



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica  
de Estruturas

Proc. 305/11/17713

# **SISTEMAS PASSIVOS, ACTIVOS, HÍBRIDOS E SEMIACTIVOS PARA A PROTECÇÃO SÍSMICA DE ESTRUTURAS: ESTADO DOS CONHECIMENTOS**

## **Relatório de estágio – Parte I**

Plano de Investigação Programada n.º 0305/11/17713

Lisboa • Novembro de 2011

**I&D ESTRUTURAS**

**RELATÓRIO 371/2011 – NESDE**



## NOTA PRÉVIA

O presente trabalho constitui parte do relatório de estágio da Eng<sup>a</sup> Maria João Serpa da Lança Falcão da Silva no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do Departamento de Estruturas (DE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O estágio foi realizado entre 3 de Agosto de 2009 e 16 de Setembro de 2011 sob a orientação do Engenheiro Alfredo Peres de Noronha Campos Costa, Investigador Principal do NESDE, enquadrado no Plano de Investigação Programada (2009-2012) nº 0305/11/17713 e subordinado ao tema Protecção Sísmica de Estruturas: Reabilitação, reforço e sistemas inteligentes.

O trabalho desenvolvido pela estagiária, não só durante o período de estágio suprarreferido, mas também enquanto bolsreira de doutoramento FCT/LNEC (2004-2009), deu origem a uma tese de doutoramento em Engenharia Civil (IST), intitulada *Sistemas passivos para a protecção sísmica de estruturas: Uma abordagem baseada no desempenho de amortecedores de líquido sintonizado*, orientada pelo Engenheiro Alfredo Peres de Noronha Campos Costa e pelo Professor Luís Manuel Coelho Guerreiro (IST).



## SISTEMAS PASSIVOS, ACTIVOS, HÍBRIDOS E SEMI-ACTIVOS PARA A PROTECÇÃO SÍSMICA DE ESTRUTURAS: Estado dos Conhecimentos

A redução de danos em estruturas sujeitas à acções dinâmicas, tem vindo a ser objecto de importantes contribuições das mais variadas áreas do conhecimento e investigação. Os estudos desenvolvidos um pouco por toda a comunidade científica nacional e internacional visam a obtenção de uma melhoria significativa ao nível da eficácia das edificações. Uma das linhas orientadoras passa pela utilização de sistemas que permitam a mitigação de vibrações nas estruturas.

Estes sistemas denominam-se Sistemas de Protecção Dinâmica, sendo identificados de uma forma mais particular como Sistemas de Protecção Sísmica se versarem principalmente a protecção das estruturas face às acções dinâmicas dos sismos.

Com este relatório pretende-se apresentar a evolução através do tempo ao nível dos Sistemas de Protecção Sísmica e as suas raízes em outras áreas da Engenharia, bem como contextualizar o estado actual dos conhecimentos na área da protecção dinâmica de estruturas, com particular incidência nos já referidos sistemas de protecção sísmica.

Incluem-se ainda experiências recentes desenvolvidas na área da Protecção Sísmica e exemplos de aplicação prática a nível nacional e internacional. Aproveita-se ainda para apresentar alguns conceitos básicos associados ao seu funcionamento, vantagens e limitações de utilização.

O presente relatório servirá como uma das linhas orientadoras para o desenvolvimento dos trabalhos propostos no âmbito do PIP 2009-2012 do NESDE-DE-Protecção Sísmica de Estruturas: Reabilitação, reforço e sistemas inteligentes.



## PASSIVE, ACTIVE, HYBRID AND SEMI-ACTIVE SYSTEMS FOR SEISMIC PROTECTION OF STRUCTURES: State-of-the-art

The reduction of damage in structures subjected to dynamic actions has been the subject of important contributions from different areas of knowledge and research. The studies developed throughout the national and international scientific community aimed at achieving a significant improvement in the efficiency of buildings. One of the guidelines is the use of systems for vibration mitigation in structures.

These systems are called Dynamic Protection Systems, being identified as Seismic Protection Systems if devoted for the protection of structures against the dynamic actions of earthquakes.

This report aims to present the evolution throughout time of Seismic Protection Systems and their roots in other areas of engineering, and contextualize the current state of knowledge in the area of dynamic protection of structures, with particular focus on already referred Seismic Protection Systems.

The report will also include recent experiences developed in the area of seismic protection and examples of implementation at national and international level. Moreover will be presented some basic concepts associated with their operation, advantages and limitations of use.

This document also serves as guideline for the development of the work proposed under the 2009-2012 PIP NESDE DE – Protecção Sísmica de Estruturas: Reabilitação, reforço e sistemas inteligentes.



## SYSTEMES PASSIFS, ACTIFS, HYBRIDES ET SEMI-ACTIFS POUR LA PROTECTION SISMIQUE DES STRUCTURES: État des connaissances

La réduction des dommages dans les structures soumises à des actions dynamiques, a été l'objet d'importantes contributions de différents domaines de la connaissance et la recherche. Les études développées pour la communauté scientifique nationale et internationale visant à parvenir une amélioration significative de l'efficacité des bâtiments. Une des lignes directrices est de l'utilisation de systèmes pour l'atténuation des vibrations dans les structures.

Ces systèmes sont appelés Systèmes Dynamiques de Protection, tels identifiés Systèmes pour la Protection Sismique si sont dédiés à la protection des structures contre l'action dynamique des tremblements de terre.

Avec ce rapport sera fait une présentation de l'évolution au fil du temps des Systèmes pour la Protection sismique et de leurs racines dans d'autres domaines de l'ingénierie. En outre, l'état actuel des connaissances dans la protection dynamique des structures sera présenté, avec un accent particulier sur déjà visées aux Systèmes pour la Protection Sismique.

Sera aussi présenté l'expérience récente dans le domaine de la protection sismique et des exemples de mise en œuvre au niveau national et international. Enfin sera toujours présenté des concepts de base liés à leur fonctionnement, les avantages et les limitations d'utilisation.

Ce rapport sera une des lignes directrices pour le développement des activités proposées dans le cadre du PIP 2009-2012 DE NESDE – Protecção Sísmica de Estruturas : Reabilitação, reforço e sistemas inteligentes.



# ÍNDICE

1. Introdução	1
2. Estado actual dos conhecimentos na área da Protecção Sísmica	3
2.1. Sistemas Passivos	5
2.1.1. Isolamento Sísmico	6
2.1.1.1. Apoios elastoméricos	14
2.1.1.2. Aparelhos de apoio deslizantes	21
2.1.2. Sistemas Dissipadores de Energia	26
2.1.2.1. Amortecedores Metálicos	28
2.1.2.2. Amortecedores por Atrito	41
2.1.2.3. Amortecedores Viscoelásticos	47
2.1.2.4. Amortecedores de Fluido Viscoso	53
2.1.2.5. Amortecedores electro-inductivos	65
2.1.2.6. Amortecedores de Massa Sintonizada	67
2.1.2.7. Amortecedores de Líquido Sintonizado	85
2.1.2.8. Materiais “Inteligentes”	108
2.2. Sistemas Activos	113
2.2.1. Amortecedores Activos de Massa	119
2.2.2. Sistemas Activos de Amortecimento e Rigidez Variável	125
2.2.3. Cabos Activos	127
2.2.4. Sistemas de Contraventamento Activos	132
2.2.5. Deflectores aerodinâmicos de geometria variável	133
2.2.6. Dispositivos Activos de Controlo de Deformação	133
2.2.7. Apêndices Aerodinâmicos Activos	134
2.2.8. Isolamento de Base Activo	136
2.3. Sistemas Híbridos	138
2.3.1. Amortecedores Híbridos de Massa	139
2.3.2. Isolamento de Base Híbrido	145
2.3.3. Amortecedores de Fluido Viscoso com Actuador Hidráulico	151
2.4. Sistemas Semi-Activos	153
2.4.1. Amortecedores de Fluido Controlável	157
2.4.2. Amortecedores de fricção controlada	162
2.4.3. Amortecedores de rigidez variável	164
2.4.4. Amortecedores semi-activos viscosos	166

2.4.5.	Amortecedores semi-activos de massa e de líquido sintonizado	168
2.4.6.	Amortecedores hidráulicos	168
3.	Aplicações práticas em Portugal	169
4.	Considerações finais	176
5.	Agradecimentos	178
	BIBLIOGRAFIA	179

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Variedade de Sistemas de Protecção Sísmica. ....	5
Figura 2 - Conceito de isolamento sísmico, adaptado de [Austrália Earth Science, 1995] .....	6
Figura 3 - Esquema da primeira patente de isolamento sísmico [Guerreiro, 2003] .....	7
Figura 4 - Escola Heinrich Pestalozzi, Skopje, Republica da Macedónia [Guerreiro, 2003]: a) Vista do exterior, b) Detalhe de colocação do apoio de borracha .....	8
Figura 5 - Detalhe do sistema de isolamento usado na Central nuclear de Kroeberg, Africa do Sul [Guerreiro, 2003] .....	9
Figura 6 - Foothill Communities Law and Justice Center Los Angeles, USA; a) Vista exterior [NISEE, 2004] .....	9
Figura 7 - Vista do exterior do West Japan Postal Computer Centre [Naeim, Kelly] .....	10
Figura 8 - Vista do exterior do edifício William Clayton, Wellington, Nova Zelândia [William Clayton, 2009] .....	10
Figura 9 – Viaduto Somplango, Itália: a) Vista exterior e b) detalhe de um dispositivo de isolamento de base [Castellano e Infanti, 2005] .....	11
Figura 10 - Complexo SIP, Companhia Italiana de Telefones, Ancona, Itália: a) Vista global do exterior e detalhe de um dispositivo de isolamento de base [Guerreiro, 2006] .....	11
Figura 11 - Venture Business Laboratory da Universidade de Kyoto, Japão; a) Vista exterior [VBL, 2006]; b) Detalhe dos dispositivos colocados na rede de água [Oliveira, 2009] .....	12
Figura 12 - Colocação do isolamento de base em edifícios [Guerreiro, 2006] .....	13
Figura 13 - Colocação do isolamento de base em pontes [Guerreiro, 2006] .....	13
Figura 14 - Vista exterior do Fire Command and Control Facility de Los Angeles, USA [NISEE, 2009] .....	14
Figura 15 - Apoio elastomérico [Maurer Söhne GmbH & Co. KG, 2007] .....	15
Figura 16 - Apoio de borracha de amortecimento elevado – HDRB: a) aspecto geral e b) ciclo histirético [Guerreiro, 2003] .....	16
Figura 17 - Complexo SIP, Ancona, Itália: a) Perspectiva do exterior, b) detalhe de apoios HDRB e c) detalhe de sistema de segurança associado [Dolce et al, s/d] .....	16
Figura 18 - Edifícios residenciais, Scillace, Itália: a) Perspectiva do exterior, b) detalhe de da zona de colocação dos apoios [Dolce et. al, s/d] .....	17
Figura 19 - Hospital Gervasutta, Itália: a) Aspecto geral, b) detalhe do posicionamento aparelhos de apoio HDRB [Dolce et. al, ...] .....	17
Figura 20 - Bronzes de Riace: a) Aspecto geral, b) detalhe do sistema de isolamento sísmico [Dolce et. al, s/d] .....	18
Figura 21 - Estátua de imperador germânico: a) Aspecto geral, b) detalhe do sistema de isolamento sísmico com 3 níveis de HDRB [Dolce et. al, s/d] .....	18
Figura 22 - Estátua do Sátiro de Mazaro del Valo: a) Aspecto geral, b) detalhe do rosto [Dolce et. al, s/d] .....	18
Figura 23 - Apoios elastómerico com núcleo de chumbo – LRB: a) aspecto geral e b) ciclo histirético [Guerreiro, 2006] .....	19
Figura 24 - Apoio Elastomérico com Núcleo de Chumbo [Maurer Söhne GmbH & Co. KG, 2007] .....	19
Figura 25 - Lead rubber bearings: a) aspecto do apoio, b) ciclo histerético [Robinson Seismic Lda, 2008] .....	20
Figura 26 - Vista exterior do edifício do parlamento, Nova Zelândia: a) edifício principal, b) biblioteca da Assembleia [Robinson Seismic Lda, 2008] .....	20
Figura 27 - Aplicação de lead rubber bearings em edifícios de interesse cultural, Nova Zelândia: a) Museu da Nova Zelândia, b) Museu Wellington [Robinson Seismic Lda, 2008] .....	20
Figura 28 - “Gates of Hell” de August Rodin colocados nos jardins do Museu de Nacional de Arte Ocidental, Tóquio, Japão: a) Vista geral, b) Detalhe do sistema de isolamento de base [Takenaka Co, 1999] .....	21
Figura 29 - Aspecto detalhado de um sistema pendular com atrito [Oiles Co, 2005] .....	22
Figura 30 – Sistema pendular com atrito – FPS: a) aspecto geral, b) ciclo histirético [Guerreiro, 2006] .....	22
Figura 31 - Comparação entre o movimento do pêndulo (a) e o movimento do sistema pendular com atrito (b) [Guerreiro, 2006] .....	22

Figura 32 - Pêndulo deslizante - “Sliding Isolation Pendulum” [Maurer Söhne GmbH & Co. KG, 2007] .....	23
Figura 33 - Sistema pendular com atrito para aplicação em pontes [Lee et. al, 2005].....	23
Figura 34 - Esquema de funcionamento de estrutura com Sistema Dissipador de Energia [Adaptado de Spencer Jr. e Soong, 1999].....	27
Figura 35 - Exemplos de Amortecedores Metálicos, (a) Torsional Beam, (b) Flexural Beam, (c) Rolling-bending U-strip. [Soong, et al., 1997]. .....	31
Figura 36 - Dispositivo ADAS: a) aspecto geral e b) processo de deformação sob a simulação de uma ação sísmica [Aiken, 2006]. .....	32
Figura 37 - Processo de deformação de um dispositivo TADAS sob a simulação de uma dada ação sísmica [Aiken, 2006]. .....	32
Figura 38 - Comportamento histerético de um dispositivo TADAS [Tsai et. al., 1993].....	32
Figura 39 - Edifício Wells Fargo, San Francisco: a) vista do exterior, b) detalhe do dispositivo ADAS colocado. [Aiken, 2006].....	33
Figura 40 - Edifício Izazaga n°s 38 a 40, Cidade do México: a) vista do exterior, b) detalhe do dispositivo ADAS colocado [Aiken, 2006].....	34
Figura 41 - Vista do exterior do Core Pacific City, Taipei [Aiken, 2006].....	34
Figura 42 - Aspecto geral de dispositivo Shear Link Braced Frame, adaptado de [Rai e Wallace, 2000] .....	35
Figura 43 - Mecanismo de colapso de estrutura porticada com Dispositivo Shear-Link, adaptado de [Rai e Wallace, 2000].....	35
Figura 44 - Lead extrusion damper: a) Representação esquemática [Aiken, 2006] e b)sequência de 3 primeiros ciclos com frequência de teste de 0.9Hz e amplitude de deslocamento de $\pm 125\text{mm}$ [Aiken, 2006] .....	36
Figura 45 - Central de Polícia de Wellington, Nova Zelândia; a) Vista exterior [Robinson Seismic Lda, 2008]; b) e c) Detalhe dos Lead Extrusion Dampers colocados [Aiken, 2006] .....	37
Figura 46 - Vista exterior de um hotel japonês em que foram incluídos lead extrusion dampers [Robinson Seismic Lda, 2008] .....	37
Figura 47 - Exemplo de Amortecedor Metálico do tipo unbonded brace damper [Soong, et al., 2002]. .....	38
Figura 48 - Exemplo de amortecedor metálico do tipo steel slit damper: a) corte e b) vista de cima [Albernami, 2007]. .....	38
Figura 49 - Amortecedor metálico com orifício circular simples: a) aspecto geral e b) ciclo histerético [Li e Li, 2007]. .....	39
Figura 50 - Amortecedor metálico com orifício em forma de X duplo: a) aspecto geral e b) ciclo histerético [Li e Li, 2007]. .....	39
Figura 51 - Deformação em Amortecedores Metálico após ensaios quase-estáticos: a) dispositivo com orifício circular simples e b) orifício em forma de X duplo [Li e Li, 2007]...	40
Figura 52 - Edifício em betão armado na Dalian University of Technology, China: a) vista geral do exterior, b) dispositivo com orifício circular simples colocado e c) dispositivo com orifício em forma de X duplo colocado [Li e Li, 2007].....	40
Figura 53 - Protótipo de amortecedor metálico ensaiado nas instalações do NCREE [Aiken, 2006]. .....	41
Figura 54 - Dissipador Pall por atrito adaptado de [Sadek, et al., 1996] .....	44
Figura 55 - Dispositivo “Sumitomo”, adaptado de [Aiken, 2006].....	45
Figura 56 - Sonic Office building, Omiya, Japão; a) Vista exterior [Robinson Seismic Lda, 2008] b) detalhes dos dispositivos colocados [Soong e Dargush, 1997] .....	45
Figura 57 - Edifício Columbia SeaFirst, Seattle; a) Vista exterior e b) detalhes do dispositivo colocado [Soong e Dargush, 1997].....	46
Figura 58 - Modelo analítico simplificado da inclusão de amortecedores por fricção em estruturas em pórtico contraventadas.....	46
Figura 59 - Amortecedor viscoelástico: a) Representação esquemática [M.I.T., 2005] e b)exemplo de dispositivo [Kawashima Lab, 2004].....	48
Figura 60 - Amortecedor viscoelástico colocado no World Trade Center, Nova York, EUA: a) Dispositivo típico e b) Detalhe de colocação na estrutura [Samali e Kwok, 1995].....	49
Figura 61 – Representação esquemática de ligação entre dois edifícios e detalhe de dispositivo viscoelástico colocado na estrutura, adaptado de [Oliveira, 2009] .....	50
Figura 62 – Edifício Gentile Fermi, Fabriano, Itália: a)vista geral do exterior e b) detalhe de dispositivo colocado [Antonucci, 2001] .....	51
Figura 63 - Dissipador misto visco-elástico e por fricção [DAMPETECH, 2001].....	51

