



Igor Gama Pestana
Licenciado

Controlo de Vibrações em Engenharia Civil - Amortecedor de Colunas de Líquido Sintonizado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Doutor Corneliu Cismaşiu

Júri:

Presidente: Doutor Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca
Arguente: Doutor Dragos Ionut Moldovan
Vogal: Doutor Corneliu Cismaşiu

“Copyright” Igor Gama Pestana, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria antes de mais expressar os mais sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Corneliu Cismaşiu pelo apoio, profissionalismo, disponibilidade e rigor demonstrados até à concretização final deste trabalho. Muito obrigado.

Agradeço ao Prof. Mário Franca e aos auxiliares José Gaspar e Jorge Silvério pela ajuda disponibilizada durante a realização deste documento.

O meu eterno agradecimento aos meus avós Gil Pestana e Joana Pestana e aos meus pais Joaquim Pestana e Paula Gama, porque sem eles este mestrado não teria sido possível. Obrigado pelo esforço, apoio, dedicação e confiança que depositaram em mim.

Quero ainda agradecer pelo amor, amizade e apoio incondicional aos meus familiares e amigos que estiveram presentes e contribuíram direta ou indiretamente na conclusão desta dissertação e do meu mestrado. Em especial quero agradecer às seguintes pessoas: Ana Catarina, António Gama, Desmond Vilas, Elton Guerreiro, Júlio Galvão, Júlio Henrique, Sofia Dias.

Resumo

A implementação de sistemas de controlo pode melhorar o desempenho estrutural de modo a que vibrações outrora significativas sejam reduzidas para limites impostos por normas ou critérios de segurança. Entre as soluções possíveis para o efeito, encontram-se os amortecedores de colunas de líquido sintonizado ou *tuned liquid column dampers* (TLCDs). Trata-se de sistemas que permitem um amortecimento da estrutura primária através da oscilação da coluna de líquido no seu reservatório em forma de "U", e baseia-se na inércia do movimento do líquido para contrariar o movimento da estrutura. A dissipação de energia resulta da passagem do líquido através de um orifício no troço horizontal ao qual está associada uma força de amortecimento. Essa força é não linear, depende de um coeficiente associado a essa singularidade, da velocidade de oscilação do líquido e aliada à força de inércia permite o controlo estrutural.

Para um exemplo de aplicação é avaliada a eficiência de um sistema TLCD num pórtico a escala reduzida e a respetiva simulação numérica em MATLAB. O ensaio consiste num protótipo TLCD instalado no pórtico que é colocado numa mesa sísmica educacional. Nessa mesa o sistema é sujeito a diferentes ações dinâmicas e, através de um acelerómetro, são medidas as acelerações pré e pós instalação do amortecedor, comparando posteriormente os resultados com os da simulação e verificada a sua eficiência.

A estratégia de controlo consistiu na determinação dos parâmetros dinâmicos associados e conseqüente dimensionamento das características do TLCD que minimizam ao máximo as acelerações. No exemplo de aplicação, para o ensaio experimental atingem-se reduções na ordem dos 60%.

Palavras chave:

Amortecedor de colunas de líquido sintonizado; Controlo estrutural; Mesa sísmica educacional.

Abstract

The implementation of control systems can improve the structural performance of a building by reducing erstwhile striking vibrations to the limits imposed by either regulations or safety criteria. Among the different possible solutions for this propose, there is the Tuned Liquid Column Damper (TLCD). This system enables a damping in primary structure through the oscillation of a liquid in the "U" shape reservoir and is based on the inertia of the fluid stream in order to counteract structure motion. The energy dissipation results from the passage of the liquid through a hole in the horizontal section of the reservoir to which is associated a damping force. This force is not linear, it depends on a coefficient linked to that singularity, the oscillation velocity of the liquid and, combined with the inertial force, it permits structural control.

To provide a design example of this technique, it is evaluated the efficiency of a TLCD system in a steel frame building and its respective simulation in MATLAB. The experimental test consists in a TLCD prototype installed onto a reduced scale structure that is placed on an educational shaking table. On this table, the system is undergone to different dynamic actions and, with the help of an accelerometer, the accelerations are measured before and after the damper's installation, comparing afterward these results with the ones recorded in the simulation, and verified their efficiency.

The control strategy consisted in the determination of the associated dynamic parameters and the consequently dimensioning of the TLCD characteristics that minimize effectively the accelerations. In this design example, the structural response is reduced in about 60%.

Keywords:

Tuned liquid column damper; Structural control; Educational shaking table.

Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Breve enquadramento histórico	1
1.2 Motivação e objetivos	1
1.3 Organização e descrição sumária	2
2 Estado da arte	5
2.1 Sistemas de controlo estrutural	5
2.1.1 Controlo passivo	5
2.1.2 Controlo ativo	6
2.1.3 Controlo semi-ativo	7
2.1.4 Controlo híbrido	8
2.2 Amortecedores de líquido sintonizado	8
2.2.1 Amortecedor de oscilação sintonizada	9
2.2.2 Amortecedor de colunas de líquido sintonizado	11
2.2.3 Amortecedor de líquido sintonizado controlável	22
3 Exemplo de aplicação	27
3.1 Descrição do modelo experimental	30
3.1.1 Determinação da frequência própria	32
3.1.2 Determinação do amortecimento	33
3.2 Descrição do modelo numérico	35
3.3 Estudo paramétrico do sistema TLCD	39
3.3.1 Variação da relação entre frequências	40
3.3.2 Variação da relação entre massas	41

3.3.3	Variação da razão entre o comprimento do trecho horizontal e o comprimento total da coluna líquida	41
3.3.4	Variação da abertura do orifício	43
3.3.5	Conclusões	44
3.4	Dimensionamento do sistema TLCD	45
4	Análise e comparação de resultados	51
4.1	Excitação harmónica	51
4.1.1	Simulação numérica e ensaio experimental	52
4.1.2	Conclusões	52
4.2	Vibração em regime livre	54
4.2.1	Simulação numérica e ensaio experimental	54
4.2.2	Conclusões	54
4.3	Excitação sísmica	56
4.3.1	Simulação numérica e ensaio experimental	57
4.3.2	Conclusões	62
5	Considerações finais e propostas para trabalhos futuros	65
5.1	Conclusões e considerações finais	65
5.2	Propostas para trabalhos futuros	68
	Bibliografia	69
A	Construção do modelo experimental	73
B	Códigos MATLAB	77
B.1	Determinação da frequência própria	77
B.1.1	Modelo numérico sem TLCD	77
B.1.2	Modelo experimental sem TLCD	77
B.2	Estudo paramétrico	78
B.3	Simulação numérica do modelo numérico	87
B.3.1	Excitação harmónica - Dimensionamento do sistema TLCD	87
B.3.2	Vibração em regime livre	88
B.3.3	Sismo de El Centro	89
B.3.4	Sismo de Kobe	90
B.3.5	Sismo de Northridge	91
C	Ficha técnica	93

Índice de Figuras

2.1	Dimensões dos TSDs em reservatórios retangulares e circulares.	9
2.2	Força de controlo F gerada pelo TSD.	10
2.3	Torre de controlo do aeroporto de Nagasaki, no Japão [37].	11
2.4	Shin Yokohama Prince Hotel em Yokohama, no Japão.	12
2.5	Esquema de um TLCD e suas características.	13
2.6	Força de controlo (F) transmitida a um pórtico de 1GDL resultante da ação do sistema TLCD.	14
2.7	Esquema de um LCVA e suas características.	14
2.8	Desenho esquemático de um sistema DTLCD instalado numa estrutura.	15
2.9	Desenho esquemático de um sistema CTLCD.	16
2.10	Esquema de um TLCD fora da posição de equilíbrio estático devido a um deslocamento horizontal x	16
2.11	Esquema de um TLCD fora da posição de equilíbrio estático.	18
2.12	One Wall Center, no Canada.	21
2.13	Sofitel Hotel, no Japão.	22
2.14	Comcast Center, nos EUA.	23
2.15	Comportamento das partículas num fluido eletro-reológico e num magneto-reológico quando sujeitas a um fluxo F elétrico ou magnético, respetivamente.	24
2.16	Desenho esquemático de um sistema HTLCD instalado numa estrutura. Vista em planta e em corte do HTLCD.	25
3.1	Reservatório instalado no pórtico.	28
3.2	Pórtico instalado na mesa sísmica com reservatório (a) sem água e (b) com água.	29
3.3	Transformada de Fourier para o ensaio experimental: excitação harmónica do pórtico sem TLCD.	32
3.4	Resposta do pórtico na situação de vibração em regime livre sem TLCD.	33
3.5	Modelo experimental e correspondente modelo numérico.	36
3.6	Estrutura de 1GDL com um sistema TLCD instalado.	37
3.7	Coefficiente K para (a) cotovelos e (b) válvulas de correção [24].	39
3.8	Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a Ω	41
3.9	Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a μ	42
3.10	Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a α	42

3.11	Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a δ .	43
3.12	Transformada de Fourier correspondente ao ensaio experimental excitação harmónica do pórtico sem reservatório.	49
3.13	Transformada de Fourier correspondente ao ensaio experimental excitação harmónica do pórtico com reservatório e sistema TLCD com ($A_o = 0$).	49
3.14	Transformada de Fourier correspondente ao ensaio experimental excitação harmónica do pórtico com reservatório e sistema TLCD com ($A_o = A$).	50
4.1	Simulação da resposta estrutural do pórtico quando excitado em ressonância por uma aceleração de base harmónica.	52
4.2	Resposta estrutural do pórtico quando excitado em ressonância por uma aceleração de base harmónica.	53
4.3	Simulação da resposta estrutural do pórtico na situação de vibração em regime livre.	55
4.4	Resposta estrutural do pórtico na situação de vibração em regime livre.	55
4.5	Registo das acelerações em função do tempo - Sismo de El Centro.	58
4.6	Registo das acelerações em função do tempo - Sismo de Kobe.	58
4.7	Registo das acelerações em função do tempo - Sismo de Northridge.	59
4.8	Simulação da resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de El Centro.	59
4.9	Simulação da resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de Kobe.	60
4.10	Simulação da resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de Northridge.	60
4.11	Resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de El Centro.	61
4.12	Resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de Kobe.	61
4.13	Resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de Northridge.	62
A.1	(a) Pormenor da ligação da válvula ao tubo. (b) Pormenor da ligação do "cotovelo" ao tubo.	73
A.2	(a) Elementos constituintes do reservatório. (b) Reservatório a instalar no pórtico.	73
A.3	(a) Elementos constituintes do pórtico. (b) Pórtico sem reservatório.	74
A.4	(a) Pórtico sem reservatório instalado na mesa sísmica. (b) Pórtico com reservatório instalado na mesa sísmica.	74
A.5	(a) Pormenor da ligação aparafusada da base aos pilares. (b) Pormenor da ligação aparafusada do piso aos pilares.	75
A.6	(a) Mesa sísmica. (b) Pormenor da instalação do pórtico à mesa sísmica.	75

Índice de Tabelas

2.1 Exemplo de edifícios com sistema TSD instalado. Data de instalação e frequência do TSD [7, 13, 20].	12
2.2 Exemplo de edifícios com sistema TLCD instalado. Data de instalação, tipo e número de TLCDs [7].	23
3.1 Massas individuais de alguns dos constituintes do modelo experimental.	30
3.2 Intervalo e valores base dos parâmetros do sistema TLCD considerados no estudo paramétrico.	40
3.3 Variação de δ em função de A_o [24].	44
3.4 Parâmetros e características do sistema TLCD instalado no pórtico.	46
3.5 Massa do sistema TLCD e do reservatório.	47
3.6 Comparação das frequências próprias.	48

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

CTLCD *Circular Tuned Liquid Column Damper*

DTLCD *Double Tuned Liquid Column Damper*

ER-Fluid *Electro-Rheological Fluid*

EUA Estados Unidos da América

GDL Grau de Liberdade

HTLCD *Hybrid Tuned Liquid Column Damper*

LCD-PA *Liquid Column Damper - Pressure Adjustment*

LCVA *Liquid Column Vibration Absorber*

MR-Fluid *Magneto-Rheological Fluid*

PA *Pressure Adjustment*

PTLCD *Pressurized Tuned Liquid Column Damper*

RK Runge-Kutta

TLCD *Tuned Liquid Column Damper*

TLD *Tuned Liquid Damper*

TSD *Tuned Sloshing Damper*

Siglas

FCT Faculdade de Ciências e Tecnologia

UNL Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

A	área da secção transversal do sistema TLCD
A_o	área da secção do orifício do sistema TLCD
B	comprimento do troço horizontal do sistema TLCD
C	comprimento da placa de acrílico
c	coeficiente de amortecimento
c_{cr}	coeficiente de amortecimento crítico
D	diâmetro do sistema TLCD
E	Módulo de Young
e_{piso}	espessura do piso do pórtico
e_{pilar}	espessura do pilar
F	força de controlo transmitida à estrutura pelo sistema TLCD
g	aceleração gravítica
H	altura do pórtico
K	coeficiente dependente da geometria da singularidade
k	rigidez do pórtico
L	comprimento total do líquido no sistema TLCD
l	largura da placa de acrílico e do pilar
L_e	comprimento de encurvadura
L_v	comprimento do troço vertical do sistema TLCD
M	massa segundo o GDL do pórtico sem sistema TLCD
$m_{acelerómetro}$	massa do acelerómetro
m_{piso}	massa do piso do pórtico
m_{fitas}	massa das fitas
m_{pilar}	massa do pilar
$m_{reservatório}$	massa do reservatório
m_{TLCD}	massa do sistema TLCD
N_{cr}	carga crítica do pilar
N_{pilar}	esforço normal no pilar

- P_{cr} carga crítica
- R raio do reservatório do sistema TLCD
- T energia cinética
- t tempo
- V energia potencial
- w frequência angular
- w_{TLCD} frequência própria do sistema TLCD
- w_a frequência natural amortecida
- w_s frequência própria do pórtico sem sistema TLCD
- $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ deslocamento, velocidade e aceleração horizontal em função do tempo do sistema TLCD ou correspondente deslocamento, velocidade e aceleração do pórtico ao nível do GDL
- \ddot{x}_{g0} amplitude máxima da aceleração
- \bar{y} amplitude do deslocamento $y(t)$
- $y(t), \dot{y}(t), \ddot{y}(t)$ deslocamento, velocidade e aceleração em função do tempo da coluna líquida do sistema TLCD
- y_{max} deslocamento máximo da coluna do líquido no sistema TLCD
- α razão entre o comprimento do trecho horizontal e o comprimento total do líquido do sistema TLCD
- β amortecimento do pórtico sem sistema TLCD
- δ coeficiente de perda de carga hidráulica
- μ relação entre a massa do sistema TLCD e a massa da estrutura associada ao modo de vibração i do pórtico
- ρ massa volúmica
- φ ângulo de fase
- Ω relação entre a frequência do sistema TLCD e a frequência do pórtico sem TLCD

Capítulo 1

Introdução

1.1 Breve enquadramento histórico

No último século tem-se assistido ao aparecimento e desenvolvimento de um grande número de sistemas de controlo, porém as preocupações relativas a vibrações remontam aos tempos mais antigos. Há cerca de cem anos atrás foram registadas soluções passivas de controlo estrutural aplicadas por John Milne, um professor de engenharia no Japão. Este construiu uma pequena casa de madeira colocando-a sobre uma espécie de rolamentos de modo a demonstrar que uma estrutura podia ser isolada de um abalo sísmico [14]. Algumas dessas e outras técnicas, agora mais desenvolvidas, são hoje utilizadas para melhorar a resistência da estrutura aos sismos [22].

De facto, tem-se verificado vários desenvolvimentos tanto ao nível da simulação numérica e tecnologia utilizada na realização de ensaios (associados às crescentes capacidades computacionais), bem como nos mais recentes equipamentos de medição da resposta dinâmica de estruturas (por exemplo, sistemas de aquisição de dados e sensores). Foram estas evoluções que impulsionaram o desenvolvimento de modelos numéricos, tornando-os cada vez mais adequados para a análise do comportamento dinâmico de estruturas; são estes modelos que nos permitem nos dias de hoje avaliar as características dinâmicas de uma estrutura e a sua resposta. As crescentes preocupações com a segurança ao nível da engenharia de estruturas têm também impulsionado a revisão da regulamentação de segurança, nomeadamente no que se refere ao comportamento estrutural devido a ações dinâmicas, e em particular, sobre ações sísmicas. Por outro lado, estes avanços na regulamentação têm sido alcançados graças aos mais recentes desenvolvimentos na tecnologia.

1.2 Motivação e objetivos

Nas últimas décadas tem-se verificado uma tendência para a construção de edifícios cada vez mais altos (para melhor ordenamento do território) e com recurso a materiais alternativos ao betão armado, vulgarmente aço (devido à escassez dos recursos naturais associados à produção de cimento). De modo

geral, resultam estruturas mais leves, flexíveis e com baixo amortecimento para resistir às ações dinâmicas a que estão sujeitas.

Existem dois aspetos importantes a ter em conta aquando a ocorrência dessas ações em estruturas e aos quais está associada regulamentação a cumprir: o nível de conforto dos utilizadores e a integridade estrutural do edifício. As ações externas e a possibilidade do colapso dessas construções podem não só levar a elevadas perdas materiais e económicas, mas também à perda de muitas vidas humanas. Tem-se verificado de forma dramática a vulnerabilidade de muitas construções desprovidas de quaisquer características resistentes a este tipo de solicitação. Os sinistros nem sempre correspondem à ocorrência de grandes abalos sísmicos; na maior parte das vezes estão relacionados com a vulnerabilidade resultante da ausência de certas soluções construtivas ou sistemas que atenuem as vibrações [22]. Essa necessidade de controlo levou ao estudo e desenvolvimento de várias técnicas inovadoras, tais como o sistema de amortecimento de colunas de líquido sintonizado ou *Tuned Liquid Column Damper* (TLCD), o objeto de estudo nesta dissertação.

O TLCD é um sistema particular de amortecedores de líquido sintonizado ou *Tuned Liquid Dampers* (TLD), e por ser o sistema em estudo, o estado da arte será focado neste tipo de sistemas de controlo. Descrito o seu funcionamento, apresentadas as suas características e deduzidas as equações que descrevem o seu funcionamento, o objectivo desta dissertação será estudar a sua eficiência no controlo das vibrações de um pórtico a escala reduzida, sujeito a diferentes ações dinâmicas. Para esse modelo experimental, será dimensionado um sistema TLCD e analisada a sua contribuição na redução da resposta estrutural através de uma simulação numérica e ensaios experimentais numa mesa sísmica educacional. De acordo com a literatura consultada [15, 25], se este sistema for devidamente dimensionado, a resposta à solicitação pode atingir reduções superiores a 50% em estruturas com frequências baixas e quando excitadas em ressonância.

1.3 Organização e descrição sumária

Os cinco capítulos constituintes da dissertação podem ser enquadrados em duas secções: a primeira diz respeito ao estado da arte associado aos sistemas de líquido sintonizado e a segunda relativa a um exemplo de aplicação que consiste no controlo da resposta estrutural de um pórtico a escala reduzida com um sistema TLCD.

No segundo capítulo expõem-se os amortecedores de líquido sintonizado. São apresentados os diferentes sistemas, feita uma descrição da suas características e funcionamento e apresentados exemplos da sua aplicação reais em estruturas. Relativamente aos TLCDs, por se tratarem do objeto de estudo, adicionalmente são deduzidas as equações que descrevem o seu funcionamento e apresentados os parâmetros associados ao seu dimensionamento.

Já o terceiro capítulo é dedicado à modelação numérica e ensaio experimental

de um pórtico com o sistema de controlo TLCD. São apresentadas as equações associadas ao funcionamento de um modelo numérico de 1GDL com um sistema TLCD instalado e indicado o processo matemático a utilizar no programa de cálculo MATLAB para a resolução do sistema de equações. É descrito o processo de dimensionamento e construção do sistema TLCD, a sua instalação no pórtico e o ensaio na mesa sísmica. Antes do dimensionamento realiza-se ainda um estudo paramétrico com o intuito de adquirir uma certa sensibilidade em relação à influência dos parâmetros do sistema TLCD na resposta estrutural.

Quanto ao capítulo quatro, são apresentados os resultados experimentais e numéricos da ação do TLCD num pórtico de um piso. Através de uma análise aos valores obtidos do ensaio, é estudada a eficiência do sistema de controlo na redução das acelerações do pórtico para as diferentes ações impostas e, também, verificado se o seu dimensionamento foi bem executado. Faz-se ainda uma comparação dos valores experimentais com os numéricos, a fim de verificar se as equações que definem o problema descrevem corretamente a situação real.

No quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho no que diz respeito ao dimensionamento e aplicação prática de TLCDs com base, principalmente, no estudo prático elaborado no capítulo anterior. Por fim, são apresentadas algumas sugestões e considerações a ter em conta em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Sistemas de controlo estrutural

Durante um evento catastrófico, o risco de ocorrência de danos graves em estruturas pode ser reduzido se forem adotadas de sistemas que permitam a dissipação da energia que lhes é transmitida. Esse evento pode corresponder a um sismo ou ventos fortes, sendo sobre esses dois tipos de ações e a respetiva resposta das estruturas que tem havido especial atenção por parte de vários investigadores nas últimas décadas [14].

O nível de segurança e resistência das construções a esse tipo de ações dinâmicas vai estar diretamente relacionado com o tipo de controlo que possui e sua capacidade de dissipar a energia que lhe é induzida. Acontecimentos mais graves, como a perda de vidas humanas, podem ser evitados a partir de técnicas que permitam uma maior atenuação da resposta, como por exemplo, a modificação da rigidez, massa, amortecimento ou *design* e ainda através da instalação de sistemas de controlo passivos e/ou ativos. Mantendo as propriedades dinâmicas desejáveis da estrutura, estes sistemas constituem soluções bastante promissoras no aumento da resistência da construção. Destacam-se entre eles os sistemas de controlo: passivos, ativos, semi-ativos e híbridos [22]. É no controlo passivo que se enquadram os amortecedores de líquido sintonizado, e por essa razão, no estado da arte, serão apresentados em pormenor este tipo de soluções.

2.1.1 Controlo passivo

Sistemas de amortecimento passivo têm já um comportamento bem conhecido e por essa razão a sua aplicação é bem aceite pelos engenheiros civis. Contudo, são incapazes de se adaptar às mudanças estruturais e às diferentes condições de cargas dinâmicas que possam surgir. Por esta e outras razões, é que se têm estudado o aperfeiçoamento do passivo na resposta às oscilações impostas através, por exemplo, de soluções híbridas e semi-ativas.

A dissipação consiste na utilização de materiais e dispositivos que permitem melhorar o amortecimento, rigidez e, conseqüentemente, a resistência estrutural.

Podem ser usados como controlo de ações sísmicas e do vento, não só em estruturas a serem construídas, como também na reabilitação das existentes. Esse controlo passivo não necessita de fonte de energia externa. Destaca-se pela sua capacidade de lidar com solicitações que impliquem grandes amplitudes de oscilação e elevada necessidade de dissipação de energia. Apesar de possuir menos eficiência que os sistemas ativos ou semi-ativos, nomeadamente em casos onde é necessária uma maior adaptabilidade de controlo, a sua fiabilidade e baixo custo de instalação e manutenção tornaram este tipo de soluções as mais aplicadas no ramo da engenharia sísmica. Por outro lado, só em casos onde são necessários mecanismos de controlo mais sofisticados é que não se deve eleger o controlo passivo. Assim, os vários métodos passivos que permitem uma melhor resposta dinâmica da estrutura são [15, 22]:

- *Design aerodinâmico* - Melhoramento das propriedades aerodinâmicas da estrutura;
- *Design estrutural* - Por exemplo, aumento da massa e rigidez¹;
- *Dispositivos auxiliares de amortecimento* - Isoladores da base, dissipadores e absorvedores. Os últimos consistem na implementação de sistemas de massa na estrutura, sendo nestas soluções que se encontram os amortecedores de líquido sintonizado e que serão descritos seguidamente.

2.1.2 Controlo ativo

Os sistemas de controlo ativo são bastante mais complexos que os passivos [22]. Este tipo de controlo é realizado através de atuadores alimentados por uma fonte de energia externa que aplicam forças na estrutura a fim de introduzir ou retirar energia ao sistema. O cálculo das forças adequadas à solicitação é feito a partir de um computador central que recebe a informação de sensores instalados na estrutura que medem a resposta dinâmica. Isto é, o sistema ativo atua com base em medições da resposta estrutural, sendo os sinais tratados por intermédio de algoritmos computacionais que emitem um sinal ao atuador.

São este tipo de sistemas que geralmente permitem alcançar os melhores níveis de eficácia. Isto deve-se à capacidade que têm de aplicar na estrutura apenas as forças necessárias para dar resposta a determinada solicitação. O seu uso tem especial interesse em estruturas flexíveis e que possuem vários modos de vibração significativos [22]. Essa adaptabilidade permite uma resposta sintonizada ao sistema estrutural quando este é solicitado por determinada ação, sendo esta a principal vantagem que possuem em relação aos sistemas passivos. No entanto, a elevada quantidade de energia indispensável ao funcionamento dos atuadores exige um dimensionamento adequado do sistema de alimentação pois, por exemplo, na eventualidade de ocorrer um abalo mais gravoso, podem haver falhas gerais de energia, o que torna inativo o sistema de controlo. Para além desta

¹A resposta da estrutura ao vento é relativamente sensível à sua massa e rigidez. As acelerações causadas por essa ação dinâmica podem ser assim reduzidas através do aumento desses parâmetros [19].

desvantagem de puderem deixar de funcionar em certas circunstâncias, existem ainda outros inconvenientes: o seu elevado custo direto e de manutenção, e a dificuldade que possuem, por vezes, em aplicar forças numa determinada gama de frequências e amplitude em situações onde o sistema de controlo é essencial para garantir o Estado Limite Último.

Para além das limitações já mencionadas, referem-se ainda: possíveis erros de modelação - a limitação dos graus de liberdade na modelação da estrutura constituem uma fonte de erro, podendo o algoritmo de controlo baseado no modelo não ser o mais eficiente à resposta estrutural; tempo de resposta - existe um intervalo de tempo entre a deteção da solicitação e a aplicação das forças de controlo, o resultado pode ser um controlo ineficaz e provocar instabilidade; sensores e controladores limitados - não é possível instalar sensores em todos os locais da estrutura de modo a obter todas as suas respostas à ação dinâmica, sendo de especial interesse a sua otimização; incertezas nos parâmetros da estrutura - por exemplo, incertezas relativas à sua resistência e degradação ao longo do tempo podem afetar a eficácia; fiabilidade - devido a problemas relativos à sua ativação, manutenção e disponibilidade de energia no momento da ação externa, pode não transmitir muita confiança aos seus ocupantes; relação custo-eficiência - considerada a principal razão de implementação ou não desta solução.

Por exemplo, nos EUA, à exceção de uma ponte situada em Oklahoma, não existe qualquer aplicação de sistemas ativos nas estruturas em todo o território. No entanto, esta situação pode ser explicada pelo tipo de engenharia praticada neste e em muitos outros países. A sua conservabilidade, redundância e ausência de consentimento nos procedimentos de análise são impedimentos para que sejam aplicados. Situação inversa ocorre no Japão, onde existe um grande investimento no desenvolvimento e implementação destes e novos mecanismos de controlo estrutural [32].

Como alternativa, e mantendo os padrões de eficácia, procura-se uma solução de controlo semi-ativo ou híbrido que alie essa eficácia à fiabilidade dos sistemas passivos.

2.1.3 Controlo semi-ativo

Verifica-se uma diferente tendência no que respeita à aceitação de estratégias de controlo semi-ativo. Estes são sistemas promissores pois têm a fiabilidade dos dispositivos passivos, a versatilidade dos ativos e não exigem grandes quantidades de energia, podendo funcionar com uma simples bateria [32]. O foco das recentes investigações passou então para os sistemas semi-ativos. Ao não utilizarem energia mecânica, manipulam as propriedades de amortecimento do sistema de um modo ideal para reduzir a resposta estrutural a uma determinada excitação induzida na estrutura.

Para se ter uma ordem de grandeza, na atualidade existem dispositivos que permitem aplicar uma força de cem toneladas com a potência elétrica de uma

lâmpada de candeeiro. O valor baixo de energia fornecida está relacionado pela não introdução de energia mecânica no sistema, garantindo que se mantenha operacional mesmo para eventos extremos que poderiam tornar inoperáveis os dispositivos ativos. Logo, e ainda pelo facto de estudos preliminares indicarem que estes sistemas semi-ativos podem alcançar os níveis de desempenho dos sistemas ativos [22], tornam-se soluções muito apelativas para o controlo de vibrações em engenharia civil.

2.1.4 Controlo híbrido

As estratégias de controlo híbrido têm sido objeto de muita investigação na procura de um maior potencial para aumentar a fiabilidade e eficiência do controlo estrutural. São soluções que combinam os diferentes sistemas de controlo, tradicionalmente ativos e passivos, procurando tirar partido das vantagens associadas a cada um deles quando operam separadamente e suprimir as suas limitações e restrições. Os níveis de eficácia podem superar os sistemas ativos mas a sua análise é mais complexa. É também a fim de superar a solução semi-ativa, que entre outras, apresenta uma incapacidade para responder a cargas aplicadas repentinamente, que tem havido especial interesse no estudo e desenvolvimento deste tipo de sistemas.

2.2 Amortecedores de líquido sintonizado

Quando sujeitas a ações dinâmicas, várias são as soluções que permitem aumentar a performance das estruturas, tanto a nível dos seus critérios de segurança como de conforto. Geralmente, a opção mais económica e de fácil implementação diz respeito a um sistema passivo, tais como os amortecedores de líquido sintonizado (TLDs). Os TLDs são soluções passivas de absorção de energia e têm vindo a ser sugeridas no controlo de diferentes condições de carregamento dinâmico. O seu baixo custo, a fácil sintonização e as baixas exigências de manutenção, compõem um conjunto de vantagens que tornam esta solução tão apelativa no controlo de vibrações em engenharia civil.

Constituem soluções relativamente pouco eficientes na atenuação da resposta dinâmica de estruturas sujeitas a ações sísmicas, porém são particularmente interessantes no controlo de vibrações harmónicas causadas pelo vento em estruturas flexíveis, vulneráveis a fenómenos de ressonância e para frequências inferiores a 1Hz [22].

Dentro deste tipo de solução têm-se os seguintes sistemas [3, 16, 31]:

- Amortecedor de oscilação sintonizada ou *tuned sloshing damper* (TSD):
 - Amortecedor de oscilação sintonizada raso (TSD shallow);
 - Amortecedor de oscilação sintonizada profundo (TSD deep).
- Amortecedor de colunas de líquido sintonizado ou *tuned liquid column damper* (TLCD):

- Amortecedor de líquido absorvedor de vibrações ou *tuned liquid vibration absorber* (LCVA);
 - Amortecedor de colunas de líquido sintonizado duplo ou *double tuned liquid column damper* (DTLCD);
 - Amortecedor de colunas de líquido sintonizado circular ou *circular tuned liquid column damper* (CTLCD);
 - Amortecedor de colunas de líquido sintonizado híbrido ou *hybrid tuned liquid column damper* (HTLCD);
 - Amortecedor de colunas de líquido sintonizado pressurizado ou *pressurized tuned liquid column damper* (PTLCD).
- Amortecedor de líquido sintonizado controlável.

Cada uma destas soluções será apresentada em pormenor seguidamente.

2.2.1 Amortecedor de oscilação sintonizada

Os sistemas TSDs consistem em reservatórios, geralmente, retangulares ou circulares com água no seu interior à pressão atmosférica e instalados no piso mais elevado do edifício, onde ocorrem os maiores deslocamentos. Como referido anteriormente, podem ser classificados como rasos ou profundos, em função da altura de água (h): se essa altura for inferior a 0,15 do maior comprimento L (ou diâmetro D , se for circular) é classificado como raso, caso contrário é profundo (Figura 2.1) [3]. A sua escolha vai depender do tipo de excitação que se pretende controlar. De um modo geral, para vibrações de maior escala, a sua análise torna-se mais complicada devido ao comportamento não linear da onda de superfície [15]. Não é assim uma solução muito prática para controlar ações dinâmicas violentas (como um sismo) pelo que se torna uma escolha não muito frequente.

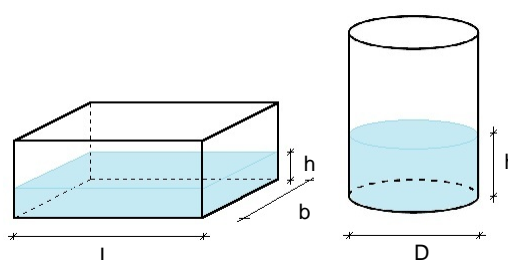


Figura 2.1: Dimensões dos TSDs em reservatórios retangulares e circulares.

Dimensionados para uma frequência igual ou próxima à frequência da estrutura que se pretende controlar, o seu funcionamento consiste numa compensação de fase no movimento estrutural através do efeito do líquido que se encontra dentro do reservatório. É a oscilação da superfície livre do líquido no(s) reservatório(s) instalado(s), aquando ocorre a ação externa, que dissipa parte da energia dinâmica transmitida à estrutura, controlando assim as vibrações; o movimento do

líquido, que se encontra desfasado com o movimento da estrutura, gera as forças que alteram as suas características dinâmicas. A situação ideal corresponde assim ao caso em que a oscilação do líquido possui a mesma frequência que o modo de vibração da estrutura que se pretende controlar, ou seja, ao caso onde entrem em ressonância para a mesma frequência excitadora. Em situações particulares, é possível ajustar essa frequência combinando este sistema com um mecanismo de controlo ativo (ver secção 2.2.3).

A força de controlo gerada e transmitida à estrutura durante a oscilação é calculada a cada momento em função da diferença de pressão hidráulica nas paredes transversais do reservatório e tem o sentido da face com maior altura de líquido (Figura 2.2) [31]. A sua determinação feita pela seguinte expressão:

$$F = \frac{1}{2} \rho g b (h_d^2 - h_e^2) \quad (2.1)$$

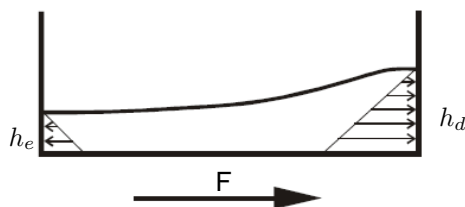


Figura 2.2: Força de controlo F gerada pelo TSD.