Figura 64 - Ciclo histirético de dispositivo F-VEDD [DAMPETECH, 2001].....	52
Figura 65 - Relação força-velocidade em amortecedores de fluido viscoso [Guerreiro, 2006]..	55
Figura 66 - Relação força-velocidade em amortecedores de fluido viscoso [Guerreiro, 2006]..	56
Figura 67 - Ciclos dissipativos em amortecedores de fluido viscoso [Guerreiro, 2006] .....	56
Figura 68 - Viscous Damping Wall: a) Detalhe de dispositivo e b) Mecanismo de funcionamento do dispositivo, adaptado de [Soong e Dargush, 1997] .....	56
Figura 69 - Dispositivo Taylor, adaptado de [Soong, e Dargush, 1997] .....	58
Figura 70 - Dispositivo Jarret, adaptado de [Soong, e Dargush, 1997] .....	58
Figura 71 - Hotel Woodland, California: a) vista geral do exterior [Taylor Devices Inc, 2009] e b) detalhe dos dispositivos colocados [Taylor Devices Inc, 2009].....	59
Figura 72 - San Bernardino County Medical Centre: a) vista geral do exterior [Taylor Devices Inc, 2009] e b) detalhe de colocação dos dispositivos [Taylor Devices Inc, 2009].....	60
Figura 73 – Ponte Seo-Hae, Seoul, Korea: a) vista geral da estrutura e viadutos de aproximação e b) detalhe do dispositivo colocado [Infanti, 2001] .....	60
Figura 74 – Ponte Seohae, Seoul, Korea: a) visão geral da estrutura e b) detalhe de colocação do dispositivo [Infanti et. al, 2004].....	61
Figura 75 – Ponte Chun-Su, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação do dispositivo [Infanti et. al, 2004].....	61
Figura 76 – Ponte E-Po, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação de dispositivos na direcção transversal e longitudinal [Infanti et. al, 2004] .....	61
Figura 77 – Ponte Kang-Dong, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação de dispositivos [Infanti et. al, 2004].....	61
Figura 78 – Ponte Dong-Yu, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação de dispositivo na direcção transversal [Infanti et. al, 2004] .....	62
Figura 79 – Ponte sobre o rio Higuamo, Republica Dominicana: a) vista global [google images, 2009] e b) dispositivo colocado [Castellano, 2004] .....	63
Figura 80 – Igreja “Dives in Misericórdia”, Roma, Itália: a) visão global da zona oeste e b) detalhe da colocação dos dispositivos [Castellano, 2004] .....	63
Figura 81 – Pacific Northwest Major League Baseball Park, Seattle, EUA: a) aspecto geral da estrutura e b) dispositivos colocados [Taylor Devices Inc, 2009].....	64
Figura 82 – Pacific Northwest Major League Baseball Park, Seattle, EUA: a) colocação de dispositivos de protecção e b) dispositivos colocados [Taylor Devices Inc, 2009].....	64
Figura 83 – City Hall, Los Angeles, EUA: a) visão global do exterior e b) dispositivo colocado [Taylor, 2009]. .....	65
Figura 84 – Amortecedores electro-inductivos: a) linear [Kawashima Lab, 2004] e b) rotativo [ALGA, 2009].....	66
Figura 85 - Esquema de funcionamento de um amortecedor de massa sintonizado, adaptado de [Soong e Dargush, 1997]. .....	68
Figura 86 – Função de resposta em frequência de um amortecedor de massa sintonizado [Gerb, 2009] .....	72
Figura 87 - Ponte Akashi-Kaikyo, Japão: a) visão geral e b) amortecedor de massa sintonizada colocado nas torres [HBSE, 200].....	73
Figura 88 – Torre Center Point [Images Google, 2009].....	74
Figura 89 – Torre John Hancock [Berlinoir, 2008] .....	74
Figura 90 – Citicorp Center [Citicorp, 2009].....	76
Figura 91 – Canadian National Tower [CN Tower, 2009].....	76
Figura 92 – Chiba Port Tower [CPT images google, 2009] .....	76
Figura 93 – Fukuoka Tower, Fukuoka, Japão: a) Vista exterior [FT images google, 2009] e b) AMS colocado [Mitsubishi, 2005].....	77
Figura 94 – Crystal Tower, Osaka, Japão: a) Vista exterior [CT images google, 2009], b) representação esquemática do funcionamento do AMS [Nagase e Hisatoku, 1992] colocação dos AMS junto do sistema de refrigeração [Nagase e Hisatoku, 1992] .....	78
Figura 95 – Yokohama Landmark Tower, Yokohama, Japão: a) Vista do exterior [YT Wikipedia, 2009], b) representação esquemática do AMS colocado [Kareem et. al., 1999] .....	78
Figura 96 – Vista do exterior da torre de controlo de tráfego aéreo do Aeroporto de Washington, Washington, EUA [Cooper, s/d] .....	79
Figura 97 – Hotel Burj Al Arab, Dubai, Emirados Árabes Unidos: a) Vista global do exterior [BAA, 2009], b) pormenor de colocação do amortecedor de massa sintonizado [Gerb, 2009] e c) detalhe de amortecedor de massa sintonizado [Gerb, 2009].....	79

Figura 98 – Passadiço do Millennium, Londres, Reino Unido: a) Vista global [MB, 2009], b) perspectiva aérea [Gerb, 2009] .....	80
Figura 99 – Passadiço do Millennium, Londres, Reino Unido: a) AMS vertical [Gerb, 2009], e b) AMS horizontal durante a colocação [Gerb, 2009] .....	80
Figura 100 – Trump Tower, New York, EUA: a) Vista do exterior e b) representação esquemática do amortecedor de massa sintonizada colocado [TT, 2009] .....	81
Figura 101 - Edifício de 101 pisos de Taipei: a) vista global do exterior [images google, 2009], b) detalhe do topo [Taipei 101, s/d], e c) aspecto global do amortecedor de massa sintonizado [Taipei 101, s/d].....	82
Figura 102 – Taipei 101, Taipei, Taiwan: a)Representação esquemática dos amortecedores de massa sintonizada colocados no pináculo [Haskett et. al., s/d] e b) Instalação dos amortecedores de massa sintonizada do pináculo [Taipei 101, s/d].....	82
Figura 103 – Plataforma de balanço sobre o Grand Canyon, Arizona, EUA: a) Vista aérea [Skywalk, 2010] e b)Representação esquemática de amortecedor de massa sintonizado colocado [Skywalk, 2010].....	83
Figura 104 – Esquematização das partes constituintes de um amortecedor de impacto [Kareem et. al, 1999] .....	83
Figura 105 - Esquematização da “família” de amortecedores de líquido sintonizado, adaptado de [Kareem et. al, 1999].....	85
Figura 106 - Esquematização do funcionamento de amortecedores de sloshing, adaptado de [Robinson et. al., 2007] .....	86
Figura 107 - Tanque anti balanço para navios patenteado por Frahm [Den Hartog, 1956] .....	87
Figura 108 - Anel parcialmente cheio de líquido para aplicação em satélites [Fujino et. al., 1988] .....	88
Figura 109 - Torre do aeroporto de Nagasaki, Japão: a) Vista do exterior [Tamura, s/d] e b) detalhe de conjunto de amortecedores de líquido sintonizado [Soong e Dargush, 1997] ..	93
Figura 110 - Farol da marina de Yokohama, Japão: a) representação esquemática da colocação dos amortecedores de líquido sintonizado e b) aspecto geral dos amortecedores de líquido sintonizado [Soong e Dargush, 1997] .....	94
Figura 111 - Gold Tower, Japão: a) visão global do exterior [GT, s/d] e b) protótipo de amortecedor de sloshing colocado [Yalla, 2001] .....	95
Figura 112 - Hotel Shin-Yokohama Prince, Japão: a) Vista exterior [Tamura, s/d] e b) amortecedores de líquido sintonizado instalados na cobertura [Dankook University, 2006] .....	96
Figura 113 - Representação esquemática da torre de controlo de tráfego aéreo do Aeroporto Internacional de Tóquio em Haneda, Japão [Tamura et. al., 1996]. .....	97
Figura 114 - Aeroporto Internacional de Tóquio em Haneda, Japão: a) Representação esquemática de unidade de amortecedores de líquido sintonizado [Tamura et. al., 1996] b) Protótipo de amortecedores de líquido sintonizado [Tamura et. al., 1996] e c) amortecedores de líquido sintonizado instalados em suportes de aço [Tamura et. al., 1996]. .....	97
Figura 115 – Millennium Tower, Tóquio, Japão: a) Visão global da estrutura [MT, 2007], b) Representação esquemática do funcionamento de amortecedor de líquido sintonizado, c) controlo passivo de uma unidade de amortecedor de líquido sintonizado e d) controlo activo de uma unidade de amortecedor de líquido sintonizado, adaptado de [Yalla, 2001]98	98
Figura 116 – Esquematização de amortecedor de coluna de líquido sintonizado .....	101
Figura 117 – Random House Tower, New York, EUA: a) Vista do exterior [Tamboli, s/d] e b) representação esquemática amortecedor de coluna de líquido sintonizado colocado [Robinson e Kala, 2007].....	102
Figura 118 – Comcast Center, Philadelphia, EUA: a) Vista do exterior [Robinson e Kala, 2007] e b) Representação esquemática do amortecedor de coluna de líquido sintonizado colocado [Robinson e Kala, 2007].....	103
Figura 119 – Hotel Cosima, Tóquio, Japão: a) Vista do exterior e b) representação esquemática do detalhe do mecanismo de ajuste da frequência [Shimizu e Teramura, 1994].....	104
Figura 120 - Igreja de S. Giorgio Trigano, Itália: a) Aspecto geral da torre sineira e b) dispositivo com memória de forma colocado [Castellano, 2001] .....	110
Figura 121 - Basílica de S. Francisco, Assis, Itália: a) Vista geral do exterior e b) danos no frontão resultantes do sismo de 1997 [Castellano, 2001a].....	110

Figura 122 – Sistemas usados na reabilitação e reforço da Basílica de S. Francisco, Assis, Itália: a) Detalhe dos dispositivos, b) detalhe da colocação, c) detalhe de colocação e d) aspecto final do reforço [Castellano, 2001b] .....	111
Figura 123 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema de protecção activa, adaptado de [Spencer Jr. e Soong, 1999]. .....	114
Figura 124 - Edifício Kyobashi Seiwa, Tóquio: a) Vista exterior [Kareem et. al, 2001]; b) esquemática da colocação do sistema de protecção activa do tipo amortecedor de massa sintonizada [Soong e Spencer Jr., 2002] e c) unidade de amortecedor de massa sintonizada colocado [Kareem et. al, 2001] .....	121
Figura 125 - Edifício Applause Tower, Osaka, Japão: a) Vista do exterior e b) Representação esquemática do amortecedor de massa activo [Takenaka Co., 2001].....	122
Figura 126 – Complexo Shinjuku Park Tower, Tóquio: a) Visão global do exterior [SPT, 2009] e b) perspectiva do complexo de edifícios vista do solo.....	123
Figura 127 - Sistema Trigon colocado no Edifício Shinjuku Tower, Tóquio: a) Detalhe do dispositivo; b) esquema de funcionamento [Soong e Spencer Jr., 2002]. .....	123
Figura 128 – Shanghai World Financial Center, Shanghai, Japão: a) Vista do exterior e b) detalhe construtivo do amortecedor activo de massa sintonizado [SWFC Wikipedia, 2009] .....	124
Figura 129 – Torre de TV, Nanjing, R.P. China: a) visão global do exterior, b) representação esquemática da colocação da massa sobre o apoio em Teflon e c) detalhe da colocação da massa sobre o apoio em Teflon [Reinhorn et. al, 2000] .....	124
Figura 130 – Representação esquemática da colocação de um sistema de dispositivos de amortecimento e rigidez variável num edifício [Moutinho, 1998].....	126
Figura 131 – Kajima Technical Research Institute, Tóquio, Japão a) Vista do exterior do edifício e b) representação esquemática da colocação dos sistemas activos de amortecimento e rigidez variável [Sakamoto e Koboril, 1995] .....	126
Figura 132 – Representação esquemática de implementação de sistema de cabos activos [Pinto e Gonçalves, 2000].....	128
Figura 133 – Colocação de cabos activos em tirantes de pontes atirantadas [Moutinho, 1998]. .....	129
Figura 134 – Pórtico de 3 pisos com cabos activos: Representação esquemática do dispositivo de ensaio e b) modelo ensaiado [Spencer Jr. et. al., 1998]. .....	130
Figura 135 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema protecção por via de cabos activos, adaptado de Spencer Jr. e Soong, 1999]. .....	131
Figura 136 - Bayview Bridge, Mississipi, EUA [BB, s/d]. .....	131
Figura 137 – Sistema de contraventamento activo: a) Representação esquemática de dispositivo de ensaio e b) detalhe do dispositivo ensaiado [Loh et. al, 1999]. .....	132
Figura 138 – Dispositivos activos de controlo de deformação: a) Situação sem dispositivo, b) situação com dispositivos e carga vertical aplicada a 1/2 vão e c) situação com dispositivo e carga vertical aplicada a 1/4 de vão, adaptado de [Moutinho, 1998] .....	134
Figura 139 – Esquema de colocação de apêndices aerodinâmicos activos [Hansen e Thoft- Christensen, s/d]. .....	134
Figura 140 – Esquemática do funcionamento do isolamento de base activo, adaptado de [Spencer Jr, 2000]. .....	137
Figura 141 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema de protecção híbrido, adaptado de Spencer Jr. e Soong, 1999]. .....	138
Figura 142 - Edifício Sendagaya INTES, Tóquio: a) Vista exterior; b) Esquema da colocação do sistema amortecedor híbrido de massa e respectivos sensores de controlo [Higashino e Aizawa, 1993]. .....	141
Figura 143 - Planta do edifício Sendagaya INTES, Tóquio com identificação da localização dos dois amortecedores híbridos de massa que constituem o sistema de protecção híbrido [Higashino e Aizawa, 1993]. .....	141
Figura 144 - Yokohama Landmark Tower, Yokohama: a) Vista do exterior [YT, 2009] e b) esquema do pêndulo amortecedor híbrido de massa de vários níveis [Yamazaki et. al, 1993]. .....	142
Figura 145 - Edifício Ando Nighikichon, Tóquio: a) Vista do exterior; b) esquematização da colocação do sistema de protecção híbrida Duox [Soong e Spencer Jr., 2002]. .....	143
Figura 146 - Edifício Ando Nighikichon, Tóquio, Japão: a) Esquema de funcionamento 2D; b) esquema de funcionamento 3D [Soong e Spencer Jr., 2002]. .....	144

Figura 147 – Osaka Resort City (ORC) Symbol Tower, Osaka, Japão: a) Vista global do exterior; b) unidade de amortecedor híbrido de massa instalada [Kareem et. al, 1999]...	144
Figura 148 – Hotel RIGHA Royal, Japão: a) Vista global do exterior; b) unidade de amortecedor híbrido de massa instalado [Kareem et. al, 1999].	145
Figura 149 – Aeroporto Internacional de Kansai, Kansai, Japão: a) Visão global do exterior; b) unidade de amortecedor híbrido de massa colocada na torre de controlo de tráfego aéreo [Kareem et. al, 1999].	145
Figura 150 – Estrutura ensaiada, adaptado de [Riley et. al, 1998].	147
Figura 151 – Sistema de isolamento de base híbrido constituído por apoios deslizantes (passivo) e um actuador (activo), adaptado de [Riley et. al, 1998].	147
Figura 152 – Sistema de isolamento de base híbrido ensaiado na Universidade de Berkeley: a) Dispositivo de ensaio, b) amortecedores de fluido viscoso pequenos e c) amortecedores de fluido viscoso grandes [Chang et. al, 2002].	148
Figura 153 – Sistema híbrido de isolamento de base constituído por um conjunto de pêndulo (passivo) e amortecedor magnetoreológico (semi-activo) – Dispositivo de ensaio.....	150
Figura 154 – Sistema híbrido de isolamento de base constituído por um conjunto de apoios elastoméricos (passivo) e amortecedor magnetoreológico (semi-activo) – Dispositivo de ensaio com identificação.....	150
Figura 155 – Edifício de escritórios, Osaka, Japão: a) Vista global do exterior [Takenaka, 2001] e b) amortecedor multifunções [Takenaka, 2001].	151
Figura 156 – Edifício de escritórios, Osaka, Japão: a) Apoio linear [Takenaka, 2001]; b) apoio elastomérico com núcleo de chumbo [Takenaka, 2001].	151
Figura 157 – Esquematização de colocação de um protótipo de um sistema híbrido constituído por um amortecedor de fluido viscoso e um actuador hidráulico activo [Cheng e Jiang, 1998].	152
Figura 158 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema de protecção semi-activa, adaptado de [Spencer Jr. e Soong, 1999].	154
Figura 159 – Tipos de sistemas semi-activos .....	156
Figura 160 - Comportamento dos fluidos magnetoreológicos e electroreológicos: a) sem campo aplicado e b) com campo aplicado, adaptado de [Yang, 2001].	158
Figura 161 - Amortecedor de fluido controlável do tipo magnetoreológico, adaptado de [Spencer Jr. e Soong, 1999].	158
Figura 162 - Implementação de amortecedor de fluido controlável magnetoreológico em máquinas de lavar: a) Detalhe do dispositivo colocado [NASA, 2009] e b) estrutura com dispositivo colocado [NASA, 2009].	161
Figura 163 - Implementação de amortecedor de fluido controlável Magneo-reológico na indústria automóvel: a) Detalhe do dispositivo colocado [IMAGES GOOGLE, 2009] e b) Chevrolet Corvette [IMAGES GOOGLE, 2009].	161
Figura 164 - Implementação de amortecedor de fluido controlável magnetoreológico em pontes: a) Detalhe do dispositivo colocado [DTL, 2009] e b) Ponte Dong Ting Lake, China [DTL, 2009].	161
Figura 165 - Implementação de amortecedor de fluido controlável do tipo magnetoreológico em estruturas de edifícios: a) Detalhe do dispositivo colocado [DTL, 2009] e b) Nihon-Kagaku-Miraikan Museum, Japão [DTL, 2009].	161
Figura 166 - Implementação de solução híbrida entre amortecedor de fluido controlável magnetoreológico e isolamento de base em estruturas de edifícios: a) detalhe do dispositivo colocado [Fujitani et. al, 2003] e b) exemplo de aplicação [Fujitani et. al, 2003].	162
Figura 167 – Esquematização de um amortecedor semi-activo de rigidez variável, adaptado de [Kamagata e Kabori, 1994].	165
Figura 168 – Esquematização de um amortecedor semi-activo viscoso, adaptado de [Oliveira, 2009].	167
Figura 169 – Ponte Salgueiro Maia, Santarém, Portugal: a) Visão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].	170
Figura 170 – Ponte Vasco da Gama, Lisboa, Portugal: a) Visão global da estrutura [Images google, 2009] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].	171
Figura 171 – Viaduto do Loureiro, Lisboa, Portugal: a) vVisão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].	171
Figura 172 – Viaduto do Loureiro, Lisboa, Portugal: a) Visão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].	172

Figura 173 – Viaduto sobre a Ribeira da Laje no Rio Grande da Pipa, Lisboa, Portugal: a) Visão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].	172
Figura 174 – Visão global da Ponte Pedonal Pedro e Inês, Coimbra, Portugal [ViBest, 2006].	172
Figura 175 – Sistema de controlo implementado na Ponte Pedonal Pedro e Inês, Coimbra, Portugal: a) Detalhe de um dispositivo colocado [Caetano et. al, 2007] e b) dispositivo colocado no tabuleiro [Caetano et. al, 2007]	173
Figura 176 – a) Pormenor de um apoio HDRB utilizados no Hospital da Luz [Prazeres Ferreira, 2008] e b) Planta e cortes dos edifícios com localização dos apoios do Hospital da Luz [Prazeres Ferreira, 2008].	174
Figura 177 - Fotografia aérea da fase construtiva do Hospital da Luz [Prazeres Ferreira, 2008].	174
Figura 178 – Representação esquemática do aspecto final do complexo [Guerreiro et. al, 2008].	175
Figura 179 – Hotel Mundial, Lisboa, Portugal: a) Perspectiva do exterior [HM, 2009] e b) detalhe do sistema colocado [Venâncio et. al, 2004]	175
Figura 180 – Teatro Municipal de Faro, Faro, Portugal: a) Perspectiva do exterior [TMF, 2009] e b) detalhe do sistema colocado [Venâncio et. al, 2004]	176



# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Benefícios expectáveis na aplicação de sistemas de isolamento sísmico, adaptado [Takenaka Corporation, 2001] .....	26
---	----



## 1. Introdução

As acções dinâmicas em estruturas podem originar diferentes níveis de danos estruturais resultantes dos níveis de vibrações dinâmicas impostas, sejam elas resultantes de ventos, sismos ou de uma simples explosão. Existem situações, em que a segurança estrutural não se encontra ameaçada, podendo o nível de vibrações tornar-se excessivo na óptica do conforto dos utilizadores. É, por isso, que os investigadores têm vindo a procurar, desde há muito tempo, formas de prevenir vibrações elevadas em estruturas de edifícios e pontes.

No que refere à protecção estrutural pretendida, pode não se conseguir alcançar a situação ideal pelo simples aumento de resistência ou rigidez dos elementos estruturais, devido, por exemplo, a limitações estruturais relacionadas com a capacidade resistente dos elementos de fundação ou com os custos associados ao aumento de resistência. Para além disso, convém não esquecer que, para certas acções, como é o caso da acção sísmica, o aumento da rigidez pode intensificar os efeitos negativos das vibrações que se pretende mitigar.

É também importante lembrar que os métodos de dimensionamento tradicionais consideram a capacidade de deformação inelástica dos elementos estruturais, admitindo danos consideráveis. Esta abordagem pode ser crítica, no caso de estruturas que devam manter a sua operacionalidade durante e especialmente após a ocorrência de desastres naturais, como é o caso dos hospitais, centros de comunicações, edifícios históricos ou infra-estruturas vitais de transporte.

A utilização de métodos alternativos, como sejam os sistemas de protecção dinâmica, pode ser uma solução adequada e segura para fazer face às acções dinâmicas impostas. Estes métodos avançados não reforçam a estrutura, mas reduzem as forças geradas pela acção dinâmica imposta, o que leva à redução da resposta estrutural (acelerações, deslocamentos). Para além de estes sistemas começarem a ser aplicados em estruturas novas, tem-se verificado um interesse crescente na sua aplicação no reforço de estruturas existentes um pouco por todo o mundo, particularmente ao nível dos edifícios históricos [Martelli, 2007].