Na Equação (2.1), ρ é a massa volúmica do líquido, g a aceleração da gravidade, b a largura do reservatório medida perpendicular à direção do seu funcionamento (Figura 2.1), h_d a altura do líquido na parede direita do reservatório e h_e a altura do líquido na parede esquerda do reservatório.

As razões para o crescente interesse neste tipo de sistemas estão relacionadas com as suas vantagens em relação aos outros mecanismos de amortecimento, tais como: baixos custos de implementação e manutenção; facilidade de instalação em estruturas novas ou já existentes; possibilidade do controlo de vários modos de vibração; uso temporário; sem restrições a vibrações unidirecionais; a frequência do TSD pode ser controlada a partir da profundidade do líquido e das dimensões do reservatório; e a água dentro do reservatório pode ser usada, por exemplo, para abastecimento ou combater incêndios em caso de emergência. Os principais contras têm a ver com o peso adicional de toda a massa de água e do reservatório instalado na estrutura.

A primeira utilização deste tipo de sistemas foi na torre de controlo do aeroporto de Nagasaki, no Japão, em 1987 [3]. Na torre de 42 metros de altura foram instalados 25 TSDs cilíndricos, 12 ao nível do chão da sala de controlo de tráfego aéreo e os restantes 13 no patamar das escadas (Figura 2.3 (a)). Possuem 50 cm de altura, 38 cm de diâmetro e divisórias horizontais de 7,7 cm nas quais se encontra água com uma altura de 4,8 cm (Figura 2.3 (b)). Com um peso individual

de 38 kg perfazem uma solução com 950 kg [15]. Dimensionados para uma frequência de oscilação da água de 1,07 Hz [37], próxima da frequência própria da estrutura, verificou-se, através de medições posteriores à sua instalação, reduções da amplitude de vibração na ordem dos 35% para ventos de 20 m/s [15].

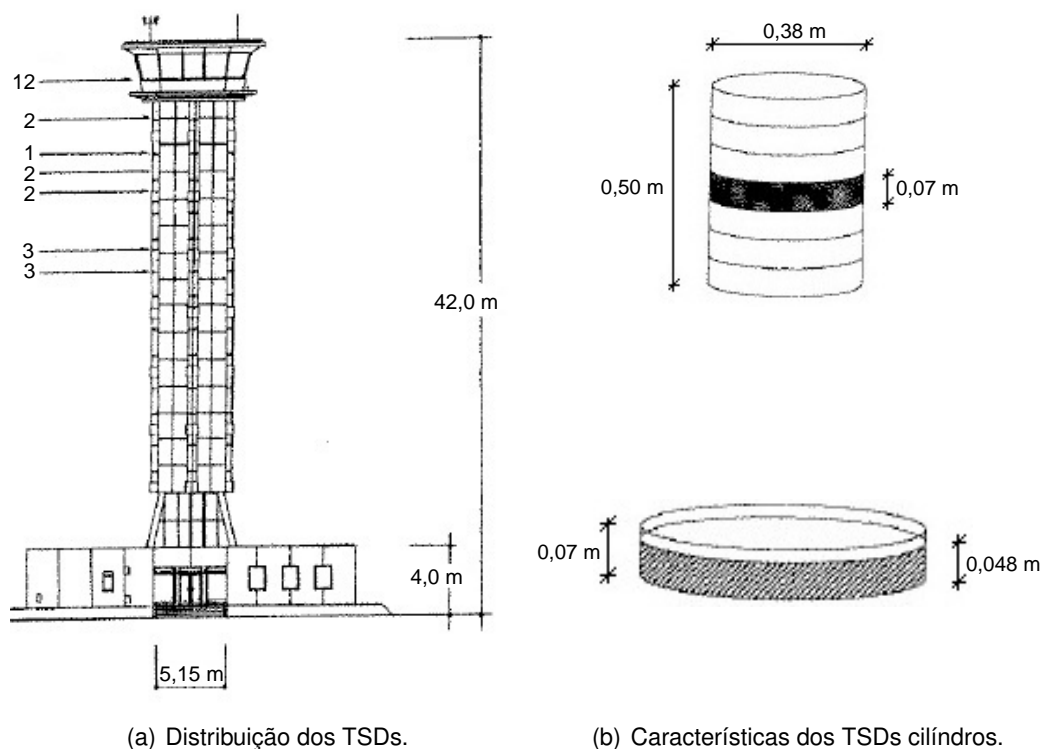


Figura 2.3: Torre de controlo do aeroporto de Nagasaki, no Japão [37].

Outro edifício onde pode ser encontrado este tipo de solução é no Shin Yokohama Prince Hotel em Yokohama, no Japão, com 42 pisos, 149 metros de altura e uma frequência de 0,31Hz (Figura 2.4 (a)) [22]. Nesta situação particular foram instalados 9 TSDs cilíndricos com 2 metros de diâmetro no topo do edifício (Figura 2.4 (b)). Estudos realizados pós-instalação demonstraram uma redução das acelerações entre 30 e 50% para ventos superiores a 20m/s [15].

A versatilidade deste tipo de solução permite, inclusive, a sua aplicação em pontes. Como exemplo tem-se a ponte Ikuchi e Bai Chay, no Japão [3]. Outros exemplos são apresentados na Tabela 2.1.

2.2.2 Amortecedor de colunas de líquido sintonizado

Os amortecedores de líquido sintonizado são propostos nos anos oitenta mas é em 1989 que Sakai propõe um novo tipo de amortecedor, os designados amortecedores de colunas de líquido sintonizado (TLCDs) [39, 41].



(a) Vista geral.



(b) TSDs instalados.

Figura 2.4: Shin Yokohama Prince Hotel em Yokohama, no Japão.

Tabela 2.1: Exemplo de edifícios com sistema TSD instalado. Data de instalação e frequência do TSD [7, 13, 20].

Edifício e sua localização	Data da instalação do TSD	Frequência do TSD (Hz)
Torre Yokohama Marine - Japão, Yokohama	1987	0,55
Torre Gold - Japão, Kagawa	1988	0,42
Edifício TYG - Japão, Atsugi	1992	0,53
Torre do aeroporto de Narita - Japão, Narita	1993	1,30
Torre do aeroporto de Haneda - Japão, Tóquio	1993	0,77
50 East Chestnut - Chicago, EUA	2007	-
One Rincon Hill Tower - San Francisco, EUA	2008	-
Elysian Hotel - Chicago, EUA	2010	-

Características do sistema

O sistema trata-se de um reservatório rígido em forma de "U", de secção transversal constante, com líquido no seu interior, à pressão atmosférica, que preenche o troço horizontal e parte dos troços verticais, constituindo a coluna líquida. O amortecimento que é conferido à estrutura será função das características físicas do reservatório, propriedades do líquido e área do orifício na secção transversal.

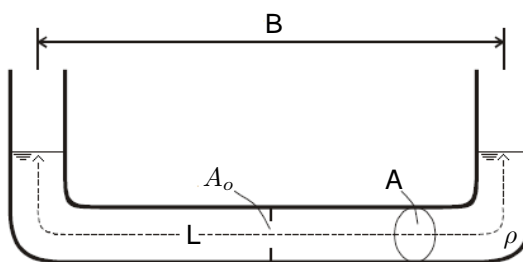


Figura 2.5: Esquema de um TLCD e suas características.

As suas propriedades são representadas na Figura 2.5, onde ρ é a massa volúmica do líquido, L o comprimento total de líquido, B o comprimento do troço horizontal de líquido e A e A_o correspondem à área da secção transversal da coluna líquida e do orifício, respetivamente.

Descrição do sistema

Um TLCD é um tipo de sistema passivo utilizado para controlar as vibrações em estruturas flexíveis. Em comparação ao aperfeiçoamento da resposta dinâmica através do aumento de resistência, rigidez ou isolamento base, demonstram ser uma solução bastante apelativa em termos económicos e de simplicidade de instalação. Ainda, no caso da sua implementação em edifícios altos, possuem a vantagem da água do reservatório ter função de abastecimento ou servir para combater incêndios em caso de emergência.

Com vantagens não só relativamente a outras soluções, os TLCD excedem algumas das capacidades de outros sistemas de controlo absorsores, por exemplo: o reservatório pode ter qualquer geometria, e ser ajustado a uma estrutura já existente; ao contrário do TSD, que para vibrações de maior escala o movimento superficial do líquido na superfície possui comportamento não-linear (sendo difícil o seu estudo, apesar de poder ser uma vantagem), este é um mecanismo com um comportamento bem compreendido para os vários níveis de oscilações; o amortecimento pode ser controlado através da abertura do orifício; e a frequência natural, como depende apenas do comprimento da coluna de líquido, pode ser controlada através de um dispositivo que altere o volume de líquido que constitui a coluna líquida.

Relativamente às suas desvantagens, a principal é que se trata de um sistema de amortecimento unidirecional, portanto o uso desta solução é restringida a estruturas com oscilações predominantes numa direção.

O seu funcionamento consiste na oscilação da massa líquida no reservatório, sendo fundamental que a frequência desse movimento esteja sintonizada com a frequência natural da estrutura, correspondente ao modo de vibração que se pretenda controlar [6, 7]. Essa oscilação tem uma frequência simetricamente desfasada à da estrutura, na qual se desenvolvem forças que são contrárias ao sentido do deslocamento estrutural e, através destas, reduz-se a sua resposta dinâmica (Figura 2.6). A esse movimento esta associada uma força de inércia, produzida pelo movimento do líquido, e uma força de amortecimento, gerada através da dissipação turbulenta da energia cinética do líquido na sua passagem pela secção do orifício. É a força de restituição, correspondente à massa deslocada, que faz o líquido voltar à sua posição de equilíbrio estático, sendo nesse movimento que se geram de essas forças de controlo.

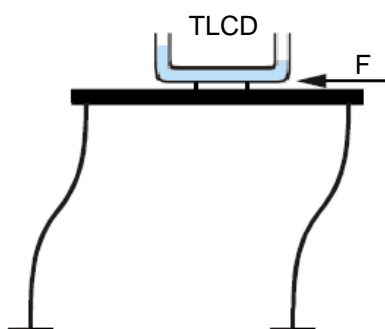


Figura 2.6: Força de controlo (F) transmitida a um pórtico de 1GDL resultante da ação do sistema TLCD.

Estudos do seu desempenho levaram também ao aparecimento de novas versões de TLCDs, por exemplo, não com a forma tradicional em "U" mas sim em "V" ou com colunas de secção variável; bidirecional, com um mecanismo de permite o seu ajuste de período; e, ainda, a fim de resolver a limitação que possuem em serem apenas eficazes para uma determinada excitação, foram propostos os amortecedores de líquido controláveis ativos e semi-ativos (ver a secção 2.2.3).

Dentro deste tipo de soluções passivas existe o já referido amortecedor de líquido absorvedor de vibrações (LCVA) [3, 6], que se trata de uma variante recente do TLCD.

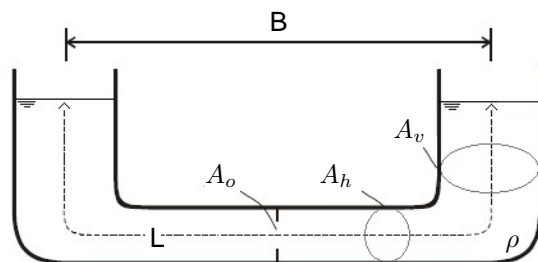


Figura 2.7: Esquema de um LCVA e suas características.

Como se pode observar na Figura 2.7, a principal diferença entre os dois é a secção não uniforme transversal do LCVA, onde A_h e A_v são a área da secção horizontal e vertical do sistema, respetivamente. A vantagem em relação ao TLCD tem a ver com o facto de poder ter diferentes dimensões ortogonais, o que permite, deste modo, existir um maior número de frequências naturais possíveis e ser mais fácil o seu ajuste.

Surgem também outras soluções com o objectivo de suprimir a limitação do seu controlo unidireccional. Como exemplo têm-se os DTLCDs e os HTLCDs (os últimos são sistemas com mecanismos ativos e por isso descritos na secção 2.2.3) [31, 3]. O DTLCD consiste em usar dois TLCDs, um em cada direcção ortogonal. Usados em situações onde a estrutura é solicitada por ações externas condicionantes em duas direcções, este sistema permite controlar a resposta estrutural segundo esses 2GDL (Figura 2.8) e, sendo o dimensionamento individual do TLCD independente um do outro, podem ser sintonizados para diferentes frequências.

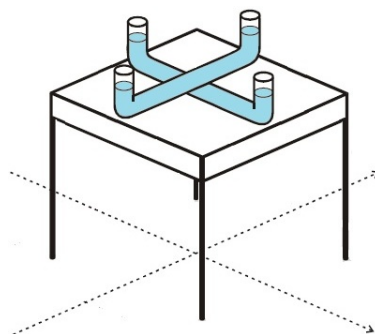


Figura 2.8: Desenho esquemático de um sistema DTLCD instalado numa estrutura.

Nos casos onde a torsão estrutural devido a determinada solicitação externa não pode ser negligenciada, é necessário dotar o elemento construtivo com uma solução que suprima esse efeito. É a fim de resolver este tipo de vibração torcional que surgem, ainda na gama dos amortecedores de líquido sintonizado, os referidos CTLCD [16]. Trata-se de um reservatório circular, com duas colunas verticais, um orifício no troço horizontal e líquido no seu interior à pressão atmosférica. Com funcionamento semelhante ao sistema TLCD, é a força de inércia aliada à força de amortecimento gerada na secção do orifício que permitem controlar a torsão estrutural.

Na Figura 2.9 é representado um sistema deste tipo, em que ρ representa a massa volúmica do líquido, y e h são o deslocamento e altura da coluna líquida, respetivamente, R o raio do reservatório circular, A a área da secção transversal e A_o a área da secção transversal do orifício no troço horizontal.

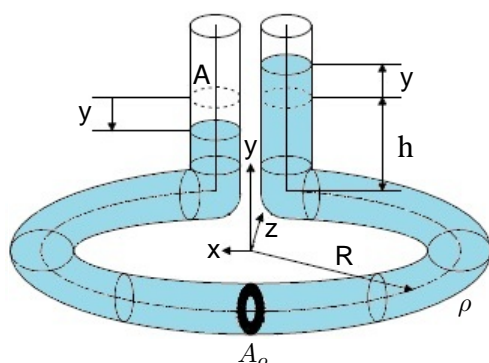


Figura 2.9: Desenho esquemático de um sistema CTLCD.

Equação do movimento da coluna líquida

Considere-se um sistema TLCD em que, devido a determinada solitação, ocorre um deslocamento y da coluna líquida. Considerando x o seu deslocamento horizontal e L_v o comprimento do trecho vertical, a posição do líquido no reservatório é a representada na seguinte figura:

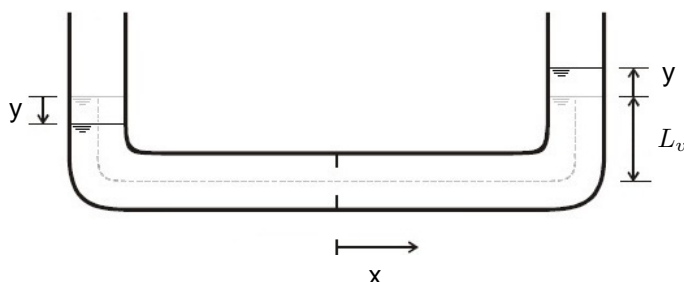


Figura 2.10: Esquema de um TLCD fora da posição de equilíbrio estático devido a um deslocamento horizontal x .

Assumindo que a área da secção transversal do TLCD é muito inferior ao comprimento do seu trecho horizontal, que o líquido é incompressível e considerando desprezáveis as suas oscilações na superfície, a equação do movimento pode ser determinada através das equações de Lagrange na direção do deslocamento y [39, 41, 42]. Assim, baseada em princípios de energia, a sua dedução será feita a partir dessas equações, onde t é o tempo, T a energia cinética, V a energia potencial e Q_y as forças não conservativas na direção y :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} = Q_y \quad (2.2)$$

Representando a velocidade horizontal e vertical do líquido por \dot{x} e \dot{y} , respetivamente, e sendo g a aceleração da gravidade, a energia cinética do sistema TLCD associada a esse movimento pode ser expressa por:

$$\begin{aligned}
T &= T_{\text{TLCD}} = T_{\text{troço vertical esquerdo}} + T_{\text{troço horizontal}} + T_{\text{troço vertical direito}} = \\
&= \frac{1}{2}\rho A(L_v - y)(\dot{y}^2 + \dot{x}^2) + \frac{1}{2}\rho AB(\dot{y} + \dot{x})^2 + \frac{1}{2}\rho A(L_v + y)(\dot{y}^2 + \dot{x}^2) \quad (2.3)
\end{aligned}$$

E a energia potencial² nessa posição é:

$$\begin{aligned}
V &= V_{\text{TLCD}} = V_{\text{troço vertical esquerdo}} + V_{\text{troço horizontal}} + V_{\text{troço vertical direito}} = \\
&= \rho Ag(L_v - y)\frac{(L_v - y)}{2} + 0 + \rho Ag(L_v + y)\frac{(L_v + y)}{2} = \\
&= \frac{1}{2}\rho Ag(L_v - y)^2 + \frac{1}{2}\rho Ag(L_v + y)^2 \quad (2.4)
\end{aligned}$$

Relativamente à parcela Q_y , tem-se a força externa, não conservativa, gerada na passagem do líquido pelo orifício. Essa força de amortecimento, Equação (2.5), resulta da dissipação turbulenta da energia cinética nessa secção, é não-linear (devido ao termo quadrático da velocidade) e depende de um coeficiente de perda hidráulica δ , função da abertura do orifício (A_o) [38, 42]. O valor de δ pode ser consultado, por exemplo, em [24]. A determinação dessa força é feita pela expressão [39, 41]:

$$Q_y = -\frac{1}{2}\rho A\delta |\dot{y}| \dot{y} \quad (2.5)$$

Resolvendo as derivadas e substituindo Q_y na equação Lagrangeana (2.2), resulta a equação do movimento do líquido num sistema TLCD:

$$\rho AL\ddot{y} + \frac{1}{2}\rho A\delta |\dot{y}| \dot{y} + 2\rho Agy = -\rho AB\ddot{x} \quad (2.6)$$

,onde \ddot{x} e \ddot{y} representam a aceleração horizontal e vertical da coluna líquida, respetivamente.

Ainda, para que seja válida, é necessário garantir que o troço horizontal esteja totalmente preenchido com líquido, ou seja, que a superfície livre do líquido permaneça nos troços verticais (condição necessária para o correto funcionamento do sistema de controlo) [31]:

²Na determinação da sua expressão, considera-se que o eixo do líquido no troço horizontal corresponde à energia potencial igual a zero.

$$y_{max} \leq \frac{L - B}{2} \quad (2.7)$$

Frequência natural de oscilação da coluna líquida

Considere-se novamente um sistema TLCD que é retirado da sua posição de equilíbrio estático. Considerando desprezáveis as forças geradas nas paredes do reservatório devidas à viscosidade do líquido (contrárias ao sentido do escoamento) e uma área do orifício igual à área da secção transversal, este oscila livremente em torno dessa posição e a equação geral do movimento vai ser a de um oscilador de 1GDL em vibração livre não amortecida.

Neste caso, a força de restituição que faz o sistema voltar à posição de equilíbrio é a força de inércia (F_i) correspondente à coluna de líquido deslocado e contrária ao sentido do deslocamento do líquido (Figura 2.11). Tem-se assim, para um determinado deslocamento y :

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m_{TLCD} \ddot{y} \quad \Leftrightarrow \quad -F_i = m_{TLCD} \ddot{y} \quad \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \quad (\rho AL) \ddot{y} + (2\rho Ag)y = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

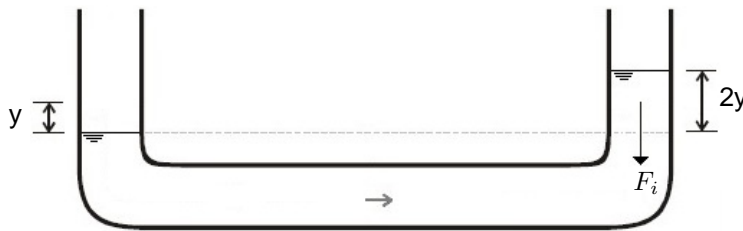


Figura 2.11: Esquema de um TLCD fora da posição de equilíbrio estático.

A Equação (2.8) é uma equação diferencial de 2ª ordem de coeficientes constantes cuja solução é do tipo:

$$y(t) = \bar{y} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (2.9)$$

Onde a frequência angular ω corresponde a ω_{TLCD} , \bar{y} representa a amplitude da oscilação e φ é o ângulo de fase e representa o defasamento do movimento oscilatório.

Substituindo a função genérica $y(t)$ e a sua segunda derivada na Equação (2.8), resulta:

$$(2\rho Ag - \rho AL\omega_{TLCD}^2) \cdot \bar{y} \cdot \text{sen}(\omega_{TLCD}t - \varphi) = 0 \quad (2.10)$$

E a frequência obtém-se pela solução não trivial desta equação, ou seja:

$$2\rho Ag - \rho AL\omega_{TLCD}^2 = 0 \quad \rightarrow \quad \omega_{TLCD} = \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (2.11)$$

É assim determinada a expressão da frequência natural do sistema TLCD e, como se pode observar, depende apenas do comprimento total de líquido no reservatório.

Parâmetros e dimensionamento

Para sintonizar de forma ótima o TLCD, é necessário definir convenientemente a sua frequência natural e amortecimento. O seu ajuste e sintonização são realizados em duas etapas: a primeira esta relacionada com a sua modelação em computador, onde o modelo é sintonizado com o modo de vibração selecionado do sistema estrutural; definidos os parâmetros e características do sistema para o modo respetivo, dá-se início à segunda etapa que consiste em trabalhos assertivos e ajustes finais *in-situ* [25].

É fundamental que a frequência do movimento do líquido no reservatório seja sintonizada com a frequência natural da estrutura e ainda que a taxa de amortecimento do seu movimento seja ajustada a um valor ideal, para que o controlo seja o mais eficaz possível. No entanto, o amortecimento conferido pelo movimento do líquido vai depender da solicitação externa e por essa razão a sintonização do TLCD só pode ser definida *a priori* no caso onde se conhece (ou se possa estimar) previamente as características dessa solicitação [6].

O dimensionamento do sistema TLCD depende então do tipo de carregamento, comportamento estrutural e níveis de redução que se pretendam atingir. Definidos esses valores, pretende-se então, além da escolha do líquido, determinar as suas dimensões: L , B , A e A_o (consultar Figura 2.5).

Para o processo de dimensionamento considere-se então os seguintes parâmetros [31]:

- Relação entre a frequência do amortecedor (ω_{TLCD}) e a frequência da estrutura (ω_s):

$$\Omega = \frac{\omega_{TLCD}}{\omega_s} \quad (2.12)$$

- Relação entre a massa do amortecedor (m_{TLCD}) (ou correspondente massa total de líquido) e a massa da estrutura associada ao modo de vibração i (m_i):

$$\mu = \frac{m_{TLCD}}{m_i} \quad (2.13)$$

- Relação entre o comprimento do troço horizontal do líquido (B) e o comprimento total do líquido (L):

$$\alpha = \frac{B}{L} \quad (2.14)$$

- Relação entre a abertura do orifício (A_o) e a área total da secção (A):

$$\delta = f(A_o) \quad (2.15)$$

A frequência ω_s da estrutura é conhecida e corresponde ao modo de vibração que domina a resposta estrutural e para a qual se pretende sintonizar o amortecedor. Definindo o parâmetro Ω , que deverá ter valor próximo de um, determina-se a frequência do amortecedor ω_{TLCD} :

$$\omega_{TLCD} = \Omega \cdot \omega_s \quad (2.16)$$

Conhecida a frequência do TLCD será, em função desta, determinado o comprimento total de líquido no reservatório:

$$\omega_{TLCD} = \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad \rightarrow \quad L = \frac{2g}{\omega_{TLCD}^2} \quad (2.17)$$

O próximo passo consiste em definir μ e respectiva m_{TLCD} (Equação (2.18)). Esta corresponde apenas à massa de líquido, ou seja, não inclui a massa do reservatório. Por norma, a massa associada ao sistema de controlo tem que ser a mais reduzida possível devido ao incremento de carga à estrutura. O seu valor não deverá ser muito elevado também devido a razões económicas e dada a limitação de espaço físico para a sua instalação.

$$m_{TLCD} = \mu \cdot m_i \quad (2.18)$$

Para o valor de m_i determinado e após escolhida a densidade do líquido a usar no sistema, determina-se a respetiva área da secção transversal da coluna líquida:

$$m_{TLCD} = \rho AL \quad \rightarrow \quad A = \frac{m_{TLCD}}{\rho L} \quad (2.19)$$

Seguidamente dimensiona-se o comprimento do troço horizontal (B). Como este parâmetro tem participação direta no amortecimento (como de poderá concluir na secção 3.3), toma-se o valor de α o maior possível (note-se que o comprimento L não pode ser aumentado pois implica a alteração da frequência para o qual o sistema TLCD esta sintonizado (Equação (2.11)):

$$B = \alpha \cdot L \quad (2.20)$$

Por fim, define-se o coeficiente de perda hidráulica (δ). Este é, como referido anteriormente, função da abertura do orifício, ou seja, função de A_o e os seus valores encontram-se, por exemplo, em [24].

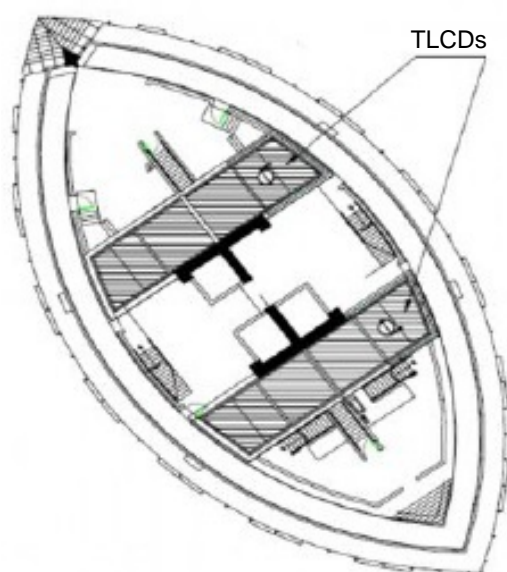
Edifícios com sistema TLCD

Como exemplo de instalação destes sistemas tem-se o One Wall Center, em Vancouver, no Canada, com 48 andares e 137 metros de altura (Figura 2.12 (a)). A fim de controlar as vibrações induzidas pelo vento, em 2001, 2 destes aparelhos foram instalados no topo do edifício (Figura 2.12 (b)). O controlo é feito na direção do menor comprimento da secção transversal elíptica pelos dois sistemas com 183 metros cúbicos de água e sintonizados para determinada frequência [17].

As vantagens adquiridas com a sua instalação foram as convencionais dos mecanismos TLCD: a aceleração da estrutura devido à ação do vento foi reduzida; a água nos reservatórios pode ser usada para extinguir incêndios ou arrefecer o interior do edifício; e os custos de manutenção são baixos em comparação a outros sistemas de controlo.



(a) Vista geral.



(b) Secção transversal do edifício e posição dos seus TLCDs.

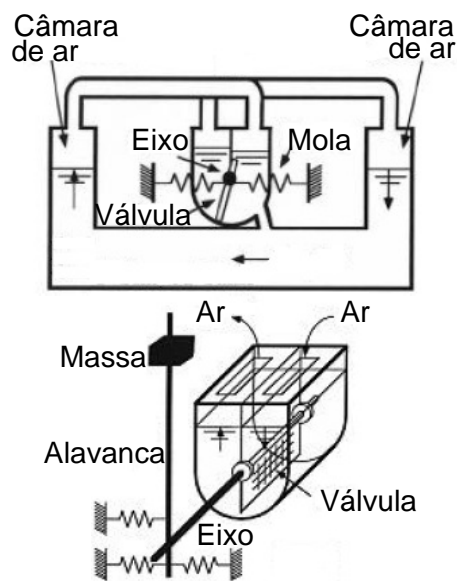
Figura 2.12: One Wall Center, no Canada.

Outro TLCD pode ser encontrado no Cosima Hotel (agora chamado Sofitel Hotel), em Tóquio, no Japão, composto por 26 pisos e uma altura de 106 metros (Figura 2.13 (a)). Com o intuito de reduzir a sua resposta dinâmica, foi instalado no topo um TLCD com 58 toneladas, onde 36 correspondem à massa do líquido.

O reservatório em forma de "U" é constituído por um troço horizontal onde o líquido se move livremente, quatro colunas (uma em cada canto) e um mecanismo de controlo entre colunas (Figura 2.13 (b)). Trata-se de um amortecedor de colunas de líquido sintonizado equipado com sistema de ajuste de período (*liquid column damper - period adjustment - LCD-PA*) [15]. Quando a estrutura é solicitada, o deslocamento horizontal do sistema faz o fluido deslocar-se; num dos lados o ar na coluna é comprimido, resultando um aumento de pressão e na coluna oposta essa pressão diminui; é esta flutuação de pressão que induz o movimento da válvula ligada ao eixo e molas, e o mecanismo controla, desta forma, o deslocamento do líquido no reservatório e o amortecimento (que é função da velocidade do líquido). Medições após instalação demonstraram reduções de acelerações entre 50-70% [15].



(a) Vista geral.



(b) Sistema TLCD com mecanismo de ajuste de período e mecanismo de ajuste de pressão.

Figura 2.13: Sofitel Hotel, no Japão.

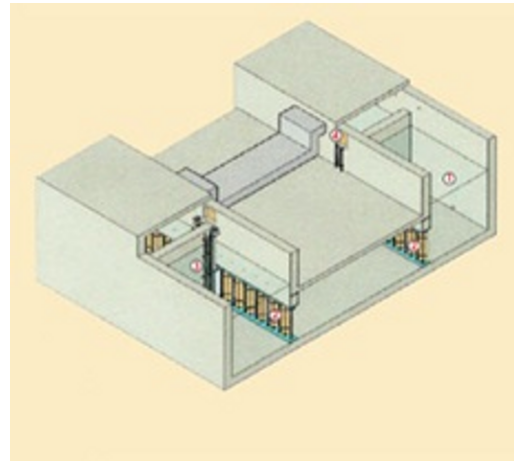
Nos Estados Unidos da América é também encontrado este sistema no Comcast Center, em Filadélfia, com 58 andares e 297 metros de altura (Figura 2.14 (a)). É o edifício mais alto dessa cidade e aqui encontra-se o maior TLCD existente no Mundo [36]. Instalado em 2008, possui 1.300 toneladas de água (Figura 2.14 (b)). Outros exemplos de edifícios com sistemas TLCD instalados podem ser consultados na Tabela 2.2.

2.2.3 Amortecedor de líquido sintonizado controlável

A instalação do amortecedor de líquido sintonizado permite o controlo das vibrações estruturais para apenas uma determinada frequência. No entanto, as ações a que as construções estão sujeitas encontram-se numa banda de



(a) Vista geral.



(b) Desenho esquemático do TLCD instalado [36].

Figura 2.14: Comcast Center, nos EUA.

Tabela 2.2: Exemplo de edifícios com sistema TLCD instalado. Data de instalação, tipo e número de TLCDs [7].

Edifício e sua localização	Data da instalação do TLCD	Número e tipo de TLCDs
Hotel Hyatt - Osaka, Japão	-	1 LCD-PA
Edifício Ichida - Osaka, Japão	-	1 LCD-PA
Casa Random - New York, EUA	2003	2 TLCDs
Torre Millennium - Filadélfia, EUA	2009	2 TLCDs

frequências e podem tomar valores para as quais o sistema de controlo prejudique a sua resposta dinâmica. Pelo fato da sua eficiência nestas situações ser muito baixa ou mesmo nula, surgem os amortecedores de líquido sintonizado ativos e semi-ativos.

Nos TSD tem-se controlo semi-ativo, por exemplo, a partir da ação de uma membrana que, através da alteração das suas propriedades (controlando por exemplo as aberturas), é fornecido o adequado amortecimento. Embora uma tecnologia emergente, estes sistemas semi-ativos de fluido controlável têm ganho bastante interesse e notoriedade ao nível do controlo de vibrações [15, 22].

O amortecimento existente num sistema passivo TLCD pode ser controlado, por exemplo, a partir da alteração da abertura do orifício através de uma válvula (controlando as perdas de carga hidráulica), ou através do uso de fluidos eletro-reológicos (ER-Fluid) ou magneto-reológicos (MR-Fluid) - materiais que alteram a sua viscosidade, podendo passar de fluido a semi-sólido numa questão milissegundos quando expostos a um campo elétrico ou magnético, respetivamente (Figura 2.15). Das possíveis e acentuadas alterações de viscosidade resultam uma maior gama de forças de amortecimento que podem ser ajustadas ao tipo de ação dinâmica que atua na estrutura. Desta forma, o TLCD pode operar numa gama de frequências e controlar a resposta estrutural sob diferentes frequências de excitação [1].

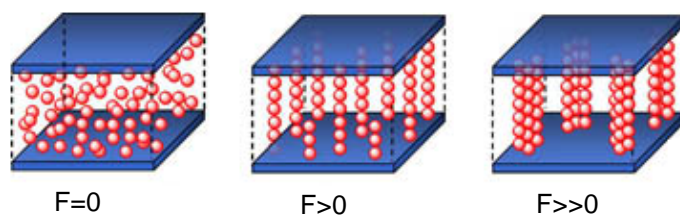


Figura 2.15: Comportamento das partículas num fluido eletro-reológico e num magneto-reológico quando sujeitas a um fluxo F elétrico ou magnético, respetivamente.

A instalação de um aparelho que permita o controlo da abertura do orifício do TLCD, vai ajustar o amortecimento conferido, em função da resposta da estrutura à solicitação externa. Através do controlo ativo dessa secção, o deslocamento da coluna líquida é controlado e, além da possibilidade de alterar a frequência própria do TLCD (podendo operar numa maior banda de frequências excitadoras), no caso de oscilações mais condicionantes, pode evitar que a condição associada ao correto funcionamento do TLCD não seja verificada (relembrar que é fundamental que a superfície livre do líquido permaneça nos troços verticais).

Outra solução de TLCDs controláveis são os amortecedores de colunas de líquido sintonizado híbridos (HTLCDs). Estes sistemas consistem num TLCD fixado a uma plataforma circular giratória que é controlada por um mecanismo elétrico-mecânico (Figura 2.16) [31]. Tem como designação híbrido porque é de controlo passivo na atenuação das oscilações impostas à estrutura (pois é um

TLCD) e ativo devido à rotação da plataforma giratória na procura da direção correta da vibração.

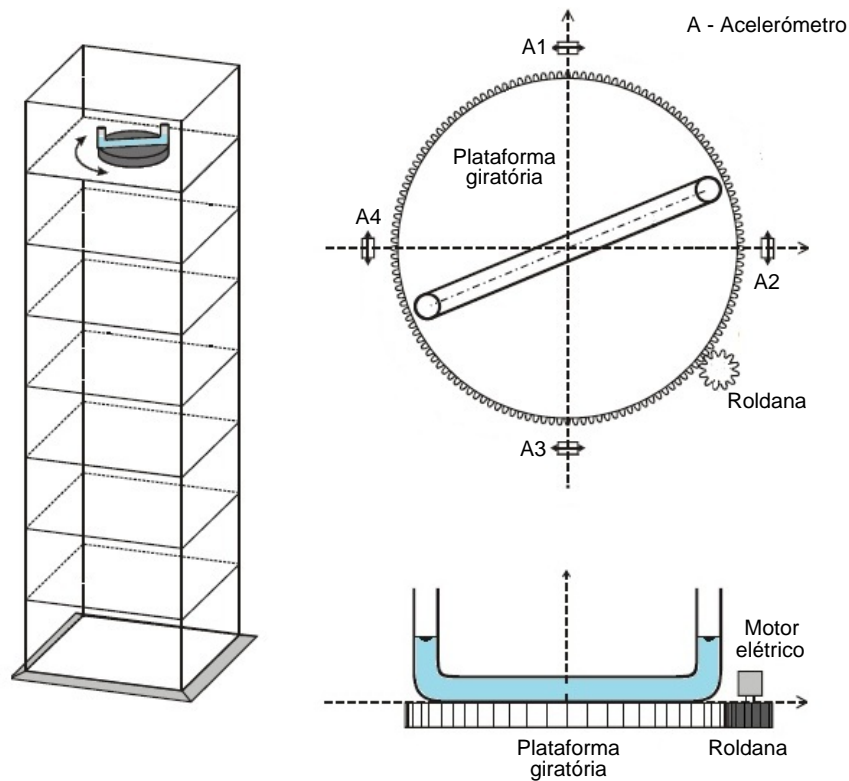


Figura 2.16: Desenho esquemático de um sistema HTLCD instalado numa estrutura. Vista em planta e em corte do HTLCD.

Relativamente aos amortecedores de colunas de líquido sintonizado pressurizados (PTLCDs), a diferença com os TLCDs consiste na pressão exercida na coluna de água nas duas extremidades do reservatório que encontram-se seladas. Nesta situação, a frequência do sistema de controlo pode ser ajustada tanto pelo comprimento da coluna de água como pela pressão nas câmaras de ar (ver edifício com sistema TLCD - Figura 2.13) [3].

Capítulo 3

Exemplo de aplicação

A análise dinâmica de estruturas é um ramo da engenharia com especial interesse e relevância no dimensionamento estrutural. Além da extrema importância de uma adequada idealização das ações atuantes, é igualmente importante a consideração de um modelo matemático que descreva de forma suficientemente aproximada o funcionamento estrutural; esse modelo permite determinar as relações matemáticas entre as características de excitação e a resposta estrutural resultante dessas ações. É assim, a partir do estabelecimento do modelo matemático de relações excitação-resposta e da adoção de um modelo espacial discreto ou contínuo que, de forma suficientemente aproximada, se representa as propriedades geométricas e físicas da estrutura (usualmente expressas por matrizes de massa, rigidez e amortecimento). E da aplicação das leis da Mecânica resulta um sistema de equações diferenciais que caracterizam o movimento estrutural. Para o estudo do comportamento dinâmico é assumido, simplificada, a hipótese de comportamento elástico linear sendo as características estruturais invariantes no tempo. Esta consideração permite, através de métodos de identificação modal, estudar e caracterizar a resposta dinâmica da estrutura através dos seus parâmetros modais (como as frequências, configurações deformadas e amortecimento).

O comportamento dinâmico de uma estrutura pode ser reproduzido através de uma modelação analítica, usualmente através do método dos elementos finitos, que permite prever o seu comportamento. No entanto, este e outros processos de cálculo podem não ser muito viáveis ou suficientes para a caracterização da sua dinâmica. Por essa razão surge a modelação experimental; não só para validar e confirmar resultados numéricos, mas também para determinar e conhecer certos comportamentos estruturais, que através de processos analíticos seriam de difícil ou impossível caracterização.

O objetivo deste capítulo é então a simulação numérica e análise experimental de um pórtico de 1GDL sob a ação de diferentes ações dinâmicas sem e com sistema TLCD. Em termos de solicitação dinâmica, os ensaios a realizar contemplarão:

- Excitação harmónica - Neste ensaio a aceleração de base corresponde a uma ação sinusoidal com uma frequência igual à frequência própria da estrutura. Ou seja, o modelo reduzido é excitado em ressonância;

- Vibração em regime livre - Introduzindo um deslocamento ao nível do GDL do pórtico, o sistema é, seguidamente, deixado a vibrar livremente;
- Excitação sísmica - Neste último caso, as ações correspondem aos sismos já introduzidos e escalados no sistema de aquisição de dados da mesa sísmica. Esses sismos são o de El Centro, Kobe e Northridge [5]. Além de se tratarem de tremores de terra já bem conhecidos e utilizados na realização de muitos artigos desta área, a sujeição do modelo reduzido a estas ações permitirá ainda que os resultados possuam um termo de comparação com outros trabalhos que poderão ser realizados no seguimento desta dissertação.

O ensaio experimental é realizado numa mesa sísmica educacional onde o pórtico é aparafusado na sua base e um acelerómetro instalado ao nível do piso mede as acelerações. As excitações de base são as referidas anteriormente e os primeiros ensaios correspondem à excitação do pórtico sem sistema TLCD. Após ensaiado para todas as solicitações, será adicionada água (pórtico com TLCD) até que o comprimento da coluna líquida corresponda ao dimensionado. Nessas condições é repetido o mesmo processo. À água a colocar no reservatório (Figura 3.1) é adicionado um corante vermelho para que sirva de contraste e se possa observar de forma clara a sua oscilação durante o ensaio. Na Figura 3.2 mostra-se o modelo experimental instalado na mesa sísmica e no Anexo A são apresentadas as etapas associadas à sua construção e instalação.

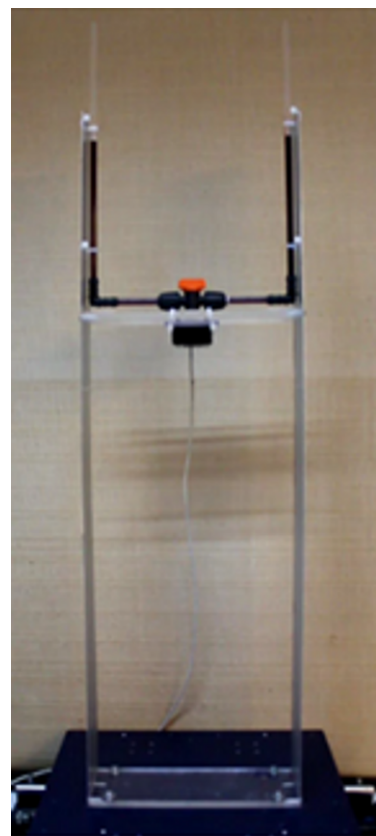
Relativamente à duração dos ensaios, na excitação em ressonância e vibração em regime livre consideraram-se cinquenta segundos e no caso dos sismos o tempo corresponderá à duração dessas ações.



Figura 3.1: Reservatório instalado no pórtico.



(a)



(b)

Figura 3.2: Pórtico instalado na mesa sísmica com reservatório (a) sem água e (b) com água.

3.1 Descrição do modelo experimental

O modelo estrutural consiste num pórtico de um piso. O piso é constituído por uma placa de acrílico com uma espessura (e_{piso}) de 9 mm, largura (l) 110 mm e comprimento (C) 305 mm. Na base do piso é ainda instalado um acelerómetro, preso por abraçadeiras de poliamida ao acrílico, que liga ao sistema de aquisição de dados através de um cabo. Os pilares (ligados ao acrílico a partir de seis parafusos, três em cada lado) são em alumínio ($E=70$ GPa) com 700 mm de altura (H), 0,8 mm de espessura (e_{pilar}) e largura igual à do piso. Os valores de massa são medidos na balança digital presente no laboratório e podem ser consultados na Tabela 3.1.

Relativamente ao reservatório, as suas dimensões serão determinadas no dimensionamento do sistema. Os materiais utilizados são: acrílico transparente, uma válvula de abertura controlável em plástico e dois "cotovelos" também em plástico. A sua permanência na posição desejada é feita com recurso a abraçadeiras de poliamida que serviram de fitas de fixação.

Tabela 3.1: Massas individuais de alguns dos constituintes do modelo experimental.

Componente	Massa (kg)
Acrílico	0,397
Acelerómetro	0,107
6 fitas	0,006
Pilar	0,286
Parafusos	0,025

Numa estrutura à escala real a massa adicional de todo o sistema TLCD (reservatório e água) poderá não ser muito condicionante, mas num modelo reduzido como o pórtico, qualquer massa adicionada ao GDL que se pretende controlar, implicará uma alteração da frequência própria. Por esta razão será considerado que a instalação do TLCD corresponde à colocação do líquido no reservatório, isto é, o peso do reservatório é considerado como peso da estrutura e a água corresponderá ao sistema TLCD. A eficiência do sistema de controlo será assim determinada pela comparação entre: pórtico sem sistema TLCD (pórtico mais reservatório sem água) e pórtico com sistema TLCD (pórtico mais reservatório com água). A influência que o reservatório e a colocação da água tiveram na frequência própria do pórtico é apresentada na secção 3.4.

Após dimensionado o sistema, foram comprados os materiais e em laboratório construído todo o sistema TLCD de origem (ver Anexo A). No entanto, antes de iniciar esse procedimento, devido às características físicas do pilar (mais propriamente devido à sua esbelteza) e a fim de evitar problemas e erros futuros na análise dinâmica, é imposta um condição associada ao peso adicionado ao nível do piso. Nesta fase ainda não são conhecidas as características do sistema TLCD nem as dimensões do reservatório logo, a massa adicional corresponderá

à soma das massas desses dois elementos (Equação (3.1)) e será limitada pela força crítica que provoca a encurvadura dos pilares.

$$m_{adicional} = m_{reservatório} + m_{TLCD} \quad (3.1)$$

Em que:

$$m_{TLCD} \equiv m_{água} \quad (3.2)$$

A carga crítica P_{cr} , é determinada pela seguinte expressão [26]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (3.3)$$

Tendo em conta as características de ligação na base e topo do pórtico (encastrado ao nível do apoio e do piso), o comprimento de encurvadura L_e vai corresponder à altura do pórtico, ou seja, $L_e = h = 0,7$ m. A carga crítica do pilar toma então o seguinte valor:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 0,3285}{0,7^2} = 6,6167 \cong 6,62 \text{ N} \quad (3.4)$$

O esforço normal no pilar é função da massa do piso (m_{piso}). Esta corresponde à soma da massa do acrílico, parafusos, reservatório com água e seus acessórios, acelerómetro e fitas de fixação. Tem-se então:

$$m_{piso} = m_{TLCD} + m_{reservatório} + m_{piso} + m_{acelerómetro} + m_{parafusos} + m_{6fitas} \quad (3.5)$$

Consultando a Tabela 3.1 resulta:

$$m_{piso} = m_{adicional} + 0,535 \text{ kg} \quad (3.6)$$

Para que não ocorra encurvadura é necessário que o esforço normal no pilar (N_{pilar}) não ultrapasse o valor da carga crítica, ou seja:

$$N_{pilar} < P_{cr} \quad \text{onde:} \quad N_{pilar} = \frac{m_{piso}}{2}g \quad (3.7)$$

Sendo g a aceleração gravítica (aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$), resulta:

$$\frac{m_{adicional} + 0,535}{2} \cdot 9,81 < 6,62 \quad \Leftrightarrow \quad m_{adicional} < 0,815kg \quad (3.8)$$

Após dimensionado o sistema TLCD e respectivo reservatório será então verificada a condição:

$$m_{adicional} = m_{reservatório} + m_{TLCD} < 0,815kg \quad (3.9)$$

3.1.1 Determinação da frequência própria

A determinação da frequência própria real do pórtico sem TLCD é possível através do método da seleção de picos, recorrendo ao analisador de Fourier sobre o sinal registado pelo acelerómetro. O procedimento é realizado no programa MATLAB através do algoritmo FFT (Transformada Rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform*) [35]. Para o efeito excitou-se o pórtico na mesa sísmica e, através da sua resposta medida pelo acelerómetro, foi determinada a frequência real pelo algoritmo referido. O valor vai corresponder ao pico de energia que diz respeito à situação onde a sollicitação harmónica coincide com a frequência natural e os restantes modos vibração são desprezáveis face à contribuição do modo excitado. Os resultados são os apresentados na Figura 3.3. Ao pico corresponde a frequência:

$$w_s = 0,7935 \cong 0,8Hz \quad (3.10)$$

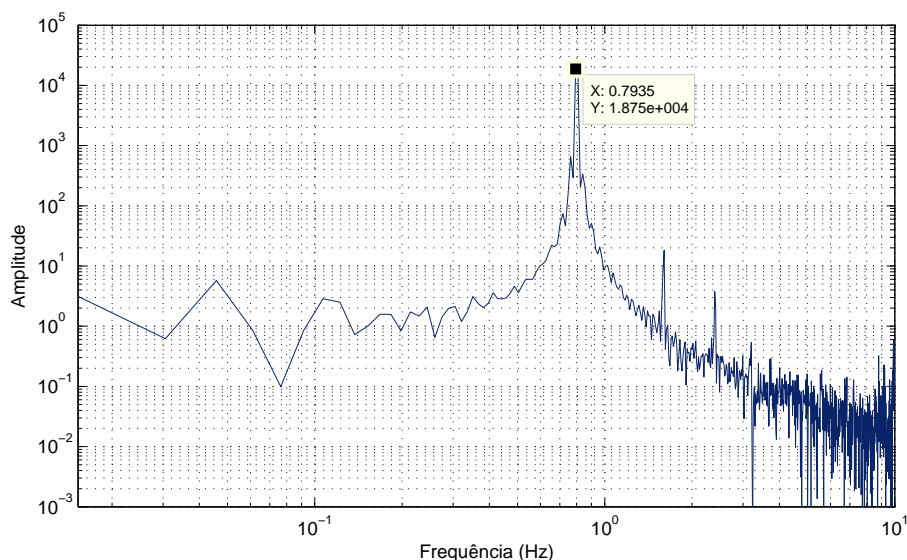


Figura 3.3: Transformada de Fourier para o ensaio experimental: excitação harmónica do pórtico sem TLCD.

3.1.2 Determinação do amortecimento

A determinação do amortecimento é feita também a partir do modelo experimental. Esta é uma propriedade importante da estrutura na sua análise dinâmica e representa o fenómeno a partir do qual a energia mecânica do sistema é dissipada e determina a amplitude de vibração em ressonância, bem como o tempo de persistência da vibração após cessada a excitação.

São diversos os processos para a sua determinação, entre os quais o método do decremento logarítmico que será utilizado neste trabalho. A sua aplicação permite estimar o amortecimento através das acelerações decrescentes medidas pelo acelerómetro em função do tempo. O termo decremento diz respeito à taxa de redução logarítmica (que esta relacionada com a redução do movimento após impulso inicial), e é determinado através da razão entre amplitudes sucessivas do sinal. O amortecimento experimental (real) do pórtilco é assim obtido a partir da resposta em regime livre.

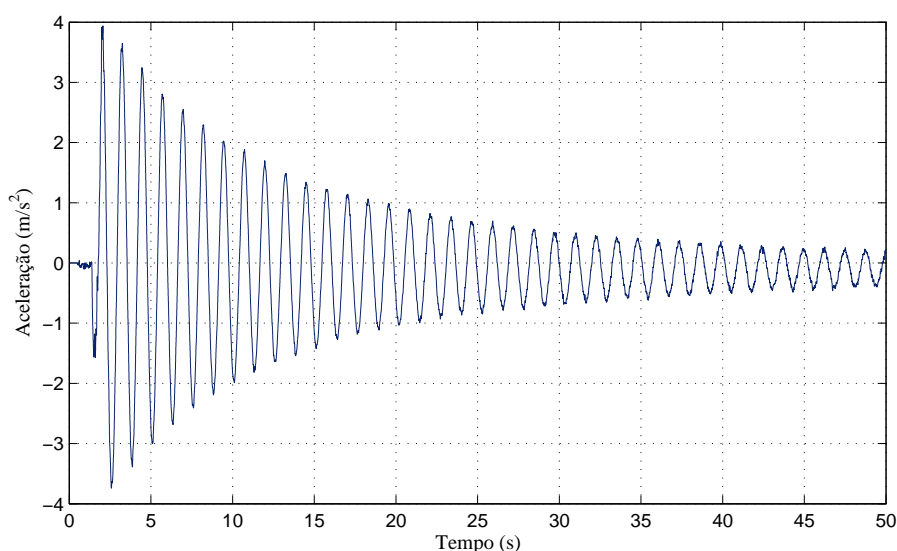


Figura 3.4: Resposta do pórtilco na situação de vibração em regime livre sem TLCD.

Na Figura 3.4 são representas as acelerações do pórtilco sem TLCD em vibração em regime livre após imposta uma solitação inicial. A equação do movimento admite uma solução do tipo:

$$x(t) = X e^{-\beta w_s t} \sin(w_a t + \varphi) \quad (3.11)$$

Sendo X é amplitude máxima do movimento oscilatório, φ o ângulo de fase e w_a a frequência natural amortecida da estrutura dada pela equação:

$$w_a = w_s \sqrt{1 - \beta^2} \quad (3.12)$$

Considerando que a resposta máxima (valores de pico) acontece quando o termo harmónico de $x(t)$ é unitário, é possível estabelecer uma razão entre as amplitudes máximas sucessivas. Sendo o intervalo de tempo entre dois valores pico i e $i + 1$:

$$t_{i+1} - t_i = \frac{2\pi}{w_a} \quad (3.13)$$

Tem-se o decaimento logarítmico dado por:

$$\frac{x_i}{x_{i+1}} = e^{\beta w_s (t_{i+1} - t_i)} \quad \Leftrightarrow \quad \ln\left(\frac{x_i}{x_{i+1}}\right) = \frac{2\pi\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (3.14)$$

Em muitos casos é difícil distinguir a amplitude de duas acelerações consecutivas separadas por um único período devido à sua aproximação. Neste caso, a precisão do valor determinado poderá não ser muito fiável e, por essa razão, consideram-se amplitudes separadas por n ciclos. Tendo ainda este tipo de estrutura um amortecimento baixo ($\beta \ll 1$), a equação anterior passa a ser escrita por:

$$\ln\left(\frac{x_i}{x_{i+1}}\right) = 2n\pi\beta \quad \Leftrightarrow \quad \beta = \ln\left(\frac{x_i}{x_{i+1}}\right) \frac{1}{2n\pi} \quad (3.15)$$

Analogamente tem-se para as acelerações:

$$\beta = \ln\left(\frac{\ddot{x}_i}{\ddot{x}_{i+1}}\right) \frac{1}{2n\pi} \quad (3.16)$$

O cabo que liga o acelerómetro ao sistema de aquisição de dados teve uma ligeira influência no registo do sinal após, sensivelmente, os 25 segundos, daí o gráfico não se encontrar perfeitamente centrado. Por essa razão na determinação de β considerou-se a aceleração logo após a imposição da condição inicial e o valor pico imediatamente antes dos 25 segundos. Da resposta estrutural representada Figura 3.4 são então retirados os valores das acelerações pico e determinado o amortecimento β experimental:

$$\beta = \ln\left(\frac{3,9390}{0,6892}\right) \frac{1}{2 \cdot 19\pi} = 0,0146 \quad (3.17)$$

Ou seja:

$$\beta \cong 1,5 \% \quad (3.18)$$

3.2 Descrição do modelo numérico

A simulação numérica é realizada em MATLAB [35]. Esta consiste no estudo do comportamento do modelo físico através de um sistema de equações que define a sua resposta em função do tempo. Definido o sistema, serão então impostas as diferentes acelerações base e determinada a resposta estrutural. No capítulo seguinte serão analisadas e comparadas com as resultantes do ensaio experimental.

O sistema passivo TLCD é devidamente calibrado com base nas características dinâmicas do modelo estrutural. É assim fundamental que o erro associado à simulação numérica e respetivo dimensionamento do sistema não seja significativo. Por esta razão é determinada a frequência própria do pórtico sem sistema TLCD, de modo a evitar potenciais erros associados também às características dos materiais. À partida, espera-se uma ligeira diferença entre a frequência de cálculo e a real devido às imperfeições inevitáveis dos elementos constituintes e, também, devido às ligações aparafusadas não corresponderem a encastramentos perfeitos.

Atendendo às características mecânicas do piso em acrílico, este funciona como um corpo rígido no seu próprio plano. Por essa razão e uma vez que as ações são horizontais, considera-se que o modelo experimental pode ser definido por um modelo numérico de 1GDL (Figura 3.5).

Na determinação da frequência própria do modelo sem TLCD considera-se a massa da placa de acrílico, do reservatório, dos parafusos e abraçadeiras, e a contribuição de $1/3^1$ da massa dos pilares mais o restante troço acima do piso² (que serviu de fixação ao reservatório (Figura 3.2). Do cálculo direto resulta a frequência dada pela Equação (3.19) e, como se pode verificar, é muito próxima à obtida do modelo experimental (Equação (3.10)).

$$k = 2 \frac{12EI}{H^3} = 2 \frac{12 \cdot 0,3285}{0,7^3} = 22,99 \text{ N/m} \quad \text{e} \quad M = 0,926 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow \omega_s = 0,7930 \text{ Hz} \cong 0,8 \text{ Hz} \quad (3.19)$$

¹O pilar encastrado nas suas extremidades, quando é sujeito a uma aceleração horizontal, a sua deformada, e correspondente distribuição das forças de inércia, apresenta uma função de 2º grau. Contudo, considerou-se a sua aproximação a um diagrama triangular, de onde resulta a contribuição de $1/3$ da massa do pilar segundo o GDL do pórtico.

²Quando o pórtico é solicitado por uma aceleração horizontal, todo o troço de pilar acima do piso desloca-se com este. Por esta razão, toda a sua massa correspondente a esses 30cm de pilar é considerada.

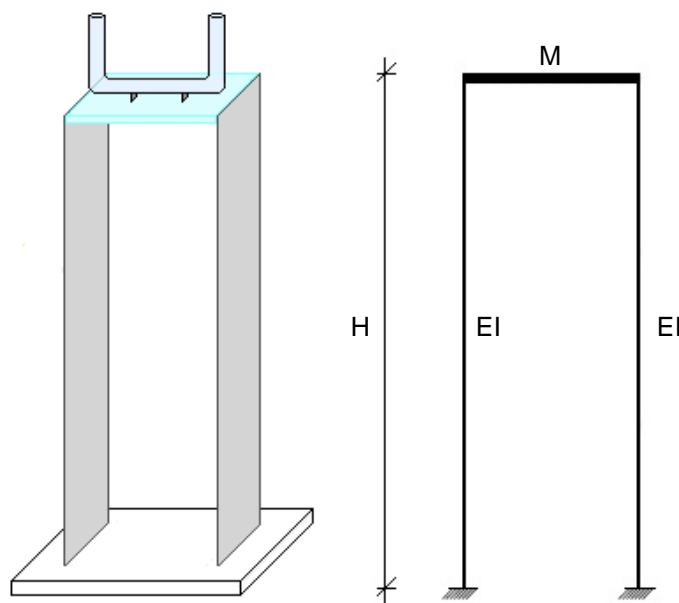


Figura 3.5: Modelo experimental e correspondente modelo numérico.

O amortecimento β da estrutura (usualmente representado em percentagem) corresponde à relação entre o coeficiente de amortecimento (c) e o coeficiente de amortecimento crítico (c_{cr}) (Equação (3.20)). A determinação do seu valor é feita na secção 3.1.2.

$$\beta = \frac{c}{c_{cr}} \quad (3.20)$$

Equações do movimento

Analogamente à dedução da equação do movimento da coluna líquida, também a equação do movimento correspondente ao pórtico com um sistema TLCD instalado, é determinada a partir das equações de Lagrange, mas na direção do deslocamento x [40, 41].

Considere-se o pórtico anteriormente descrito ao qual corresponde uma determinada massa M , rigidez k e coeficiente de amortecimento c . Considere-se ainda que nele é instalado um TLCD e todo o sistema é sujeito a uma aceleração de base \ddot{x}_g .

O acoplamento do sistema de controlo à estrutura implica a introdução de um novo GDL correspondente ao deslocamento do líquido no reservatório, $y(t)$ e, simplificada, o problema pode ser representado pela Figura 3.6. Desta situação, onde a aceleração absoluta é $\ddot{x} + \ddot{x}_g$, resultam as energias cinética e potencial representadas nas equações (3.21) e (3.22), respetivamente.

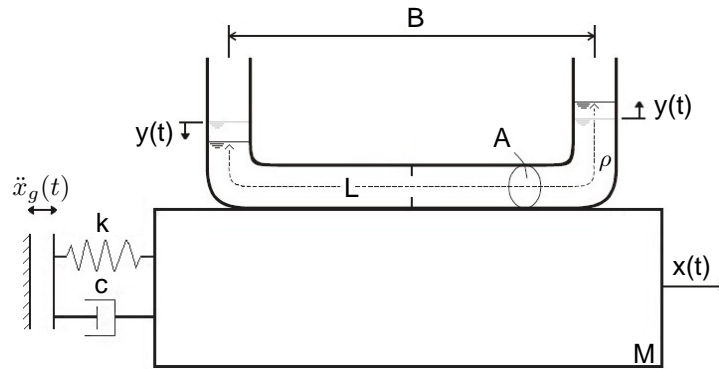


Figura 3.6: Estrutura de 1GDL com um sistema TLCD instalado.

$$\begin{aligned}
 T &= T_{\text{TLCD}} + T_{\text{estrutura}} = \\
 &= \frac{1}{2} \rho A (L_v - y) (\dot{y}^2 + (\dot{x} + \dot{x}_g)^2) + \frac{1}{2} \rho A B (\dot{y} + \dot{x} + \dot{x}_g)^2 + \\
 &\quad + \frac{1}{2} \rho A (L_v + y) (\dot{y}^2 + (\dot{x} + \dot{x}_g)^2) + \frac{1}{2} M (\dot{x} + \dot{x}_g)^2
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

, e:

$$\begin{aligned}
 V &= V_{\text{TLCD}} + V_{\text{estrutura}} = \\
 &= \frac{1}{2} \rho A g (L_v - y)^2 + \frac{1}{2} \rho A g (L_v + y)^2 + \frac{1}{2} k x^2
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Relativamente à parcela não conservativa na direção x , tem-se a força correspondente ao amortecimento da estrutura, dada por [41]:

$$Q_x = -c\dot{x} \tag{3.23}$$

Definidos todos os parâmetros e sendo que a parcela Q_y dada pela Equação (2.5), é então a partir da resolução as equações de Lagrange nas duas direções que são determinadas as duas equações que definem o exemplo de aplicação:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} = Q_x \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} = Q_y \end{cases} \tag{3.24}$$

, de onde resulta:

$$\begin{cases} (M + \rho AL)\ddot{x} + \rho A\alpha L\ddot{y} + 2M\omega_s\beta\dot{x} + M\omega_s^2x = -(M + \rho AL)\ddot{x}_g \\ \rho AL\ddot{y} + \frac{1}{2}\rho A\delta |\dot{y}| \dot{y} + 2\rho Agy = -\rho A\alpha L(\ddot{x} + \ddot{x}_g) \end{cases} \quad (3.25)$$

Estas são as duas equações correspondentes ao sistema de 2GDL, ficando assim definido o sistema de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem:

$$\mathbb{M} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \mathbb{C} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \mathbb{K} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \mathbb{F} \quad (3.26)$$

, onde:

$$\mathbb{M} = \begin{bmatrix} M + \rho AL & \rho A\alpha L \\ \rho A\alpha L & \rho AL \end{bmatrix} \quad (3.27a)$$

$$\mathbb{C} = \begin{bmatrix} 2M\beta\omega_s & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho A\delta |\dot{y}| \end{bmatrix} \quad (3.27b)$$

$$\mathbb{K} = \begin{bmatrix} \omega_s^2 M & 0 \\ 0 & 2\rho Ag \end{bmatrix} \quad (3.27c)$$

$$\mathbb{F} = - \begin{Bmatrix} M + \rho AL \\ \rho A\alpha L \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (3.27d)$$

Sendo condição necessária:

$$y_{max} \leq \frac{L - B}{2}$$

De um modo geral, não é possível determinar analiticamente a solução de uma equação diferencial (e ainda menos de um sistema de equações diferenciais), pelo que é necessário recorrer a métodos numéricos. São várias as opções: existem uns mais simples onde é possível a sua utilização em cálculo manual; e outros mais elaborados e conseqüentemente mais "pesados" numericamente, que implicam o uso de programas de cálculo automático.

O sistema de equações diferenciais (Equação (3.26)) será resolvido no programa de cálculo MATLAB utilizando o método de Runge-Kutta (RK) de 4ª ordem (comando *ode45*), com um passo de cálculo igual ao tempo de leitura entre acelerações registadas pelo acelerómetro nos ensaios (0,001 segundos). Este calcula as aproximações da solução num conjunto de pontos discretos da variável independente tempo e, por se tratar de um método de integração numérico explícito, cada iteração requer apenas o conhecimento do valor das variáveis dependentes das iterações anteriores. Uma das vantagens que possui é que

é suficiente conhecer o valor da função no ponto inicial para determinar os valores nos pontos seguintes, bastando assim conhecer as condições iniciais do problema.

Relativamente às perdas de carga, apenas as localizadas ao nível da secção da válvula são consideradas nas equações. A Figura 3.7 (b) apresenta os valores de K que nas equações diferenciais corresponde ao valor de δ . As perdas de carga contínuas e singulares ao nível dos "cotovelos" são desprezadas e por isso não consideradas nas equações. Na bibliografia consultada sobre o funcionamento destes sistemas de controlo [1, 27, 38, 39] não é indicada a razão, mas essa consideração pode ter a ver com o valor dessas perdas não afetarem de forma significativa o escoamento e/ou serem muito reduzidas em comparação com as que ocorrem na válvula. A mesma consideração é feita no modelo a ensaiar, mas, devido às pequenas dimensões e diâmetro reduzido do reservatório, estas não serão tão desprezáveis como num sistema numa estrutura real. Considera-se ainda, tal como na grande maioria das aplicações práticas, que o líquido é incompressível.

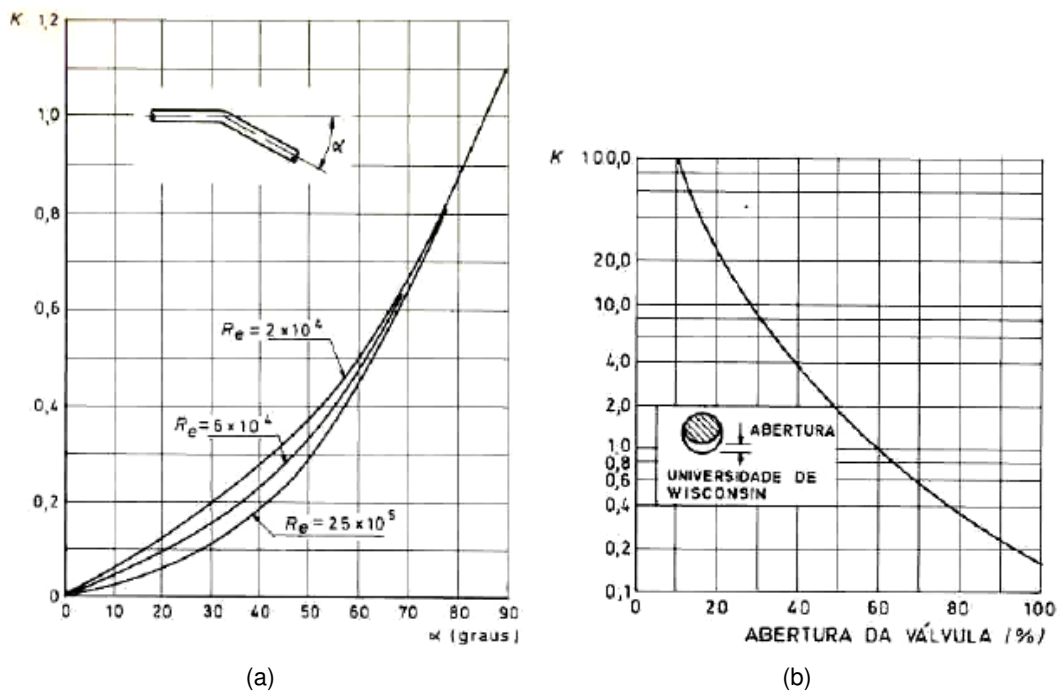


Figura 3.7: Coeficiente K para (a) cotovelos e (b) válvulas de corredeira [24].

3.3 Estudo paramétrico do sistema TLCD

A determinação das características do sistema atenuador TLCD, para se alcançar os níveis de redução de resposta desejados, é condicionada pelas características da própria estrutura. Além da frequência natural, modos de vibração dominantes e ações externas aplicadas no edifício, os parâmetros do TLCD serão ainda

condicionados pelo espaço físico do local da sua instalação. São diversas as variáveis em jogo, por essa razão e com o intuito de proporcionar ao leitor uma melhor compreensão da sua influência no dimensionamento do sistema TLCD e na resposta da estrutura, será feito um estudo paramétrico para compreender essas relações.

Este estudo vai consistir numa análise comparativa de resultados obtidos por via analítica do pórtico correspondente ao exemplo de aplicação, sem e com sistema TLCD, excitado em ressonância. Relacionando esses resultados em termos de aceleração, pretende-se obter uma conclusão sobre o desempenho do sistema para diferentes parâmetros ou respetivas características. Para o efeito, faz-se uma variação individual de cada parâmetro no intervalo considerado na Tabela 3.2, enquanto que os restantes permanecem com os valores base que são representados a negrito.