Ao longo dos anos, os sistemas de controlo e protecção têm vindo a ser desenvolvidos, no sentido de resolver os problemas relacionados com os danos resultantes de acções dinâmicas. Estes sistemas permitem melhorar o comportamento

dinâmico estrutural através da modificação das características dinâmicas das estruturas ou influenciando a forma como as acções são transmitidas à estrutura. A forma como a acção dinâmica é modificada permite distinguir os vários tipos de sistemas de protecção dinâmica.

De um modo muito genérico, os sistemas de protecção podem ser classificados em passivos e activos, dependendo se necessitam ou não do fornecimento de energia para o seu funcionamento.

O uso de sistemas passivos não introduz qualquer energia no sistema; no entanto, aumenta a capacidade dissipativa do sistema global. Um dispositivo passivo não tem a capacidade de se auto-ajustar e reagir à acção dinâmica que lhe é imposta.

Adicionalmente a estes, e por se tratar de soluções conjugadas, distinguem-se outros dois tipos de sistemas de protecção: sistemas semi-activos e híbridos. A utilização de sistemas activos, semi-activos e híbridos implica necessariamente a aplicação de controlo estrutural, com um algoritmo de decisão subjacente.

O princípio básico do controlo em sistemas de protecção é a previsão, em tempo real, da resposta estrutural dinâmica. As unidades de controlo registam a informação obtida por sensores estrategicamente colocados de maneira a que o critério de controlo previamente estabelecido para cada caso seja satisfeito. Os sistemas activos, por usarem energia para produzir e aplicar forças à estrutura para correcção de comportamentos inadequados, são dos sistemas de protecção atrás referidos os mais exigentes em termos energéticos [Oliveira, 2009].

De uma forma geral, identificam-se dois objectivos estratégicos na protecção dinâmica de estruturas: reduzir valores de deslocamentos relativos e/ou reduzir valores de acelerações relativas, com conseqüente redução das forças impostas. Para estes propósitos serem alcançados, torna-se necessário considerar as características estruturais no dimensionamento dos sistemas de protecção dinâmica mais adequados para cada situação.

As diferentes acções dinâmicas actuam de diferentes formas e é expectável que um determinado sistema de protecção e ou mecanismo de controlo para uma determinada estrutura sujeita a uma determinada acção possa não ser o mais adequado para outra estrutura sujeita a uma acção dinâmica de outro tipo (por exemplo vento e sismo).

É, por isso, extremamente importante desenvolver estudos mais aprofundados dos diferentes tipos de sistema de protecção disponíveis, com o objectivo de assim determinar qual ou quais deles produzem o desempenho pretendido nas estruturas, cuja resposta face a acções dinâmicas se pretende mitigar.

Com este relatório, pretende-se apresentar a evolução através do tempo ao nível dos sistemas de protecção dinâmica, bem como contextualizar o estado actual dos conhecimentos na área da protecção dinâmica, com particular incidência nos sistemas de protecção sísmica. Aproveita-se, ainda, para apresentar a descrição de alguns conceitos básicos associados ao seu funcionamento, vantagens e limitações de utilização.

## **2. Estado actual dos conhecimentos na área da Protecção Sísmica**

Nos últimos anos tem-se vindo a intensificar a pesquisa no domínio dos sistemas de protecção sísmica na área da engenharia civil, estando esta a ser orientada no sentido da obtenção da melhor resposta das estruturas face à ocorrência de determinadas situações de catástrofe natural.

A protecção de estruturas tal como é definida na actualidade tem as suas raízes à mais de 100 anos quando John Milne, professor de engenharia no Japão, construiu uma pequena casa de madeira sobre apoios do tipo *ball bearings* por forma a demonstrar que a estrutura poderia ficar isolada dos abalos sísmicos.

O desenvolvimento da teoria de um sistema linear e as suas aplicações ao campo das vibrações, em particular no que diz respeito á dinâmica estrutural, levou muita da primeira metade do século XX. Foi somente durante a segunda guerra mundial que conceitos como isolamento da vibração, absorção da vibração e amortecimento da vibração foram desenvolvidos e aplicados de uma forma eficaz a estruturas de aviões [Housner et al., 1997].

Até à data alguns dos sistemas de protecção de estruturas tem sido usados com sucesso e outros recentemente propostos tem vindo a oferecer a possibilidade de melhorar a eficácia dos métodos já conhecidos e utilizados e, ainda, de estender a sua aplicabilidade a situações mais complexas. Ainda que o trabalho realizado ao nível da protecção estrutural em engenharia civil seja bastante recente [Housner et al., 1997],

pode-se dizer que o número de artigos publicados e de trabalhos em curso atinge já um número considerável e com tendência para aumentar rapidamente.

Nos Estados Unidos a evolução da protecção estrutural ao nível da engenharia civil, e particularmente da engenharia sísmica, tem vindo a atrair as atenções dos investigadores. Embora tenha tido como origem certos problemas relacionados com o aeroespço, a tecnologia rapidamente evoluiu no sentido de resolver determinados problemas relacionados com a engenharia civil e de infraestruturas, sejam eles a protecção de edifícios e pontes face às acções adversas de sismos intensos e de ventos fortes.

No Japão o controlo de estruturas também tem vindo a ser desenvolvido em paralelo, sendo que algumas dezenas de edifícios se encontram acoplados com sistemas de controlo activo. Mais se refere a utilização de sistemas passivos de isolamento de base em edifícios de pequeno a médio porte como uma estratégia aceite de dimensionamento não só nos Estados Unidos mas também em outras zonas de sismicidade elevada (Japão, Europa, Rússia...) [Housner et al., 1997].

Os edifícios que tem vindo a ser construídos usando dispositivos de protecção sísmica mostram que estes são uma ferramenta muito valiosa ao nível da engenharia e que se forem utilizados métodos combinados (sistemas híbridos ou semi-activos) ou mais sofisticados (sistemas activos de controlo inteligente ou robusto) é possível que, apesar dos custos adicionais associados se obtenham resultados muito bons aquando da mobilização dos referidos dispositivos na sequência de uma dada acção sísmica de intensidade considerável.

Nos últimos anos tem-se vindo a intensificar a pesquisa no domínio dos sistemas de protecção sísmica na área da engenharia civil, estando esta a ser orientada no sentido da obtenção da melhor resposta das estruturas face à ocorrência de determinadas situações de catástrofe natural. Uma das situações que origina maior número de perdas de vários níveis é a ocorrência de um sismo. Desta forma observa-se um interesse crescente na obtenção de soluções que minimizem os efeitos resultantes em estruturas, em particular nas estruturas de edifícios, protegendo-as face à solicitação de uma determinada acção sísmica.

A protecção sísmica de estruturas de edifícios pode ser efectuada de várias formas: passiva, activa, híbrida ou semi-activa. Saliencia-se ainda que das formas de protecção sísmica atrás referidas a que se encontra mais implementada e com um desenvolvimento mais avançado na actualidade é a que engloba sistemas passivos.

No entanto tanto os sistemas activos como os sistemas híbridos ou, ainda, os semi-activos, estes últimos aliando as vantagens tanto dos activos como dos passivos, começam a ser adoptados nos mais variados tipos de estruturas e considerando as solicitações mais adversas.

Pensa-se, que a implementação de sistemas de protecção sísmica a estruturas de edifícios, nomeadamente nos de betão armado, será uma aposta com futuro por permitir a minimização das consequências directas e indirectas associadas à ocorrência de acções sísmicas de magnitude elevada.

Os sistemas de protecção sísmica encontram-se divididos, como já foi referido, em vários grupos: passivos, activos, semi-activos e híbridos.

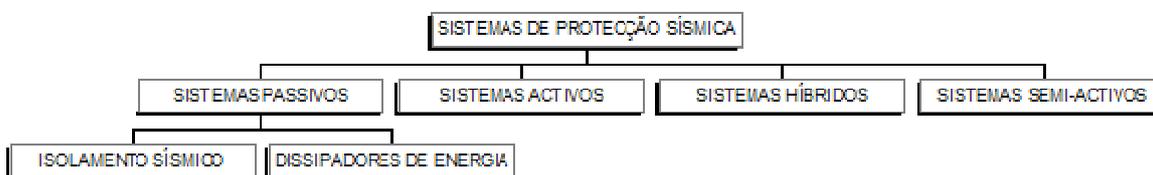


Figura 1 - Variedade de Sistemas de Protecção Sísmica.

Nas secções seguintes passa-se então a apresentar de uma forma mais aprofundada os sistemas passivos disponíveis para a protecção sísmica de estruturas, estudos desenvolvidos e implementações estruturais.

## 2.1. Sistemas Passivos

Relativamente à protecção passiva, pode dizer-se que esta consiste, principalmente, em anexar mecanismos às estruturas, sejam elas edifícios ou não, que permitam a atenuação dos efeitos dos movimentos resultantes das acções exercidas sobre as mesmas e que para isso não necessitem de qualquer forma de interacção ou de meios energéticos externos.

Os dispositivos de protecção passiva transmitem forças que são desenvolvidas em resposta ao movimento da estrutura. A energia, num sistema estrutural controlado de uma forma passiva, incluindo a dos próprios dispositivos passivos, não pode ser aumentada pelos elementos constituintes dos sistemas de protecção [Housner et al., 1997].

O isolamento sísmico e o uso de dissipadores de energia constituem os dois exemplos de sistemas passivos de protecção sísmica. Embora tanto um tipo como o outro sejam capazes de dissipar energia, o que os distingue é o recurso ao corte das ligações horizontais nos sistemas de isolamento sísmico.

### 2.1.1. Isolamento Sísmico

O isolamento sísmico é uma forma de protecção baseada na ideia de que é possível eliminar todas as ligações, no plano horizontal, entre a estrutura e o solo de fundação. Assim o movimento horizontal da estrutura será independente do movimento horizontal do solo, movimento este, que é o principal responsável pelos danos introduzidos nas estruturas em consequência das acções sísmicas. Para além disso, este tipo de sistemas deverá apresentar a capacidade de suporte na direcção vertical, em virtude de as ligações nesta direcção terem que ser inevitavelmente mantidas. A Figura 2 apresenta a esquematização do conceito de isolamento sísmico associado a uma estrutura.

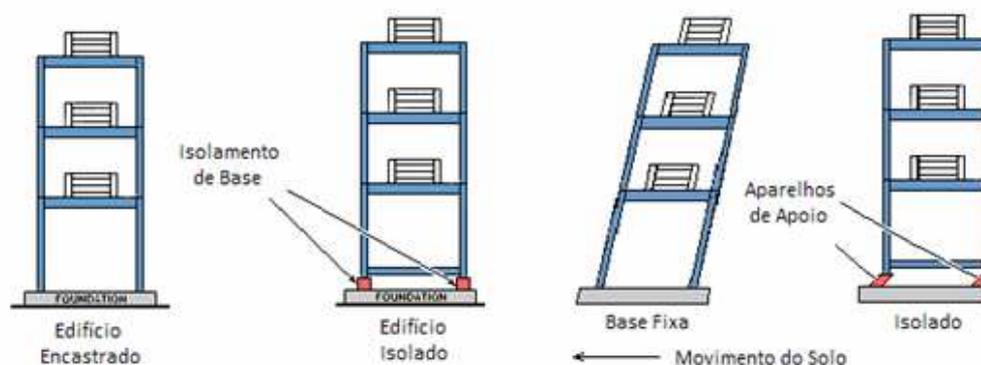


Figura 2 - Conceito de isolamento sísmico, adaptado de [Austrália Earth Science, 1995]

Geralmente os sistemas de isolamento sísmico são colocados por baixo das estruturas ao nível das suas fundações, sendo-lhes atribuída neste caso a denominação de isolamento sísmico de base. Por meio da sua flexibilidade e capacidade de absorção de energia, os sistemas de isolamento reflectem e absorvem parcialmente alguma da energia fornecida pelo sismo antes desta energia ser transmitida à estrutura. Como abordagens detalhadas da tecnologia subjacente ao isolamento sísmico referem-se Skinner et al. [1993] e Guerreiro [1996].

A rigidez dos elementos de isolamento sísmico deverá ser forçosamente baixa, garantindo, no entanto, a capacidade restituição da estrutura à posição original.

Geralmente o isolamento sísmico aplica-se a estruturas de edifícios com frequências superiores a 2Hz. Quando sujeitos a grandes deformações, durante a ocorrência de um sismo, é necessária a introdução de aparelhos de amortecimento ou dissipação suplementares [Oliveira, 2003]. Aspectos construtivos inerentes à sua utilização impedem que se estabeleçam ligações entre a estrutura e o meio externo, que não sejam por meio dos sistemas de isolamento. É extremamente importante que se garanta e disponibilize espaço livre suficiente para que a estrutura se mova livremente sem qualquer tipo de impedimento [Guerreiro, 1996].

No início do século XX aparecem as primeiras referências a um sistema de protecção sísmica que pode ser considerado como isolamento de base. Este sistema, patenteado em Munique decorria o ano de 1906, consistia numa placa rígida que servia de base de suporte a um edifício e que, por sua vez, assentava sobre um conjunto de roletes de um material rijo. [Guerreiro, 2003]

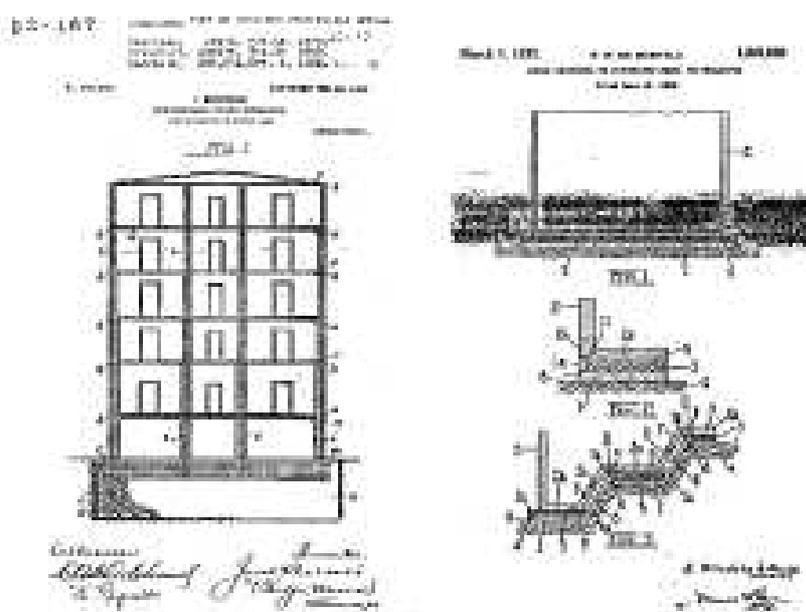


Figura 3 - Esquema da primeira patente de isolamento sísmico [Guerreiro, 2003]

Em Agosto de 1909 um médico do norte de Inglaterra, Dr. Calantarients registou uma nova patente para um método de construção de edifícios, que propunha que as estruturas deveriam ser construídas sobre uma junta livre e uma camada de areia fina ou talco que permitiria que o edifício deslizasse durante a ocorrência de um sismo, e como tal reduzindo as forças transmitidas à própria estrutura

O desenvolvimento da teoria de um sistema linear e as suas aplicações ao campo das vibrações, em particular no que diz respeito á dinâmica estrutural, levou muita da primeira metade do século XX. Foi somente durante a segunda guerra mundial que conceitos como isolamento da vibração, absorção da vibração e

amortecimento da vibração foram desenvolvidos e aplicadas de uma forma eficaz a estruturas de aviões [Housner et al., 1997].

Embora os conceitos fundamentais do isolamento sísmico tenham vindo a ser estudados desde o século passado, a sua implementação só começou a dar os primeiros passos nas últimas décadas do mesmo [Stanton, 1991].

No entanto, já vai surgindo um grande número de estruturas isoladas sísmicamente, embora as técnicas de isolamento sísmico ainda não sejam usadas de uma forma muito generalizada, na maior parte dos países do mundo, resumindo-se a sua aplicação principalmente aos Estados Unidos, Japão, Nova Zelândia e a alguns países da Europa [Dames e Moore 1979, Buckle 1986] dos quais se salienta a Itália.

Assim surge em 1969 surge em Skopje, na então Jugoslávia actualmente republica da Macedónia, aquele que é apontado como o primeiro exemplo de aplicação de isolamento de base – a escola Heinrich Pestalozzi (Figura 4a). Este edifício encontra-se assente em blocos de borracha não reforçada (Figura 4b) sendo ligado ao exterior por meio de elementos fusíveis. Quando os elementos fusíveis se quebram o edifício fica a vibrar livremente sobre os apoios de borracha [Guerreiro, 2003]

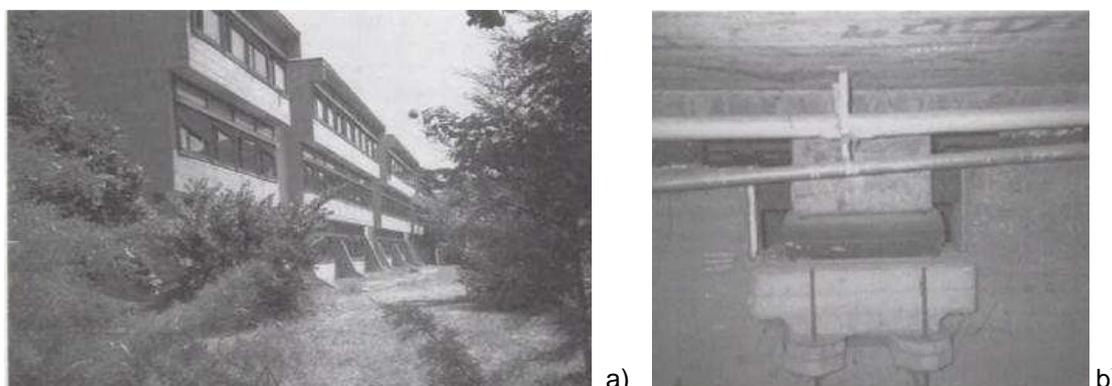


Figura 4 - Escola Heinrich Pestalozzi, Skopje, Republica da Macedónia [Guerreiro, 2003]: a) Vista do exterior, b) Detalhe de colocação do apoio de borracha

O aparecimento e, posterior, desenvolvimento de tecnologia ao nível dos apoios em borracha, neoprene ou outros elastómeros veio promover a aplicação de sistemas de isolamento de base a estruturas. Em 1978 foi construída uma central nuclear na África do Sul (Kroeberg), em que foi aplicado isolamento de base. Esta estrutura constitui um marco histórico na evolução do conceito de isolamento, por ser exemplificativa de uma estrutura com elevados requisitos de segurança.



Figura 5 - Detalhe do sistema de isolamento usado na Central nuclear de Kroeberg, Africa do Sul [Guerreiro, 2003]

O primeiro edifício construído nos Estados Unidos a incluir isolamento de base localiza-se a cerca de 97 km a este de Los Angeles e corresponde ao Foothill Communities Law and Justice Center. Esta estrutura de quarto pisos elevados e caves e sub-caves para colocação do isolamento de base foi concluída em 1985. O sistema de isolamento de base compreende 98 dispositivos do tipo elastoméricos de borracha natural disposta em várias camadas e reforçadas com chapas de aço. A superestrutura do edifício é constituída por uma estrutura em aço reforçada por elementos de contaventamento em alguns vãos.



Figura 6 - Foothill Communities Law and Justice Center Los Angeles, USA; a) Vista exterior [NISEE, 2004]

No Japão o primeiro grande edifício isolado foi completado em 1986, desde então mais de 500 edifícios com isolamento de base foram aprovados para construção pelo Ministério de Construção japonês. Os edifícios construídos e a construir não contemplam apenas edifícios governamentais, mas também residenciais e hospitais. Um dos maiores edifícios com isolamento sísmico corresponde ao West Japan Postal Computer Centre, localizado em Sanda na província de Kobe. Trata-se de um edifício de 6 pisos com uma área em planta de 47000m<sup>2</sup> que se encontra apoiado sobre 120 apoios elastoméricos.



*Figura 7 - Vista do exterior do West Japan Postal Computer Centre [Naeim, Kelly]*

Relativamente à Nova Zelândia o primeiro exemplo de aplicação de isolamento sísmico reporta ao edifício William Clayton (Wellington). Esta estrutura concluída em 1981 corresponde à primeira aplicação a nível mundial de blocos de borracha com núcleo de chumbo



*Figura 8 - Vista do exterior do edifício William Clayton, Wellington, Nova Zelândia [William Clayton, 2009]*

Em Itália a primeira estrutura a integrar isolamento sísmico, e que foi simultaneamente reconhecida como a primeira ponte da Europa a apresentar uma solução para mitigação de vibrações com recurso a isolamento sísmico, corresponde ao viaduto Somplango (Figura 9). Trata-se de uma estrutura cuja construção ficou concluída em 1976. O sistema de isolamento era muito simples, mas eficiente, e compreendeu uma combinação de apoios elastoméricos num dos encontros e apoios deslizantes no topo de todos os pilares.

Com efeito o sismo durante a fase final da sua construção esteve sujeito ao sismo de Friuli (1976), cujo epicentro se encontrava localizado apenas a poucos quilómetros de distância, não tendo sofrido qualquer dano enquanto outras pontes ou viadutos na mesma área, dimensionados com uma abordagem convencional apresentaram danos consideráveis [Castellano e Infanti, 2005]

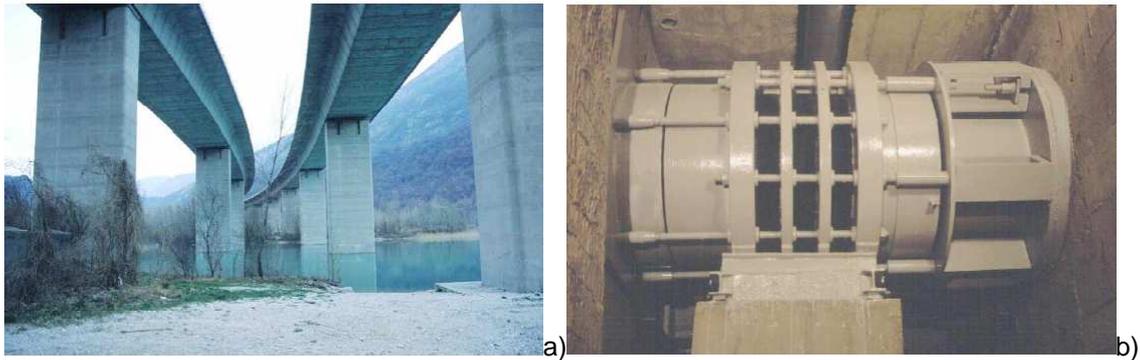


Figura 9 – Viaduto Somplango, Itália: a) Vista exterior e b) detalhe de um dispositivo de isolamento de base [Castellano e Infanti, 2005]

A aplicação de isolamento a edifícios em Itália apenas teve a sua génese alguns anos mais tarde, no início da década de 80, embora de uma forma muito gradual, principalmente devido à falta de regulamentação específica e à demorada verificada no que refere à aprovação de procedimentos adoptados para o dimensionamento.

O isolamento sísmico tem vindo a ser cada vez mais usado em Itália, após a publicação em 2003 da regulamentação italiana mais recente que inclui capítulos e disposições específicas acerca do isolamento sísmico em pontes e edifícios [Castellano e Infanti, 2004]. Indica-se ainda, como exemplo da primeira aplicação em grande escala de isolamento de base em Itália, o edifício que alberga a companhia italiana de telefones, SIP, em Ancona (Itália). Este complexo data do início da década de 90.

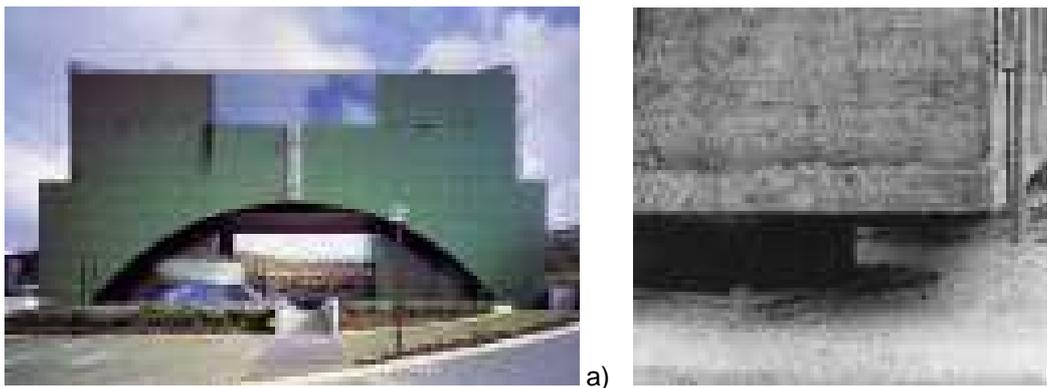


Figura 10 - Complexo SIP, Companhia Italiana de Telefones, Ancona, Itália: a) Vista global do exterior e detalhe de um dispositivo de isolamento de base [Guerreiro, 2006]

A utilização de isolamento de base tem sido orientada no sentido da protecção sísmica de estruturas, ainda que possa ser usada, e com elevados níveis de desempenho, em situações em que se pretenda a redução de vibrações induzidas por equipamentos (indústria) ou ruído. Também em edifícios especiais em que seja

necessário garantir alta precisão em determinadas operações poderá ser necessário o recurso a esta estratégia de mitigação de vibrações.

Como exemplo de aplicação numa situação destas refere-se o Venture Business Laboratory da Universidade de Kyoto, Japão, onde se desenvolve investigação na área dos materiais electrónicos com base em aproximações atómicas e moleculares. Este tipo de investigação requer que os materiais sejam controlados e avaliados a escalas infinitesimais, sendo por isso que o edifício obedeça a normas muito restritivas no que respeita a vibrações admissíveis. À data da sua construção foi a primeira estrutura universitária japonesa a incluir sistemas de protecção de vibrações sísmicas do tipo isolamento de base. Todo o edifício e as ligações ao exterior (redes de água, gás e eléctrica) se encontram protegidos com recurso a sistemas de isolamento de base [Oliveira, 2009]. (Figura 11 a e b)

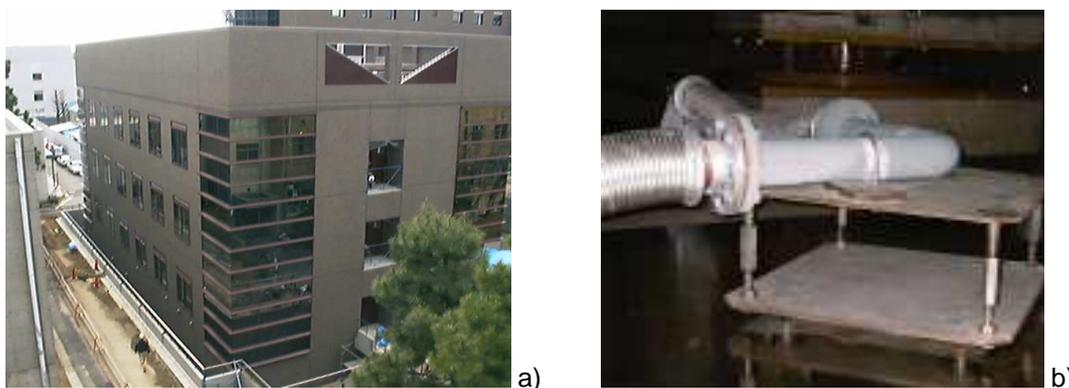


Figura 11 - Venture Business Laboratory da Universidade de Kyoto, Japão; a) Vista exterior [VBL, 2006]; b) Detalhe dos dispositivos colocados na rede de água [Oliveira, 2009]

Um sistema de isolamento sísmico para além da eficácia, deve apresentar características de fiabilidade, adaptabilidade, boa relação custo-benefício associada a um mínimo de manutenção, para que, de cada vez que ocorra um sismo no período de vida útil da estrutura, o referido sistema de isolamento possa entrar em acção da melhor forma possível.

A selecção de um sistema de isolamento sísmico deverá ser efectuada de acordo com critérios envolvendo, para além da relação custo-benefício, o compromisso entre vários factores, dos quais se salientam o deslocamento ao nível da base e o corte basal bem como a resposta a diferentes frequências.

O isolamento de base torna uma estrutura mais flexível e insensível às componentes horizontais de altas frequências. A frequência fundamental da estrutura é assim reduzida. A eficiência deste tipo de sistema depende da capacidade de filtrar as componentes de excitação com frequência próxima da frequência fundamental da

estrutura. O recurso a isolamento de base não é aconselhável em estruturas muito flexíveis, uma vez que a sua inclusão neste tipo de estruturas pode causar instabilidades perigosas [Casarotti, 2004].

Uma estrutura com isolamento de base é geralmente suportada por uma série de apoios colocados entre a estrutura e a sua fundação, no caso de edifícios (Figura 12) ou entre o tabuleiro e o topo dos pilares ou entre o tabuleiro e os encontros no caso das pontes (Figura 13).

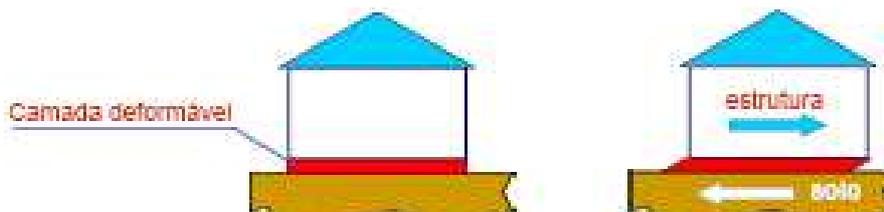


Figura 12 - Colocação do isolamento de base em edifícios [Guerreiro, 2006]



Figura 13 - Colocação do isolamento de base em pontes [Guerreiro, 2006]

Para que uma estrutura se encontre completamente isolada é necessário que não existam restrições de qualquer espécie, nomeadamente ao nível das ligações ao exterior (redes de água, gás e eléctrica), porque só desta forma é que se consegue o perfeito funcionamento do sistema de isolamento de base. É imperativo que se assegure que existe suficiente espaço disponível para permitir o movimento da estrutura. [Guerreiro, 1996].

A título exemplificativo desta problemática refere-se a implementação de isolamento sísmico no Fire Command and Control Facility de Los Angeles construído no início da década de 90. A solução adoptada para este edifício de dois pisos compreendeu a colocação de 32 apoios elastómericos de elevado amortecimento (High-damping rubber bearings – HDR). O edifício alberga os computadores que gerem os serviços de emergência de todo o condado, daí que seja necessário que se mantenha funcional durante e após a ocorrência de um sismo.

Durante o sismo de Northridge (Janeiro de 1994), e tratando-se de um edifício que, dada a sua importância no planeamento de emergência, tem a sua resposta

monitorizada identificaram-se frequência estranhas nos registos de aceleração. Este comportamento foi inesperado, tratando-se de uma estrutura com isolamento de base, o que causou uma certa perplexidade e indignação. Após cuidada investigação foi descoberta a explicação para o facto atrás indicado: um dos acessos foi construído rigidamente ligado à estrutura, o que acabou por comprometer o fosso de isolamento necessário [Clark et. al, 2005]



*Figura 14 - Vista exterior do Fire Command and Control Facility de Los Angeles, USA [NISEE, 2009]*

Actualmente já se encontra desenvolvida e estudada uma extensa variedade de soluções para isolamento de base. Os sistemas de isolamento sísmico podem ser materializados sob a forma de aparelhos de apoio: aparelhos elastoméricos mais ou menos complexos (por exemplo blocos de Borracha de Baixo e Alto Amortecimento – LDRB e HDRB e Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo - LRB), aparelhos de apoio deslizantes (sistema Pendular com Atrito – FPS) ou ainda por meio de blocos de apoio de borracha em associação com dissipadores.

#### 2.1.1.1. Apoios elastoméricos

Este é o tipo de apoios mais frequentemente usado em isolamento de base. Os apoios elastoméricos caracterizam-se por apresentar um bloco de elastómero intercalado por chapas de aço, podendo ainda conter ou não núcleos de chumbo (Figura 15).

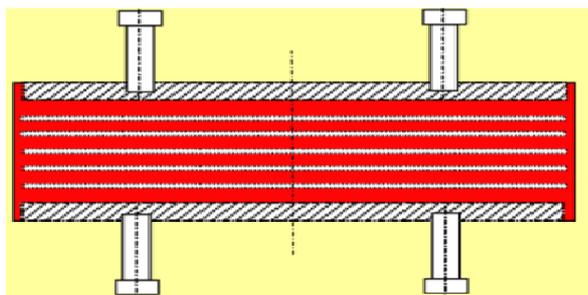


Figura 15 - Apoio elastomérico [Maurer Söhne GmbH & Co. KG, 2007]

Os elastómeros utilizados na concepção de sistemas de isolamento sísmico podem ser de origem natural ou sintética. Tipicamente, os blocos de elastómero apresentam grande capacidade de deformação, baixo módulo de elasticidade, grande capacidade de acumulação de energia, aumento de rigidez com a redução de temperatura e envelhecimento, este último provocado por ocorrência de fenómenos de oxidação. Apesar das restrições, e segundo MCEER, aparelhos que incluam na sua constituição materiais elastoméricos, podem ultrapassar os 50 anos de vida útil [João Correia Y Alberty Moreira de Andrade, 2007].

Um exemplo de aparelho de apoio elastomérico corresponde ao apoio elastomérico de baixo amortecimento (“Low Damping Rubber Bearing” – LDRB). Este dispositivo consiste num conjunto de camadas de borracha, com espessuras compreendidas entre 8 e 20mm, separadas por camadas de aço de 2 a 4mm de espessura. As camadas de aço dificultam a deformação das camadas de borracha, fazendo com que, desta maneira, os aparelhos consigam suportar cargas axiais elevadas, sem que para isso sejam identificadas deformações excessivas. Estes aparelhos apresentam como vantagens a simplicidade na sua produção, a facilidade na sua modelação em termos de análise de projecto e a manutenção das suas características ao longo do tempo. Como desvantagem a necessidade de se fazer auxiliar por sistemas de amortecimento suplementares. [Correia e Andrade, 2007].

Identifica-se ainda como aparelho de apoio elastomérico, o apoio elastomérico de elevado amortecimento (“High damping Rubber Bearing” – HDRB). Em termos de método de produção e aspecto, estes dispositivos são em muito semelhantes aos LDRB mas apresentam um valor de amortecimento acrescido, à custa da adição de carbono, óleos e resinas.

A título meramente comparativo, refere-se que, enquanto o LDRB apresenta no máximo um coeficiente de amortecimento de 10%, o HDRB apresenta um coeficiente de amortecimento entre 10 e 20%, conseguido à custa de aditivos adequados, o que

torna dispensável o uso de sistemas de amortecimento suplementares. Como características adicionais refere-se o seu módulo de distorção (G) entre 0.4MPa e 1.4MPa e o facto da rigidez diminui com o aumento da distorção. No entanto apresentam um aumento significativo de rigidez para grandes distorções

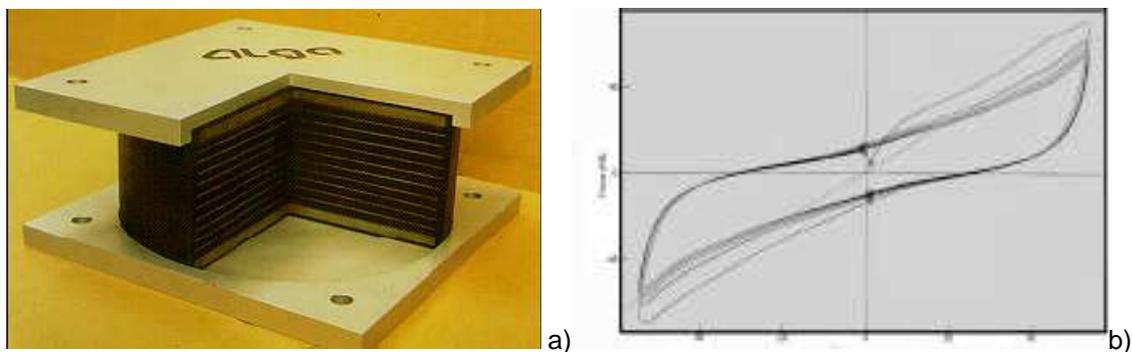


Figura 16 - Apoio de borracha de amortecimento elevado – HDRB: a) aspecto geral e b) ciclo histérico [Guerreiro, 2003]

Como exemplo de aplicação em estruturas de apoios do tipo HDRB em estruturas identifica-se o complexo hospital Arrowhead Medical Center (USA). Este complexo, terminado em 1997, tem cerca de 400 apoios do tipo HDRB dimensionados para permitir deslocamentos até 550mm. No entanto e com o sentido de melhorar o desempenho face às acções sísmicas posteriormente foram adicionados amortecedores de fluido viscoso (referidos na secção 2.1.2.4.)

Outro exemplo de aplicação de apoios do tipo HDRB, mas a nível europeu corresponde ao já identificado complexo da companhia dos telefones italiana localizado na cidade de Ancona (Figura 17). Para além dos apoios elastoméricos indicados (Figura 17b) o sistema de isolamento compreende ainda um sistema de segurança (Figura 17c).

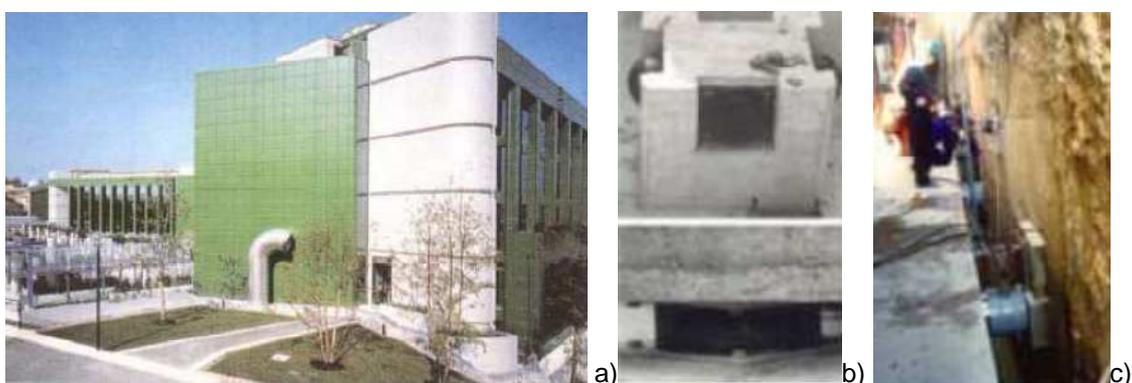


Figura 17 - Complexo SIP, Ancona, Itália: a) Perspectiva do exterior, b) detalhe de apoios HDRB e c) detalhe de sistema de segurança associado [Dolce et al, s/d]

Ao nível dos edifícios residenciais muito também já tem sido feito identificando-se como a primeira aplicação em Itália a este tipo de estruturas a efectuada nos

apartamentos dos edifícios residenciais de Squillace (Figura 18). Neste caso em particular o sistema de isolamento sísmico consistiu em apoios do tipo LDRB e HDRB instalados no topo dos pilares das caves (Figura 18b). À semelhança do efectuado para o complexo da companhia telefónica italiana, o sistema de isolamento sísmico inclui, para além dos apoios elastómericos referidos um sistema de segurança.



Figura 18 - Edifícios residenciais, Scillace, Itália: a) Perspectiva do exterior, b) detalhe de da zona de colocação dos apoios [Dolce et. al, s/d]

Em edifícios públicos o recurso a HDRB também é uma boa alternativa. Como exemplo desta situação refere-se o Hospital Gervasutta (Itália) em que foram usados estes apoios elastoméricos (Figura 19).



Figura 19 - Hospital Gervasutta, Itália: a) Aspecto geral, b) detalhe do posicionamento aparelhos de apoio HDRB [Dolce et. al, ...]

Como consequência dos danos causados pelos sismos, tem-se vindo também a recorrer à implementação de técnicas de isolamento sísmico, nomeadamente com recurso a apoios do tipo HDRB, na reabilitação sísmica da herança cultural.

A título exemplificativo do mencionado no parágrafo anterior, identificam-se as intervenções ao nível dos bronzes de Riace (Figura 20), a estátua de um imperador germânico (Figura 21) e o sátiro de Mazaro del Vallo (Figura 22). Nos dois últimos casos foi usado um sistema de isolamento sísmico com 3 níveis de apoios HDRB.