Tabela 3.2: Intervalo e valores base dos parâmetros do sistema TLCD considerados no estudo paramétrico.

Parâmetro	Intervalo e valor base
$\Omega = \omega_{TLCD}/\omega_s$	[0,9 1,0 1,1]
$\mu = m_{TLCD}/M$	[0,2% 0,5% 1,0% 1,5% 2,0%]
$\alpha = B/L$	[0,3 0,5 0,7]
$\delta = f(A_o)$	[9,00($A_o = 30\%A$) 0,59($A_o = 70\%A$) 0,17 ($A_o = A$)] [24]

3.3.1 Variação da relação entre frequências

Mantendo constantes os restantes parâmetros, na variação de Ω é apenas afetado o comprimento da coluna de líquido, que altera a frequência própria do sistema de controlo. Para colunas de água mais compridas têm-se sistemas com frequências mais baixas e vice-versa. Contudo, e mantendo fixa a relação de massas, a variação do comprimento implica a alteração da área da secção transversal do sistema TLCD. Ou seja, para $\mu = 1\%$, a cada Ω esta associado um comprimento L e conseqüentemente uma área A . A Figura 3.8 representa a influência de Ω na redução das acelerações.

Como esperado, a melhor resposta estrutural, excitando a estrutura em ressonância, é quando as frequências são iguais ($\Omega = 1$). Nesse caso, após instalado o sistema TLCD, são atingidos níveis de redução superiores a 80%. Para $\Omega = 0,9$, ou seja, quando a frequência do TLCD inferior à da estrutura, valores de redução na ordem dos 17% indicam que o sistema não se encontra sintonizado e, por essa razão, não se atingem os níveis de redução tão significativas quanto as anteriores. Quando a sua frequência é superior à da estrutura ($\Omega = 1,1$) apresentam-se reduções próximas de 30%. Note-se que para a mesma diferença em relação a $\Omega = 1$, a redução não é simétrica.

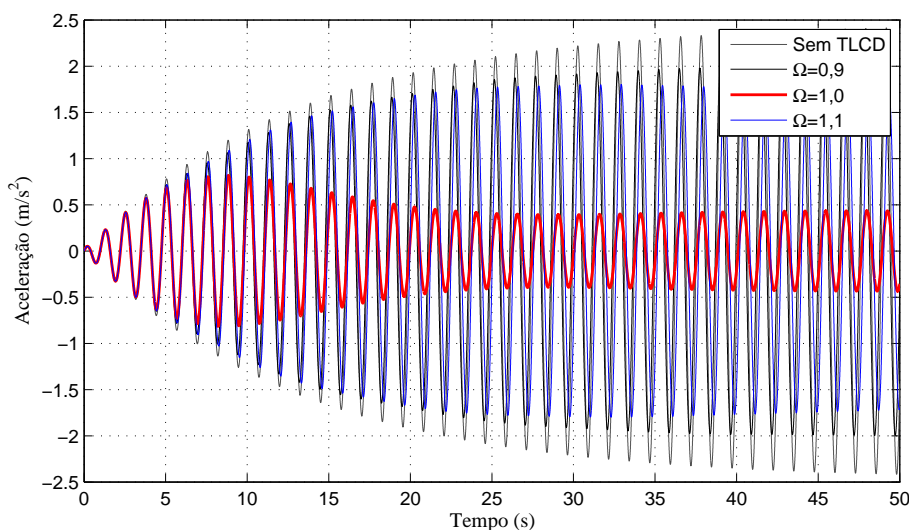


Figura 3.8: Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a Ω .

3.3.2 Variação da relação entre massas

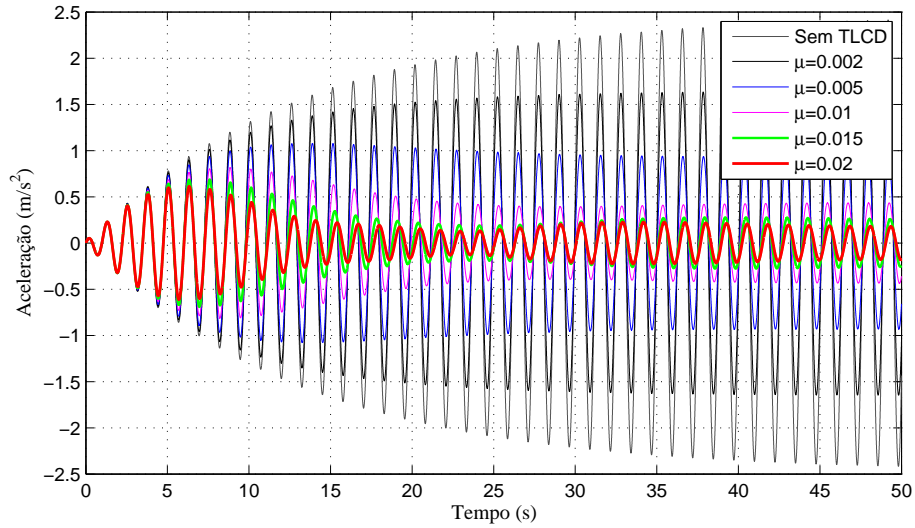
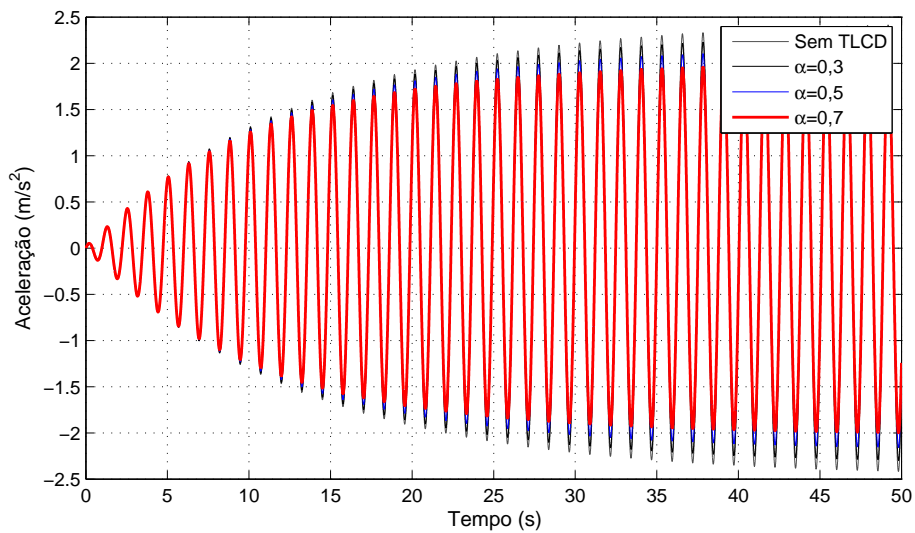
A introdução de massa ao nível do GDL que se pretende controlar implica a diminuição da sua frequência de vibração, sendo essa diminuição tanto maior quanto maior a massa do TLCD instalado. No entanto, não só a condicionante do espaço físico como o incremento excessivo de peso na estrutura para a qual esta não se encontra dimensionada, são fatores que limitam a massa do sistema de controlo. Para diferentes percentagens de μ , a Figura 3.9 apresenta a sua influência na resposta da estrutura.

A conclusão imediata é que quanto maior μ maior a eficiência do sistema. Para $\mu = 0,2\%$ já se obtêm reduções de acelerações superiores a 30%, sendo os melhores resultados alcançados para $m_{TLCD} = 2\%M$, com uma redução superior a 90% em relação à estrutura sem sistema TLCD.

Outra conclusão é que o aumento do desempenho do sistema com o acréscimo de massa mostra-se não linear; por exemplo, a diferença de $\mu = 1\%$ para $\mu = 1,5\%$ é de 7% (aproximadamente), ao passo que aumentando $\mu = 0,5\%$ para $\mu = 1\%$ é 20%. Cabe então ao projetista dimensionar a menor massa do TLCD para o amortecimento que pretende, de modo a tornar a solução o mais viável e prática possível.

3.3.3 Variação da razão entre o comprimento do trecho horizontal e o comprimento total da coluna líquida

O parâmetro α , como dito anteriormente, relaciona o comprimento do trecho horizontal (B) com o comprimento total do líquido (L). Mantendo constante L , o objetivo deste estudo é verificar a influência que B tem na resposta da estrutura

Figura 3.9: Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a μ .Figura 3.10: Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a α .

à ação dinâmica considerada. A variação desse comprimento implica apenas a alteração de α (não influenciando nenhum dos outros parâmetros) e os resultados são os representados na Figura 3.10.

Demonstra-se que quanto maior α melhor o desempenho do sistema. Esta conclusão já era esperada, tomando em conta que quanto maior o comprimento B , maior é a força de inércia desenvolvida e melhor o desempenho do amortecedor TLCD. Mas, também, maior será a alteração da frequência da estrutura. É então necessário ter em conta estas duas condições, aliadas à necessidade de garantir que a superfície livre permaneça nos troços verticais (quando ocorre a oscilação do líquido).

3.3.4 Variação da abertura do orifício

A relação entre a área da secção transversal A e a área do orifício A_o , é dada pelo parâmetro δ . Este, obtido experimentalmente, corresponde ao fator associado às perdas de carga localizadas provocadas em válvulas, sendo possível a determinação do seu valor óptimo [39, 41]. A seguinte figura mostra a influência que a abertura do orifício tem na resposta estrutural:

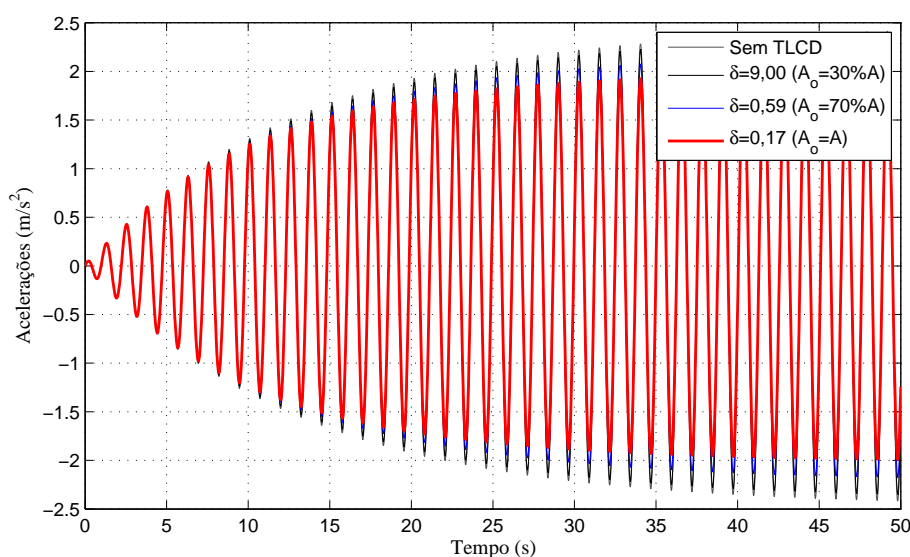


Figura 3.11: Eficiência do TLCD na resposta em acelerações, função a δ .

Quanto maior o valor de δ (menor A_o) (Tabela 3.3) maiores são as perdas de carga localizadas nessa secção. Desta forma, o líquido perde velocidade devido à restrição física imposta e o deslocamento da coluna líquida será menor; e, como se observa na equação do movimento da coluna líquida, uma menor velocidade de escoamento implica uma força menor transmitida à estrutura.

Para valores de δ próximos de zero, ou seja, A_o aproximadamente A , o líquido movimenta-se livremente no reservatório e são maiores as forças de inércia

associadas a esse movimento. Desta forma, o desempenho do TLCD na redução da resposta estrutural é melhor. No entanto, por vezes é necessário diminuir o deslocamento da coluna líquida para que seja válida a condição relacionada com y_{max} associada ao sistema de equações ou devido às dimensões máximas do sistema TLCD e local da sua instalação. Para o efeito utiliza-se a válvula instalada a meio do troço horizontal. Esta quando parcialmente fechada implica uma perda de carga hidráulica nessa secção e, conseqüentemente, um menor deslocamento da massa de líquido.

Tabela 3.3: Variação de δ em função de A_o [24].

A_o/ A	Coeficiente hidráulico δ
1,0	0,17
0,9	0,25
0,8	0,38
0,7	0,59
0,6	1,00
0,5	1,90
0,4	3,90
0,3	9,00
0,2	25,00
0,1	100,00

3.3.5 Conclusões

O estudo permitiu compreender a forma como a variação dos vários parâmetros, que intervêm ao dimensionamento do sistema de controlo, influenciam a resposta da estrutura quando excitada em ressonância. Em função do estudo paramétrico conclui-se que o melhor desempenho corresponde a um sistema com frequência igual à da estrutura primária e massa tanto maior quanto possível (com o cuidado de não tornar a solução inviável ou sobrecarregar demasiado a estrutura).

Relativamente aos parâmetros α e δ , a redução é tanto maior quanto maior for o comprimento B (maior α) e quanto mais aberta estiver a válvula (menor δ). Note-se que na força de amortecimento na Equação (2.6) apesar do parâmetro δ ser diretamente proporcional ao seu valor, a velocidade \dot{y} , que também é diretamente proporcional, por ser um termo quadrático influencia mais o seu valor. Assim, quanto menor delta, maior A_o , maior a velocidade \dot{y} e, conseqüentemente, melhor eficiência do sistema na atenuação da sollicitação. No entanto, a restrição imposta relativa ao deslocamento vertical conduz a uma relação entre esses dois parâmetros; se δ é aproximadamente zero (A_o aproximadamente A), o líquido move-se livremente e os deslocamentos podem ultrapassar o deslocamento máximo y_{max} , que é função do comprimento B (ou seja, de α):

$$y_{max} \leq \frac{L - B}{2} \quad \rightarrow \quad y_{max} \leq \frac{L(1 - \alpha)}{2} \quad (3.28)$$

Para elevados níveis de excitação o deslocamento y é elevado, podendo em certos casos ser necessário reduzir a área do orifício (aumentar δ) para que seja verificada a condição de y_{max} necessária à validação do sistema de equações (3.26). Esta ação, como se verificou no estudo paramétrico, devido à perda de carga hidráulica na secção do orifício, implica uma diminuição do desempenho do TLCD; então, para manter os mesmos níveis de amortecimento, essa diminuição deverá ser compensada através da alteração de outro parâmetro; como o incremento de massa do sistema poderá não ser uma solução viável, uma outra opção é o aumento do comprimento B (se possível). A parcela associada ao amortecimento, função de δ , é assim importante nos casos onde seja necessário reduzir a energia do movimento e garantir o correto funcionamento do sistema TLCD.

3.4 Dimensionamento do sistema TLCD

Conhecidas as equações que definem o problema e a forma como os parâmetros do sistema de controlo influenciam a resposta estrutural, é então dimensionado o sistema TLCD para o pórtico. Esse dimensionamento tem como objetivo, unicamente, a diminuição das acelerações horizontais do pórtico. Ou seja, o deslocamento da coluna líquida, que em certos casos reais é condicionante, não terá qualquer influência na escolha dos parâmetros.

Procedimento e fundamentos do dimensionamento

O procedimento é feito através de iterações, que consistiram na variação individual de cada um dos parâmetros na procura da solução mais viável para o pórtico, tendo em consideração as suas dimensões físicas. As várias iterações são realizadas no programa de cálculo automático através do sistema de equações (3.26) e o dimensionamento do sistema TLCD teve em conta os seguintes fundamentos³:

- Pretende-se, como dito anteriormente, a solução que mais reduz as acelerações horizontais do pórtico;
- A escolha do líquido a usar está relacionada com a influência que a sua densidade tem nas características físicas do sistema e na resposta estrutural;
- O diâmetro de dimensionamento é influenciado pelos diâmetros comerciais de acrílicos disponíveis. No entanto, não deverá ser muito reduzido pois

³Importa relembrar que são calculadas as características da coluna líquida e não as dimensões do reservatório. Por exemplo, o diâmetro resultante do cálculo corresponde não ao diâmetro do tubo, mas sim ao da coluna de líquido (ou correspondente diâmetro interno do tubo).

as forças resistentes geradas devido à viscosidade do líquido podem condicionar o correto funcionamento do sistema. Em diâmetros pequenos, como essas forças são contrárias ao sentido do escoamento, a frequência do sistema TLCD pode ser alterada, deixando-o dessintonizado. Estes fenómenos da hidráulica, por não serem tidos em consideração no sistema de equações, não deverão ter valores significativos ao ponto de condicionar o correto funcionamento do TLCD durante o ensaio experimental. Logo, após dimensionado o diâmetro do sistema, é então verificado experimentalmente se o escoamento do líquido no tubo é muito afetado;

- O tipo de sistema passivo em causa é especialmente eficiente para situações onde a estrutura é excitada em ressonância [25], logo na procura dos parâmetros ideais (e correspondente dimensionamento) a solicitação base introduzida no sistema de equações corresponde à excitação harmónica (com frequência igual à frequência própria do pórtico sem TLCD). É assim esperado que as maiores reduções de aceleração estejam associadas a este ensaio;
- Tratando-se da simulação de uma estrutura real, pretende-se que a massa do sistema seja a menor possível. Na prática corresponderia a uma solução mais económica e que requer menos espaço físico;
- Como as referências bibliográficas consultadas indicam que aplicações reais destes sistemas podem alcançar reduções de acelerações na ordem dos 50% [22, 25], procura-se então uma solução que permita ao pórtico ter diminuições de resposta semelhantes;
- Concluiu-se, através do estudo paramétrico, que o parâmetro α deverá ser tanto maior quanto possível; no entanto, pretende-se que o sistema TLCD não ultrapasse os limites do piso, logo o seu valor será condicionado por esse comprimento.

Características do sistema TLCD dimensionado

Tomando a água como líquido do sistema e definidos os seus parâmetros, do dimensionamento resultaram os valores representados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros e características do sistema TLCD instalado no pórtico.

Parâmetro	Valor considerado	Característica	Valor de cálculo
Ω	1	L	79,0 cm
μ	3,3%	D	0,7 cm
α	36,0%	B	28,5 cm
δ	0,17	A_o	$A_o = A = 0,4 \text{ cm}^2$

Devido ao reduzido valor do parâmetro α , as colunas líquidas terão maior comprimento (aproximadamente 25 cm) e por isso, à partida, considera-se válida

a condição relativa a y_{max} . Dos resultados do ensaio experimental observaram-se deslocamentos que não ultrapassaram os 5 cm e, como:

$$y_{max} \leq \frac{L(1 - \alpha)}{2} = \frac{79(1 - 0,36)}{2} = 25,3 \text{ cm} \quad (3.29)$$

, torna-se então válido o sistema de equações (3.26) e não é posto em causa o correto funcionamento do sistema.

Verificação da condição de encurvadura dos pilares

Para estas características, a massa do sistema TLCD⁴ e do reservatório⁵ tomam os valores dados na Tabela 3.5. Falta agora verificar se este dimensionamento verifica a condição imposta anteriormente relativa à encurvadura dos pilares.

Tabela 3.5: Massa do sistema TLCD e do reservatório.

Elemento	Massa (kg)
Sistema TLCD	0,040
Reservatório	0,086

Como mostrado na Equação (3.9), a massa do sistema TLCD mais o respetivo reservatório não pode ultrapassar os 0,815kg. Como:

$$0,086 + 0,040 = 0,126 < 0,815 \text{ kg} \quad (3.30)$$

, então essa condição é verificada, ou seja, os pilares não encurvam após instalação do reservatório e colocação da água no seu interior.

Influência da massa adicional na frequência própria do pórtico

Como se concluiu do estudo paramétrico, a redução da resposta da estrutura será tanto maior quanto maior a massa do TLCD. No entanto, numa aplicação prática desta dimensão, qualquer incremento de massa influenciará a frequência própria do pórtico. Se a massa do sistema de controlo tiver um valor elevado, o TLCD é dimensionado para uma frequência que será alterada quando for instalado. Ou seja, o TLCD deixará de ter a mesma frequência que a estrutura,

⁴Para que fosse possível a montagem dos elementos, foi necessário que os "cotovelos" e válvula tivessem um diâmetro ligeiramente superior ao do tubo. Devido ao ligeiro alargamento nesses segmentos, a massa do sistema TLCD (e correspondente massa de água) corresponderá, não à resultante do cálculo direto (0,031kg), mas sim à massa medida na balança digital que se apresenta na tabela.

⁵A massa do reservatório corresponde à massa total do tudo de acrílico, aos dois "cotovelos" de plástico e à válvula instalada no troço horizontal. A medição, tal como para os restantes constituintes, é realizada na balança digital presente no laboratório.

implicando que não sejam excitados em ressonância para a mesma frequência excitadora. Nesta situação, a eficiência do sistema de controlo na redução da resposta é baixa porque a força de controlo gerada pela oscilação da água não está sintonizada com o movimento do pórtico. Foi por esta razão, e a fim de não alterar significativamente a frequência própria da estrutura, que anteriormente considerou-se que o reservatório fazia parte da estrutura. Desta forma, o pórtico sem TLCD corresponderia ao pórtico com o reservatório e o pórtico com TLCD a esses dois mais a massa da água⁶.

Com o objetivo de conhecer a influência que o reservatório e, posteriormente, a água tiveram na frequência do pórtico, esta foi determinada para mais três situações: modelo correspondente apenas ao pórtico e modelo com TLCD. No ensaio com o sistema TLCD foram consideradas duas situações: na primeira a válvula foi fechada ($A_o = 0$), o que significa que o sistema se encontrava inativo e apenas contribui na massa do GDL; a segunda correspondeu à abertura completa da válvula, ou seja, com o sistema TLCD a funcionar com as características com que foi dimensionado. Realizando os ensaios experimentais, através da sua resposta e analogamente ao procedimento anteriormente realizado, foram determinadas as frequências através do algoritmo FFT (Figura 3.12, Figura 3.13 e 3.14). Os resultados são os apresentados na seguinte tabela:

Tabela 3.6: Comparação das frequências próprias.

Resultados	Pórtico	Pórtico reservatório e água com $A_o = 0$	Pórtico reservatório e água com $A_o = A$
Numéricos	0,8355 Hz	0,7764 Hz	0,7927 Hz e 0,7932 Hz
Experimentais	0,8392 Hz	0,7782 Hz	0,7935 Hz (*)
(*) Deveriam resultar duas frequências muito próximas (como se pode verificar dos resultados numéricos) no entanto, a resolução da análise e precisão de Fourier no sinal registado só permitiu identificar de forma clara a frequência representada.			

Como se pode verificar foi relevante considerar o reservatório como parte da estrutura porque, caso contrário, o sistema seria dimensionado para uma frequência que, após a sua instalação, não seria a mesma. Em vez disso, a instalação do sistema TLCD, correspondente à introdução da água no reservatório, não altera de forma significativa a frequência própria do modelo e, desta forma, encontra-se sintonizado com o modo de vibração que se pretende controlar (relembrar secção 3.1.1 e 3.2 onde a frequência experimental e numérica do modelo sem TLCD é 0,7935 Hz e 0,7930 Hz, respetivamente).

Ainda a salientar que os resultados numéricos são relativamente próximos aos experimentais. Por esta razão, à partida as características do modelo estão bem caracterizadas na modelação, garantindo uma análise e estudo mais fiáveis sobre a eficiência do sistema TLCD no pórtico.

⁶Note-se que numa estrutura à escala real, a influência da massa passiva de um sistema TLCD na massa total da estrutura é muito reduzida.

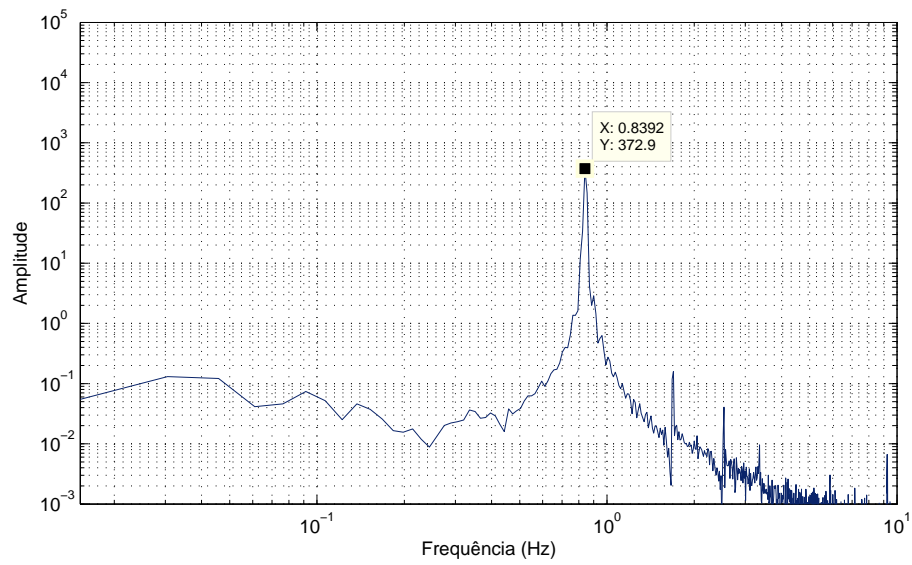


Figura 3.12: Transformada de Fourier correspondente ao ensaio experimental excitação harmônica do pórtico sem reservatório.

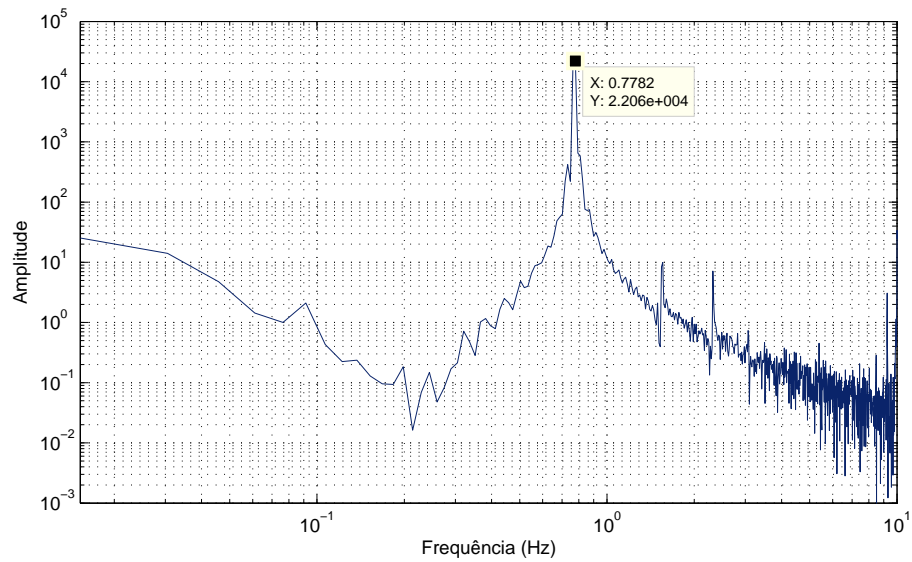


Figura 3.13: Transformada de Fourier correspondente ao ensaio experimental excitação harmônica do pórtico com reservatório e sistema TLCD com ($A_o = 0$).

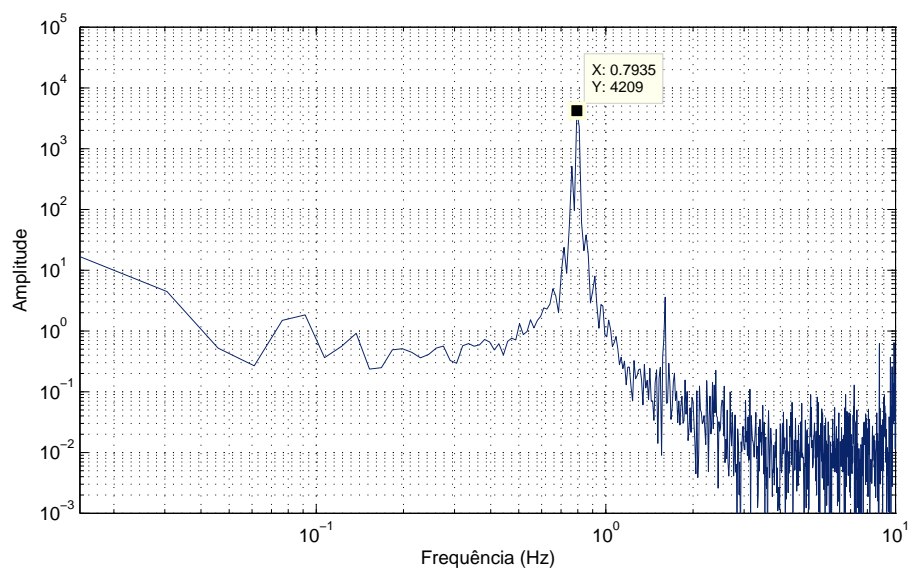


Figura 3.14: Transformada de Fourier correspondente ao ensaio experimental excitação harmônica do pórtico com reservatório e sistema TLCD com ($A_o = A$).

Capítulo 4

Análise e comparação de resultados

Neste capítulo são apresentados e comparados os resultados do comportamento do pórtico sem e com sistema de controlo TLCD. A sua eficiência é verificada através dos resultados obtidos no ensaio experimental e faz-se ainda uma comparação dos valores obtidos da leitura do acelerómetro com os determinados da simulação numérica, a fim de verificar a validade do sistema de equações que define a situação em causa. Para o efeito serão apresentados dois gráficos referentes às mesmas condições de excitação sem e com sistema TLCD: o primeiro que corresponde aos resultados numéricos determinados a partir do sistema de equações diferenciais e o segundo ao sinal registado pelo aparelho de leitura durante o ensaio.

Relativamente aos fenómenos hidráulicos que ocorrem durante a oscilação do líquido, procurou-se que o diâmetro do reservatório não tivesse influência na frequência desse movimento. Através das verificações feitas em laboratório, à partida a viscosidade da água e as forças de atrito desenvolvidas na parede do tubo não são condicionantes. No entanto, no modelo real estas acabam sempre por existir, por mais reduzidas que sejam. Tal situação aliada ao fato de o dimensionamento das características do TLCD resultar da resolução das duas equações diferenciais que não consideram as imperfeições dos materiais e das ligações, e estando o coeficiente δ presente numa das equações (que é obtido experimentalmente [24]), implicará que exista sempre um erro associado que fará os resultados numéricos nunca serem perfeitamente iguais aos experimentais.

4.1 Excitação harmónica

Como referido, estudos indicam que este sistema é especialmente eficiente no controlo de vibrações onde a estrutura principal é excitada em ressonância e, por essa razão, foi dimensionado para esta excitação. A fim de validar o sistema de equações e o método de integração utilizado, inicialmente é feita uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais e, seguidamente, através dos

valores obtidos pelo registo do acelerómetro, avaliada a eficiência do sistema TLCD na redução da resposta do modelo experimental.

4.1.1 Simulação numérica e ensaio experimental

No sistema de equações introduz-se então uma aceleração de base harmónica com frequência igual à frequência do modo de vibração que se pretende controlar:

$$\ddot{x}_g = \ddot{x}_{g0} \sin(\omega_f t) \quad , \text{ em que:} \quad (4.1)$$

$$\omega_f = \omega_s = 0,79 \text{ Hz} = 4,98 \text{ rad/s} \quad \text{e} \quad \ddot{x}_{g0} = 0,07 \text{ m/s}^2 \quad (4.2)$$

Os resultados obtidos da integração do sistema de equações diferenciais em MATLAB são os seguintes:

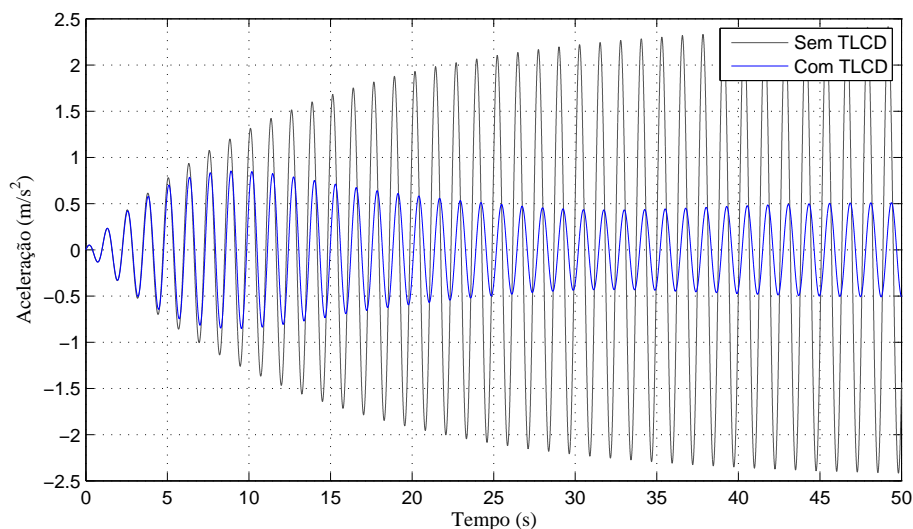


Figura 4.1: Simulação da resposta estrutural do pórtico quando excitado em ressonância por uma aceleração de base harmónica.

Instalado o pórtico na mesa sísmica é realizado o ensaio sem e com sistema TLCD. Da leitura do acelerómetro instalado ao nível do piso, resultaram as acelerações representadas no gráfico:

4.1.2 Conclusões

Observando os gráficos conclui-se que as equações definem corretamente o problema. A variação das acelerações com e sem sistema TLCD na simulação e ensaio experimental é semelhante, inclusive nos instantes iniciais onde a estrutura e o sistema encontram-se a entrar em ressonância até, aproximadamente, aos 25 segundos. No entanto, os valores numéricos e experimentais para as amplitudes

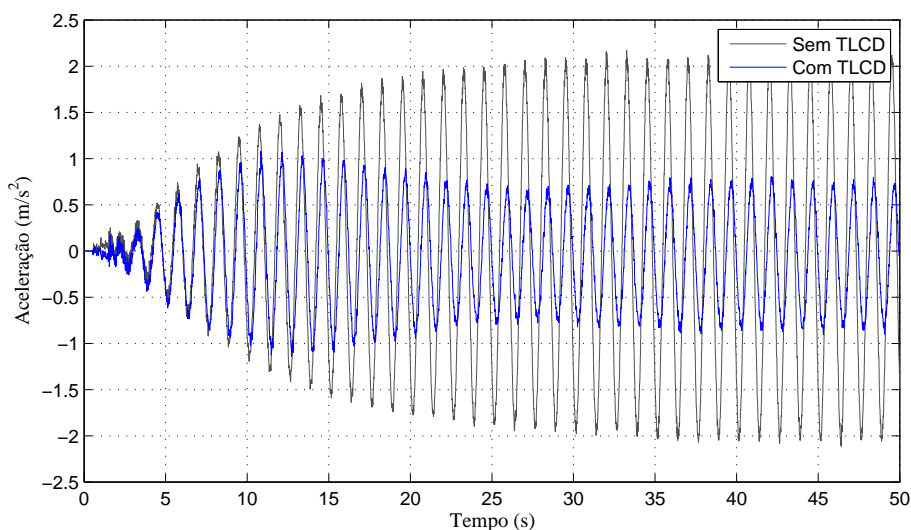


Figura 4.2: Resposta estrutural do pórtico quando excitado em ressonância por uma aceleração de base harmónica.

máximas variam na ordem dos 10% para o modelo sem controlo e 30% para o modelo com sistema de controlo. Tais diferenças devem-se às razões referidas anteriormente: imperfeições dos materiais e das ligações e fenómenos hidráulicos existentes que não são tidos em conta na simulação.