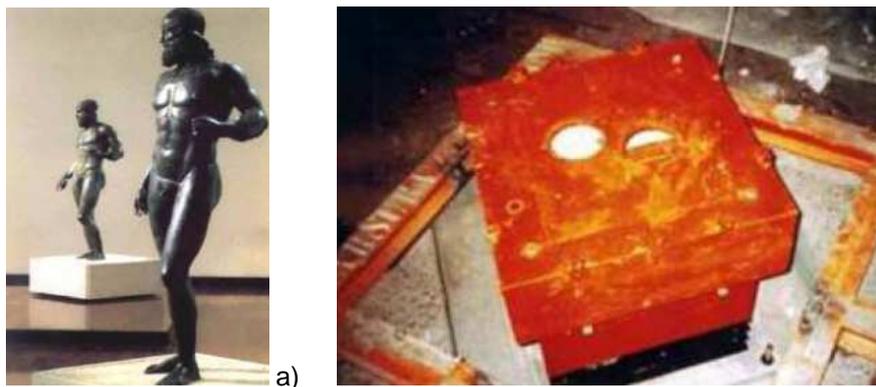


Figura 20 - Bronzes de Riace: a) Aspecto geral, b) detalhe do sistema de isolamento sísmico [Dolce et. al, s/d]

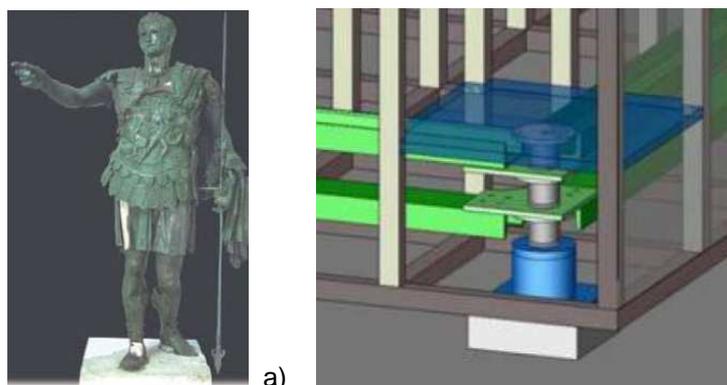


Figura 21 - Estátua de imperador germânico: a) Aspecto geral, b) detalhe do sistema de isolamento sísmico com 3 níveis de HDRB [Dolce et. al, s/d]



Figura 22 - Estátua do Sátiro de Mazaro del Valo: a) Aspecto geral, b) detalhe do rosto [Dolce et. al, s/d]

Outro tipo de apoio elastomérico corresponde ao apoio elastomérico com núcleo de chumbo (*Lead Rubber Bearing – LRB*), correspondendo a uma variação dos apoios de borracha tradicionais. Estes dispositivos, tal como se apresentam na Figura 23a e Figura 24, compreendem um conjunto de blocos de borracha cintados, com núcleo cilíndrico em chumbo embutido.

Neste caso em particular o suporte das cargas verticais é efectuado pelo conjunto de elastómeros, sendo a dissipação de energia é efectuada por meio do núcleo de chumbo. A cintagem dos blocos de borracha é efectuada por meio de

chapas de aço que servem igualmente para fixar os apoios à estrutura e às fundações. O bloco de apoio tem um comportamento bi-linear conseguindo elevados valores de amortecimento através da plastificação do núcleo de chumbo.

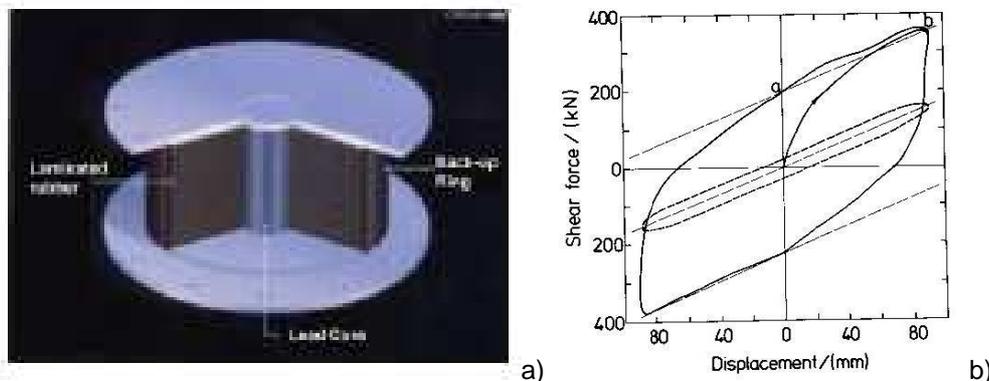


Figura 23 - Apoios elastómerico com núcleo de chumbo – LRB: a) aspecto geral e b) ciclo histérico [Guerreiro, 2006]

Apresentam a rigidez após a cedência da borracha que entra na sua constituição e uma tensão de cedência ao corte do chumbo de aproximadamente 10MPa, sendo que a rigidez antes da cedência é cerca de 10x a rigidez após cedência [Guerreiro, 2006].

Este tipo de aparelhos mantém as suas características fundamentais sem degradação mesmo quando sujeitos a ciclos de carga repetidos. Para além disso, não carece de qualquer tipo de operação de manutenção possuindo uma excelente durabilidade.

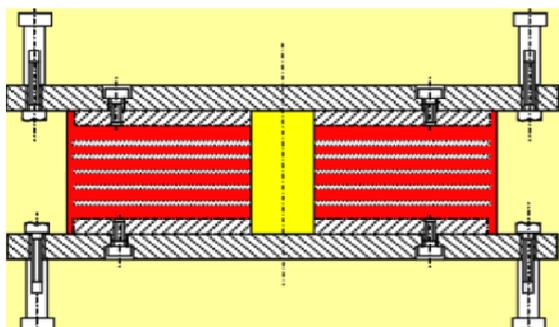


Figura 24 - Apoio Elastomérico com Núcleo de Chumbo [Maurer Söhne GmbH & Co. KG, 2007]

Os *lead rubber bearings* são mundialmente famosos por terem sido o sistema de isolamento sísmico responsável pela protecção com sucesso do Hospital Universitário durante o sismo de Northridge de 1994, enquanto que cerca de 10 hospitais localizados nas suas imediações ficaram de tal forma danificados que tiveram que ser evacuados não tendo qualquer utilidade para a situação de emergência no pós-sismo

Em Janeiro de 1995, no sismo de Great Hanshin (Kobe), um edifício localizado na zona mais afectada pela acção sísmica e que incluía um sistema de isolamento sísmico do tipo lead rubber bearings sobreviveu sem qualquer dano ou mesmo interrupção do seu funcionamento.

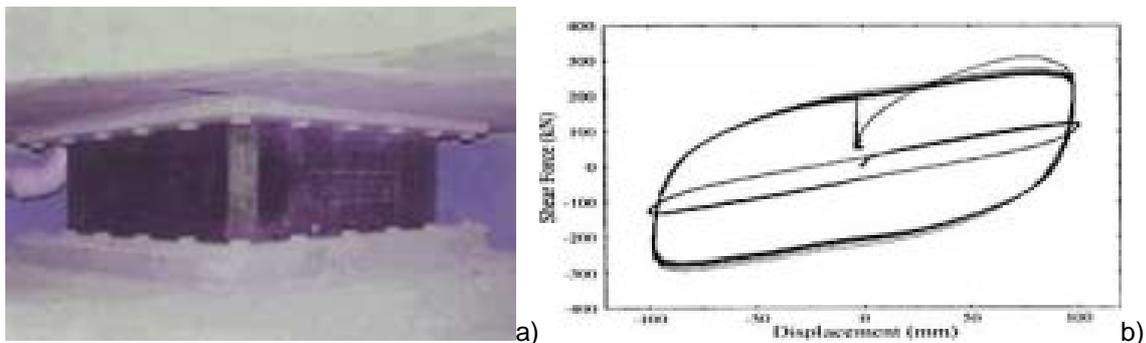


Figura 25 - Lead rubber bearings: a) aspecto do apoio, b) ciclo histerético [Robinson Seismic Lda, 2008]

Apresentam-se em seguida exemplos de algumas das estruturas isoladas com recurso a *lead rubber bearings*:



Figura 26 - Vista exterior do edifício do parlamento, Nova Zelândia: a) edifício principal, b) biblioteca da Assembleia [Robinson Seismic Lda, 2008]



Figura 27 - Aplicação de lead rubber bearings em edifícios de interesse cultural, Nova Zelândia: a) Museu da Nova Zelândia, b) Museu Wellington [Robinson Seismic Lda, 2008]

### 2.1.1.2. Aparelhos de apoio deslizantes

Para além dos apoios anteriormente referenciados, incluem-se no isolamento sísmico os aparelhos de apoio deslizantes. Este tipo de dispositivos baseia-se no conceito de superfícies deslizantes. Como exemplo deste tipo de dispositivos indicam-se os *roller bearings* e os *sliding bearings*.

Os primeiros, *roller bearings*, consistem num conjunto de pequenos cilindros que se podem movimentar de forma a acomodar os deslocamentos de base. Em trabalhos recentes [Lee et. al, 2004] foi proposto que os referidos cilindros deveriam ser colocados num determinado declive, com um mínimo de energia potencial no centro e, como tal, que lhes permite voltar automaticamente à posição de equilíbrio.

Um exemplo de aplicação destes apoios cilíndricos corresponde ao colocado sob a escultura de bronze de Auguste Rodin “Gates of Hell”. Esta escultura encontra-se nos jardins do Museu Nacional de Arte Ocidental (Tóquio) tendo sido colocada sobre uma plataforma de isolamento de base constituída por cinco cilindros circulares e dois dissipadores. Este sistema compreende cilindros circulares entre duas superfícies curvas combinados com três chapas metálicas [Takenaka Co, 1999].



a)



b)

Figura 28 - “Gates of Hell” de August Rodin colocados nos jardins do Museu de Nacional de Arte Ocidental, Tóquio, Japão: a) Vista geral, b) Detalhe do sistema de isolamento de base [Takenaka Co, 1999]

Os segundos dispositivos, *sliding bearings*, correspondem aos denominados *friction pendulum systems* ou sistema pendular com atrito – FPS. Tal como se apresenta na Figura 29, os sistemas pendulares com atrito não são mais do que isoladores em aço inox compreendendo um conjunto de uma estrutura côncava com uma superfície articulada deslizante e uma placa de cobertura.

A frequência do sistema de isolamento é determinada pelo raio de curvatura da superfície côncava. A força de fricção gerada fornece o amortecimento desejado para dissipar a energia de vibração. Desta forma as forças laterais e os movimentos de vibração transmitidos à estrutura são bastante reduzidos. A força lateral é proporcional à carga vertical, o que minimiza os efeitos adversos dos movimentos de torção em estruturas que apresentem distribuição de massa assimétrica [Oliveira, 2009].

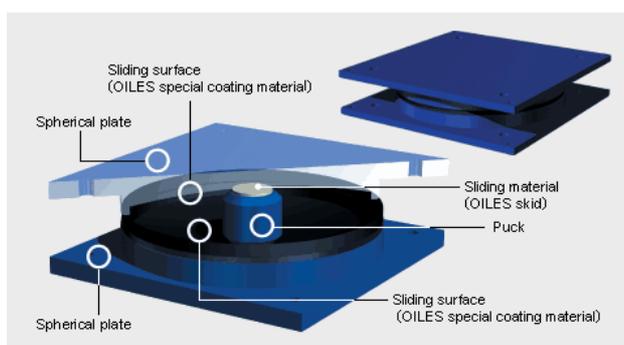


Figura 29 - Aspecto detalhado de um sistema pendular com atrito [Oiles Co, 2005]

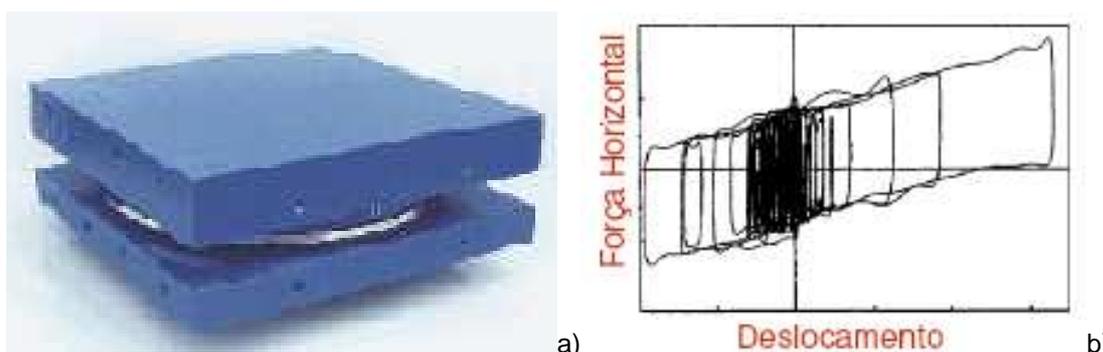


Figura 30 – Sistema pendular com atrito – FPS: a) aspecto geral, b) ciclo histérico [Guerreiro, 2006]

A superfície articulada deslizante é envolvida por um material auto lubrificante, o que permite a garantia de um baixo coeficiente de atrito. A dissipação de energia é feita por atrito. Este tipo de apoio permite a transmissão das cargas verticais à superfície deslizante, obtendo um determinado deslocamento horizontal. A recuperação da estrutura à posição inicial é conseguida através dum mecanismo de funcionamento inspirado no movimento do pêndulo.

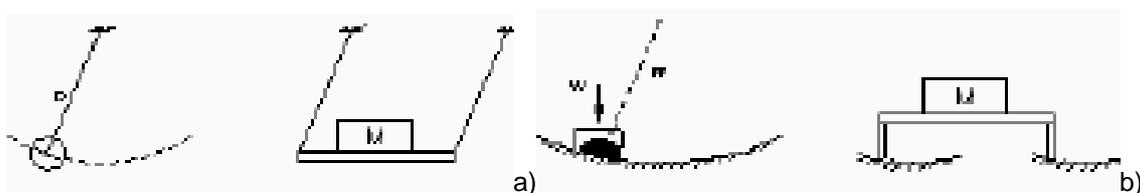


Figura 31 - Comparação entre o movimento do pêndulo (a) e o movimento do sistema pendular com atrito (b) [Guerreiro, 2006]

O coeficiente de atrito entre a superfície deslizante e a chapa de apoio determina a dissipação pretendida, que é resultado do deslocamento relativo entre a estrutura e o solo. Dependendo das exigências estruturais o amortecimento pode situar-se entre 5 a 35% [Maurer Söhne GmbH & Co. KG, 2007].

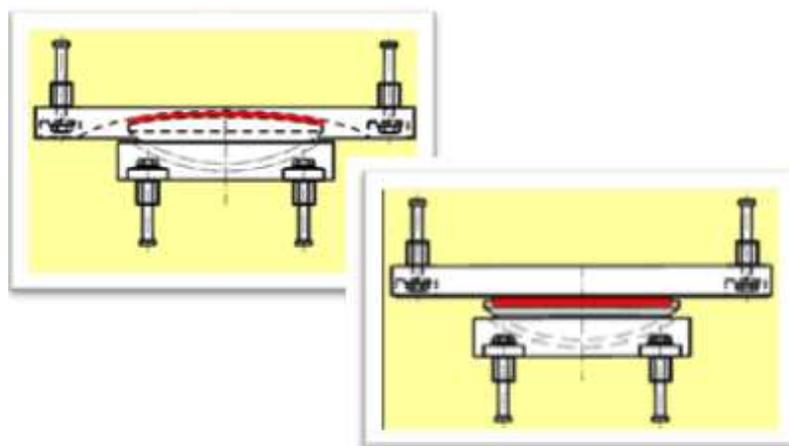


Figura 32 - Pêndulo deslizante - "Sliding Isolation Pendulum" [Maurer Söhne GmbH & Co. KG, 2007]

Os sistemas pendulares com atrito apresentam como vantagem adicional o facto de as suas propriedades não serem afectadas pelo seu envelhecimento ou variação de temperatura [Constantinou, 1994]. Estes dispositivos, à semelhança do verificado em outros sistemas de protecção sísmica, podem assumir proporções muito elevadas, como pode ser comprovado pela Figura 33.



Figura 33 - Sistema pendular com atrito para aplicação em pontes [Lee et. al, 2005]

A eficiência e as características funcionais deste tipo de dispositivos tem vindo a ser confirmados através de testes e programas de monitorização desenvolvidos tanto pela Universidade da Califórnia como pela Universidade das Forças Armadas da Alemanha.

No entanto alguns resultados de investigações recentes [Pranesh e Sinha, 2004] mostraram que quando sujeitos a excitações elevadas os sistemas pendulares

com atrito com superfície de deslizamento esférica se tornam ineficazes. Em situações em que se verifique deslizamento reduzido, a força de restituição é linear e a frequência do dispositivo aproximadamente constante [Oliveira, 2009]; no entanto para grandes deslizamentos a frequência aumenta muito com repercussões directas no aumento da força de restituição.

Na actualidade identificam-se diferentes tipos diferentes de sistemas pendulares com atrito: o SI (sem capacidade para regressar à posição inicial), os SIP e SIP-D (com capacidade de restituição da posição original) e o sistema pendular de frequência variável (VFPI). Este último foi proposto em [Pranesh e Sinha, 2000] e consiste numa adaptação do sistema pendular com atrito (FPS) em que é usada uma superfície de deslizamento côncava como no sistema pendular com atrito, mas sem um raio constante. Esta geometria foi obtida tendo por base a equação básica de uma elipse em que o semi-eixo maior é uma função linearmente dependente do deslizamento. O raio de curvatura é variável, na medida em que a frequência do dispositivo reduz com o aumento do deslizamento. A taxa de redução pode ser controlada por meio da escolha adequada da configuração da superfície do dispositivo.

A utilização de aparelhos de apoio elastoméricos apresenta-se vantajosa quando comparada com a implementação de soluções com recurso a aparelhos de apoio deslizantes. Assim referem-se [Correia e Andrade, 2007]:

- i. Produção ser consideravelmente mais fácil;
- ii. Economia;
- iii. Ciclo de vida mais extenso;
- iv. Manutenção é mais simples;
- v. Não apresentar na sua composição partes metálicas móveis;
- vi. Dispensarem o recurso a sistemas externos para conferir resistência a acções laterais de baixa amplitude.

Os sistemas de isolamento sísmico tem vindo a ser principalmente aplicados em estruturas novas consideradas como sendo de grande importância, quer do ponto de vista de segurança (como é o caso de hospitais, centro de comando de bombeiros, etc.), quer do ponto de vista económico (como é o caso de escritórios contendo equipamento sofisticado e de custo elevado).

Identificam-se, no entanto, também em alguns exemplos de edifícios de habitação. Apesar do que foi referenciado a sua aplicação não se resume apenas a edifícios novos, sendo uma opção válida em edifícios antigos, em diferentes estados de degradação, em edifícios construídos e em que não foram verificadas as regras de segurança sísmica actualmente em vigor ou em edifícios que são utilizados para fins diferentes dos para os quais foram concebidos e/ou dimensionados.

Variáveis como o valor arquitectónico ou a não perturbação do funcionamento das estruturas quando sujeitas a operações de execução da reabilitação e/ou reforço por meio de técnicas correntes podem limitar o grau de intrusão nos edifícios e assim ser necessário o recurso à aplicações de outras formas de reforço, como por exemplo o isolamento sísmico [Guerreiro, 1996].

O isolamento sísmico é hoje em dia um tema bem estudado. O facto de ter sido incluído no Eurocódigo 8 é por si só sinal de que o tema passou à muito a fase experimental e que é uma certeza no que a protecção sísmica diz respeito.

Não obstante o que foi anteriormente referido, actualmente os estudos prosseguem com o intuito de se desenvolverem mais e melhores soluções. Exemplo disso é o projecto europeu LESSLOSS, que através do Subprojecto 6 desenvolveu, entre outras coisas, um estudo ao nível de dispositivos de protecção sísmica. No âmbito desse estudo em particular foi estudado, desenvolvido e proposta a solução de um isolador de baixa rigidez (*Low Stiffness Isolators - LSI*), cujo principal objectivo é a aplicação do isolamento base também a estruturas leves, como por exemplo edifícios familiares de dois ou três andares [Forni, et al., 2007].

Atendendo ao facto de que o isolamento de base aumenta a deformabilidade e a vulnerabilidade das estruturas que incluem este tipo de sistemas de protecção a determinadas acções dinâmicas, como por exemplo o vento, surge aumentada. Como tal a introdução de dispositivos de dissipação suplementares deve ser uma solução adicional contemplada de forma a limitar os deslocamentos no sistema de isolamento a valores aceitáveis [Oliveira, 2009].