A diferença do último caso já seria de esperar. Como referido anteriormente, a viscosidade da água para um diâmetro de tubo de 7 mm acaba por ser condicionante, na medida em que diminui a frequência própria do TLCD; não estando perfeitamente sintonizado com a estrutura principal, a sua eficiência é tanto menor quanto maior a diferença entre frequências. Por estas razões a redução das acelerações no ensaio é inferior ao que seria esperado da simulação.

Para os primeiros segundos da excitação, o sistema não contribui de forma significativa na redução da resposta. Tal situação diz respeito à força de controlo (associada ao movimento do líquido) não ser a ideal. Ou seja, não estando o sistema sintonizado para aquela ordem de frequências, a sua contribuição é pouco ou nada significativa. Quando em ressonância, a coluna líquida move-se a maior velocidade e a força de inércia gerada, agora com maior valor, contraria de forma ideal o deslocamento ao nível do GDL, conferindo o desejado amortecimento.

Outro resultado observado é a diminuição do gradiente das acelerações quando o modelo possui o sistema TLCD instalado. Constitui uma característica e resultado importante em termos práticos pois o corpo humano é sensível não à velocidade, mas sim à sua variação, ou seja, à aceleração. São as oscilações de aceleração num maior período de tempo que permitem um maior conforto aos ocupantes do edifício.

Relativamente ao ensaio propriamente dito e ao estudo do sistema TLCD na redução das acelerações do modelo, observa-se que para a estrutura desprovida de qualquer tipo de controlo, quando em ressonância, possui acelerações máximas de $2,0 \text{ m/s}^2$ (aproximadamente). Após colocada a água, e nas mesmas condições que as anteriores, essas acelerações diminuem para valores na ordem dos $0,8 \text{ m/s}^2$, verificando-se assim reduções superiores a 60%. Note-se que este valor está associado à estrutura e sistema TLCD ambos em ressonância, ou seja, após os 25 segundos iniciais. Verifica-se então que, mesmo não estando perfeitamente sintonizado como acontece na simulação numérica (onde se atingem reduções de 80%), constitui uma solução muito eficaz no controlo deste tipo de excitação.

4.2 Vibração em regime livre

O ensaio em regime livre consistiu na imposição de um deslocamento inicial e de seguida deixado o sistema a vibrar livremente. Na simulação numérica considera-se a respetiva ação na resolução do sistema de equações sem e com TLCD, ou seja, as condições iniciais são exatamente as mesmas nas duas situações. Contudo no ensaio prático isso não acontece. O modelo instalado na mesa sísmica é também sujeito a um deslocamento inicial (ao nível do GDL) mas, como é imposto manualmente, existe sempre uma diferença nessas duas situações. No entanto, como se pode observar no gráfico correspondente ao registo do acelerómetro, essa diferença é reduzida, podendo assim a eficiência do TLCD ser avaliada corretamente no ensaio experimental.

4.2.1 Simulação numérica e ensaio experimental

Ao modelo experimental foi imposto um deslocamento inicial de 15 cm (aproximadamente). Essa solicitação foi realizada com o auxílio de uma régua graduada, que teve como intuito que as condições iniciais fossem o mais semelhantes possíveis nos ensaios sem e com sistema de controlo. Na modelação numérica, tem-se como condição inicial essa solicitação, sendo nulas as restantes.

$$x_0 = 0,15 \text{ m} \quad (4.3)$$

Os resultados da resposta do pórtico, numéricos e experimentais, são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, repetivamente.

4.2.2 Conclusões

Os instantes iniciais do registo do acelerómetro representados na Figura 4.4, correspondem ao período de aplicação da condição inicial. Aplicada essa ação, as acelerações começam com amplitudes máximas de, sensivelmente, 3 m/s^2 e

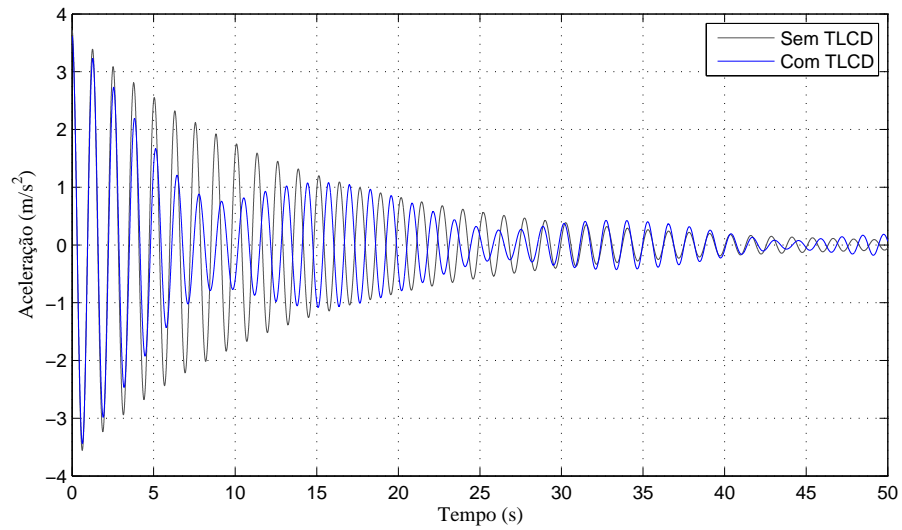


Figura 4.3: Simulação da resposta estrutural do pórtico na situação de vibração em regime livre.

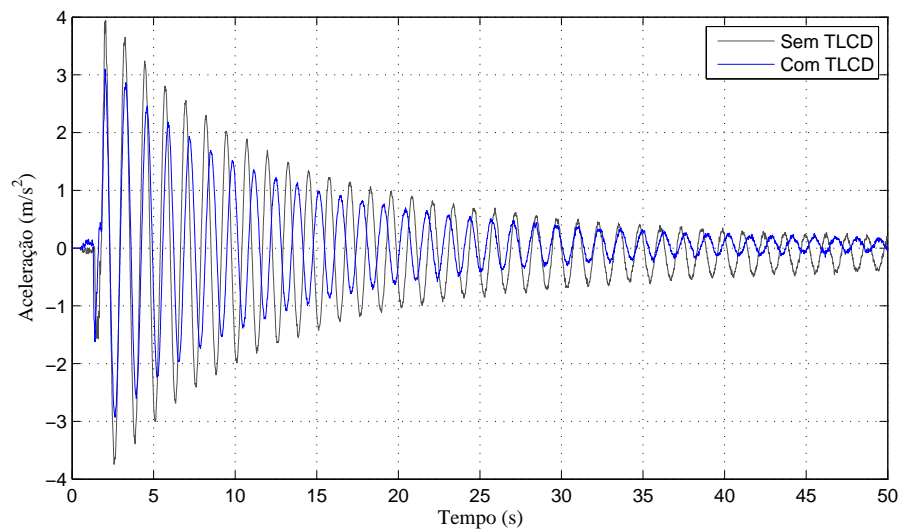


Figura 4.4: Resposta estrutural do pórtico na situação de vibração em regime livre.

4 m/ s² (com e sem TLCD, respetivamente) e é a partir desses valores que será então feita a comparação dos resultados experimentais e numéricos.

Para o modelo sem TLCD verificam-se resultados semelhantes nas duas situações. O amortecimento real introduzido no cálculo numérico demonstra-se aqui ter sido corretamente determinado. A resposta à solicitação é sensivelmente igual, com a exceção de nos instantes finais (já próximo do repouso) se apresentarem com alguma diferença. Também nesses instantes, o registo do acelerómetro é ligeiramente influenciado pelo cabo do acelerómetro e, por essa razão, não se encontra perfeitamente centrado como a resposta simulada.

Seguidamente, quando colocado o TLCD, a diferença demonstrou ser mais significativa. Da resolução do sistema de equações resulta um gráfico de acelerações diferente dos resultados que seriam esperados. Além da diferença relativa aos valores obtidos, nos resultados numéricos verifica-se o fenómeno designado por *beating* devido à proximidade das duas frequências, e que não se observa nos registos experimentais.

Relativamente aos registos experimentais e correspondente análise da eficiência do TLCD, verificou-se que após aplicada a condição inicial, já nos instantes iniciais obtiveram-se as primeiras reduções: próximo dos 2,5 segundos o sistema reduz as acelerações em mais de 20% e com o decorrer do ensaio a sua eficiência vai aumentando. Passados cerca de 10 segundos já se obtêm reduções de quase 30%. Após cerca de 20 segundos, os registos das acelerações deixam de estar centrados, o que não permite uma análise clara sobre a eficiência do sistema. A razão dessa situação é que as acelerações reduzidas do pórtico (já próximo do repouso) acabaram por ser influenciadas pelo cabo que liga o acelerómetro ao computador. Contudo mantém sensivelmente o mesmo nível de redução.

A elevada eficiência verificada na redução da resposta tem a ver com o fato de o pórtico, quando em regime livre, vibrar com uma frequência muito próxima para a qual o sistema de controlo TLCD se encontra dimensionado (relembrar que $\beta \ll 1$).

4.3 Excitação sísmica

Ao modelo instalado na mesa sísmica são impostos os três tipos de sismos e, da mesma forma, analisada a resposta sem e com sistema TLCD. Estes correspondem aos sismos já referidos anteriormente, o sismo de El Centro, Kobe e Northridge. Para a simulação correspondente a essas ações considera-se que a solicitação de base é o vetor correspondente às acelerações medidas em função do tempo pelo acelerómetro (que se encontra ao nível da base durante o ensaio).

Cada ação sísmica é única mas na sua generalidade possuem gradientes de aceleração elevados, como é o caso das aplicadas no modelo. Relativamente à eficiência do sistema TLCD para este tipo de ação dinâmica, à partida são esperadas reduções de resposta inferiores às dos ensaios anteriores. Tal como

a bibliografia consultada indica [25], este tipo de controlo é eficiente para baixas frequências e para controlar as vibrações em situações onde a estrutura é excitada em ressonância. Sabendo então que o princípio do funcionamento do sistema consiste na geração de uma força de inércia resultante da oscilação da coluna líquida, justifica-se que, nos instantes em que ocorrem os maiores abalos, este não contribua de forma significativa para o controlo estrutural. Tais resultados verificam-se nos três ensaios correspondentes aos três sismos. Nos instantes da solitação onde as acelerações e gradientes são mais significativos, a resposta do modelo sem e com controlo é praticamente a mesma.

Em certos instantes a resposta do modelo chega a piorar após instalado o sistema. Isto deve-se ao facto do movimento entre eles não ser desfasado, como se pretende com o seu dimensionamento. A força gerada, em vez de contrária, passa a ter o mesmo sentido que o movimento do GDL implicando, dessa forma, acelerações superiores. Posteriormente a esse abalo, com a estrutura sujeita a acelerações menos significativas, já se verificam reduções correspondentes à ação do sistema TLCD.

4.3.1 Simulação numérica e ensaio experimental

Como se verifica do sistema de equações (3.26) é necessário introduzir a solitação base correspondente a \ddot{x}_g e, neste caso, essa variável corresponde a um vetor. Na base de dados da mesa sísmica encontram-se escalados os sismos e, como referido, é através do registo das acelerações em função do tempo de um acelerómetro instalado na base do pórtico que se obtém esse vetor. Por esta razão, é necessário realizar os ensaios antes de modelar numericamente o comportamento do pórtico sob essas ações.

Realizados os ensaios e obtidos os vetores para os sismos, foi verificado se existe ruído nas gravações do sinal, a partir da análise dos registos do acelerómetro instalado na base da mesa sísmica (Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7). Dessa análise conclui-se que o ruído no registo do sinal não é significativo devido à uniformidade verificada na leitura em todos os ensaios.

Para o ensaio experimental, as leituras efetuadas pelo acelerómetro instalado ao nível do piso são as apresentadas nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

Relativamente à simulação numérica, foi verificada a convergência da solução através da diminuição do passo de cálculo na resolução das equações diferenciais. Para o efeito, iniciou-se com um passo de cálculo igual ao tempo de leitura entre acelerações registadas pelo acelerómetro (0,001 segundos), reduzindo o seu valor até que a aceleração máxima da solução sem e com TLCD fosse convergente. Os resultados da simulação da ação do sistema TLCD na atenuação das acelerações do pórtico são os representados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

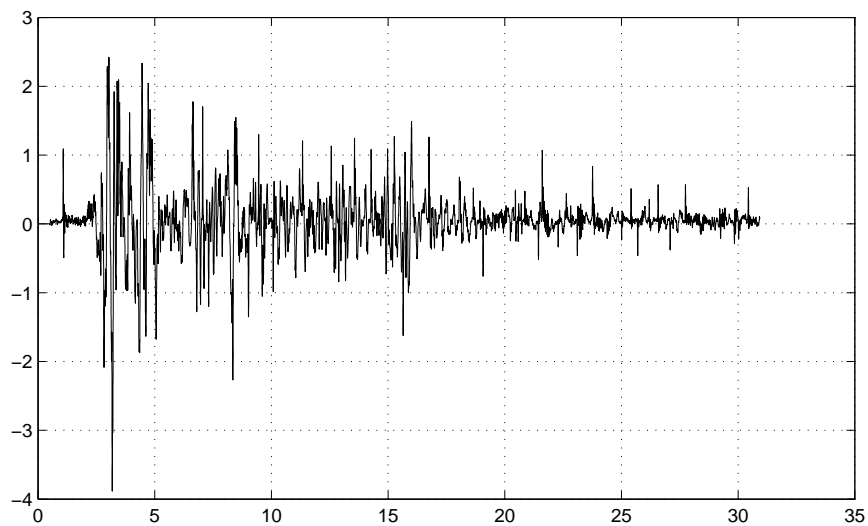


Figura 4.5: Registo das acelerações em função do tempo - Sismo de El Centro.

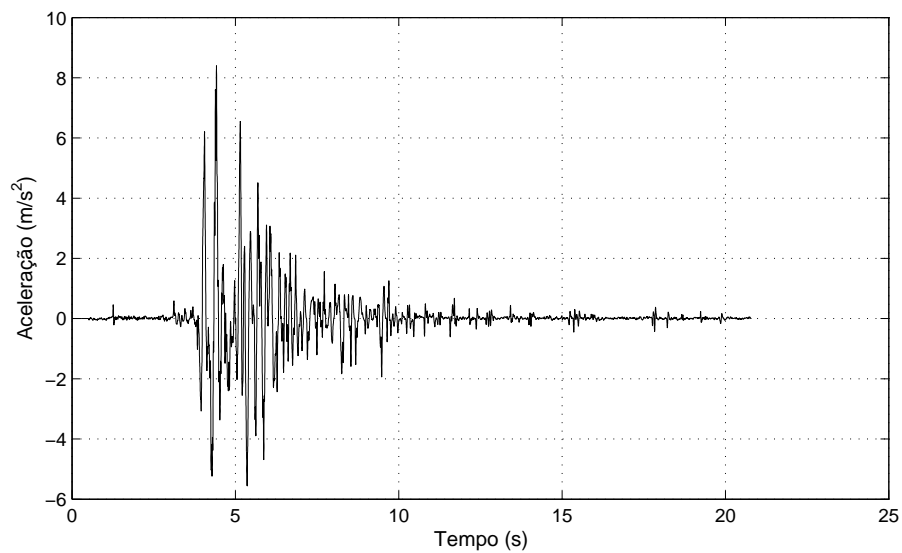


Figura 4.6: Registo das acelerações em função do tempo - Sismo de Kobe.

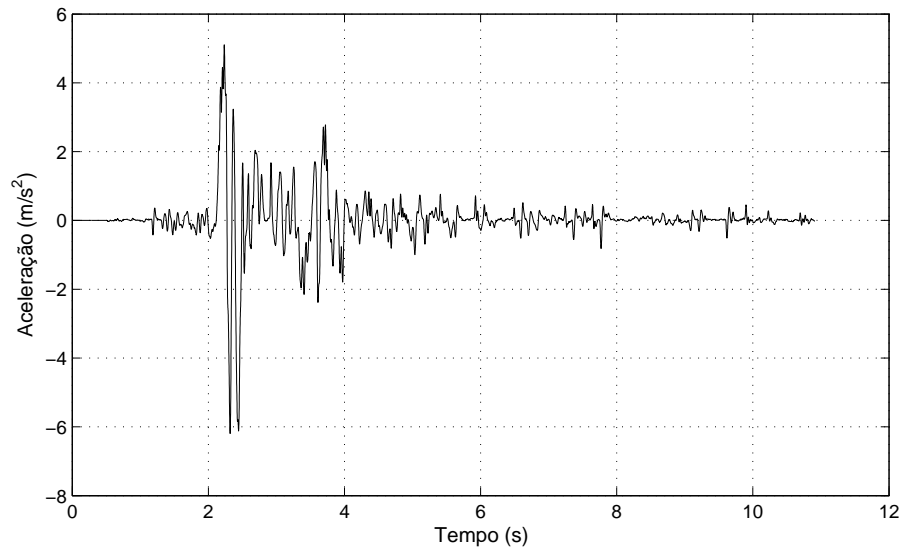


Figura 4.7: Registro das acelerações em função do tempo - Sismo de Northridge.

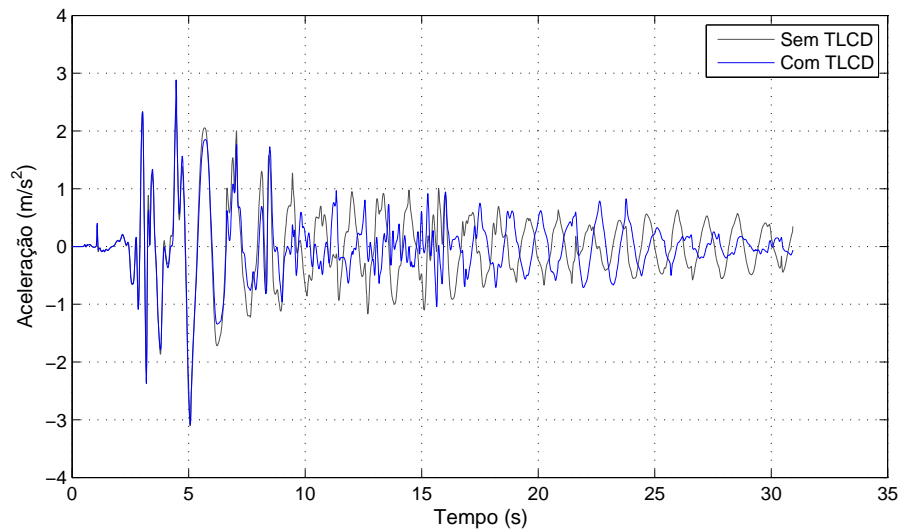


Figura 4.8: Simulação da resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de El Centro.

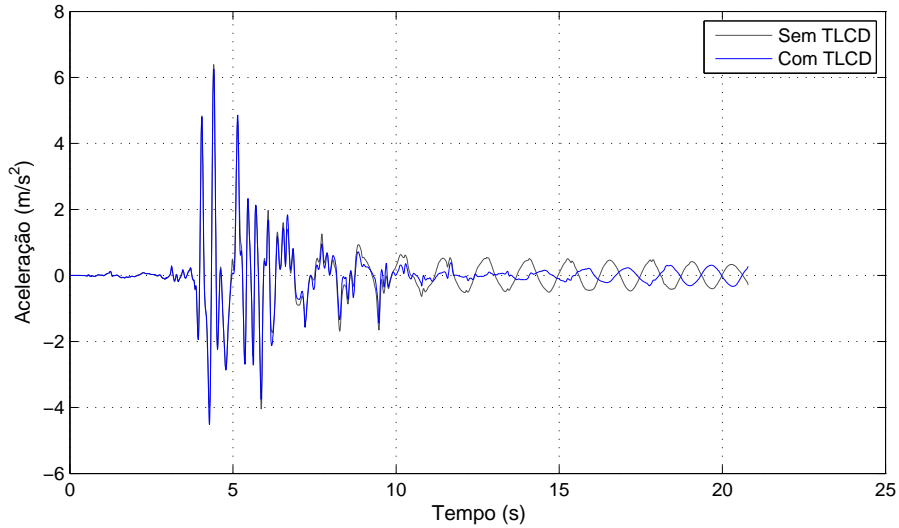


Figura 4.9: Simulação da resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de Kobe.

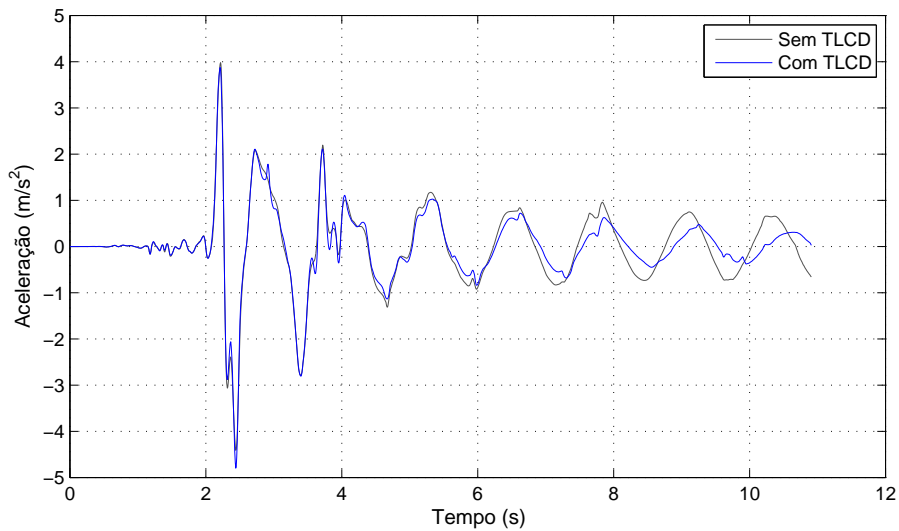


Figura 4.10: Simulação da resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de Northridge.

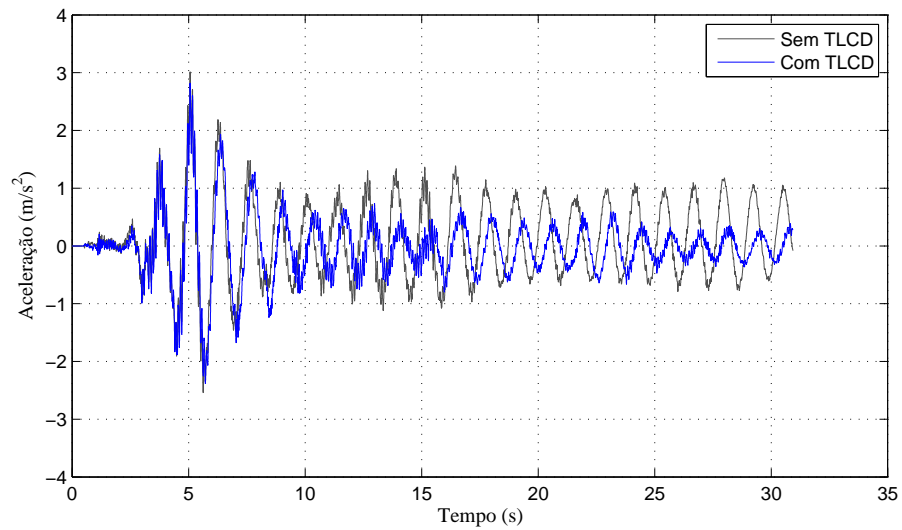


Figura 4.11: Resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sísmico de El Centro.

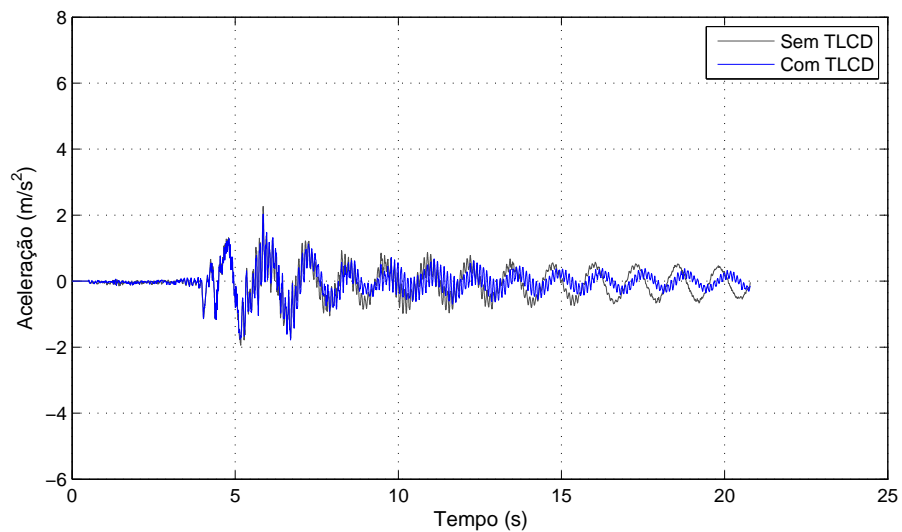


Figura 4.12: Resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sísmico de Kobe.

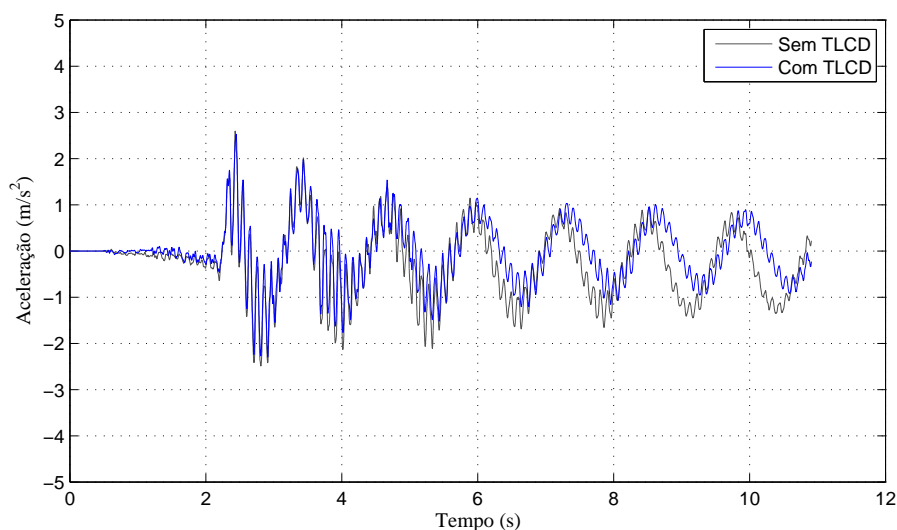


Figura 4.13: Resposta estrutural do pórtico para a aceleração de base sismo de Northridge.

4.3.2 Conclusões

As conclusões relativas às excitações sísmicas associadas à diferença entre resultados numéricos e experimentais foram semelhantes para os 3 tipos de sismos. As mais significativas verificam-se nos instantes iniciais do sismo de Kobe e Northridge. Após essas acelerações de base mais condicionantes nos instantes iniciais, a diferença passa a ser menor e, agora sob acelerações mais baixas, o comportamento numérico do modelo sem e com TLCD aproxima-se do experimental. Para o sismo de El Centro, as amplitudes máximas das acelerações numéricas não se afastam muito das medidas pelo acelerómetro, isto durante o intervalo de tempo onde os gradientes do sismo são mais elevados.

No entanto, a principal diferença é entre o comportamento numérico e experimental do modelo. Por se tratar de um modelo reduzido determinados fatores poderão ter sido condicionantes e influenciadores dessa discrepância, tais como: problemas de escala, fenómenos hidráulicos não tidos em conta no sistema de equações (tais como as tensões superficiais no líquido), o método numérico e a influência do cabo nas acelerações do piso durante o registo do sinal.

Em relação aos resultados experimentais e respetiva análise da eficiência do sistema TLCD, após as solicitações mais condicionantes dos 3 sismos, com o modelo a vibrar sob acelerações de base menores, verificou-se de forma clara a ação do sistema de controlo na redução da sua resposta dinâmica. Os níveis de redução e principais conclusões são referidas seguidamente para cada ação sísmica.

Sismo de El Centro

Da análise dos resultados obtidos da simulação e ensaio experimental obtêm-se semelhantes conclusões. O modelo sem e com sistema de controlo apresenta praticamente a mesma resposta nos momentos iniciais (onde as acelerações são significativas) e só depois começa-se a verificar indícios da redução da resposta estrutural.

Da comparação dos resultados experimentais do modelo sem e com sistema TLCD verifica-se que dos 3 aos 7 segundos (aproximadamente), apesar das acelerações serem semelhantes, o sistema TLCD chega a aumentar as acelerações ao nível do GDL. Só depois desse abalo e já sujeito a menores valores de aceleração de base, é que se verificam significativas reduções na resposta do pórtico.

Os registos não se encontram perfeitamente centrados mas é visível a redução da resposta a partir dos 10 segundos. Agora a vibrar sob ações dinâmicas menos condicionantes, atingem-se reduções superiores a 60%. Note-se que esta ordem de grandeza é semelhante à do ensaio onde o modelo é excitado em ressonância. O que se pode concluir é que, nesse intervalo de tempo, a estrutura encontrava-se excitada com frequências próximas à sua frequência própria (situação para a qual o sistema foi dimensionado).

Sismo de Kobe

O segundo ensaio diz respeito à ação do sismo de Kobe no modelo. Este corresponde à situação onde se identificam as maiores diferenças entre resultados numéricos e experimentais. Verifica-se que, enquanto as acelerações máximas registadas pelo acelerómetro são na ordem dos 2 m/s^2 , as resultantes do sistema de equações atingem valores superiores a 8 m/s^2 . Esta discrepância acontece nos instantes iniciais onde o gradiente das acelerações é elevado e desvanece com o decorrer do tempo. Decorridos sensivelmente 10 segundos, à exceção das singularidades resultantes da integração, os resultados numéricos apresentam valores bastante próximos dos experimentais para o modelo sem e com controlo.

Conclusões semelhantes ao ensaio anterior se tiram deste caso. Nos instantes iniciais onde ocorre o abalo mais forte, aproximadamente dos 4 aos 7 segundos, o sistema TLCD chega a piorar a resposta do modelo à solicitação. Pelo facto da excitação ter uma frequência diferente da qual o sistema foi dimensionado resultam valores de aceleração ligeiramente superiores. Tal como referido, a não sintonização do sistema com o GDL que se pretende controlar na estrutura poderá não surtir efeito na redução da resposta ou até mesmo piorar.

Decorridos cerca de 7 segundos, começa a ser visível a ação do TLCD. A vibração do modelo quando oscila sob acelerações mais reduzidas, possui uma frequência mais próxima da frequência própria do modelo (e correspondente à qual o sistema foi dimensionado). Nessa situação são alcançadas reduções de aceleração na ordem dos 35% e, tal como no caso anterior, a variação de acelerações passa a

acontecer num maior período de tempo, ou seja, o seu gradiente é menor quando o pórtico tem sistema de controlo.

Sismo de Northridge

Por último o modelo é sujeito ao sismo de Northridge. Relativamente à comparação da simulação com o ensaio, verifica-se, tal como nos casos anteriores, uma diferença mais significativa para os instantes iniciais onde as acelerações induzidas são mais elevadas. Posteriormente a esses instantes, os resultados numéricos aproximam-se mais dos registados pelo acelerómetro instalado ao nível do piso, à exceção das singularidades que resultam do programa de cálculo.

As conclusões retiradas deste ensaio experimental relativamente à resposta da estrutura, são análogas aos ensaios dos sismos anteriores. Nos segundos iniciais, onde ocorrem as acelerações mais condicionantes, o sistema TLCD não possui uma contribuição significativa no controlo mas, ao contrário do que aconteceu nos outros casos, não piorou a sua resposta. As razões deste reduzido amortecimento são as mesmas para a situação do sismo como aceleração de base: a água do sistema encontra-se em repouso no momento do abalo e, pelo facto da força gerada pela sua oscilação ser inexistente, não há oposição ao movimento do GDL. Além disso, as frequências altas durante esses instantes estão longe daquela com que foi dimensionado o sistema.

Apesar dos gráficos não estarem perfeitamente centrados, depois dos 5 segundos começam a observar-se os primeiros sinais de redução. Agora sob reduzidas acelerações e a oscilar com uma frequência mais baixa e próxima à do sistema, são atingidas reduções na ordem dos 30%.

Capítulo 5

Considerações finais e propostas para trabalhos futuros

5.1 Conclusões e considerações finais

Apesar de muitos dos sistemas de controlo existentes na atualidade serem bastante eficientes na redução de resposta estrutural, muitos deles não têm sido utilizados por diversas razões, tais como: questões arquitetónicas, impossibilidade de serem adaptados nas zonas de componentes modais máximas, ou simplesmente por não ser fisicamente viável a sua instalação na estrutura. Por estes e outros motivos tem-se privilegiado sistemas de atuação inerciais, como por exemplo o sistema TLCD. A sua eficiência, a possibilidade das suas características de controlo poderem ser ajustadas à medida que a frequência própria da estrutura se altera ao longo dos anos e o facto de facilmente serem camuflados no seu interior, entre outras vantagens também já descritas anteriormente, torna este tipo de soluções bastante apelativas no controlo de vibrações em estruturas.

O estudo paramétrico elaborado, permitiu ganhar uma certa sensibilidade em relação aos parâmetros associados ao dimensionamento deste tipo de sistemas de controlo e da influência destes na resposta estrutural. As principais conclusões foram:

- A razão entre as frequências deve ser o mais próximo de um. Deste modo, quando a estrutura é excitada em ressonância, o sistema TLCD também será e o controlo da vibração é feito pelo movimento desfasado. Como verificado no estudo paramétrico, tomando esse valor, obtém-se a menor resposta dinâmica;
- Quanto mais elevada a massa do sistema TLCD, mais será a resposta dinâmica e, conseqüentemente, maior o amortecimento conferido à estrutura. No entanto, quanto maior for essa massa, além do incremento de peso na estrutura, maior o espaço físico necessário para a instalação do sistema;

- A razão entre o comprimento do trecho horizontal e o comprimento total de líquido, desde que seja obedecida a condição de permanência de líquido nos trechos verticais do reservatório e permanecendo constante o valor de L , deverá ser apenas condicionado pelo espaço físico disponível no local de instalação e ter o maior valor possível;
- A abertura do orifício está associada à perda de carga hidráulica nessa seção. A perda de carga influencia a velocidade que o líquido se desloca e o amortecimento conferido. Concluiu-se que quanto maior abertura do orifício, maior o amortecimento garantido pelo sistema TLCD, logo menor a resposta dinâmica da estrutura. No entanto, em situações onde os deslocamentos da coluna líquida são elevados, a fim de não por em causa o correto funcionamento do sistema, uma das soluções é a diminuição dessa abertura.

Assim, quando os TLCDs são devidamente sintonizados com a estrutura, quanto maior o comprimento horizontal do líquido e massa do sistema, maior é a redução das acelerações.

Contudo, as principais conclusões obtêm-se do exemplo de aplicação. A simulação numérica da resposta do modelo sob as diferentes ações dinâmicas e o respetivo ensaio experimental permitiu tirar as seguintes conclusões:

- O estudo demonstrou que o desempenho deste sistema na redução da resposta dinâmica de uma estrutura é dependente das características de excitação e, como seria de esperar, as maiores reduções de resposta corresponderam ao caso em que o sistema TLCD foi instalado para controlar a solicitação harmónica. Do ensaio experimental verificou-se que, com uma massa de 3,3% da massa do GDL correspondente ao modo de vibração a controlar, são atingidas diminuições de aceleração na ordem dos 60%. Conclui-se assim que se trata de uma solução bastante eficiente no controlo de vibrações em situações onde a estrutura principal é excitada em ressonância. Além disso, diminui o gradiente das acelerações, o que constitui um objetivo importante numa aplicação real. No entanto, trata-se de uma redução significativa também devido ao facto de a frequência própria do pórtico ser menor que 1 Hz e, desta forma, estarem reunidas as condições ideais para a aplicação deste sistema de amortecimento. Ainda a referir que esse valor de redução é significativo, mas também só alcançado quando o modelo e sistema TLCD se encontram em ressonância; note-se que nos instantes iniciais pouco ou nada contribui no controlo da resposta dinâmica;
- A eficiência do sistema é tanto maior quanto mais próxima estiver a frequência dessa vibração e a frequência para o qual o sistema foi dimensionado. Como se pode verificar da análise anteriormente feita, no ensaio correspondente ao Sismo de El Centro e Sismo de Kobe, apesar do sistema TLCD não se encontrar diretamente dimensionado para esse tipo de ação, são alcançadas reduções de 60% e 35%, respetivamente. Pode-se

concluir que o sistema TLCD apenas opera de forma eficaz para a sua frequência própria ou para valores próximos desta;

- Dos ensaios onde as solicitações correspondiam aos sismos, demonstrou-se o referido na descrição do modelo: se o sistema de amortecimento não estiver sintonizado para a excitação imposta à estrutura principal, este poderá piorar a sua resposta dinâmica. Essa situação acontece para o ensaio do Sismo de El Centro e Sismo de Kobe, em que se verifica um aumento da aceleração máxima do modelo com sistema TLCD. Contudo, se se tiver em conta a forma como o sistema opera à partida compreende-se o porquê desse efeito. Após esse abalo, o TLCD já apresenta uma considerável contribuição na redução da resposta pois a estrutura oscila com uma frequência próxima à do modo de vibração que se pretende controlar e para a qual se dimensionou o sistema;
- Não se trata de um sistema capaz de proteger uma estrutura para sismos de grande intensidade. Da análise dos gráficos correspondentes à sujeição do modelo a ações sísmicas, verificou-se que quando acontecem as principais e mais gravosas acelerações de base, o sistema em nada contribui para a diminuição das acelerações da estrutura. Como se pode concluir do apanhado feito na secção 2.2.2, este tipo de ações exigem outro tipo de soluções mais adequadas, tanto ativas como passivas. No entanto, mantendo o sistema TLCD, uma solução híbrida talvez fosse o ideal (por exemplo com um isolamento base).

As principais situações onde este tipo de sistema passivo deverá ser aplicado dizem então respeito a casos onde a estrutura principal possui uma frequência baixa e está sujeita a ações que impliquem a sua vibração em ressonância. O estudo efetuado permitiu então reforçar o que vem indicado no estado da arte referente aos sistemas TLCD: as principais aplicações desta solução dizem respeito a edifícios altos onde o vento é condicionante, ou seja, frequências de excitação baixas. Como exemplo têm-se os "arranha-céus" onde o vento é uma ação condicionante; com a diminuição das acelerações máximas é conferido um maior conforto aos ocupantes desse edifício [29].

De um modo geral, pode-se concluir que o sistema de equações define corretamente o problema, apesar das duas equações não contabilizarem determinados fenómenos hidráulicos, como as perdas de carga hidráulica continuas no movimento do líquido no reservatório. Os valores e comportamento da estrutura foram semelhantes, à exceção dos instantes iniciais dos sismos (onde as acelerações impostas no modelo possuíam gradientes elevados) e da vibração livre do modelo com TLCD. Acontece que, para um reservatório com um diâmetro interno de 7 mm, as tesões superficiais e forças de atrito desenvolvidas na oscilação da água poderão ter influenciado a frequência própria do sistema. Também os problemas de escala, as imperfeições dos materiais e ligações poderão ter tido alguma influência nos resultados. A não contabilização desses

fenómenos e particularidades acabam por implicar que os valores numéricos não sejam iguais aos experimentais, como se pôde constatar da Tabela 3.6. A eficiência experimental (ou real) do sistema TLCD acaba por ser inferior à resultante da simulação onde a frequência do sistema se encontra perfeitamente sintonizada com a do pórtico.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

Tendo em conta os conhecimentos e experiência adquiridos na realização da análise experimental e numérica, propõe-se então:

- A contabilização dos fenómenos hidráulicos no TLCD, desenvolvendo um novo sistema de equações que contabilizasse as tensões superficiais, viscosidade e forças de atrito desenvolvidas durante a oscilação do líquido (função do material das paredes do reservatório). Assim, através de um modelo matemático dentro da Teoria da Mecânica de Fluidos, a modelação do problema seria mais próxima da realidade e o sistema mais preciso no controlo da resposta dinâmica da estrutura;
- A resolução do sistema de equações através de outros métodos numéricos, testando a sua proximidade com os resultados experimentais;
- A realização dos mesmos ensaios mas com um acelerómetro de leitura *wireless*, pois durante os ensaios realizados na dissertação, o cabo que liga o aparelho ao sistema de aquisição de dados da mesa sísmica, acabou por ter influência no registo das acelerações;
- O estudo desta solução juntamente com outros tipos de controlo que permitissem suprimir a sua principal limitação relacionada com a sua incapacidade em responder instantaneamente à solicitação. Por exemplo, a aplicação de um isolamento base reduzia os deslocamentos iniciais da estrutura e posteriormente o controlo ficaria assegurado pelo sistema TLCD;
- Mantendo as mesmas características dinâmicas, analisar diferentes soluções de troços de reservatório com áreas de secção horizontal e vertical diferentes, com o objetivo de, com uma solução mais económica, obterem-se os mesmos níveis de redução;
- A instrução pedagógica e o desenvolvimento de novos estudos associados a esta solução no laboratório de sísmica da Faculdade, onde permanecerá o modelo experimental. Uma ficha técnica do funcionamento do sistema TLCD (Anexo C) será também fornecida a esta instituição e, através de outros elementos ou sistemas de controlo presentes nesse laboratório, poderão ser realizados novos ensaios associados à temática do controlo de vibrações estruturais (por exemplo, elaborar os mesmos ensaios desta dissertação mas com o pórtico assente num terreno que simule a interação solo-estrutura e/ou combinar o TLCD com um isolamento base.)

Bibliografia

- [1] Balendra, T., C. M. Wang e H. F. Cheong: *Effectiveness of tuned liquid column dampers for vibration control of towers*. Engineering Structures, 17(9):668 – 675, 1995.
- [2] Banerji, P., M. Murudi, A. H. Shah e N. Popplewell: *Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (29):587 – 602, 2000.
- [3] Bharadwaj, N.: *Application of tuned liquid damper for controlling structural vibration*. Tese de Mestrado, National Institute of Technology, Rourkela, India, Maio 2010.
- [4] Cassolato, M.: *The performance of a tuned liquid damper equipped with inclined and oscillating damping screens*. Tese de Mestrado, The University of Western Ontario [UWO], Ontario, Canada, Maio 2007.
- [5] Center, Pacific Earthquake Engineering Research: *PEER strong motion database*. <http://peer.berkeley.edu/smcat/>. Acesso: 30/07/2012.
- [6] Chaiviriyawong, P., S. Limkatanyu e T. Pinkaew: *Simulations of characteristics of tuned liquid column damper using an elliptical flow path estimation method*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.
- [7] Chaiviriyawong, P. e W. Prachaseree: *Applications of passive mass dampers for civil engineering structural control: a review*. Prince of Songkla University, Songkla, Tailândia, 2000.
- [8] Chopra, A. K.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson/Prentice Hall, 2007.
- [9] Costa, A. C.: *Sistemas inteligentes para a protecção sísmica de estruturas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, 2008.
- [10] Datta, T. K. e H. Khas: *A state of the art review on active control of structures*. Earthquake, 40(1):1 – 17, 2003.
- [11] El Damatty, A. A.: *Studies on the Application of Tuned Liquid Dampers (TLD) to Up-Grade the Seismic Resistance of Structures*. ICLR Research, 17, 2002.
- [12] Franca, M. J.: *Modelos Reduzidos e Computacionais em Engenharia*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, 2010.

- [13] Halvorson e Partners Structural Engineers: *Projects*. <http://halvorsonandpartners.com/projectlist>. Acesso: 15/11/2012.
- [14] Housner, G. W., L. A. Bergman, T. K. Caughey, S. F. Masri, R. E. Skelton, T. T. Soong, B. F. Spencer e J. T. P. Yao: *Structural control: past, present, and future*. Journal of Engineering Mechanics, 123(9):1893 – 1905, 1997.
- [15] Kareem, A., T. Kijewski e Y. Tamura: *Mitigation of motions of tall buildings with special examples of recent applications*. Journal on Wind and Structures, 2(3):201 – 251, 1999.
- [16] Lin-Sheng, H. U. O. e L. I. Hong-Nan: *Torsionally coupled response control of structures using circular tuned liquid column dampers*. The 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1560, 2004.
- [17] Lord, J., C. E. Ventura, E. Dascotte, R. Brincker e P. Andersen: *[N1026] FEM Updating Using Ambient Vibration Data from a 48-storey Building in Vancouver, British Columbia, Canada*. The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2003.
- [18] Mejia, R.: *Robust control of systems subjected to uncertain disturbances and actuator dynamics*. Tese de Mestrado, Universitat de Girona, Girona, Spain, March 2005.
- [19] Mendis, P., T. Ngo, Haritos N., A. Hira, B. Samali e J. Cheung: *Wind Loading on Tall Buildings*. EJSE Special Issue: Loading on Structures.
- [20] Morsy, H.: *A numerical study of the performance of tuned liquid dampers*. Tese de Mestrado, McMaster University, Hamilton, Ontario, Janeiro 2010.
- [21] Mourão, P.: *Controlo activo de vibrações em estruturas flexíveis*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, Março 2010.
- [22] Moutinho, C.: *Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, Agosto 2007.
- [23] Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling e B. P. Flannery: *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific*. Cambridge University Press, 3ª edição, 2007.
- [24] Quintela, A. C.: *Hidráulica*. Fundação Caloute Gulbenkian, 2007.
- [25] Reiterer, M. e F. Ziegler: *Bi-axial Seismic Activation of Civil Engineering Structures Equipped with Tuned Liquid Column Dampers*. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 7(1), 2005.
- [26] Rodrigues, C. C.: *Resistência de materiais II*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, 2007.

- [27] Sadek, F., B. Mohraz e H. S. Lew: *Single and multiple-tuned liquid column dampers for seismic applications*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27(5):439 – 463, 1998.
- [28] Sakai, F., S. Takaeda e T. Tamaki: *Tuned liquid column damper - new type device for suppression of building vibrations*. Proc. Int. Conf. on highrise buildings, 2:926 – 931, 1989.
- [29] Silva, T.: *Avaliação da transmissão de vibração num edifício existente*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Julho 2010.
- [30] Soong, T.: *Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice*. Engineering Structures, 24(3):243 – 259, 2002.
- [31] Souza, R.: *Controle passivo/activo das oscilações de estruturas esbeltas por meio de dispositivos fluido-dinâmicos*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Junho 2003.
- [32] Spencer, B. F. e S. Nagarajaiah: *State of the Art of Structural Control*. Journal of Structural Engineering, 129(7):845 – 856, 2003.
- [33] Spencer, B. F. e M. K. Sain: *Controlling buildings: a new frontier in feedback*. IEEE Control Systems Magazine, 17(6):19 – 35, 1997.
- [34] Spencer, B. F. e T. T. Soong: *New applications and development of active, semiactive and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA*. Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, 1999.
- [35] Spencer, R. L.: *Introduction to MATLAB*. Brigham Young University, Utah, EUA, 2000.
- [36] Stephens, S.: *Robert A. M. Stern Architects raises the bar with Philadelphia's Comcast Center*. <http://archrecord.construction.com>. Acesso: 30/01/2012.
- [37] Tamura, Y., K. Jujii, T. Ohtsuki, T. Wakahara e R. Kohsaka: *Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation*. Engineering Structures, 17(9):609 – 621, 1995.
- [38] Won, A. Y. J., J. A. Pires e M. A. Haroun: *Stochastic seismic performance evaluation of tuned liquid column dampers*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 25(11):1259 – 1274, 1996.
- [39] Wu, J.: *Experimental calibration and head loss prediction of tuned liquid column damper*. Tamkang Journal of Science and Engineering, 8(4):319 – 325, 2005.
- [40] Wu, J. e C. Chang: *Design table of optimal parameters for tuned liquid column damper responding to earthquake*. 4th International Conference on Earthquake Engineering, (165), 2006.

- [41] Wu, J., C. Chang e Y. Li: *Optimal designs for non-uniform tuned liquid column dampers in horizontal motion*. Journal of Sound and Vibration, 326(1-2):104–122, 2009.
- [42] Wu, J., M. Shih, Y. Lin e Y. Shen: *Design guidelines for tuned liquid column damper for structures responding to wind*. Engineering Structures, 27(13):1893 – 1905, 2005.
- [43] Zahrai, S. M. e A. Kavand: *Strong Ground Motion Effects on Seismic Response Reduction by TLCDs*. Scientia Iranica, 15(3):275 – 285, 2008.

Apêndice A

Ilustração das diversas etapas da construção do modelo experimental



(a)



(b)

Figura A.1: (a) Pormenor da ligação da válvula ao tubo. (b) Pormenor da ligação do "cotovelo" ao tubo.



(a)



(b)

Figura A.2: (a) Elementos constituintes do reservatório. (b) Reservatório a instalar no pódio.

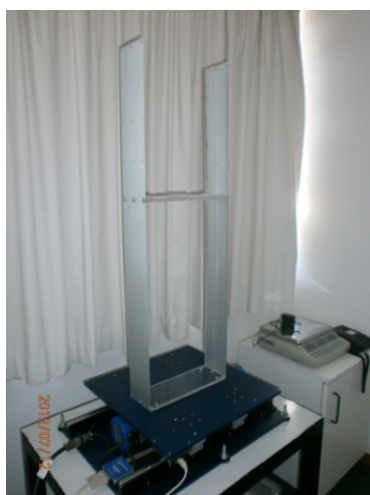


(a)

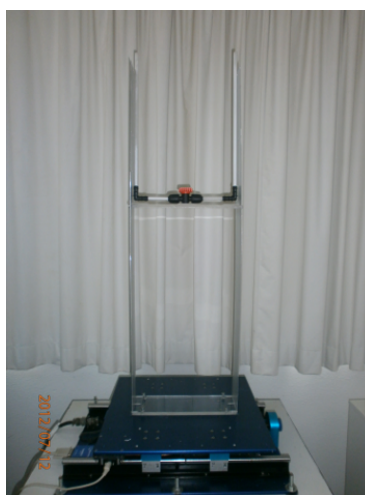


(b)

Figura A.3: (a) Elementos constituintes do pórtico. (b) Pórtico sem reservatório.



(a)



(b)

Figura A.4: (a) Pórtico sem reservatório instalado na mesa sísmica. (b) Pórtico com reservatório instalado na mesa sísmica.



(a)

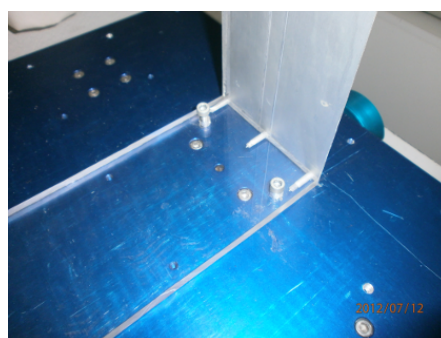


(b)

Figura A.5: (a) Pormenor da ligação aparafusada da base aos pilares. (b) Pormenor da ligação aparafusada do piso aos pilares.



(a)



(b)

Figura A.6: (a) Mesa sísmica. (b) Pormenor da instalação do pórtico à mesa sísmica.

Apêndice B

Códigos MATLAB

B.1 Determinação da frequência própria

B.1.1 Modelo numérico sem TLCD

```
mvalvula = 0.031; %[kg]
m2cotovelos = 0.008; %[kg]
mtuboshoriz = 0.010; %[kg]
mtubosvert = 0.037; %[kg]
macelerometro = 0.107; %[kg]
mfio = 0.061; %[kg]
mparafusos=0.025; %[kg]
macrilico = 0.397; %[kg]
mpilaraluminio=0.286; %[kg]
mfitas = 0.001*6; %[kg]
M_GDL =mvalvula+m2cotovelos+mtuboshoriz+mtubosvert+
        macelerometro+mparafusos+macrilico+0.3*mpilaraluminio+
        0.3*mpilaraluminio+0.7*(1/3)*mpilaraluminio+
        0.7*(1/3)*mpilaraluminio+mfitas; %[kg]
h_piso=0.7; %[m]
b_placa = 11*10^-2; %[m]
e_placa = 0.8*10^-3; %[m]
M = (M_GDL)*10^-3; %[ton]
E_aluminio = 70000*10^3; %[kPa]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12; %[m^4]
EI = E_aluminio*I_placa; %[kN*m^2]
k_M = 2*12*EI/h_piso^3; %[kN/m]
w1calculo_rads = sqrt(k_M/(M)); %[rad/s]
w1calculo_Hz= w1calculo_rads/(2*pi); %[Hz]
```

B.1.2 Modelo experimental sem TLCD

```
fs = 1000;
t = tempoensaio;
m = length(t);
```

```

n = pow2(nextpow2(m));
y = fft(aceleracoesensaio,n);
f = (0:n-1)*(fs/n);
power = y.*conj(y)/n;
loglog(f,power);
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Amplitude');

```

B.2 Estudo paramétrico

Variação de Ω

```

M=0.9261;%[kg]
h=0.7;%[m]
b_placa = 11*10^-2;%[m]
e_placa = 0.8*10^-3;%[m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12;%[m^4]
E_aluminio = 70000*10^3;%[kPa]
EI = E_aluminio*I_placa;%[kNm^2]
mv=1000;%[kg/m3]
xg0=0.0030;%[m]
w0=4.9823;%[rad/s]
wf=4.9823;%[rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81;%[m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2);%[m]

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (xg0*w0^2*sin(wf*t)*M-w0^2*y(1)*M-2*w0*beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (xg0*w0^2*sin(wf*Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-2*w0*beta*Yi(:,3)*M)/M;

%Valores base
miu=0.01;
delta = 0.17;%Ao = 100% A
alfa=0.7;

%Pórtico com TLCD:

%omega=0.9
f09=0.9;

```

```

L09=2*g/(f09^2*w0^2);%[m]
A09=miu*M/(mv*L09); %[m^2]
f1=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A09*L09)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A09*alfa*L09*((mv*A09*alfa*L09*(-(M+mv*A09*
L09)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A09*
L09)*(mv*A09*alfa*L09*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A09*g*y(2)-(1/2)*mv*
A09*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A09*L09*(M+mv*A09*L09)-(mv*A09*
L09)^2)))/(M+mv*A09*L09);(mv*A09*alfa*L09*(-(M+mv*A09*L09)*xg0*w0^2*
sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A09*L09)*(mv*A09*alfa*
L09*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A09*g*y(2)-(1/2)*mv*A09*delta*abs(y(4))*
y(4)))/(mv*A09*L09*(M+mv*A09*L09)-(mv*A09*L09)^2)];
[Tf1,Yf1]= ode45(f1,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f1 = ((M+mv*A09*L09)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)-M*w0^2*Yf1(:,1)-
2*M*w0*beta*Yf1(:,3)-mv*A09*alfa*L09*((mv*A09*alfa*L09*(-(M+mv*A09*
L09)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)+M*w0^2*Yf1(:,1)+2*M*w0*beta*Yf1(:,3))+
(M+mv*A09*L09)*(mv*A09*alfa*L09*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)-2*mv*A09*g*
Yf1(:,2)-(1/2)*mv*A09*delta*abs(Yf1(:,4)).*Yf1(:,4)))/
(mv*A09*L09*(M+mv*A09*L09)-(mv*A09*L09)^2)))/(M+mv*A09*L09);

%omega=1.0
f10=1.0;
L10=2*g/(f10^2*w0^2);%[m]
A10=miu*M/(mv*L10); %[m^2]
f2=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A10*L10)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A10*alfa*L10*((mv*A10*alfa*L10*(-(M+mv*
A10*L10)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*
A10*L10)*(mv*A10*alfa*L10*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A10*g*y(2)-
(1/2)*mv*A10*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A10*L10*(M+mv*A10*
L10)-(mv*A10*L10)^2)))/(M+mv*A10*L10);(mv*A10*alfa*L10*(-(M+
mv*A10*L10)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*
y(3)))+(M+mv*A10*L10)*(mv*A10*alfa*L10*xg0*w0^2*sin(wf*t)-
2*mv*A10*g*y(2)-(1/2)*mv*A10*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A10*L10*
(M+mv*A10*L10)-(mv*A10*L10)^2)];
[Tf2,Yf2]= ode45(f2,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f2 = ((M+mv*A10*L10)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)-M*w0^2*
Yf2(:,1)-2*M*w0*beta*Yf2(:,3)-mv*A10*alfa*L10*((mv*A10*alfa*L10*
(-(M+mv*A10*L10)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)+M*w0^2*Yf2(:,1)+2*M*w0*
beta*Yf2(:,3)))+(M+mv*A10*L10)*(mv*A10*alfa*L10*xg0*w0^2*
sin(wf*Tf2)-2*mv*A10*g*Yf2(:,2)-(1/2)*mv*A10*delta*
abs(Yf2(:,4)).*Yf2(:,4)))/(mv*A10*L10*(M+mv*A10*
L10)-(mv*A10*L10)^2)))/(M+mv*A10*L10);

%omega=1.1
f11=1.1;
L11=2*g/(f11^2*w0^2);%[m]
A11=miu*M/(mv*L11); %[m^2]
f3=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A11*L11)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*

```

```

w0^2*y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A11*alfa*L11*((mv*A11*alfa*L11*(-(M+mv*
A11*L11)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3))+(M+mv*A11*
L11)*(mv*A11*alfa*L11*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A11*g*y(2)-(1/2)*
mv*A11*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A11*L11*(M+mv*A11*L11)-(mv*
A11*L11)^2)))/(M+mv*A11*L11);(mv*A11*alfa*L11*(-(M+mv*A11*L11)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3))+(M+mv*A11*L11)*
(mv*A11*alfa*L11*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A11*g*y(2)-(1/2)*
mv*A11*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A11*L11*(M+mv*A11*L11)-
(mv*A11*L11)^2)];
[Tf3,Yf3]= ode45(f3,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f3 = ((M+mv*A11*L11)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-M*w0^2*Yf3(:,1)-2*
M*w0*beta*Yf3(:,3)-mv*A11*alfa*L11*((mv*A11*alfa*L11*(-(M+mv*A11*L11)*
xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)+M*w0^2*Yf3(:,1)+2*M*w0*beta*Yf3(:,3))+
(M+mv*A11*L11)*(mv*A11*alfa*L11*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-2*mv*
A11*g*Yf3(:,2)-(1/2)*mv*A11*delta*abs(Yf3(:,4)).*
Yf3(:,4)))/(mv*A11*L11*(M+mv*A11*L11)-(mv*A11*
L11)^2)))/(M+mv*A11*L11);

```

Variação de μ

```

M=0.9261;%[kg]
h=0.7;%[m]
b_placa = 11*10^-2;%[m]
e_placa = 0.8*10^-3;%[m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12;%[m^4]
E_aluminio = 70000*10^3;%[kPa]
EI = E_aluminio*I_placa;%[kNm^2]
mv=1000;%[kg/m3]
xg0=0.0030;%[m]
w0=4.9823;%[rad/s]
wf=4.9823;%[rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81;%[m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2);%[m]

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (xg0*w0^2*sin(wf*t)*M-w0^2*y(1)*M-2*w0*beta*
y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (xg0*w0^2*sin(wf*Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-2*w0*beta*
Yi(:,3)*M)/M;

%Valores base
f=1.0;

```

```

L=2*g/(f^2*w0^2); %[m]
delta = 0.17;%Ao = 100% A
alfa=0.7;

%Pórtico com TLCD:

%miu=0.002
miu02=0.002;
A02=miu02*M/(mv*L); %[m^2]
f1=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A02*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A02*alfa*L*((mv*A02*alfa*L*(-(M+mv*
A02*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3))+
(M+mv*A02*L)*(mv*A02*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A02*
g*y(2)-(1/2)*mv*A02*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A02*L*(M+
mv*A02*L)-(mv*A02*L)^2)))/(M+mv*A02*L);(mv*A02*alfa*L*
(-(M+mv*A02*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*
y(3))+(M+mv*A02*L)*(mv*A02*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*
mv*A02*g*y(2)-(1/2)*mv*A02*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*
A02*L*(M+mv*A02*L)-(mv*A02*L)^2)];
[Tf1,Yf1]= ode45(f1,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f1 = ((M+mv*A02*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)-M*w0^2*
Yf1(:,1)-2*M*w0*beta*Yf1(:,3)-mv*A02*alfa*L*((mv*A02*alfa*L*
(-(M+mv*A02*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)+M*w0^2*Yf1(:,1)+2*M*w0*
beta*Yf1(:,3))+(M+mv*A02*L)*(mv*A02*alfa*L*xg0*w0^2*
sin(wf*Tf1)-2*mv*A02*g*Yf1(:,2)-(1/2)*mv*A02*delta*
abs(Yf1(:,4)).*Yf1(:,4)))/(mv*A02*L*(M+mv*A02*L)-(mv*
A02*L)^2)))/(M+mv*A02*L);

%miu=0.005
miu05=0.005;
A05=miu05*M/(mv*L); %[m^2]
f2=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A05*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A05*alfa*L*((mv*A05*alfa*L*(-(M+mv*A05*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3))+(M+mv*A05*L)*
(mv*A05*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A05*g*y(2)-(1/2)*
mv*A05*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A05*L*(M+mv*A05*L)-(mv*
A05*L)^2)))/(M+mv*A05*L);(mv*A05*alfa*L*(-(M+mv*A05*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3))+(M+mv*
A05*L)*(mv*A05*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A05*
g*y(2)-(1/2)*mv*A05*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A05*
L*(M+mv*A05*L)-(mv*A05*L)^2)];
[Tf2,Yf2]= ode45(f2,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f2 = ((M+mv*A05*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)-M*w0^2*
Yf2(:,1)-2*M*w0*beta*Yf2(:,3)-mv*A05*alfa*L*((mv*A05*alfa*L*
(-(M+mv*A05*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)+M*w0^2*Yf2(:,1)+2*M*w0*
beta*Yf2(:,3))+(M+mv*A05*L)*(mv*A05*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*
Tf2)-2*mv*A05*g*Yf2(:,2)-(1/2)*mv*A05*delta*abs(Yf2(:,4)).*

```

```

Yf2(:,4))/(mv*A05*L*(M+mv*A05*L)-(mv*A05*L)^2))/(M+
mv*A05*L);

%miu=0.01
miu1=0.01;
A1=miu1*M/(mv*L); %[m^2]
f3=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A1*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A1*alfa*L*((mv*A1*alfa*L*(-(M+mv*A1*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A1*L)*
(mv*A1*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A1*g*y(2)-(1/2)*mv*A1*
delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A1*L*(M+mv*A1*L)-(mv*A1*
L)^2)))/(M+mv*A1*L);(mv*A1*alfa*L*(-(M+mv*A1*L)*xg0*
w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*
A1*L)*(mv*A1*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A1*g*y(2)-
(1/2)*mv*A1*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A1*L*(M+mv*A1*
L)-(mv*A1*L)^2)];
[Tf3,Yf3]= ode45(f3,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f3 = ((M+mv*A1*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-M*w0^2*
Yf3(:,1)-2*M*w0*beta*Yf3(:,3)-mv*A1*alfa*L*((mv*A1*alfa*L*(-(M+mv*
A1*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)+M*w0^2*Yf3(:,1)+2*M*w0*beta*Yf3(:,3))+
(M+mv*A1*L)*(mv*A1*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-2*mv*A1*g*
Yf3(:,2)-(1/2)*mv*A1*delta*abs(Yf3(:,4)).*Yf3(:,4)))/(mv*
A1*L*(M+mv*A1*L)-(mv*A1*L)^2)))/(M+mv*A1*L);

%miu=0.015
miu15=0.015;
A15=miu15*M/(mv*L); %[m^2]
f4=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A15*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A15*alfa*L*((mv*A15*alfa*L*(-(M+mv*A15*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A15*L)*
(mv*A15*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A15*g*y(2)-
(1/2)*mv*A15*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A15*L*(M+mv*A15*
L)-(mv*A15*L)^2)))/(M+mv*A15*L);(mv*A15*alfa*L*(-(M+mv*A15*
L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*
A15*L)*(mv*A15*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A15*g*y(2)-
(1/2)*mv*A15*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A15*L*(M+mv*A15*
L)-(mv*A15*L)^2)];
[Tf4,Yf4]= ode45(f4,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f4 = ((M+mv*A15*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf4)-M*w0^2*
Yf4(:,1)-2*M*w0*beta*Yf4(:,3)-mv*A15*alfa*L*((mv*A15*alfa*L*
(-(M+mv*A15*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf4)+M*w0^2*Yf4(:,1)+2*M*w0*
beta*Yf4(:,3)))+(M+mv*A15*L)*(mv*A15*alfa*L*xg0*w0^2*
sin(wf*Tf4)-2*mv*A15*g*Yf4(:,2)-(1/2)*mv*A15*delta*
abs(Yf4(:,4)).*Yf4(:,4)))/(mv*A15*L*(M+mv*A15*L)-
(mv*A15*L)^2)))/(M+mv*A15*L);

%miu=0.02

```

```

miu2=0.02;
A2=miu2*M/(mv*L); %[m^2]
f5=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A2*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A2*alfa*L*((mv*A2*alfa*L*(-(M+mv*A2*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A2*L)*
(mv*A2*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A2*g*y(2)-(1/2)*mv*A2*
delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A2*L*(M+mv*A2*L)-(mv*A2*L)^2)))/(M+mv*
A2*L);(mv*A2*alfa*L*(-(M+mv*A2*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*
y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A2*L)*(mv*A2*alfa*L*xg0*w0^2*
sin(wf*t)-2*mv*A2*g*y(2)-(1/2)*mv*A2*delta*abs(y(4))*
y(4)))/(mv*A2*L*(M+mv*A2*L)-(mv*A2*L)^2)];
[Tf5,Yf5]= ode45(f5,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f5 = ((M+mv*A2*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf5)-M*w0^2*
Yf5(:,1)-2*M*w0*beta*Yf5(:,3)-mv*A2*alfa*L*((mv*A2*alfa*L*
(-(M+mv*A2*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf5)+M*w0^2*Yf5(:,1)+2*M*w0*
beta*Yf5(:,3)))+(M+mv*A2*L)*(mv*A2*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf5)-
2*mv*A2*g*Yf5(:,2)-(1/2)*mv*A2*delta*abs(Yf5(:,4)).*
Yf5(:,4)))/(mv*A2*L*(M+mv*A2*L)-(mv*A2*L)^2)))/(M+mv*A2*L);

```

Variação de α

```

M=0.9261; %[kg]
h=0.7; %[m]
b_placa = 11*10^-2; %[m]
e_placa = 0.8*10^-3; %[m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12; %[m^4]
E_aluminio = 70000*10^3; %[kPa]
EI = E_aluminio*I_placa; %[kNm^2]
mv=1000; %[kg/m3]
xg0=0.0030; %[m]
w0=4.9823; %[rad/s]
wf=4.9823; %[rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81; %[m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2); %[m]

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (xg0*w0^2*sin(wf*t)*M-w0^2*y(1)*M-2*w0*
beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (xg0*w0^2*sin(wf*Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-2*w0*
beta*Yi(:,3)*M)/M;

%Valores base