Os benefícios associados à aplicação de isolamento sísmico nos mais diversos tipos de estruturas foram coligidos e apresentados pela Takenaka Corporation (Tabela 2.1.).

Tabela 1 - Benefícios expectáveis na aplicação de sistemas de isolamento sísmico, adaptado [Takenaka Corporation, 2001]

	Edifícios privados	Edifícios públicos	Ind. de energia	Industria
	Habitaciones unifamiliares	Edificios de apartamentos Hospitals/centros de saúde Residências de terceira idade	Centros financeiros Edifícios de escritórios/centros comerciais	Industria Farmacéutica Industria de biotecnología Industria de Componentes Laboratórios vários
Aumento da segurança estrutural	o	o	o	o
Redução do custo durante o ciclo de vida da estrutura	o	o	o	o
Minimização e protecção de pessoas contra as ondas de choque	o	o	o	o
Facilita o dimensionamento de elementos secundários	o	o	o	o
Previne a queda de objectos no interior das estruturas	o	o	o	o
Protecção de bens patrimoniais	o	o	o	o
Prevenção de secções de actividade		o	o	o
Protecção de linhas de produção			o	o
Prevenção de derrames de substâncias perigosas			o	o
Evitar difíceis processos de reconstruções após um sismo	o	o		o

## 2.1.2. Sistemas Dissipadores de Energia

Paralelamente aos sistemas de isolamento sísmico, e também por se tratarem de sistemas passivos, têm vindo a ser desenvolvidos sistemas de dissipação de

energia. Estes últimos, não são mais de que dispositivos, especialmente concebidos com o objectivo de dissipar energia, enquanto a estrutura à qual estão associados se deforma. Nos dias de hoje existem diversas propostas de dispositivos deste tipo: amortecedores metálicos (*mettalic dampers*), amortecedores por atrito (*friction dampers*), amortecedores viscoelásticos (*viscoelastic dampers*), amortecedores de fluido viscoso (*viscous fluid dampers*), amortecedores de massa sintonizada (*tuned mass dampers*), amortecedores de líquido sintonizado (*tuned liquid damper*) e materiais inteligentes (*smart materials*).

O funcionamento de estruturas com protecção sísmica do tipo sistemas dissipadores de energia (SDE) processa-se de acordo com o esquematizado em seguida:

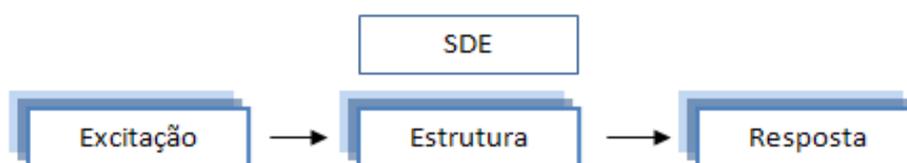


Figura 34 - Esquema de funcionamento de estrutura com Sistema Dissipador de Energia [Adaptado de Spencer Jr. e Soong, 1999].

Actualmente, o isolamento sísmico e o uso de sistemas dissipadores de energia, constituem os dois exemplos de protecção sísmica com maior implementação ao nível dos vários tipos de estruturas em engenharia civil, embora, por vezes, exista alguma dificuldade em classificar um determinado sistema como isolamento sísmico ou como dissipador de energia. A razão para a referida dificuldade prende-se com facto de os próprios sistemas de isolamento também apresentam algumas propriedades de dissipação de energia.

No entanto, quando se refere o uso de dissipadores de energia como sistemas de protecção passiva de estruturas deve-se definir uma solução que só envolva a utilização de tais dispositivos, sem que se estabeleça corte algum de ligações da estrutura com o exterior. Desta forma fica clarificada a diferença entre isolamento sísmico e Sistemas de Dissipação de Energia [Jerónimo, 2001]

Os tipos de estruturas em que é mais corrente a utilização de sistemas passivos são aquelas em que se pretende minimizar o risco de danos (estruturais ou não estruturais) devido, principalmente, a exigências de manutenção de serviços em situação de ocorrência de sismo severo (construções de nível prioritário: hospitais, bombeiros...), acautelar aspectos de ordem económica ou, ainda, em situações em

que se torne difícil o reforço, como por exemplo, neste último caso, as construções, que por várias razões, apresentam importância histórica para a comunidade.

Ao nível da protecção passiva já muito se têm feito tanto ao nível do isolamento sísmico como de alguns tipos de sistemas dissipadores de energia, outros há, como os amortecedores de líquido sintonizado (ALS) que, apesar das boas características teoricamente apresentadas, ainda carecem de verificação e validação experimental e analítica. Estes estudos revestem-se de particular importância quando se pretende também comparar desempenhos entre sistemas dissipadores de energia mais estudados e amplamente divulgados como é o caso dos amortecedores metálicos (*metallic dampers*), amortecedores viscoelásticos (*visco-elastic dampers*), amortecedores de fluido viscoso (*viscous fluid dampers*) ...

A ideia de reduzir a resposta sísmica de estruturas através da utilização de sistemas dissipadores de energia não é recente. A investigação académica e científica, bem como o investimento por parte da indústria nesta área tornaram este tipo de protecção muito apelativa e acessível. Os muitos exemplos de aplicação existentes um pouco por todo o mundo, não sendo Portugal excepção, provam o que foi referido anteriormente. Alguns destes exemplos serão apresentados mais adiante na secção 2.3.

É de referir ainda que o comportamento de estruturas com sistemas de dissipação de energia incluídos, nomeadamente no que respeita a comportamento face às acções sísmicas, é muito diferente do de estruturas convencionais sendo os métodos de análise e dimensionamento necessariamente adaptados a este tipo de solução.

Orientando o estado actual dos conhecimentos no sentido dos dispositivos dissipadores de energia e de acordo com o esquematizado na Figura 1 passa-se a referir de uma forma sumária cada um dos sistemas incluídos nesta categoria.

#### 2.1.2.1. Amortecedores Metálicos

Um dos mecanismos mais eficientes disponíveis para a dissipação de energia fornecida a uma estrutura durante a ocorrência de uma determinada acção sísmica é através da deformação inelástica de substância metálicas, sendo sobre estes

princípios que assenta o funcionamento dos amortecedores metálicos, ou na denominação anglo-saxónica os *metallic dampers*.

Nas estruturas de aço tradicionais o dimensionamento contra as acções sísmicas assenta sobre a ductilidade de pós-cedência dos membros estruturais no sentido de obter a dissipação necessária.

No entanto a ideia de utilizar separadamente amortecedores histiréticos dentro das estruturas, que permitam absorver uma grande porção da energia sísmica, começou com trabalho conceptual e experimental [Kelly et al., 1972] [Skinner et al., 1975]. Alguns dos dispositivos considerados pelos investigadores referidos anteriormente incluem vigas de torção, vigas de flexão e *U-strip Dampers* [Soong e Dargush, 1997].

Os diversos tipos de amortecedores metálicos são acoplados à estrutura com o objectivo de reduzir a energia que de outro modo seria absorvida pela mesma. A dissipação de energia é feita à custa da deformação inelástica de elementos metálicos, ou seja, em ciclos de deformação para lá do limite elástico do elemento metálico.

Nos amortecedores metálicos a dissipação de energia é conseguida à custa da deformação inelástica do material em que são fabricados. Podem ser construídos em chapas de aço macio de diferentes geometrias (triangular, em X ou em V), de forma a que as forças e tensões se espalhem de uma forma uniforme. A deformação nos amortecedores metálicos pode ser causada pela flexão, pelo corte, pela torção do material dependendo do tipo de dispositivo.

Nestes dispositivos dissipação de energia é obtida por meio de ciclos de deformação para além do limite elástico do elemento metálico. Para além de fornecerem dissipação de energia adicional, estes dispositivos adicionam também rigidez ao sistema principal em que se encontram incluídos. A Figura 38 apresenta a curva histérica característica de um amortecedor metálico obtida por via experimental (Figura 38a) e por via analítica (Figura 38b).

De forma a incluir de uma forma efectiva estes dispositivos no dimensionamento de uma estrutura deverá ser possível caracterizar o seu comportamento não-linear força-deslocamento sujeito a carregamentos cíclicos arbitrários. Ozdemir [Ozdemir, 1976] foi o primeiro a considerar este problema de modelação por meio das analogias com as teorias constitutivas elastoplásticas e

viscoplásticas existentes. A modelação assim proposta permitiu o desenvolvimento de formas apropriadas para as relações força-deslocamento.

Adicionalmente, Ozdemir [Ozdemir, 1976] desenvolveu algoritmos numéricos eficientes para a computação/cálculo de estruturas com amortecedores metálicos incluídos e sujeitas a carregamentos/acções dependentes do tempo, como por exemplo as causadas por sismos. Logo em seguida, Bhatti e outros [Bhatti et al., 1978] empregaram a mesma metodologia para estudar a resposta de estruturas nas quais foram incluídas barras de torção amortecedoras em conjunto com sistemas de isolamento sísmico de base [Soong e Dargush, 1997]. Na simulação do comportamento deste tipo de dispositivos pode-se utilizar um modelo de comportamento bilinear com baixa rigidez pós-cedência [Oliveira, 2003].

Nos anos que se seguiram às verificações de Kelly, Skinner, Ozdemir, Bhatti e outros foram efectuados progressos consideráveis no desenvolvimento dos amortecedores metálicos - *mettalic dampers*. Como exemplo disso apresenta-se o facto de terem sido propostas várias alterações aos dispositivos estudados inicialmente, incluindo os em forma de X (*X-Shape*) e os amortecedores de forma triangular (*Triangular Shape Dampers*). Relativamente aos materiais utilizados na sua concepção também se verificaram evoluções significativas tendo-se observado a utilização de materiais com memória de forma (*Lead e Shape Memory Alloys*) neste tipo de sistemas de dissipação de energia.

Numerosos programas experimentais foram desde então conduzidos com o objectivo de determinar as características e desempenho dos dispositivos isoladamente ou incluídos em modelos de estruturas. Como resultado de programas experimentais que tem sido desenvolvidos, muitos produtos comerciais tem sido desenvolvidos e implementados tanto para projectos de estruturas novas como para projectos de reforço de estruturas. Em particular, um número considerável de estruturas existentes na Nova Zelândia, México, Japão, Itália e Estados Unidos incluem amortecedores metálicos como meio de obter resistência sísmica melhorada [Soong e Dargush, 1997].

De forma a compreender melhor o comportamento dos dissipadores metálicos deve-se considerar em primeiro lugar a resposta inelástica dos metais sujeitos a carregamentos cíclicos dependentes do tempo e com essa resposta definir modelos constitutivos. Estes modelos constitutivos podem ser usados para desenvolver relações apropriadas força-deslocamento. Uma vez tendo o modelo força-

deslocamento bem estabelecido o engenheiro projectista deverá incorporar essa mesma informação na análise global da estrutura [Soong e Dargush, 1997].

A par com a definição de modelos adequados é importante desenvolver estudos experimentais ao nível dos componentes individualmente bem como ao nível da estrutura como um todo [Soong e Dargush, 1997].

Quando sujeitos a acções sísmicas moderadas, os amortecedores metálicos conferem maior rigidez à estrutura, enquanto que quando sujeitos a acções sísmicas extremas, funcionam como elementos de dissipação de energia. Dependendo do modo de funcionamento do aparelho, estes podem-se deformar por flexão, corte ou torção [Maldonado-Mercado, 1995].

De uma forma geral, este tipo de dispositivos são caracterizados por um comportamento estável, fiabilidade a longo termo, boa resistência a diferentes condições climáticas e os já referidos aumentos de rigidez, resistência e capacidade de dissipação de energia da estrutura [Sadek, et al., 1996]. Aspectos inerentes à sua aplicação, fazem destes dispositivos boas aplicações para reforço, devido à sua fácil instalação, evitando que se recorra a técnicas demasiado intrusivas. Os primeiros exemplos destes dispositivos foram referidos por [Kelly et al. 1972] e por [Skinner et al. 1975], ilustrados na Figura 35, onde se incluem *Torsional Beam*, *Flexural Beam* e o *Rolling-bending U-strip*.

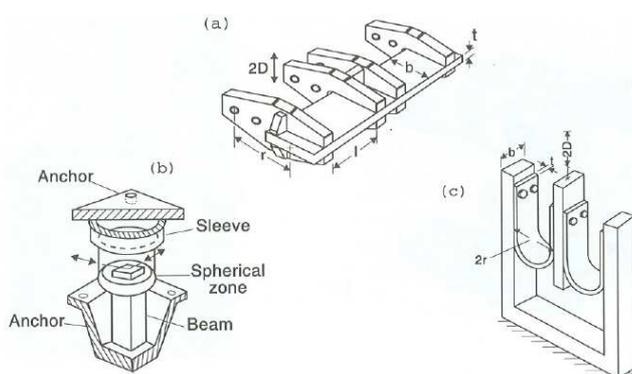


Figura 35 - Exemplos de Amortecedores Metálicos, (a) *Torsional Beam*, (b) *Flexural Beam*, (c) *Rolling-bending U-strip*. [Soong, et al., 1997].

Nos anos que se seguiram, desenvolveram-se progressos consideráveis ao nível dos amortecedores metálicos, tendo sido propostos diversos tipos de dispositivos que a seguir se indicam: i) *X-Shaped plate (Added Damping and Stiffness - ADAS)* – Figura 36, ii) *Triangular plate (Triangular Added Damping and Stiffness - TADAS)* – Figura 37 e Figura 38 e iii) *Lead Extrusion Dampers* [Soong et al., 1997].

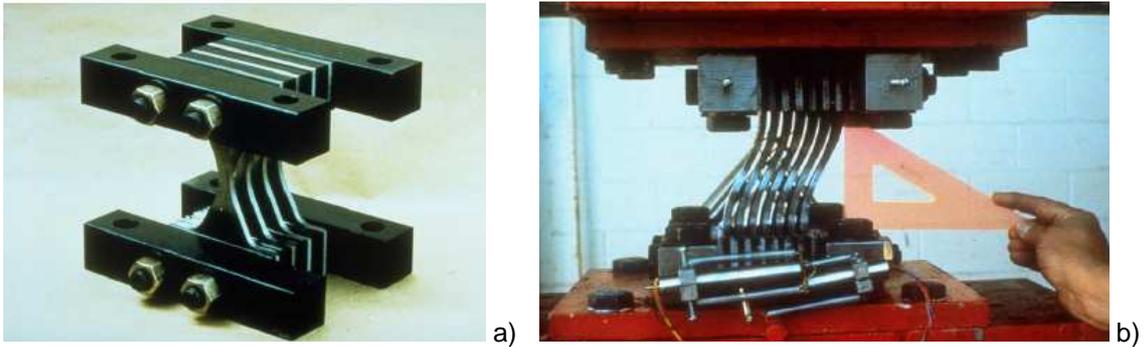


Figura 36 - Dispositivo ADAS: a) aspecto geral e b) processo de deformação sob a simulação de uma acção sísmica [Aiken, 2006].



Figura 37 - Processo de deformação de um dispositivo TADAS sob a simulação de uma dada acção sísmica [Aiken, 2006].

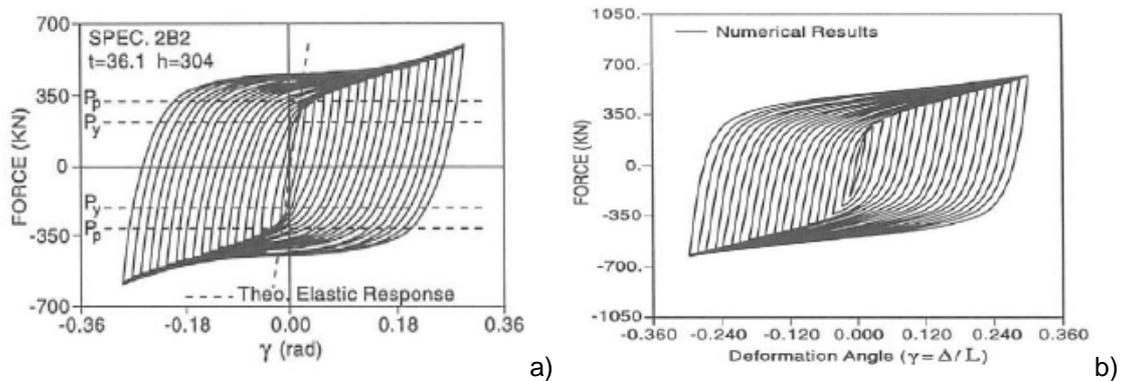


Figura 38 - Comportamento histerético de um dispositivo TADAS [Tsai et. al., 1993].

Um exemplo de dispositivos ADAS corresponde ao desenvolvido em Berkeley na Universidade da Califórnia [Wittaker et. al., 1991]. Este sistema não é mais do que um conjunto de várias chapas de aço em forma de X, em que a cedência ocorre ao longo de todo o comprimento do dispositivo. Os dispositivos ADAS entram em cedência de uma forma pré-determinada libertando a estrutura em que se encontram incluídos de solicitações de ductilidade excessiva. Os ensaios desenvolvidos durante a investigação indicada permitiram comprovar que este tipo de dispositivos melhora o comportamento das estruturas em que estão instalados através de um aumento da rigidez, da resistência e da capacidade de dissipação de energia.

Os dispositivos ADAS e TADAS, são muito adequados para situações de reforço em estruturas existentes ou mesmo para aplicação em estruturas novas. Ambos são constituídos por placas de aço macio, sendo que o dispositivo ADAS apresenta as placas com o formato de um “X”, enquanto o dispositivo TADAS (considerado uma variação do dispositivo anterior), tem as placas na forma triangular, para que a deformação se assemelhe à de uma consola.

Atendendo à sua forma e quando sujeitos a um determinado valor de tensão, ambos os dispositivos encurvam uniformemente ao longo de todo o seu comprimento, como é apresentado na Figura 36. Para além disso refere-se ainda que quando a tensão imposta atinge e ultrapassa o limite de elasticidade do material, a plastificação ocorre em todo o seu volume. Durante os ciclos de deformação, as placas metálicas apresentam um comportamento histerético (Figura 37), com a sua plastificação a absorver grande parte da energia transmitida à estrutura por intermédio da vibração [Moreschi, 2000].

As primeiras aplicações dos dissipadores histeréticos metálicos ocorreram na Nova Zelândia e no Japão. Nos últimos anos, surgiram novas aplicações, incluindo o uso do dispositivo ADAS em situações de reforço, em países como o México e os Estados Unidos da América. Um bom exemplo é reforço do Wells Fargo Bank em São Francisco, Califórnia. Após o sismo Loma Prieta de 1989, este edifício, de 1967, sofreu obras de recuperação e 7 dispositivos ADAS foram colocados com o intuito de reforçar a estrutura [Soong, et al., 2002].

Relativamente aos dispositivos ADAS apresentam-se duas aplicações. A primeira refere-se a colocação de dispositivos ADAS no edifício Wells Fargo, situado em São Francisco (Figura 39), enquanto que a segunda corresponde ao edifício Izazaga nº 38-40 situado na Cidade do México (Figura 40).



Figura 39 - Edifício Wells Fargo, San Francisco: a) vista do exterior, b) detalhe do dispositivo ADAS colocado. [Aiken, 2006]



Figura 40 - Edifício Izazaga n<sup>os</sup> 38 a 40, Cidade do México: a) vista do exterior, b) detalhe do dispositivo ADAS colocado [Aiken, 2006]

No que refere aos dispositivos do tipo TADAS apresenta-se também uma situação (Figura 41) em que foram utilizados como forma de protecção face às acções dinâmicas. Trata-se do Centro Comercial Core Pacific City localizado em Taípe. Esta construção datada de 2001, compreende dois edifícios, um em forma de L e um outro em forma de esfera. O complexo consiste em 12 pisos elevados e 7 níveis enterrados para estacionamento subterrâneo. O dimensionamento sísmo-resistente foi desenvolvido pela ARUP de Los Angeles tendo em conta a regulamentação sísmica existente e com recurso a pushovers estáticos e análises tridimensionais não-lineares. Os dispositivos implementados, que permitem a dissipação de energia, foram desenvolvidos pelo Prof. K.C. Tsai da National University of Taiwan



Figura 41 - Vista do exterior do Core Pacific City, Taípe [Aiken, 2006]

Outro tipo de Amortecedor Metálico corresponde ao sistema em alumínio do tipo *shear-link* que funciona por corte. Este dispositivo consiste basicamente numa viga em forma de I feita numa liga de alumínio de baixa cedência, dimensionada para entrar em cedência por corte [Rai e Wallace, 2000]. Como consequência a força máxima resultante das cargas laterais pode ser minimizada. O alumínio que entra na constituição destes dispositivos é um material muito dúctil ao corte permitindo grandes

deformações inelásticas sem encurvar. Em caso de danos, a substituição das ligações é simples e fácil. São dispositivos que apresentam excelentes capacidades dissipativas, grande eficiência e comportamento bastante fiável em estruturas porticadas contraventadas. Tratam-se de dispositivos que apresentam uma excelente capacidade de dissipação de energia e comportamento eficiente quando incluídos em estruturas porticadas ou em treliça.

Na Figura 42 e Figura 43 apresenta-se, respectivamente, a representação esquemática de uma aplicação deste tipo de dispositivos e o mecanismo de colapso típico.

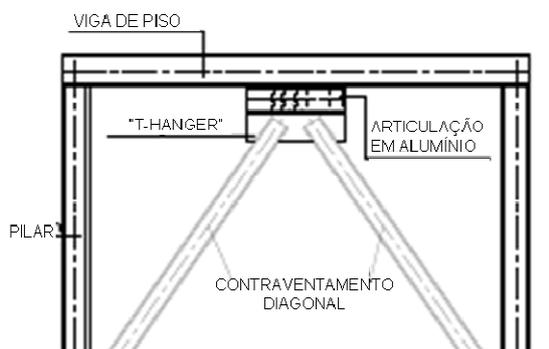


Figura 42 - Aspecto geral de dispositivo *Shear Link Braced Frame*, adaptado de [Rai e Wallace, 2000]

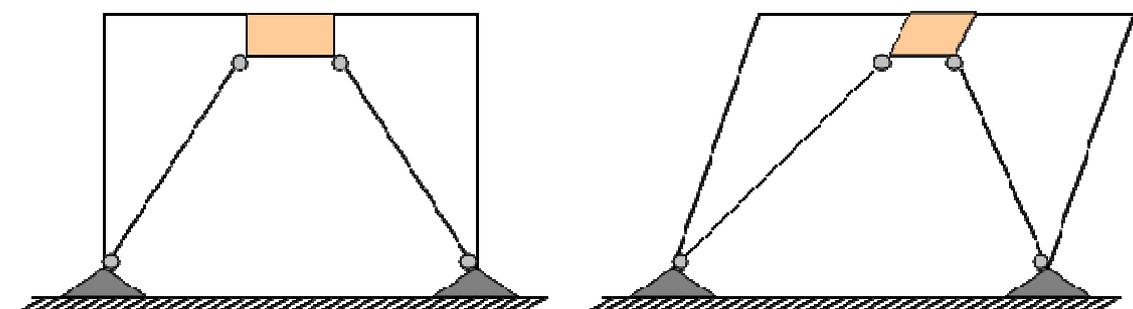


Figura 43 - Mecanismo de colapso de estrutura porticada com Dispositivo *Shear-Link*, adaptado de [Rai e Wallace, 2000]

Para além dos dispositivos *shear-link* tem vindo a ser estudados outros que também funcionam por corte. De Matteis e outros [De Matteis et. al., 2003] desenvolveram estudos sobre painéis em aço de baixa cedência que funcionam por corte. As melhorias observadas ao nível da capacidade de dissipação de energia e aumento da rigidez lateral da estrutura em que se encontram incluídos são, de facto, os maiores benefícios associados a estes painéis.

No entanto, a ocorrência precoce do fenómeno da encurvadura por corte pode trazer algum cuidado, na medida em que pode ser responsável pelo fraco comportamento dissipativo dos painéis que apresentem uma resposta histérica muito

pronunciada do tipo deslizante. A aplicabilidade deste tipo de painéis surge como bastante eficaz no caso de estruturas primárias que são caracterizadas por apresentarem rigidez lateral limitada. De facto, nestes casos os painéis que funcionam ao corte podem comportar-se não só como dispositivos histiréticos mas também como rigidificadores da estrutura.

Os *lead extrusion dampers*, são dispositivos que apresentam o mesmo comportamento que os dispositivos ADAS e TADAS, ao nível do seu comportamento histirético durante ciclos de deformação. O seu processo de funcionamento, que foi denominado de extrusão (Figura 44a), baseia-se em forçar a passagem de um determinado material através de um orifício alterando a sua forma.

Os *lead extrusion dampers* apresentam como vantagem o facto de a relação carga-deformação ser muito estável e independente do número de ciclos de carga e descarga a que se encontram sujeitos (Figura 44b). Para além disso a sua configuração permite que sejam resistentes a agentes ambientais apresentando uma vida útil elevada quando comparado com outros dispositivos, não necessitando tanto de reparações, como de substituição na sequência de uma determinada acção sísmica, uma vez que consegue retomar a sua forma original [Sadek, et al., 1996]

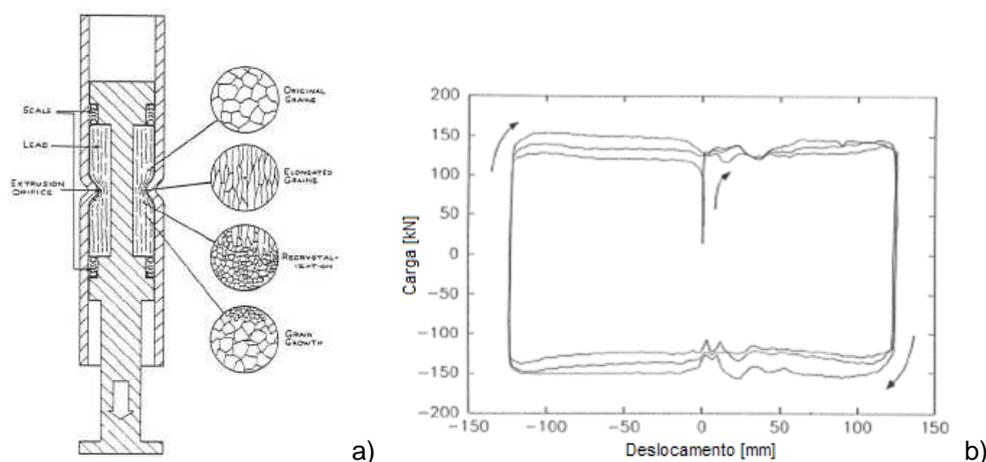


Figura 44 - Lead extrusion damper: a) Representação esquemática [Aiken, 2006] e b) sequência de 3 primeiros ciclos com frequência de teste de 0.9Hz e amplitude de deslocamento de  $\pm 125\text{mm}$  [Aiken, 2006]

Para os *lead extrusion dampers* tem vindo a ser efectuadas aplicações a vários níveis e a edifícios com diferentes tipos de utilidade. Assim, como exemplo identificam-se os *lead extrusion dampers* incluídos nos edifícios da Estação Central de Polícia de Wellington na Nova Zelândia, como se apresenta em detalhe na Figura 45.



Figura 45 - Central de Polícia de Wellington, Nova Zelândia; a) Vista exterior [Robinson Seismic Lda, 2008]; b) e c) Detalhe dos Lead Extrusion Dampers colocados [Aiken, 2006]



Figura 46 - Vista exterior de um hotel japonês em que foram incluídos lead extrusion dampers [Robinson Seismic Lda, 2008]

Mais recentemente, surgiram novas propostas, tais como o *unbonded brace damper* [Soong, et al., 2002] (Figura 47) e o *steel slit damper* [Albernami, 2007] (Figura 48). Para além destes identificam-se ainda duas soluções de amortecedores metálicos constituídos por chapas metálicas com aberturas: com orifício circular simples (Figura 49a) e com orifício em forma de duplo X (Figura 50a).

O dispositivo *unbonded brace damper* baseia-se, nos mesmos princípios que os dispositivos anteriormente referenciados. Como pode ser observado na Figura 47, este sistema é constituído por um conjunto de placas de aço, que compõem o seu núcleo, revestidas por um tubo de aço, preenchido de betão. O núcleo é numa primeira fase encamisado com o objectivo de reduzir a fricção entre este elemento e o betão. Quando o dispositivo se encontra sujeito a uma dada acção sísmica, o núcleo trabalha à tracção estabilizando o dispositivo, enquanto este dissipa energia. Por seu

lado, o conjunto tubo+betão resiste à deformação por compressão [Soong, et al., 2002].

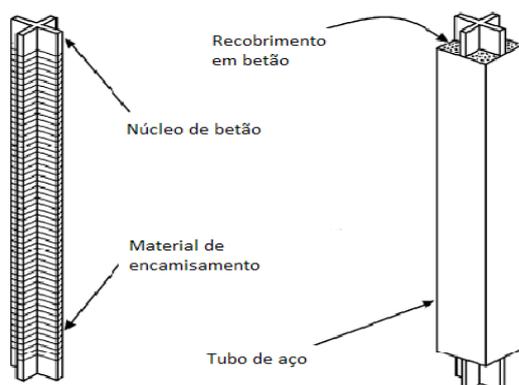


Figura 47 - Exemplo de Amortecedor Metálico do tipo unbonded brace damper [Soong, et al., 2002].

O amortecedor metálico do tipo *steel slit damper* consiste numa chapa de aço com cortes (*slits*) próximos (Figura 48a e Figura 48b). Quando sujeito a uma dada acção sísmica, a chapa de aço entre as aberturas comporta-se como uma série de *flexural links*, com elevada deformabilidade ao corte.

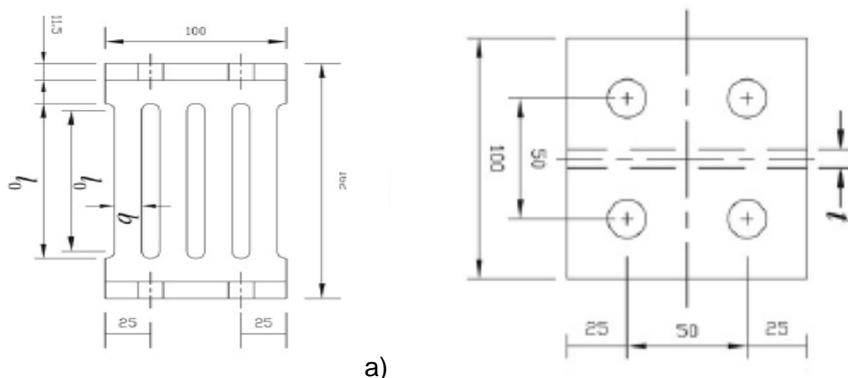


Figura 48 - Exemplo de amortecedor metálico do tipo steel slit damper: a) corte e b) vista de cima [Albernami, 2007].

Por alteração do dimensionamento dos cortes (por exemplo do seu comprimento, do seu número ou da distância entre eles), a rigidez e a resistência dos componentes do sistema podem ser definidas e controladas de uma forma independente.

Para verificação das características destes dispositivos muito trabalho de investigação tem vindo a ser desenvolvido nos anos mais recentes, salientando-se por exemplo os ensaios cíclicos patentados no trabalho de Hitaka e outros [Hitaka et. al., 2007] cujos resultados comprovam as boas características de ductilidade, de rigidez e dissipação de energia mesmo para situações de pequenos níveis de deslocamentos.

Os amortecedores metálicos constituídos por chapas metálicas com aberturas (Figura 49a e Figura 50a) compreendem um tipo de dispositivos que tem na sua constituição chapas em aço de espessura reduzida (cerca de 4mm). Estes dispositivos têm vindo a ser ensaiados em plataforma sísmica por meio de testes quase estáticos [Li e Li, 2007].

Os resultados obtidos têm vindo a ser bastante conclusivos no que refere à sua estabilidade e capacidade dissipativa face a solicitações sísmicas, salientando-se o comportamento dos sistemas com orifício circular simples que apresentam para além de excelente dissipação de energia uma elevada rigidez inicial. Na Figura 49b e Figura 50b apresentam-se os ciclos histeréticos correspondentes a cada um dos dispositivos.

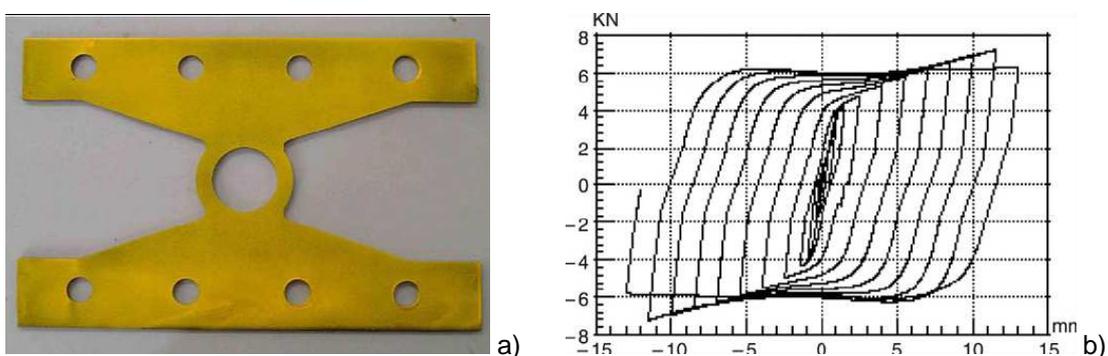


Figura 49 - Amortecedor metálico com orifício circular simples: a) aspecto geral e b) ciclo histerético [Li e Li, 2007].

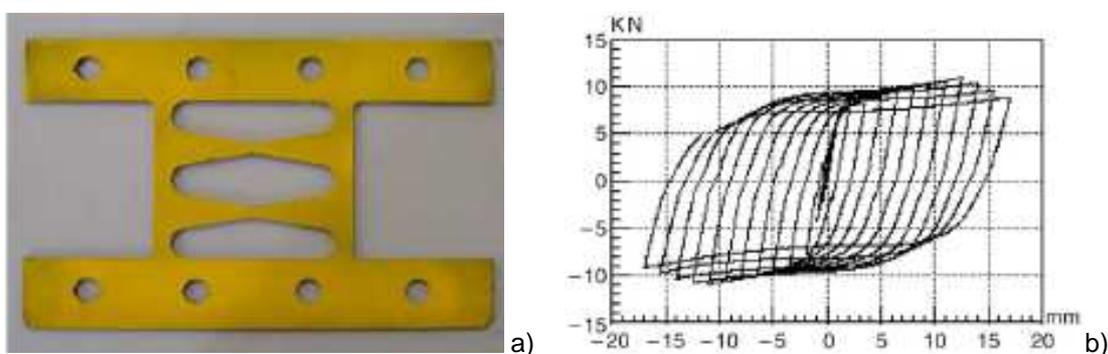


Figura 50 - Amortecedor metálico com orifício em forma de X duplo: a) aspecto geral e b) ciclo histerético [Li e Li, 2007].

Na Figura 51a e Figura 51b mostra-se o aspecto dos amortecedores metálicos com orifício circular simples e com orifício em forma de X duplo, respectivamente, após ensaios experimentais quase-estáticos onde surge evidenciada a sua capacidade de deformação.

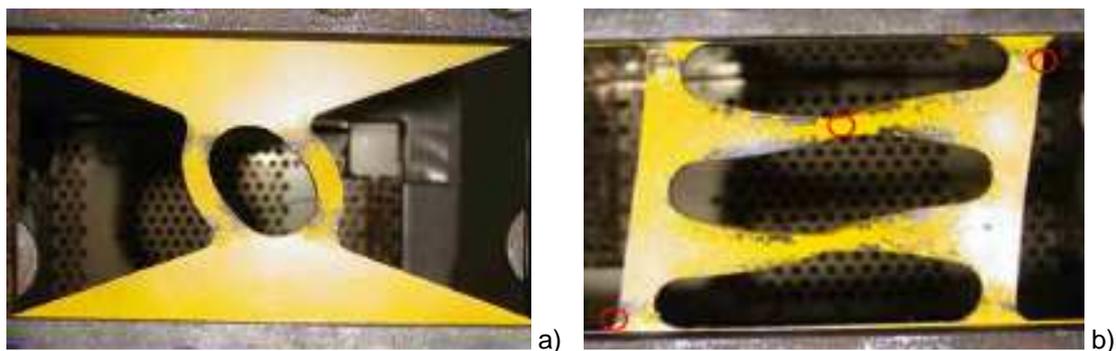


Figura 51 - Deformação em Amortecedores Metálico após ensaios quase-estáticos: a) dispositivo com orifício circular simples e b) orifício em forma de X duplo [Li e Li, 2007].

Como exemplo de aplicação destes dispositivos refere-se um edifício em betão armado localizado no campus universitário da Dalian University of Technology (China) e constituído por duas partes distintas de 5 e 6 pisos, respectivamente (Figura 52).



Figura 52 - Edifício em betão armado na Dalian University of Technology, China: a) vista geral do exterior, b) dispositivo com orifício circular simples colocado e c) dispositivo com orifício em forma de X duplo colocado [Li e Li, 2007].

Qualquer tipo de dissipadores metálicos que apresentem um comportamento histerético estável, reduzidos ciclos de fadiga e reduzida sensibilidade à temperatura circundante, apresentam uma fiabilidade elevada a longa distância sendo um dos mecanismos mais eficientes no que refere a dissipação de energia [Oliveira, 2009]

Para implementação em estruturas reais é necessária a investigação (numérica e experimental) que, no caso dos amortecedores metálicos tem vindo a ser

desenvolvida desde há largos anos ao nível das maiores instalações de investigação científica espalhadas um pouco por todo o mundo. Como exemplo disso apresenta-se uma imagem representativa de uma estrutura ensaiada no NCREE (Figura 53)



Figura 53 - Protótipo de amortecedor metálico ensaiado nas instalações do NCREE [Aiken, 2006].

#### 2.1.2.2. Amortecedores por Atrito

Outro género de dispositivo capaz de dissipar energia é o chamado amortecedor por atrito. A dissipação de energia resultante da ocorrência de um sismo pode ser efectuada também por meio de mecanismos de fricção nos chamados *Friction Dampers*. Desta forma no funcionamento destes elementos considera-se a fricção desenvolvida entre dois corpos sólidos em movimento de escorregamento de um deles relativamente ao outro. Processos deste tipo são frequentes na natureza e tem vindo a ser utilizados nos mais variados sistemas de engenharia. Por exemplo a fricção de sólidos desempenha um papel importante no controlo global do movimento tectónico e da geração sísmica.

Usualmente, os componentes do amortecedor são dimensionados de forma a desenvolver fricção fiável que permita a produção de ciclos histiréticos rectangulares [Chandra et. al, 2000]. A teoria subjacente ao seu funcionamento baseia-se na suposição das seguintes hipóteses [Soong e Dargush, 1997]:

- i) O total da força de atrito gerada, mostra-se como independente do tipo de superfície e da área de contacto;
- ii) O total da força de atrito gerada, apresenta-se como proporcional ao total da força normal que actua através da zona de interface;
- iii) Nos casos do escorregamento ocorrer a velocidades baixas, o total da força de atrito originada é independente da mesma.

Quando se fala em atrito é importante fazer uma distinção entre atrito estática e atrito cinética. Assim o primeiro ocorre quando não existe deslocamento macroscópico relativo entre corpos e pode ser descrita como a força necessária para que o escorregamento tenha início. Pode ser visto como o valor limite acima do qual o deslizamento começa. O atrito cinético corresponde à força necessária para manter o movimento deslizante e geralmente apresenta um coeficiente de atrito mais reduzido [Oliveira, 2009].

A fórmula geral da força de atrito pode ser escrita com recurso a modelos simples como é o caso do modelo de atrito de Coulomb apresentado na equação (1):

$$F_f = \mu F_N \text{sign}(\dot{x}) \quad (1)$$

em que  $F_f$  corresponde à força de atrito gerada pelo dispositivo,  $\mu$  coeficiente de atrito,  $F_N$  a reacção normal actuante no dispositivo e  $\dot{x}$  a velocidade relativa.

No entanto é importante não esquecer que o coeficiente de atrito pode depender de vários factores como as propriedades dos materiais, as dimensões, a rugosidade das superfícies de contacto, a história da solitação (uma vez que o carregamento pode modificar a forma da superfície), as condições (zonas lubrificadas ou secas), efeitos térmicos e as propriedades dinâmicas do próprio dispositivo, em que se incluem a massa, a inércia, a rigidez e o amortecimento [Philippon et. al, 2004] [Ostermeyer e Muller, 2006]. Para além disso foi verificada [Emge et. al, 2007] uma relação entre os valores da velocidade de escorregamento e dos coeficientes de fricção.