```

```

f=1.0;
L=2*g/(f^2*w0^2); %[m]
delta = 0.17;%Ao = 100% A
miu=0.001;
A=miu*M/(mv*L); %[m^2]

%Pórtico com TLCD:

%alfa=0.3
alfa03=0.3;
f1=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*
y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A*alfa03*L*((mv*A*alfa03*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*
(mv*A*alfa03*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*
delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)))/(M+mv*
A*L);(mv*A*alfa03*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*
y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa03*L*xg0*w0^2*
sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta*abs(y(4))*y(4)))/
(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)];
[Tf1,Yf1]= ode45(f1,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f1 = ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)-M*w0^2*
Yf1(:,1)-2*M*w0*beta*Yf1(:,3)-mv*A*alfa03*L*((mv*A*alfa03*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)+M*w0^2*Yf1(:,1)+2*M*w0*beta*Yf1(:,3)))+(M+mv*A*L)*
(mv*A*alfa03*L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)-2*mv*A*g*Yf1(:,2)-(1/2)*
mv*A*delta*abs(Yf1(:,4))*Yf1(:,4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-
(mv*A*L)^2)))/(M+mv*A*L);

%alfa=0.5
alfa05=0.5;
f2=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*y(1)
-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A*alfa05*L*((mv*A*alfa05*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*
(mv*A*alfa05*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*
delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)))/
(M+mv*A*L);(mv*A*alfa05*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*
w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa05*L*
xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta*
abs(y(4))*y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)];
[Tf2,Yf2]= ode45(f2,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f2 = ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)-M*w0^2*Yf2(:,1)-
2*M*w0*beta*Yf2(:,3)-mv*A*alfa05*L*((mv*A*alfa05*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)+M*w0^2*Yf2(:,1)+2*M*w0*beta*Yf2(:,3)))+(M+mv*A*L)*
(mv*A*alfa05*L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)-2*mv*A*g*Yf2(:,2)-(1/2)*mv*A*
delta*abs(Yf2(:,4))*Yf2(:,4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)))/
(M+mv*A*L);

```

```

%alfa=0.7
alfa07=0.7;
f3=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*y(1)-
2*M*w0*beta*y(3)-mv*A*alfa07*L*((mv*A*alfa07*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*
(mv*A*alfa07*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta*
abs(y(4))*y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)))/
(M+mv*A*L);(mv*A*alfa07*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*
w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa07*L*xg0*w0^2*
sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta*abs(y(4))*
y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)];
[Tf3,Yf3]= ode45(f3,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f3 = ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-M*w0^2*Yf3(:,1)-
2*M*w0*beta*Yf3(:,3)-mv*A*alfa07*L*((mv*A*alfa07*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)+M*w0^2*Yf3(:,1)+2*M*w0*beta*Yf3(:,3)))+(M+mv*
A*L)*(mv*A*alfa07*L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-2*mv*A*g*Yf3(:,2)-(1/2)*
mv*A*delta*abs(Yf3(:,4)).*Yf3(:,4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*
L)^2)))/(M+mv*A*L);

```

Varição de δ

```

M=0.9261;%[kg]
h=0.7;%[m]
b_placa = 11*10^-2;%[m]
e_placa = 0.8*10^-3;%[m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12;%[m^4]
E_aluminio = 70000*10^3;%[kPa]
EI = E_aluminio*I_placa;%[kNm^2]
mv=1000;%[kg/m3]
xg0=0.0030;%[m]
w0=4.9823;%[rad/s]
wf=4.9823;%[rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81;%[m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2);%[m]

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (xg0*w0^2*sin(wf*t)*M-w0^2*y(1)*M-2*w0*
beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (xg0*w0^2*sin(wf*Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-2*w0*
beta*Yi(:,3)*M)/M;

```

```

%Valores base
f=1.0;
L=2*g/(f^2*w0^2); %[m]
miu=0.001;
A=miu*M/(mv*L); %[m^2]
alfa=0.7;

%Pórtico com TLCD:

%Ao = 30% A
delta1 = 9;
f1=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*y(1)-
2*M*w0*beta*y(3)-mv*A*alfa*L*((mv*A*alfa*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+
M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*L*xg0*w0^2*
sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta1*abs(y(4))*y(4)))/
(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)))/(M+mv*A*L); (mv*A*alfa*L*(-(M+
mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3))+
(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-
(1/2)*mv*A*delta1*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-
(mv*A*L)^2)];
[Tf1,Yf1]= ode45(f1,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f1 = ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)-M*w0^2*Yf1(:,1)-2*M*
w0*beta*Yf1(:,3)-mv*A*alfa*L*((mv*A*alfa*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)+
M*w0^2*Yf1(:,1)+2*M*w0*beta*Yf1(:,3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*
L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf1)-2*mv*A*g*Yf1(:,2)-(1/2)*mv*A*delta1*
abs(Yf1(:,4)).*Yf1(:,4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*
L)^2)))/(M+mv*A*L);

%Ao = 70% A
delta2 = 0.59;
f2=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*y(1)-
2*M*w0*beta*y(3)-mv*A*alfa*L*((mv*A*alfa*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+
M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-
2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta2*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-
(mv*A*L)^2)))/(M+mv*A*L); (mv*A*alfa*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*
sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*
L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta2*abs(y(4))*
y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)];
[Tf2,Yf2]= ode45(f2,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f2 = ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)-M*w0^2*Yf2(:,1)
-2*M*w0*beta*Yf2(:,3)-mv*A*alfa*L*((mv*A*alfa*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)+M*w0^2*Yf2(:,1)+2*M*w0*beta*Yf2(:,3)))+
(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf2)-2*mv*A*g*Yf2(:,2)-
(1/2)*mv*A*delta2*abs(Yf2(:,4)).*Yf2(:,4)))/(mv*A*L*
(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)))/(M+mv*A*L);

%Ao = 100% A

```

```

delta3 = 0.17;
f3=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)-M*w0^2*y(1)-
2*M*w0*beta*y(3)-mv*A*alfa*L*((mv*A*alfa*L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*
sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*L*
xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-(1/2)*mv*A*delta3*abs(y(4))*
y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2))/(M+mv*A*L);(mv*A*alfa*
L*(-(M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3))+
(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*t)-2*mv*A*g*y(2)-
(1/2)*mv*A*delta3*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A*L*(M+mv*A*L)-
(mv*A*L)^2)];
[Tf3,Yf3]= ode45(f3,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_f3 = ((M+mv*A*L)*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-M*w0^2*Yf3(:,1)-
2*M*w0*beta*Yf3(:,3)-mv*A*alfa*L*((mv*A*alfa*L*(-(M+mv*A*L)*
xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)+M*w0^2*Yf3(:,1)+2*M*w0*beta*Yf3(:,3))+
(M+mv*A*L)*(mv*A*alfa*L*xg0*w0^2*sin(wf*Tf3)-2*mv*A*g*
Yf3(:,2)-(1/2)*mv*A*delta3*abs(Yf3(:,4)).*Yf3(:,4)))/
(mv*A*L*(M+mv*A*L)-(mv*A*L)^2)))/(M+mv*A*L);

```

B.3 Simulação numérica do modelo numérico

B.3.1 Excitação harmônica - Dimensionamento do sistema TLCD

```

M=0.9261;%[kg]
h=0.7;%[m]
b_placa = 11*10^-2;%[m]
e_placa = 0.8*10^-3;%[m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12;%[m^4]
E_aluminio = 70000*10^3;%[kPa]
EI = E_aluminio*I_placa;%[kNm^2]
mv=1000;%[kg/m3]
xg0=0.0030;%[m]
w0=4.9823;%[rad/s]
wf=4.9823;%[rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81;%[m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2);%[m]

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (xg0*w0^2*sin(wf*t)*M-w0^2*y(1)*M-2*w0*
beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.001:50],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (xg0*w0^2*sin(wf*Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-2*w0*
beta*Yi(:,3)*M)/M;

```

```

%Pórtico com TLCD
miu33 = 0.033; % [%]
A33 = miu33 * M / (mv * L); % [m^2]
f = @(t, y) [y(3); y(4); ((M + mv * A33 * L) * xg0 * w0^2 * sin(wf * t) - M * w0^2 *
y(1) - 2 * M * w0 * beta * y(3) - mv * A33 * alfa * L * ((mv * A33 * alfa * L * (- (M + mv * A33 * L) *
xg0 * w0^2 * sin(wf * t) + M * w0^2 * y(1) + 2 * M * w0 * beta * y(3)) + (M + mv * A33 * L) *
(mv * A33 * alfa * L * xg0 * w0^2 * sin(wf * t) - 2 * mv * A33 * g * y(2) - (1/2) *
mv * A33 * delta * abs(y(4)) * y(4))) / (mv * A33 * L * (M + mv * A33 * L) - (mv *
A33 * L)^2)) / (M + mv * A33 * L); (mv * A33 * alfa * L * (- (M + mv * A33 * L) * xg0 *
w0^2 * sin(wf * t) + M * w0^2 * y(1) + 2 * M * w0 * beta * y(3)) + (M + mv * A33 * L) *
(mv * A33 * alfa * L * xg0 * w0^2 * sin(wf * t) - 2 * mv * A33 * g * y(2) - (1/2) *
mv * A33 * delta * abs(y(4)) * y(4))) / (mv * A33 * L * (M + mv * A33 * L) -
(mv * A33 * L)^2)];
[Tf, Yf] = ode45(f, [0:0.001:50], [0 0 0 0]);
aceleracao_f = ((M + mv * A33 * L) * xg0 * w0^2 * sin(wf * Tf) - M * w0^2 * Yf(:, 1) -
2 * M * w0 * beta * Yf(:, 3) - mv * A33 * alfa * L * ((mv * A33 * alfa * L * (- (M + mv * A33 * L) * xg0 * w0^2 *
sin(wf * Tf) + M * w0^2 * Yf(:, 1) + 2 * M * w0 * beta * Yf(:, 3)) + (M + mv * A33 * L) * (mv * A33 * alfa *
L * xg0 * w0^2 * sin(wf * Tf) - 2 * mv * A33 * g * Yf(:, 2) - (1/2) * mv * A33 * delta * abs(Yf(:, 4))) *
Yf(:, 4))) / (mv * A33 * L * (M + mv * A33 * L) - (mv * A33 * L)^2)) / (M + mv * A33 * L);

%Características do TLCD
d33 = sqrt(A33 * 10^4 * 4 / pi); % [cm]
l = L * 10^2; % [cm]
b = alfa * l; % [cm]

```

B.3.2 Vibração em regime livre

```

M = 0.9261; % [kg]
h = 0.7; % [m]
b_placa = 11 * 10^-2; % [m]
e_placa = 0.8 * 10^-3; % [m]
I_placa = e_placa^3 * b_placa / 12; % [m^4]
E_aluminio = 70000 * 10^3; % [kPa]
EI = E_aluminio * I_placa; % [kNm^2]
mv = 1000; % [kg/m3]
xg0 = 0;
w0 = 4.9823; % [rad/s]
wf = 4.9823; % [rad/s]
beta = 1.5 / 100;
f = 1;
delta = 0.17;
alfa = 0.36;
g = 9.81; % [m/s^2]
L = 2 * g / (f^2 * w0^2); % [m]

```

```

%Pórtico sem TLCD

```

```

i=@(t,y) [y(3); y(4); (0*M-w0^2*y(1)*M-2*w0*beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.001:50],[-0.15 0 0 0]);
aceleracao_i = (0*M-w0^2*Yi(:,1)*M-2*w0*beta*Yi(:,3)*M)/M;

%Pórtico com TLCD
miu33 = 0.033;[%]
A33=miu33*M/(mv*L);[%m^2]
f=@(t,y) [y(3); y(4); ((M+mv*A33*L)*0-M*w0^2*y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-
mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*L*(-(M+mv*A33*L)*0+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*
beta*y(3))+ (M+mv*A33*L)*(mv*A33*alfa*L*0-2*mv*A33*g*y(2)-(1/2)*
mv*A33*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*
L)^2)))/(M+mv*A33*L);(mv*A33*alfa*L*(-(M+mv*A33*L)*0+M*w0^2*y(1)+
2*M*w0*beta*y(3))+ (M+mv*A33*L)*(mv*A33*alfa*L*0-2*mv*A33*g*y(2)-
(1/2)*mv*A33*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-
(mv*A33*L)^2)];
[Tf,Yf]= ode45(f,[0:0.001:50],[-0.15 0 0 0]);
aceleracao_f = ((M+mv*A33*L)*0-M*w0^2*Yf(:,1)-2*M*w0*beta*Yf(:,3)-
mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*L*(-(M+mv*A33*L)*0+M*w0^2*Yf(:,1)+
2*M*w0*beta*Yf(:,3))+ (M+mv*A33*L)*(mv*A33*alfa*L*0-2*mv*A33*g*
Yf(:,2)-(1/2)*mv*A33*delta*abs(Yf(:,4)).*Yf(:,4)))/
(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2)))/(M+mv*A33*L);

```

B.3.3 Sismo de El Centro

```

M=0.9261;[%kg]
h=0.7;[%m]
b_placa = 11*10^-2;[%m]
e_placa = 0.8*10^-3;[%m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12;[%m^4]
E_aluminio = 70000*10^3;[%kPa]
EI = E_aluminio*I_placa;[%kNm^2]
mv=1000;[%kg/m3]
xg0=0.0030;[%m]
w0=4.9823;[%rad/s]
wf=4.9823;[%rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81;[%m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2);[%m]

%Sismo de El Centro
function ag=Aceleracao_mesa_elcen(tt)
    load('Sismo_elcen','Tempo_elcen','Aceleracao_elcen')
    ag=interp1(Tempo_elcen,Aceleracao_elcen,tt);
end

```

```

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (-Aceleracao_mesa_elcen(t)*M-w0^2*y(1)*M-
    2*w0*beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.0004:30.9299980],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (-Aceleracao_mesa_elcen(Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-
    2*w0*beta*Yi(:,3)*M)/M;

%Pórtico com TLCD
miu33 = 0.033; %[ ]
A33=miu33*M/(mv*L); %[m^2]
f=@(t,y) [y(3); y(4); (-(M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_elcen(t)-M*w0^2*y(1)-
    2*M*w0*beta*y(3)-mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*L*((M+mv*A33*L)*
    Aceleracao_mesa_elcen(t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A33*L)*
    (-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_elcen(t)-2*mv*A33*g*y(2)-(1/2)*mv*A33*
    delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2))/(M+mv*A33*L);
    (mv*A33*alfa*L*((M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_elcen(t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*
    beta*y(3)))+(M+mv*A33*L)*(-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_elcen(t)-2*mv*A33*
    g*y(2)-(1/2)*mv*A33*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*
    L)^2)];
[Tf,Yf]= ode45(f,[0:0.0004:30.9299980],[0 0 0 0]);
aceleracao_f = (-(M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_elcen(Tf)-M*w0^2*Yf(:,1)-
    2*M*w0*beta*Yf(:,3)-mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*L*((M+mv*A33*L)*
    Aceleracao_mesa_elcen(Tf)+M*w0^2*Yf(:,1)+2*M*w0*beta*Yf(:,3)))+(
    M+mv*A33*L)*(-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_elcen(Tf)-2*mv*A33*g*Yf(:,2)-
    (1/2)*mv*A33*delta*abs(Yf(:,4)).*Yf(:,4)))/(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(
    mv*A33*L)^2)))/(M+mv*A33*L);

```

B.3.4 Sismo de Kobe

```

M=0.9261; %[kg]
h=0.7; %[m]
b_placa = 11*10^-2; %[m]
e_placa = 0.8*10^-3; %[m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12; %[m^4]
E_aluminio = 70000*10^3; %[kPa]
EI = E_aluminio*I_placa; %[kNm^2]
mv=1000; %[kg/m3]
xg0=0.0030; %[m]
w0=4.9823; %[rad/s]
wf=4.9823; %[rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81; %[m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2); %[m]

```

```

% Sismo de Kobe
function ag=Aceleracao_mesa_kobe(tt)

    load('Sismo_kobe','Tempo_kobe','Aceleracao_kobe')
    ag=interp1(Tempo_kobe,Aceleracao_kobe,tt);
end

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (-Aceleracao_mesa_kobe(t)*M-w0^2*y(1)*M-
    2*w0*beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.0004:20.7919980],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (-Aceleracao_mesa_kobe(Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-
    2*w0*beta*Yi(:,3)*M)/M;

%Pórtico com TLCD
miu33 = 0.033;[%]
A33=miu33*M/(mv*L);%[m^2]
f=@(t,y) [y(3); y(4); -(M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_kobe(t)-
    M*w0^2*y(1)-2*M*w0*beta*y(3)-mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*L*
    ((M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_kobe(t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*
    beta*y(3))+(M+mv*A33*L)*(-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_kobe(t)-
    2*mv*A33*g*y(2)-(1/2)*mv*A33*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*L*
    (M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2)))/(M+mv*A33*L);(mv*A33*alfa*L*
    ((M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_kobe(t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*
    y(3))+(M+mv*A33*L)*(-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_kobe(t)-
    2*mv*A33*g*y(2)-(1/2)*mv*A33*delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*
    L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2)];
[Tf,Yf]= ode45(f,[0:0.0004:20.7919980],[0 0 0 0]);
aceleracao_f = -(M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_kobe(Tf)-M*w0^2*
Yf(:,1)-2*M*w0*beta*Yf(:,3)-mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*L*((M+mv*
A33*L)*Aceleracao_mesa_kobe(Tf)+M*w0^2*Yf(:,1)+2*M*w0*beta*
Yf(:,3))+(M+mv*A33*L)*(-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_kobe(Tf)-
2*mv*A33*g*Yf(:,2)-(1/2)*mv*A33*delta*abs(Yf(:,4)).*Yf(:,4)))/
(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2)))/(M+mv*A33*L);

```

B.3.5 Sismo de Northridge

```

M=0.9261;[%[kg]
h=0.7;[%[m]
b_placa = 11*10^-2;[%[m]
e_placa = 0.8*10^-3;[%[m]
I_placa = e_placa^3*b_placa/12;[%[m^4]
E_aluminio = 70000*10^3;[%[kPa]
EI = E_aluminio*I_placa;[%[kNm^2]
mv=1000;[%[kg/m3]
xg0=0.0030;[%[m]

```

```

w0=4.9823;%[rad/s]
wf=4.9823;%[rad/s]
beta=1.5/100;
f=1;
delta=0.17;
alfa=0.36;
g=9.81;%[m/s^2]
L=2*g/(f^2*w0^2);%[m]

% Sismo Northbridge
function ag=Aceleracao_mesa_north(tt)
    load('Sismo_north','Tempo_north','Aceleracao_north')
    ag=interp1(Tempo_north,Aceleracao_north,tt);
end

%Pórtico sem TLCD
i=@(t,y) [y(3); y(4); (-Aceleracao_mesa_north(t)*M-w0^2*y(1)*M-
    2*w0*beta*y(3)*M)/M; 0];
[Ti,Yi]= ode45(i,[0:0.0004:10.9089980],[0 0 0 0]);
aceleracao_i = (-Aceleracao_mesa_north(Ti)*M-w0^2*Yi(:,1)*M-2*w0*
beta*Yi(:,3)*M)/M;

%Pórtico com TLCD
miu33 = 0.033;%[%]
A33=miu33*M/(mv*L);%[m^2]
f=@(t,y) [y(3); y(4); (- (M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_north(t)-M*w0^2*y(1)-
    2*M*w0*beta*y(3)-mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*L*((M+mv*A33*L)*
    Aceleracao_mesa_north(t)+M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A33*L)*
    (-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_north(t)-2*mv*A33*g*y(2)-(1/2)*mv*A33*
    delta*abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2)))/
    (M+mv*A33*L);(mv*A33*alfa*L*((M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_north(t)+
    M*w0^2*y(1)+2*M*w0*beta*y(3)))+(M+mv*A33*L)*(-mv*A33*alfa*L*
    Aceleracao_mesa_north(t)-2*mv*A33*g*y(2)-(1/2)*mv*A33*delta*
    abs(y(4))*y(4)))/(mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2)];
[Tf,Yf]= ode45(f,[0:0.0004:10.9089980],[0 0 0 0]);
aceleracao_f = (- (M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_north(Tf)-
    M*w0^2*Yf(:,1)-2*M*w0*beta*Yf(:,3)-mv*A33*alfa*L*((mv*A33*alfa*
    L*((M+mv*A33*L)*Aceleracao_mesa_north(Tf)+M*w0^2*Yf(:,1)+2*M*w0*
    beta*Yf(:,3)))+(M+mv*A33*L)*(-mv*A33*alfa*L*Aceleracao_mesa_north(Tf)-
    2*mv*A33*g*Yf(:,2)-(1/2)*mv*A33*delta*abs(Yf(:,4)).*Yf(:,4)))/
    (mv*A33*L*(M+mv*A33*L)-(mv*A33*L)^2)))/(M+mv*A33*L);

```

Apêndice C

Ficha técnica fornecida ao laboratório de sísmica da Faculdade

Controlo de vibrações de um pórtico pelo sistema de controlo TLCD

Símbolos:

A – área da secção transversal do TLCD

A_o – área da secção do orifício do TLCD

B – comprimento do trecho horizontal do TLCD

g – aceleração gravítica

L – comprimento do líquido no TLCD

M – massa segundo o GDL do pórtico sem TLCD

w_f – frequência forçada da aceleração de base

w_s – frequência própria do pórtico sem TLCD

w_{TLCD} – frequência própria do TLCD

$x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ – deslocamento, velocidade e aceleração horizontal em função do tempo do TLCD ou correspondente deslocamento, velocidade e aceleração do pórtico ao nível do GDL

x_0 – deslocamento inicial

\ddot{x}_g – aceleração de base imposta pela mesa sísmica

\ddot{x}_{g0} – amplitude máxima da aceleração de base

$y(t), \dot{y}(t), \ddot{y}(t)$ – deslocamento, velocidade e aceleração em função do tempo da coluna líquida do TLCD

α – razão entre o comprimento do trecho horizontal e o comprimento total do líquido do TLCD

β – amortecimento do pórtico sem TLCD

δ – coeficiente de perda de carga hidráulica (consultar, por exemplo, em Quintela, A. C.: *Hidráulica*. Fundação Calouste Gubenkian, 2007)

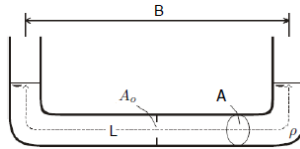
Objetivos

Prende-se diminuir a resposta dinâmica do pórtico a solicitações impostas pela mesa sísmica através do amortecedor de colunas de líquido sintonizado (ou *tuned liquid column damper* - TLCD).

Teoria

O TLCD é dimensionado para uma frequência igual à do pórtico e o seu funcionamento consiste na oscilação da massa líquida no reservatório. Essa oscilação tem uma frequência simetricamente desfasada à da estrutura, na qual se desenvolvem forças que são contrárias ao sentido do deslocamento estrutural e, através destas, reduz-se a sua resposta dinâmica. A esse movimento está associada uma força de inércia, produzida pelo movimento do líquido, e uma força de amortecimento, gerada através da dissipação turbulenta da energia cinética do líquido na sua passagem pela secção do orifício. É a força de restituição, correspondente à massa deslocada, que faz o líquido voltar à sua posição de equilíbrio estático, sendo nesse movimento que se geram de essas forças de controlo.

Trata-se de num reservatório em forma de “U”, de secção transversal constante, com água no seu interior à pressão atmosférica e uma válvula no troço horizontal que controla a área nessa secção.



O comprimento total de líquido constitui a coluna líquida e define a frequência do TLCD:

$$w_{TLCD} = \sqrt{\frac{2g}{L}}$$

O sistema de equações diferenciais que define a ação do TLCD acoplado ao pórtico é dado por:

$$\begin{bmatrix} M + \rho AL & \rho A \alpha L \\ \rho A \alpha L & \rho AL \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2M\beta w_s & 0 \\ 0 & \rho A \delta |y|/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M w_s^2 & 0 \\ 0 & 2\rho A g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M + \rho AL \\ \rho A \alpha L \end{Bmatrix} \ddot{x}_g$$

Numa estrutura à escala real a massa adicional de todo o sistema TLCD (reservatório e água) poderá não ser muito condicionante, mas num modelo reduzido como o pórtico, qualquer massa adicionada ao GDL que se pretende controlar, implicará uma alteração da frequência própria. Por esta razão será considerado que a instalação do TLCD corresponde à colocação do líquido no reservatório, isto é, o peso do reservatório é considerado como peso da estrutura e a água corresponderá ao sistema TLCD. A eficiência do sistema de controlo será assim determinada pela comparação entre: pórtico sem sistema TLCD (pórtico mais reservatório sem água) e pórtico com sistema TLCD (pórtico mais reservatório com água).

No caso de ações mais gravosas, nomeadamente com gradientes elevados de aceleração, o deslocamento da coluna líquida pode ultrapassar as colunas e pôr em causa o correto funcionamento do sistema de controlo. Para evitar que o líquido ultrapasse a altura da coluna do reservatório e que a sua superfície livre permaneça nos troços verticais, é imposta a seguinte condição ao sistema de equações apresentado anteriormente:

$$y_{max} \leq \frac{L - B}{2}$$

No caso de não ser verificada, através do fecho parcial da válvula, que esta associada às perdas de carga hidráulica nessa secção, os deslocamentos $y(t)$ podem ser diminuídos.

Descrição do ensaio

- Aparafusa-se o pórtico na sua base à mesa sísmica e instala-se o acelerómetro ao nível do piso, que medirá as acelerações a que o seu GDL está sujeito. Para o pórtico sem TLCD impõem-se as solicitações pretendidas e registam-se as acelerações através do sistema de aquisição de dados da mesa sísmica.
- Seguidamente adiciona-se a água (pórtico com TLCD) até o comprimento da coluna líquida corresponder ao dimensionado, definindo, desta forma, a frequência do TLCD. Esta será igual à do pórtico, ou seja, 0,79 Hz, e corresponde ao volume:

$$Volume = 40cm^3 \Rightarrow L = 79 cm$$

Nessas condições sujeita-se o pórtico às mesmas ações. À água a colocar no reservatório poderá ser adicionado um corante para que sirva de contraste e se possa observar de forma clara a sua oscilação durante o ensaio.

- Por fim, sobrepõem-se os gráficos obtidos do registo do acelerómetro para as duas situações, e analisa-se a eficiência do TLCD na redução das acelerações do pórtico através da sua comparação.

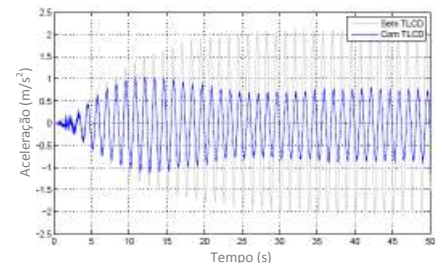
Resultados

Bibliografia relacionada com este tipo de controlo indica que o sistema TLCD constitui uma solução relativamente pouco eficiente na atenuação da resposta dinâmica de estruturas sujeitas a ações sísmicas, porém são particularmente interessantes no controlo de vibrações harmónicas causadas pelo vento em estruturas flexíveis e vulneráveis a fenómenos de ressonância. Especialmente eficientes para o controlo de vibrações de baixa frequência, se devidamente dimensionado pode atingir reduções superiores a 50%.

De ensaios já realizados no laboratório de sismica da Faculdade, obtiveram-se os seguintes resultados:

Ensaio 1 – Aceleração base correspondente a uma ação sinusoidal, com uma frequência igual à frequência própria do pórtico sem TLCD, ou seja, o modelo é excitado em ressonância. Atingiram-se reduções na ordem dos 60%.

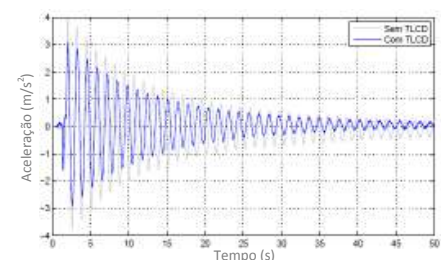
$$x_g = x_{g0} \sin(w_f t), \quad w_f = 0,79 \text{ Hz} \\ x_{g0} = 0,12 \text{ in}$$



Resposta estrutural do pórtico medida pelo acelerómetro.

Ensaio 2 – Introduzido um deslocamento ao nível do GDL do pórtico, o sistema é, seguidamente, deixado a vibrar livremente. Trata-se de uma situação de vibração em regime livre. Como essa ação é imposta manualmente, existirá sempre uma diferença nos ensaios sem e com TLCD. Cabe então ao executante o cuidado de fazer duas medições muito próximas. Neste caso foram alcançadas reduções de 29% quando essa ação inicial corresponde a:

$$x_0 \approx 15 cm$$



Resposta estrutural do pórtico medida pelo acelerómetro.

Apêndice D

Dados da mesa sísmica



QUANSER
INNOVATE. EDUCATE.

BENCH-SCALE SHAKE TABLES MOVE EARTHQUAKE ENGINEERING EDUCATION TO NEW HEIGHTS

Cutting-Edge Lab Systems for Structural Dynamics Education and Research

Heightened earthquake awareness throughout specific regions and stringent design codes has led to increasingly more undergraduate-level programs focusing on the dynamic behavior of structures. In successfully designing buildings, bridges, dams and tunnels, the engineers of tomorrow are challenged to develop and implement effective techniques to diminish damage and losses caused by earthquakes. While the dynamic behavior of buildings and bridges is of fundamental importance in modern structural design, undergraduate engineering students must also understand how these structures respond when acted upon by time-varying loads.

To help undergraduate engineering students comprehend structural dynamics and control principles, Quanser developed a number of bench-scale instructional shake tables on which students can perform hands-on experiments. These experiments allow students to see how structures respond to an earthquake loading, plus they can modify the dynamic characteristics of test cases, select different earthquake inputs, measure and analyze structural responses.

"It has been a lot of fun working with Quanser's equipment and teaching students things they wouldn't otherwise have a chance to see."

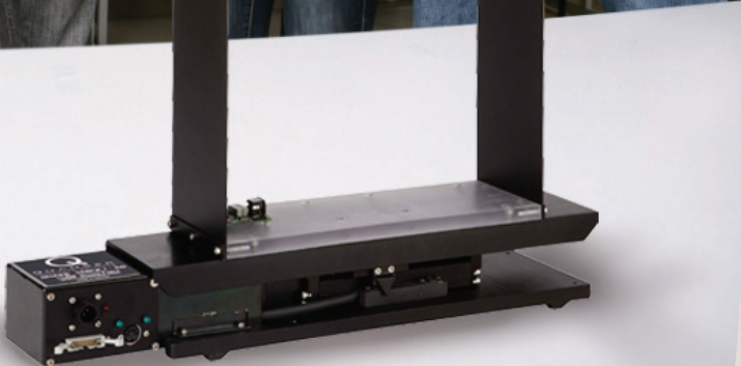
Dr. Shirley Dyke,
Professor of Mechanical and Civil Engineering,
Purdue University, USA

Proudly partnering with:



UCIST

NEES


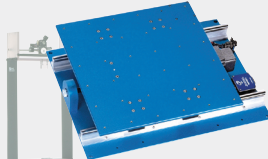
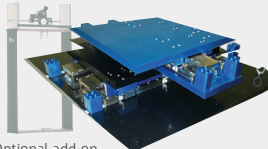






The single-axis Shake Table 1-40 is ideal for teaching a variety of earthquake engineering courses. It is a cost-effective experiment that offers plug-and-play convenience while providing accurate positioning and robust actuation.

SHAKE TABLES AND SMART STRUCTURE FOR TEACHING AND RESEARCH

This section provides a detailed overview of the cutting-edge laboratory systems available for teaching or research. There are seven turn-key earthquake engineering experiments. Their key attributes and technical specifications are presented here.

 To request a demonstration or quotation, please visit www.quanser.com/earthquake

PRODUCTS	DESCRIPTION	KEY FEATURES	WORKSTATION COMPONENTS	TECHNICAL SPECIFICATIONS																																																				
SHAKE TABLE I-40 Linear shaker  <p>Optional add-on</p>	<p>The Shake Table I-40 system is a single-axis seismic device that can be used to teach structural dynamics and control, earthquake engineering and other topics related to Civil Engineering. Shake Table I-40 is a portable yet powerful shake table which can be easily programmed through a Graphical User Interface environment. The provided software eliminates any need for hand coding while it enables you to monitor and analyze the response. This inexpensive platform facilitates an easy-connect setup for a quick and effortless interface with computer.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Compact, portable, clean and low maintenance • Precise and accurate positioning: high-resolution encoder and low-backlash guide • Ball-screw mechanism for robust actuation • Can be run with simple standalone software operation using Shake Table I-40 Software; or • Highly-flexible operation and control design using MATLAB®/Simulink® via QUARC® • Can connect to Quanser WEECS system for wireless remote operation • Complete, cost-effective turnkey system • Integrated safety features and limits • Fully documented system models and parameters 	<ul style="list-style-type: none"> • Shake Table I-40 • VoltPAQ-X2 • Q2-USB • Optional Active Mass Damper- One Floor [AMD 01]* • QUARC® 	<table border="1"> <tr> <td>Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]</td> <td>57.5 x 12.7 x 7.62 cm</td> <td>Lead Screw Pitch</td> <td>1 cm/rev</td> </tr> <tr> <td>Shake Table System Mass</td> <td>5.88 kg</td> <td>Brushless Servo Motor Power</td> <td>70 W</td> </tr> <tr> <td>Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]</td> <td>43.2 x 10.2 cm</td> <td>Maximum Continuous Current</td> <td>3 A</td> </tr> <tr> <td>Maximum Payload at 1.0 g</td> <td>1.5 kg</td> <td>Motor Maximum Torque</td> <td>3.53 N.m</td> </tr> <tr> <td>Travel</td> <td>±4 cm</td> <td>Leadscrew Encoder Resolution</td> <td>8192 counts/rev</td> </tr> <tr> <td>Operational Bandwidth</td> <td>20 Hz</td> <td>Accelerometer Range</td> <td>±0.5 g</td> </tr> <tr> <td>Peak Velocity</td> <td>46.9 cm/s</td> <td>Accelerometer Sensitivity</td> <td>1.0 V/g</td> </tr> <tr> <td>Peak Acceleration</td> <td>1.13 g</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]	57.5 x 12.7 x 7.62 cm	Lead Screw Pitch	1 cm/rev	Shake Table System Mass	5.88 kg	Brushless Servo Motor Power	70 W	Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]	43.2 x 10.2 cm	Maximum Continuous Current	3 A	Maximum Payload at 1.0 g	1.5 kg	Motor Maximum Torque	3.53 N.m	Travel	±4 cm	Leadscrew Encoder Resolution	8192 counts/rev	Operational Bandwidth	20 Hz	Accelerometer Range	±0.5 g	Peak Velocity	46.9 cm/s	Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g	Peak Acceleration	1.13 g																						
Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]	57.5 x 12.7 x 7.62 cm	Lead Screw Pitch	1 cm/rev																																																					
Shake Table System Mass	5.88 kg	Brushless Servo Motor Power	70 W																																																					
Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]	43.2 x 10.2 cm	Maximum Continuous Current	3 A																																																					
Maximum Payload at 1.0 g	1.5 kg	Motor Maximum Torque	3.53 N.m																																																					
Travel	±4 cm	Leadscrew Encoder Resolution	8192 counts/rev																																																					
Operational Bandwidth	20 Hz	Accelerometer Range	±0.5 g																																																					
Peak Velocity	46.9 cm/s	Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g																																																					
Peak Acceleration	1.13 g																																																							
SHAKE TABLE II Heavy-load linear shaker  <p>Optional add-on</p>	<p>Developed in cooperation with the University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST) and recommended by the Consortium to more than 100 institutional members, the Shake Table II offers a wide table-top surface which can accommodate several structures to increase the complexity of the experiment. Shake Table II has been used in outreach programs involving community services as well as K-12 education. This portable, bench-scale table moves along a single axis, however, two tables can be coupled for dual axis, x-y operation.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Purpose-designed and built for the University Consortium on Instructional Shake Tables [UCIST] partnered with National Network for Earthquake Engineering Simulation [NEES] • Easy integration of your structures, sensors and actuators • Simple, standalone software operation using Shake Table II Software; or • Flexible operation and control design from MATLAB®/Simulink® via QUARC® or LabView® • Fully documented system models and parameters • Shared lab resources contributed by a large community of like-minded users • Single [x] or Dual [x-y] axis configurations • Complete, cost-effective turnkey systems provided • Supports scaling and playback of earthquake data • Integrated safety features and limits 	<ul style="list-style-type: none"> • Shake Table II • UPM180-25-B-PWM • Q4 Real-Time Control Board • Optional Active Mass Damper One Floor or Two Floor* [AMD 01 or AMD 02] • VoltPAQ-X1 or VoltPAQ-X2 • QUARC® 	<table border="1"> <tr> <td>Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]</td> <td>61 x 46 x 13 cm</td> <td>Lead Screw Pitch</td> <td>1.27 cm/rev</td> </tr> <tr> <td>Shake Table System Mass</td> <td>27.2 kg</td> <td>Brushless Servo Motor Power</td> <td>745.7 W</td> </tr> <tr> <td>Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]</td> <td>46 x 46 cm</td> <td>Maximum Continuous Current</td> <td>12.5 A</td> </tr> <tr> <td>Maximum Payload at 2.5 g</td> <td>7.5 kg</td> <td>Motor Maximum Torque</td> <td>1.65 N.m</td> </tr> <tr> <td>Travel</td> <td>±7.5 cm</td> <td>Leadscrew Encoder Resolution</td> <td>8192 counts/rev</td> </tr> <tr> <td>Operational Bandwidth</td> <td>20 Hz</td> <td>Accelerometer Range</td> <td>±49 m/s²</td> </tr> <tr> <td>Peak Velocity</td> <td>83.8 cm/s</td> <td>Accelerometer Sensitivity</td> <td>1.0 V/g</td> </tr> <tr> <td>Peak Acceleration</td> <td>2.50 g</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]	61 x 46 x 13 cm	Lead Screw Pitch	1.27 cm/rev	Shake Table System Mass	27.2 kg	Brushless Servo Motor Power	745.7 W	Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]	46 x 46 cm	Maximum Continuous Current	12.5 A	Maximum Payload at 2.5 g	7.5 kg	Motor Maximum Torque	1.65 N.m	Travel	±7.5 cm	Leadscrew Encoder Resolution	8192 counts/rev	Operational Bandwidth	20 Hz	Accelerometer Range	±49 m/s ²	Peak Velocity	83.8 cm/s	Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g	Peak Acceleration	2.50 g																						
Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]	61 x 46 x 13 cm	Lead Screw Pitch	1.27 cm/rev																																																					
Shake Table System Mass	27.2 kg	Brushless Servo Motor Power	745.7 W																																																					
Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]	46 x 46 cm	Maximum Continuous Current	12.5 A																																																					
Maximum Payload at 2.5 g	7.5 kg	Motor Maximum Torque	1.65 N.m																																																					
Travel	±7.5 cm	Leadscrew Encoder Resolution	8192 counts/rev																																																					
Operational Bandwidth	20 Hz	Accelerometer Range	±49 m/s ²																																																					
Peak Velocity	83.8 cm/s	Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g																																																					
Peak Acceleration	2.50 g																																																							
XY SHAKE TABLE III Heavy-load planar shaker  <p>Optional add-on</p>	<p>The xy Shake Table III is a high-power system that can deliver high accelerations and velocities with loads up to 120 kg. It presents more advanced analysis with the introduction of multi-dynamics of particular interest. It is also useful for structural dynamics research relating to earthquake loss reduction. It is powered using linear motor technology, eliminating the need for hydraulics. It has three linear motors, two of them operate in parallel to actuate the x axis, while a single motor is used to actuate the y axis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dual-axis operation • Turnkey and easy-to-use • Linear motors for reliable and quiet operation • Extensive data acquisition and control capability • Easy integration of your structures, sensors and actuators • Flexible operation and control design from MATLAB®/Simulink® via QUARC® or LabView® • Fully documented system models and parameters • Supports scaling and playback of earthquake data • Synchronize motion profiles with multiple tables and/or other data acquisition systems • Integrated safety features and limits 	<ul style="list-style-type: none"> • Shake Table III • 230 VAC Integrated Power System • Rack-mount PC preconfigured with your choice of software & hardware • Q4 Real-Time Control Board • Optional Active Mass Damper One Floor or Two Floor* [AMD 01 or AMD 02] • QUARC® 	<table border="1"> <tr> <td>Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]</td> <td>106.7 x 106.7 x 20.3 cm</td> <td>Continuous Linear Motor Power</td> <td>506 W</td> </tr> <tr> <td>Shake Table System Mass</td> <td>550 kg</td> <td>Maximum Continuous Current</td> <td>12 A</td> </tr> <tr> <td>Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]</td> <td>71.1 x 71.1 cm</td> <td>Maximum Peak Current</td> <td>36 A</td> </tr> <tr> <td>Stage Mass</td> <td>175.5 [x], 95.22 [y] kg</td> <td>Linear Motor Maximum Continuous Force</td> <td>880.7 N</td> </tr> <tr> <td>Maximum Payload at 1.0 g</td> <td>100 kg</td> <td>Linear Motor Peak Force</td> <td>2,642.2 N</td> </tr> <tr> <td>Maximum Travel</td> <td>21.59 [x], 21.59 [y] cm</td> <td>Maximum Payload</td> <td>120 kg</td> </tr> <tr> <td>Operational Bandwidth</td> <td>20 [x], 20 [y] Hz</td> <td>Encoder Resolution</td> <td>4 µm</td> </tr> <tr> <td>Peak Velocity</td> <td>154.6 [x], 154.6 [y] cm/s</td> <td>Accelerometer Range</td> <td>±49 m/s²</td> </tr> <tr> <td>Peak Acceleration</td> <td>10.98 [x], 17.79 [y] g</td> <td>Accelerometer Sensitivity</td> <td>1.0 V/g</td> </tr> <tr> <td>Peak Linear Motor Power</td> <td>4554 W</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]	106.7 x 106.7 x 20.3 cm	Continuous Linear Motor Power	506 W	Shake Table System Mass	550 kg	Maximum Continuous Current	12 A	Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]	71.1 x 71.1 cm	Maximum Peak Current	36 A	Stage Mass	175.5 [x], 95.22 [y] kg	Linear Motor Maximum Continuous Force	880.7 N	Maximum Payload at 1.0 g	100 kg	Linear Motor Peak Force	2,642.2 N	Maximum Travel	21.59 [x], 21.59 [y] cm	Maximum Payload	120 kg	Operational Bandwidth	20 [x], 20 [y] Hz	Encoder Resolution	4 µm	Peak Velocity	154.6 [x], 154.6 [y] cm/s	Accelerometer Range	±49 m/s ²	Peak Acceleration	10.98 [x], 17.79 [y] g	Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g	Peak Linear Motor Power	4554 W														
Shake Table System Overall Dimensions [L x W x H]	106.7 x 106.7 x 20.3 cm	Continuous Linear Motor Power	506 W																																																					
Shake Table System Mass	550 kg	Maximum Continuous Current	12 A																																																					
Table Dimensions, a.k.a. Payload Area [L x W]	71.1 x 71.1 cm	Maximum Peak Current	36 A																																																					
Stage Mass	175.5 [x], 95.22 [y] kg	Linear Motor Maximum Continuous Force	880.7 N																																																					
Maximum Payload at 1.0 g	100 kg	Linear Motor Peak Force	2,642.2 N																																																					
Maximum Travel	21.59 [x], 21.59 [y] cm	Maximum Payload	120 kg																																																					
Operational Bandwidth	20 [x], 20 [y] Hz	Encoder Resolution	4 µm																																																					
Peak Velocity	154.6 [x], 154.6 [y] cm/s	Accelerometer Range	±49 m/s ²																																																					
Peak Acceleration	10.98 [x], 17.79 [y] g	Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g																																																					
Peak Linear Motor Power	4554 W																																																							
HEXAPOD Multi-axial shaker  <p>Optional add-on</p>	<p>This multi-axial shake table is a parallel robotic device capable of moving heavy loads at high accelerations, within a small workspace. Featuring six Degrees of Freedom [DOF], this industrial grade platform is suitable for research in earthquake simulation, vibration, structural dynamics, rehabilitation and more. Unlike most commercially available Stewart platforms, the Hexapod is driven by superior electrical motors which make this six DOF motion platform precise, responsive and low-maintenance.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • High precision ball screw mechanism • Safety brake logic circuit and built-in mechanical brakes • Easy inter face through USB connection • Optional six DOF force/torque sensor • High performance amplifier [built-in] • Easy integration of third party structures, sensors and actuators • Built-in software safety watchdog including run-away detection and collision avoidance • Flexible operation and control design from MATLAB®/Simulink® via QUARC® or LabView® • Precise, stiff and heavy-duty machined components • Fully documented system models and parameters • High-resolution optical encoders to measure the joint positions 	<ul style="list-style-type: none"> • Hexapod • QUARC® • Hexapod-ready PC • Optional force/torque sensor • Optional Active Mass Damper One Floor or Two Floor* [AMD 01 or AMD 02] 	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>X</td> <td>Y</td> <td>Z</td> <td>Roll</td> <td>Pitch</td> <td>Yaw</td> </tr> <tr> <td>Maximum Force, Torque</td> <td>1156.89</td> <td>1335.86</td> <td>3797.62</td> <td>548.14</td> <td>632.94</td> <td>500.95 N, N.m¹</td> </tr> <tr> <td>Workspace</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> <td>0.19</td> <td>36.81</td> <td>36.81</td> <td>50.19 m, deg¹</td> </tr> <tr> <td>Maximum Speed</td> <td>0.67</td> <td>0.67</td> <td>0.35</td> <td>152.79</td> <td>152.79</td> <td>80.62 m/s, deg/s¹</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>Total Moving Mass</td> <td>6 kg</td> <td>Arm Length</td> <td>37.5 cm</td> </tr> <tr> <td>Maximum Acceleration</td> <td>1 g</td> <td>Actuator Maximum Force</td> <td>334 N</td> </tr> <tr> <td>Operational Bandwidth</td> <td>20 Hz</td> <td>Actuator Travel</td> <td>± 30.0 cm</td> </tr> <tr> <td>Maximum Load</td> <td>250 kg</td> <td>Encoder Resolution</td> <td>10000 counts/rev</td> </tr> <tr> <td>Dimensions [L x W x H]</td> <td>110 x 110 x 75 cm</td> <td>Weight</td> <td>100 kg</td> </tr> <tr> <td>Platform Radius</td> <td>25 cm</td> <td>Rated Power</td> <td>1728 W</td> </tr> </table>		X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw	Maximum Force, Torque	1156.89	1335.86	3797.62	548.14	632.94	500.95 N, N.m ¹	Workspace	0.30	0.30	0.19	36.81	36.81	50.19 m, deg ¹	Maximum Speed	0.67	0.67	0.35	152.79	152.79	80.62 m/s, deg/s ¹	Total Moving Mass	6 kg	Arm Length	37.5 cm	Maximum Acceleration	1 g	Actuator Maximum Force	334 N	Operational Bandwidth	20 Hz	Actuator Travel	± 30.0 cm	Maximum Load	250 kg	Encoder Resolution	10000 counts/rev	Dimensions [L x W x H]	110 x 110 x 75 cm	Weight	100 kg	Platform Radius	25 cm	Rated Power	1728 W
	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw																																																		
Maximum Force, Torque	1156.89	1335.86	3797.62	548.14	632.94	500.95 N, N.m ¹																																																		
Workspace	0.30	0.30	0.19	36.81	36.81	50.19 m, deg ¹																																																		
Maximum Speed	0.67	0.67	0.35	152.79	152.79	80.62 m/s, deg/s ¹																																																		
Total Moving Mass	6 kg	Arm Length	37.5 cm																																																					
Maximum Acceleration	1 g	Actuator Maximum Force	334 N																																																					
Operational Bandwidth	20 Hz	Actuator Travel	± 30.0 cm																																																					
Maximum Load	250 kg	Encoder Resolution	10000 counts/rev																																																					
Dimensions [L x W x H]	110 x 110 x 75 cm	Weight	100 kg																																																					
Platform Radius	25 cm	Rated Power	1728 W																																																					
SMART STRUCTURE Flexible beam and pendulum 	<p>This stand-alone structure consists of a flexible beam and a servomotor driving an eccentric load. A large pendulum with an inertial load is used to actively compensate the swaying motion of the structure. This experimental platform teaches undergraduate students how to dampen vibrations of the structure using various control concepts. The Smart Structure can be used as a standalone or as an add-on to any shake table.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Inertia load consisting of two rigid beams and a round crossbeam • Base plate instrumented with a precise strain gage • Flexible operation and control design from MATLAB®/Simulink® via QUARC® or LabView® • High quality DC servo motor and gearbox • High resolution optical encoder • Precisely machined solid aluminum parts • Fully documented system models and parameters • Open architecture design 	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Structure • VoltPAQ-X1 • Q2-USB • QUARC® 	<table border="1"> <tr> <td>Motor Torque Constant</td> <td>0.0767 Nm/Amp</td> <td>Rigid Beam Mass[each]</td> <td>0.072 kg</td> </tr> <tr> <td>Motor Armature Resistance</td> <td>2.6 ohm</td> <td>Rigid Beam Inertia About End (both beams)</td> <td>0.0039 kg m²</td> </tr> <tr> <td>Motor Internal Gear Ratio</td> <td>14</td> <td>Cross Beam Mass</td> <td>0.050 kg</td> </tr> <tr> <td>Motor External Gear Ratio</td> <td>5</td> <td>Flexible Beam Length</td> <td>44.0 cm</td> </tr> <tr> <td>Total Gear Ratio</td> <td>70</td> <td>Flexible Beam Mass</td> <td>0.22 kg</td> </tr> <tr> <td>Encoder Resolution</td> <td>4096 counts/rev</td> <td>Strain Gage Sensitivity</td> <td>0.4 V/cm</td> </tr> <tr> <td>Motor Fixture Mass</td> <td>0.6 kg</td> <td>Strain Gage Gain</td> <td>2.54 cm/V</td> </tr> <tr> <td>Rigid Beam Length</td> <td>28.5 cm</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Motor Torque Constant	0.0767 Nm/Amp	Rigid Beam Mass[each]	0.072 kg	Motor Armature Resistance	2.6 ohm	Rigid Beam Inertia About End (both beams)	0.0039 kg m ²	Motor Internal Gear Ratio	14	Cross Beam Mass	0.050 kg	Motor External Gear Ratio	5	Flexible Beam Length	44.0 cm	Total Gear Ratio	70	Flexible Beam Mass	0.22 kg	Encoder Resolution	4096 counts/rev	Strain Gage Sensitivity	0.4 V/cm	Motor Fixture Mass	0.6 kg	Strain Gage Gain	2.54 cm/V	Rigid Beam Length	28.5 cm																						
Motor Torque Constant	0.0767 Nm/Amp	Rigid Beam Mass[each]	0.072 kg																																																					
Motor Armature Resistance	2.6 ohm	Rigid Beam Inertia About End (both beams)	0.0039 kg m ²																																																					
Motor Internal Gear Ratio	14	Cross Beam Mass	0.050 kg																																																					
Motor External Gear Ratio	5	Flexible Beam Length	44.0 cm																																																					
Total Gear Ratio	70	Flexible Beam Mass	0.22 kg																																																					
Encoder Resolution	4096 counts/rev	Strain Gage Sensitivity	0.4 V/cm																																																					
Motor Fixture Mass	0.6 kg	Strain Gage Gain	2.54 cm/V																																																					
Rigid Beam Length	28.5 cm																																																							
AMD 01 1 Floor Active Mass Damper 	<p>This experiment is similar in nature to active mass dampers used to suppress vibrations in tall structures against earthquakes and strong wind. It is a tall building-like structure, instrumented with an accelerometer to measure the acceleration of the "roof" relative to earth. The structure is flexible along its facade. A cart driven by a rack and pinion mechanism is mounted at the top of the structure and is free to move along in the same direction as the structure. The cart is controlled to minimize the building deflection. The AMD can be used as a standalone or as an add-on to any shake table.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible operation and control design from MATLAB®/Simulink® via QUARC® or LabView® • High quality DC servo motor and gearbox • High resolution optical encoder, to sense the cart position • Precisely machined solid aluminum cart • Fully documented system models and parameters • Variable cart load mass • Open architecture design 	<ul style="list-style-type: none"> • AMD 01 • VoltPAQ-X1 • Q2-USB • QUARC® 	<table border="1"> <tr> <td>Structure Floor Height</td> <td>53 cm</td> <td>Top Floor Natural Frequency</td> <td>2.5 Hz</td> </tr> <tr> <td>Flexible Structure Length</td> <td>32 cm</td> <td>Top Floor Linear Stiffness</td> <td>500 N/m</td> </tr> <tr> <td>Structure Depth</td> <td>11 cm</td> <td>Cart Mass</td> <td>0.39 kg</td> </tr> <tr> <td>Flexible Structure Total Mass</td> <td>1.60 kg</td> <td>Cart Travel</td> <td>± 9.5 cm</td> </tr> <tr> <td>Structure Top Floor Mass</td> <td>0.68 kg</td> <td>Floor Accelerometer Sensitivity</td> <td>1.0 V/g</td> </tr> <tr> <td>Rack Mass</td> <td>0.70 kg</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Structure Floor Height	53 cm	Top Floor Natural Frequency	2.5 Hz	Flexible Structure Length	32 cm	Top Floor Linear Stiffness	500 N/m	Structure Depth	11 cm	Cart Mass	0.39 kg	Flexible Structure Total Mass	1.60 kg	Cart Travel	± 9.5 cm	Structure Top Floor Mass	0.68 kg	Floor Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g	Rack Mass	0.70 kg																														
Structure Floor Height	53 cm	Top Floor Natural Frequency	2.5 Hz																																																					
Flexible Structure Length	32 cm	Top Floor Linear Stiffness	500 N/m																																																					
Structure Depth	11 cm	Cart Mass	0.39 kg																																																					
Flexible Structure Total Mass	1.60 kg	Cart Travel	± 9.5 cm																																																					
Structure Top Floor Mass	0.68 kg	Floor Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g																																																					
Rack Mass	0.70 kg																																																							
AMD 02 2 Floor Active Mass Damper 	<p>This advanced active mass damping experiment is useful to study the benefits of employing AMD on a two floor structure. A tall building-like structure consisting of two floors is instrumented with an accelerometer on each floor to measure their acceleration. The structure is flexible along its facade. A cart driven by a rack pinion mechanism is mounted at the top of the second floor. The cart is controlled to minimize the building deflection. AMD 02 is particularly valuable for teaching and research in structural dynamics as it includes two dynamic modes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible operation and control design from MATLAB®/Simulink® via QUARC® or LabView® • High quality DC servo motor and gearbox • High resolution optical encoders, to sense the cart position • Precisely machined solid aluminum cart • Fully documented system models and parameters • Variable cart load mass • Open architecture design 	<ul style="list-style-type: none"> • AMD 02 • VoltPAQ-X2 • Q2-USB • QUARC® 	<table border="1"> <tr> <td>Second Floor Height</td> <td>103.5 cm</td> <td>First and Second Floor Linear Stiffness</td> <td>500 N/m</td> </tr> <tr> <td>Structure Depth</td> <td>11 cm</td> <td>Cart Mass [with two weights]</td> <td>0.65 kg</td> </tr> <tr> <td>Structure Total Mass [with no rack and no cart]</td> <td>3.3 kg</td> <td>Cart Travel</td> <td>± 9.5 cm</td> </tr> <tr> <td>First Floor Mass</td> <td>1.160 kg</td> <td>Cart Planetary Gearbox Efficiency</td> <td>100 %</td> </tr> <tr> <td>Second Floor Mass</td> <td>1.380 kg</td> <td>Floor Accelerometer Sensitivity</td> <td>1.0 V/g</td> </tr> <tr> <td>Rack Mass</td> <td>0.70 kg</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Second Floor Height	103.5 cm	First and Second Floor Linear Stiffness	500 N/m	Structure Depth	11 cm	Cart Mass [with two weights]	0.65 kg	Structure Total Mass [with no rack and no cart]	3.3 kg	Cart Travel	± 9.5 cm	First Floor Mass	1.160 kg	Cart Planetary Gearbox Efficiency	100 %	Second Floor Mass	1.380 kg	Floor Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g	Rack Mass	0.70 kg																														
Second Floor Height	103.5 cm	First and Second Floor Linear Stiffness	500 N/m																																																					
Structure Depth	11 cm	Cart Mass [with two weights]	0.65 kg																																																					
Structure Total Mass [with no rack and no cart]	3.3 kg	Cart Travel	± 9.5 cm																																																					
First Floor Mass	1.160 kg	Cart Planetary Gearbox Efficiency	100 %																																																					
Second Floor Mass	1.380 kg	Floor Accelerometer Sensitivity	1.0 V/g																																																					
Rack Mass	0.70 kg																																																							

SHAKE TABLES

SMART STRUCTURES*



QUANSER
INNOVATE. EDUCATE.

FOR MORE INFO VISIT WWW.QUANSER.COM/EARTHQUAKE

Products and/or services pictured and referred to herein and their accompanying specifications may be subject to change without notice. Products and/or services mentioned herein are trademarks or registered trademarks of Quanser Inc. and/or its affiliates. Other product and company names mentioned herein are trademarks or registered trademarks of their respective owners. ©2010 Quanser Inc. All rights reserved.

Rev 1.0

*Quanser Shake Tables can be expanded by adding Smart Structures – test building-like bench-scale structures with active mass damper. This makes the Shake Table workstations adaptable for real-life earthquake studies. These structures are ideal for use with Shake Table I-40, II, III and Hexapod. They enable the experiment in the absence of your own building models.

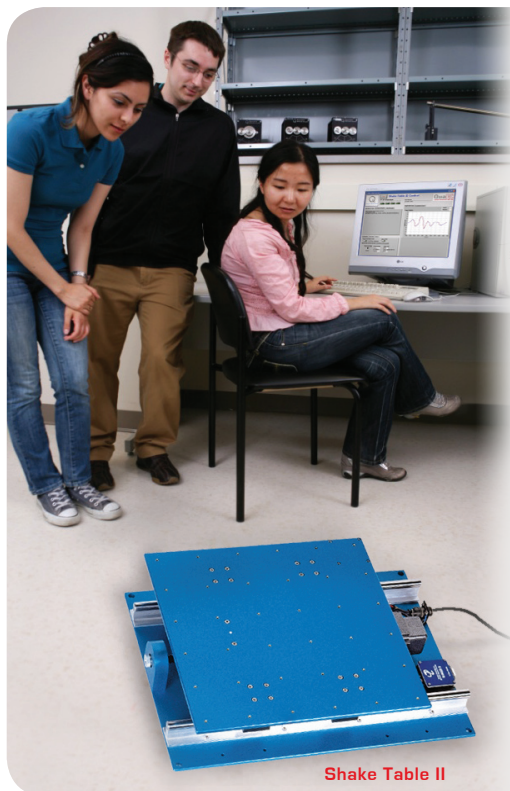
¹Assuming other five DOF's held at home position

²Contact Quanser for full bandwidth specs and graphs



QUANSER
INNOVATE. EDUCATE.

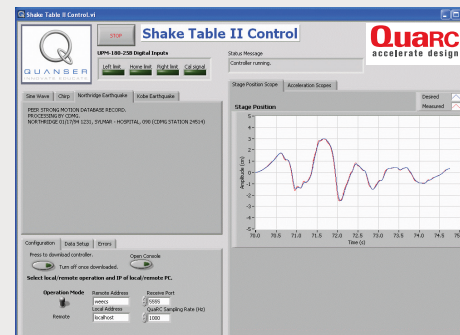
RELIABLE AND ROBUST TURN-KEY WORKSTATIONS



Quanser's Shake Tables come complete with all of the components you need; the experiment, amplifier, data acquisition card and control software are supplied with purchase. You receive a versatile, robust, optimized and integrated workstation that gives you piece of mind. The value of this turn-key solution is extended further by its open-architecture and scalable design.



Universal Power Amplifier



User-friendly Programming Environment



Data Acquisition Card

Shake Table II

HOW LEADING EDUCATORS ARE ENHANCING CIVIL ENGINEERING EDUCATION



Professor Shirley Dyke is the driving force behind University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST); she helped start the Consortium in 1999. The main goal of UCIST is to bring earthquake simulators to classrooms and foster collaborative teaching and learning at the university level. Students early in their undergraduate courses get a chance to develop an understanding of structural dynamics and controls principles through hands-on experiments in addition to theory. "Hands-on experiments seem to be particularly effective for teaching basic concepts in dynamics and control," said Prof. Dyke. UCIST selected the Shake Table II as their bench-scale seismic simulator. "Quanser simply offered us a complete package," commented Prof. Dyke. "The system consists not only of a shake table, but includes accelerometers, test structures, data acquisition and computer to record data and control the shake table. It gives us desired flexibility in performing experiments. No other company was able to give us all that." Since joining forces with Quanser, UCIST has grown from 23 member universities to over 100 worldwide, and UCIST now recommends the Shake Table II as a turnkey solution for teaching civil engineers.



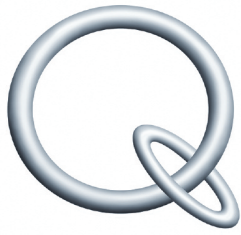
Dr. Anthony Ingraffea, Professor at the Cornell School of Civil and Environmental Engineering is a long time user of Quanser's Shake Tables to bridge the gap between theory and practice. "It has been very useful for five generations of freshmen," commented Prof. Ingraffea. Recognizing that preparing students for the real world requires real-world experiments, he uses the Shake Table II when introducing structural dynamics and assigns projects that offer hands-on and teamwork experiences. His undergraduate students experience what an earthquake looks like and the actual response of a structure. Prof. Ingraffea is confident that using a Shake Table in his classes has dramatically increased engagement and retention of undergraduates pursuing an engineering degree at Cornell. Inspired by their effectiveness, Prof. Ingraffea also uses the Shake Table in outreach activities. His goal is to stimulate underprivileged students from the High Jump program to pursue an engineering degree and career. More information is available at www.highjumpchicago.org.

For more information please visit quanser.com/earthquake

About Quanser:

Quanser is the world leader in education and research for real-time control design and implementation. We specialize in outfitting engineering control laboratories to help universities captivate the brightest minds, motivate them to success and produce graduates with industry-relevant skills. Universities worldwide implement Quanser's open architecture control solutions, industry-relevant curriculum and cutting-edge work stations to teach Introductory, Intermediate or Advanced controls to students in Electrical, Mechanical, Mechatronics, Robotics, Aerospace, Civil, and various other engineering disciplines. To request a product brochure, please e-mail info@quanser.com. Quanser educational solutions are fully compatible with:





QUANSER
INNOVATE. EDUCATE.

UNIVERSITY CONSORTIUM ON INSTRUCTIONAL SHAKE TABLES:

How to enhance civil engineering programs with earthquake simulators.

Every year catastrophic earthquakes remind us of powerful forces of nature. And every year, structural engineers around the world work hard to design and build towers, bridges, tunnels and buildings that would be able to sustain effects of these seismic events. To succeed, the engineers must understand and experience how structures dynamically respond to the earthquake loading.

PUTTING THEORY INTO PRACTICE.

"Having the ability to simulate an earthquake gives us a much better understanding of building performance," says Professor Shirley Dyke from Washington University in St. Louis. Professor Dyke is the driving force behind University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST), she helped start it in 1999. The main goal of UCIST is to bring earthquake simulators to classrooms. Students early in their undergraduate courses get a chance to develop and understanding of structural dynamics and controls principles through hands-on experiments in addition to theory. "Hands-on experiments seem to be particularly effective for teaching basic concepts in dynamics and control," continues Prof. Dyke, "they are an attractive supplement to the rather conventional content of several courses."

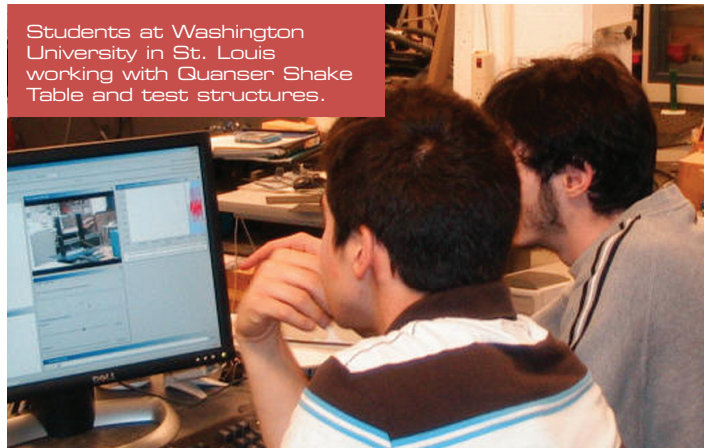
CAPTIVATING AMERICA'S CIVIL ENGINEERING STUDENTS.

One of the first tasks UCIST faced was to select the right bench-scale seismic simulator. The Shake Table II solution from Quanser was chosen. "Quanser simply offered us a complete package," answers Prof. Dyke. "The system consists not only of a shake table, but includes accelerometers, test structures, data acquisition and computer to record data and control the shake table. It gives us desired flexibility in performing experiments. No other company was able to give us all that."

With the help of the National Science Foundation (NSF) Instrumentation and Laboratory Improvement Program, UCIST equipped all its member universities with the same Quanser Shake Table II solution. The 23 member universities across U.S. started to develop earthquake related experiments and share them with other UCIST members. "It is very interesting for the students to come to the laboratory," adds Prof. Dyke. "We can see they develop interest in the subject early on. During graduate studies, they simply expand on the knowledge they acquired as undergraduate students."

BUILDING A FOUNDATION EARLY.

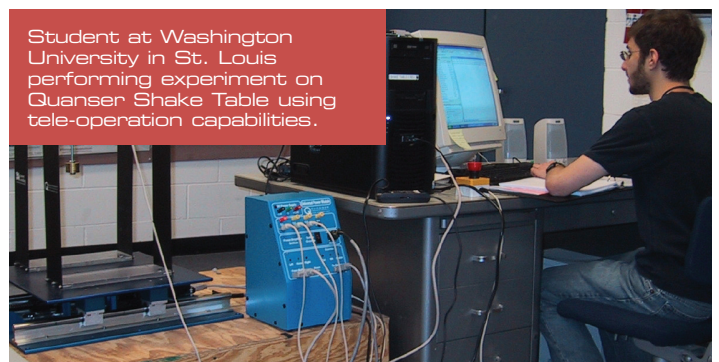
The portability of Quanser Shake Table II is an added advantage that enables UCIST to reach prospective students outside the University. Washington University's 'Moving and Shaking...Introduction to Engineering' program was launched to help attract young high-school students to engineering. "We don't know how much impact these activities have," admits Prof. Dyke, "but we truly hope that some of these kids will pursue a career in engineering."



MOTIVATING CIVIL ENGINEERING STUDENTS GLOBALLY.

In less than 10 years, UCIST has grown substantially and embarked on a new phase of its evolution. With over 100 universities from U.S. and abroad joining as members, additional funding was secured to utilize the latest cyberinfrastructure capabilities developed by the National Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES). In this phase, UCIST will focus on developing teleparticipation and teleoperation experiments. That will allow the consortium to extend hands-on experience to students whose Universities are not able to acquire Shake Tables.

"It has been a lot of fun working with Quanser equipment and teaching students things they wouldn't otherwise have a chance to see. The experiments show them how theory and real world are interconnected,"



summarizes Prof. Dyke her positive experience with Quanser.

"Developing the Shake Table II system for UCIST has been a very rewarding and pivotal for Quanser," adds Dr. Jacob Apkarian, Founder and CTO of Quanser. "We applaud UCIST for their tremendous efforts in extending hands-on experience globally."

UCIST, University Consortium on Instructional Shake Tables, was developed to enhance undergraduate and graduate education in earthquake engineering. This consortium, headquartered at Washington University in St. Louis, was initially a cooperative educational effort between 23 universities associated with the three U.S. national earthquake centers and has since expanded to over 100 universities within the U.S. and abroad. UCIST has endeavored to enhance the education of civil engineering undergraduates through the procurement of instructional shake tables and the development of curricula to be used at the undergraduate level and shared among member institutions. For more information on UCIST, visit www.mase.wustl.edu/wusceel/ucist

Dr. Shirley Dyke is a Professor of Civil Engineering at Department of Mechanical, Aerospace and Structural Engineering of Washington University in St. Louis. Her research and teaching interests include earthquake engineering, structural dynamics and structural control. She is the Director of the Washington University

Structural Control and Earthquake Engineering Lab. In 1999 she formed UCIST to incorporate topics in structural dynamics into the undergraduate curriculum across the U.S. For more details, visit www.engineering.wustl.edu

Quanser Shake Table systems help integrate Structural Dynamics and Control, Earthquake Engineering and related fields into Civil Engineering curriculum and research. The Shake Table II is a bench-scale table that simulates earthquake movements along a single axis. The x-y Shake Table III presents an advanced solution for structural dynamics research and earthquake loss reduction. Shake Table systems are powered using linear motor technology, eliminating the need for hydraulics. Systems can be expanded with optional accessories, test building-like structures with active mass damper. To learn more, visit www.quanser.com/st.