Os coeficientes de atrito do aço em chapas depende fortemente da rugosidade das superfícies de contacto para velocidades reduzidas, isto é inferiores em módulo a 1m/s. Foi observado [Lim et. al., 1989] ainda que, para velocidades superiores em módulo e para as mesmas condições de rugosidade, o coeficiente de fricção apresenta uma dependência da força normal aplicada para além da velocidade.

Em situações em que se verifique a ocorrência de uma força normal constante, o coeficiente de atrito tem tendência a decrescer com o aumento da velocidade de deslizamento. Este facto é causado pelo calor gerado durante o deslizamento e o processo de oxidação resultante das elevadas temperaturas geradas por atrito. Em situações em que se verifiquem velocidades muito elevadas, a temperatura entre

superfícies de contacto aumenta abruptamente, ficando a superfície de contacto separada por uma fina película de material derretido o que reduz consideravelmente o coeficiente de fricção [Oliveira, 2009].

Numa escala mais reduzida, os princípios de atrito são igualmente usados em travões automatizados como meio dissipador da energia cinética do movimento [Soong e Dargush, 1997]. Baseado na analogia com os referidos travões, Pall et al. [1980] começaram a desenvolver amortecedores de atrito passivos para melhorar a resposta sísmica de estruturas. O objectivo destes últimos não era mais do que a redução do movimento de um edifício *by braking rather than breaking* [Pall e Marsh, 1982].

Tem vindo a existir um progresso considerável ao longo das últimas décadas, e o número de dispositivos dissipadores deste tipo tem vindo a ser amplamente desenvolvido. De uma maneira geral estes dispositivos apresentam um bom nível de desempenho, sendo o seu comportamento pouco afectado, tanto pela frequência, como pelo número de ciclos de deformação, e ainda pelas variações de temperatura a que se encontra sujeito, exibindo uma boa resistência à fadiga.

Os amortecedores por atrito apresentam um comportamento histerético muito semelhante ao de um amortecedor metálico [Sadek, et al., 1996]. Certos autores [Chandra et. al, 2000] garantem que os amortecedores por fricção permitem a dissipação de mais energia do que outros métodos envolvendo a cedência de chapas de aço, amortecedores viscosos ou viscoelásticos, podendo a energia dissipada atingir cerca de 40% da energia sísmica o que permite evitar de uma forma muito eficiente os danos estruturais.

Os amortecedores por atrito podem assumir diversas configurações. Encontram-se entre os amortecedores por atrito mais frequentes o *Limited Slip Bolted* (LSB) desenvolvido por Pall et al. [1980] para serem utilizados na protecção de estruturas constituídas por grandes painéis. As versões mais modernas destes dispositivos têm vindo a ser implementadas num número considerável de estruturas no Canadá.

Como se encontra documentado [Pall e Pall, 1996], variações à configuração inicial destes dispositivos têm sido instaladas num número considerável de edifícios tanto ao nível do reforço como em situações de novas estruturas. Foram os mesmos autores pioneiros ao proporem o protótipo do *Pall friction damper*, em 1982, que teve uma ampla implementação de forma generalizada em estruturas de edifícios no

Canadá. O dispositivo desenvolvido corresponde a um dispositivo localizado na intersecção de dois elementos de contraventamento, conforme ilustrado na Figura 54.

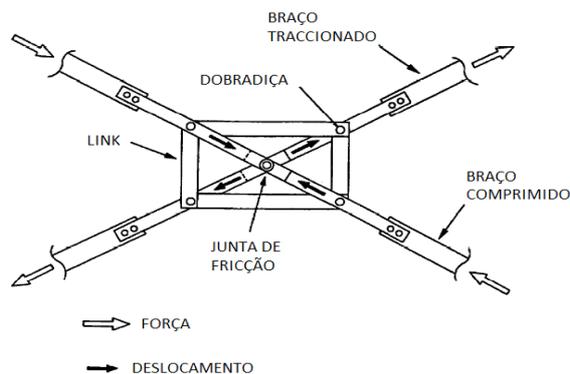


Figura 54 - Dissipador Pall por atrito adaptado de [Sadek, et al., 1996]

Quando carregado, o braço traccionado induz uma derrapagem na junta de fricção, levando a forçar o escorregamento ao braço comprimido. Desta forma, em ambos os braços é efectuada dissipação de energia. Este dispositivo pode ser projectado para evitar o escorregamento sob a acção de cargas de serviço. Diversos autores tem vindo a demonstrar a eficiência destes dispositivos no aumento de capacidade de dissipação de energia da estrutura e na redução de deslocamentos entre pisos [Filiatrault e Cherry, 1987] [Aiken et al., 1988].

Posteriormente os mesmos autores [Filiatrault e Cherry, 1990] criaram um método para otimizar o dimensionamento destes dispositivos. Como já foi referido as principais aplicações deste dispositivo encontram-se em países como o Canadá, EUA e Japão [Sadek, et al., 1996].

Como exemplo da aplicação de amortecedores por atrito em operações de reabilitação de estruturas apresenta-se a École Polyvalante (Montreal) onde foram empregues, ao longo de toda a estrutura diversos amortecedores por atrito [Pall e Pall, 1996]. Esta alternativa proposta fundamentou-se em análises dinâmicas não-lineares [Soong e Dargush, 1997].

No final da década de 80 [FitzGerald et al., 1989] foi proposto o dispositivo *slotted bolted connection* (SBC) [Soong, et al., 1997]. Mais recentemente, surgiram o *sumitomo friction damper* [Aiken and Kelly, 1990] e o *energy dissipating restraint* (ERD) [Nims et al., 1993]. Em ambos os dispositivos, o atrito ocorre uni axialmente. O primeiro encontra-se amplamente difundido e aplicado no Japão, enquanto o segundo predomina no EUA e Canadá.

Os dispositivos sumitomo como o próprio nome indica foram introduzidos pela Sumitomo Metal Industries do Japão. Originalmente usados na absorção de choques entre carruagens, foi só muito recentemente aplicado a estruturas. Tal como é ilustrado na Figura 55, o dispositivo é essencialmente composto por um material de atrito, peças de cobre impregnadas com grafite, em contacto com o cilindro e por um braço sujeito a uma força de compressão por parte de uma mola em forma de copo.

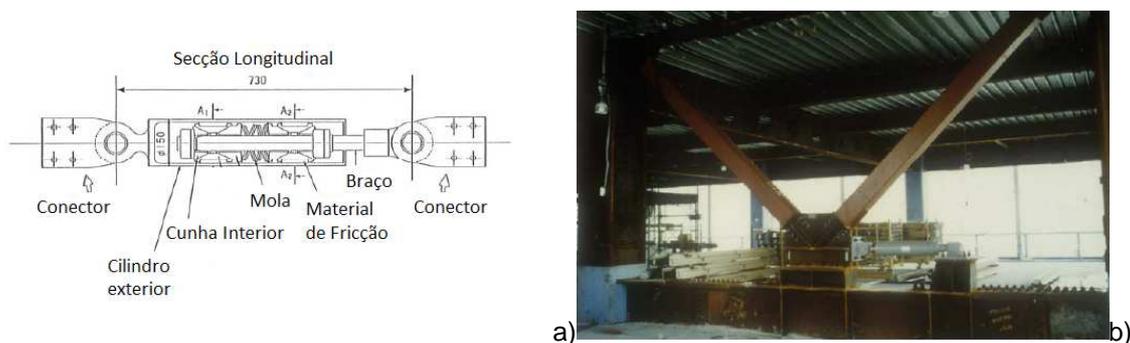


Figura 55 - Dispositivo "Sumitomo", adaptado de [Aiken, 2006]

Quando sujeito a uma acção sísmica, a dissipação de energia ocorre entre o braço e o material de fricção. A grafite tem por função a lubrificação das zonas de contacto e a garantia de existência de um coeficiente de fricção estável bem como uma operacionalidade silenciosa.

Os amortecedores por atrito do tipo Sumimoto foram instalados no edifício de 31 pisos Sonic City, na cidade de Omiya e no edifício de 22 pisos Asahi Azumabashi, em Tóquio, Japão [Sadek, et al., 1996].

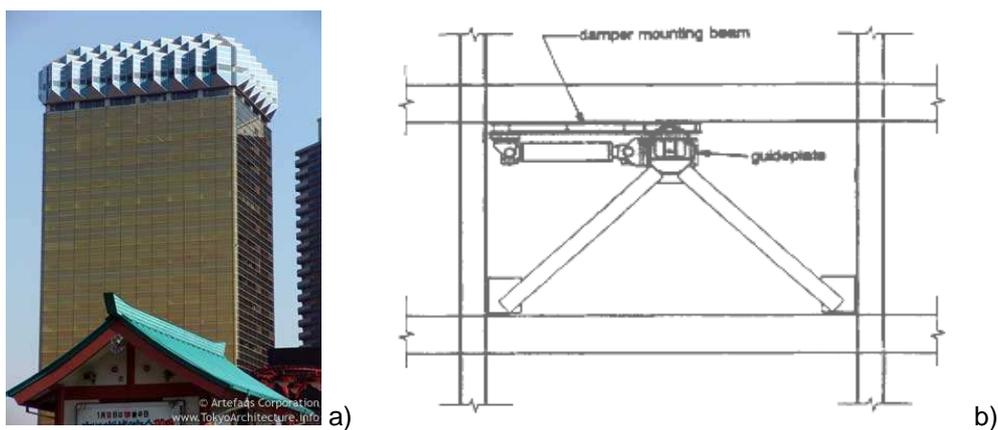


Figura 56 - Sonic Office building, Omiya, Japão; a) Vista exterior [Robinson Seismic Lda, 2008] b) detalhes dos dispositivos colocados [Soong e Dargush, 1997]

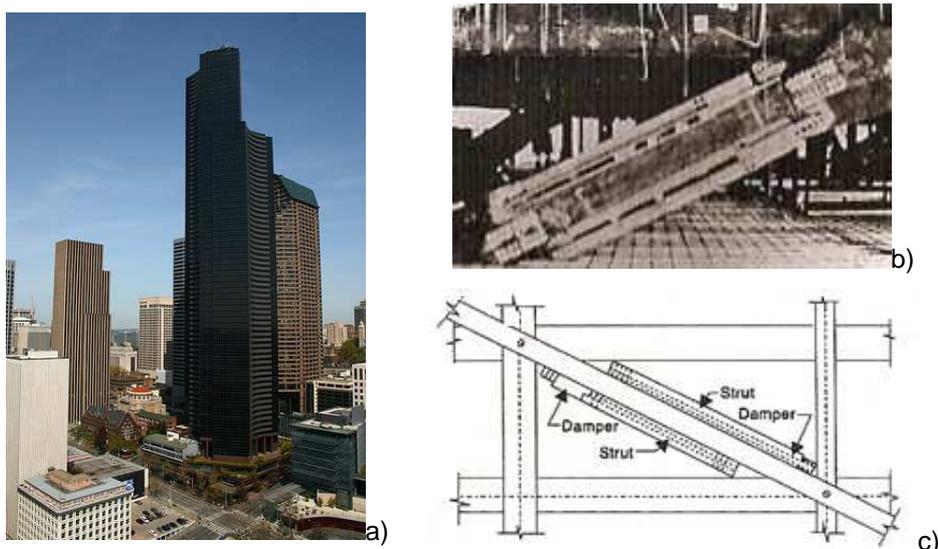


Figura 57 - Edifício Columbia SeaFirst, Seattle; a) Vista exterior e b) detalhes do dispositivo colocado [Soong e Dargush, 1997]

Em virtude de os ciclos histiréticos de um amortecedor por atrito se apresentarem muito semelhantes ao ciclo rectangular de um material elastoplástico ideal, a modelação do seu comportamento não oferece grandes dificuldades. Nos amortecedores por fricção o carregamento associado ao escorregamento pode ser admitido como se tratasse de uma força fictícia de cedência [Oliveira, 2009].

O modelo analítico mais usual para um amortecedor por atrito incluído numa estrutura em pórtico contraventada corresponde ao que se encontra patente na Figura 58.

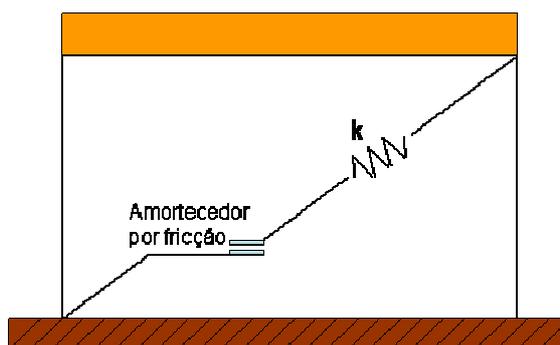


Figura 58 - Modelo analítico simplificado da inclusão de amortecedores por fricção em estruturas em pórtico contraventadas

Este modelo muito simples consiste numa mola linear e num elemento que traduz o escorregamento de Coulomb observado no amortecedor por fricção durante o seu funcionamento. A mola permite a simulação do elemento diagonal de contraventamento, sendo o outro elemento responsável pela simulação da fricção que ocorre no dispositivo [Levy et. al, 2001].

No entanto este tipo de dispositivos apresenta algumas desvantagens e dificuldade em manter as suas propriedades ao longo do tempo, nomeadamente ao nível da superfície de deslizamento. Estes factos resultam entre outros factores de:

- i) Corrosão;
- ii) Relaxação;
- iii) Danos face a um sismo.

Sendo um dispositivo constituído por ligas metálicas, a sua interface apresenta grande susceptibilidade à corrosão quando em contacto com ligas de cobre e zinco ou bronze. Com o passar do tempo, o dispositivo demonstra perdas no atrito devido à relaxação ou perda de tensão na interface, sendo como tal necessário impor às superfícies dos componentes dos amortecedores por fricção um tratamento adequado e que lhes permita produzir o nível de fricção adequado.

Adicionalmente refere-se que quando sujeito à certas acções sísmicas gravosas, este tipo de dispositivo, pode apresentar danos permanentes necessitando de substituição de alguns dos seus componentes [Sadek, et al., 1996]. O coeficiente de fricção pode igualmente modificar-se devido a razões ambientais após um grande período de inactividade.

#### 2.1.2.3. Amortecedores Viscoelásticos

A aplicação de materiais viscoelásticos no controlo de vibrações pode-se datar de meados da década de 50 quando foi usada pela primeira vez em aviões como forma de controlar vibrações induzidas [Ross et al., 1959].

As aplicações de amortecedores visco-elásticos concretizam-se normalmente por meio de pequenas pastilhas de materiais que apresentem características visco-elásticas. O termo “Visco-elásticos” por si só significa que o material apresenta, em simultâneo, propriedades de fluido viscoso e de material elástico. Como tal, quando sujeito a ciclos de deformação, carga-descarga, o material elástico recupera a sua forma original, enquanto o fluido viscoso encontra equilíbrio numa posição deformada, não recuperando a sua forma original. Em termos energéticos, este tipo de comportamento implica que uma parte da energia envolvida no processo é recuperada de imediato enquanto que a remanescente se dissipa pelo material sob a forma de

calor. De uma forma geral estes materiais consistem em polímeros ou substâncias de vidro com a capacidade de dissipar energia sobre a forma de calor quando sujeitos a deformações por corte [Ou et. al, 2007]. A força produzida por um amortecedor viscoelástico pode ser quantificada por meio da relação proposta [Ou et. al, 2007].

$$F_{ve} = c_{ve} \dot{x} + k_{ve} x \quad (2)$$

em que  $F_{ve}$  corresponde à força gerada pelo amortecedor,  $x$  a velocidade relativa  $\eta_{ve}(\omega_n)$  o factor de perda do amortecedor viscoelástico,  $G_{ve}(\omega_n)$  o módulo de corte do amortecedor viscoelástico,  $A_v$  a área de corte,  $t_{ve}$  a espessura do material de características viscoelásticas,  $\omega_n$  a frequência natural da estrutura,  $c_{ve}$  o coeficiente de amortecimento do amortecedor viscoelástico (dado pela equação 3) e  $k_{ve}$  a rigidez do amortecedor viscoelástico (dada pela equação 4).

$$c_{ve} = \frac{A_v \eta_{ve}(\omega_n) G_{ve}(\omega_n)}{\omega_n t_{ve}} \quad (3)$$

$$k_{ve} = \frac{A_v G_{ve}(\omega_n)}{t_{ve}} \quad (4)$$

Na maioria dos casos um dispositivo viscoelástico típico apresenta na sua camadas de material visco-elástico intercaladas com placas metálicas (Figura 59), sendo a dissipação de energia conseguida directamente por corte nas camadas de material viscoelástico.

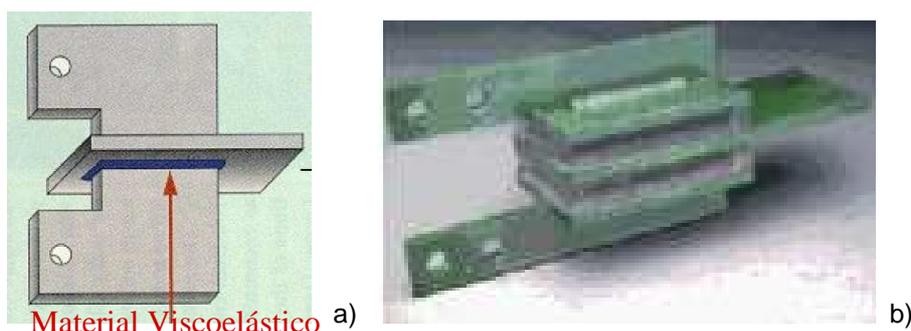


Figura 59 - Amortecedor viscoelástico: a) Representação esquemática [M.I.T., 2005] e b) exemplo de dispositivo [Kawashima Lab, 2004]

Nestes sistemas, quando implementados em estruturas de edifícios sujeitas a acções dinâmicas (ventos ou sismos), verificam-se movimentos relativos entre a placa central e a placa exterior em “T”. Dos movimentos relativos referidos resultam deformações por corte com consequente dissipação de energia [Soong, et al., 1997].

O comportamento dos materiais viscoelásticos depende fortemente da temperatura e da frequência do carregamento a que estão sujeitos, o que muitas vezes pode ser uma desvantagem. Durante uma acção dinâmica, se por acaso o calor não for dissipado com a rapidez necessária a temperatura no dispositivo pode ascender a um nível em que o material começa a perder rigidez deixando que fornecer as forças de amortecimento necessárias [Macioce, 2002]

A sua generalização a estruturas de engenharia civil data do final da década de 60 quando, em 1969, se instalaram pela primeira vez cerca de 10000 amortecedores viscoelásticos distribuídos do 10º ao 110º pisos de cada uma das torres gémeas do World Trade Center in New York para ajudar na mitigação da solicitação do vento [Mahmoodi, 1969, Mahmoodi et al., 1987, Caldwell, 1986]. A configuração geral dos amortecedores de fluido viscoso colocados nas Torres Gémeas e um detalhe da sua colocação nas estruturas são apresentados na Figura 60.

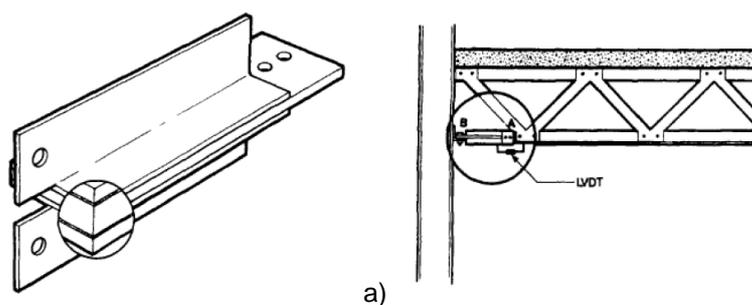


Figura 60 - Amortecedor viscoelástico colocado no World Trade Center, Nova York, EUA: a) Dispositivo típico e b) Detalhe de colocação na estrutura [Samali e Kwok, 1995]

Os dispositivos colocados permitiam a dissipação de grande parte de energia de oscilação durante a ocorrência de ventos fortes sob a forma de calor devido às deformações por corte geradas no elemento viscoelástico do dispositivo [Samali e Kwok, 1995]

A aplicação de amortecedores viscoelásticos ao nível da engenharia sísmica tem vindo a dar os primeiros passos mais recentemente, sendo usualmente necessário garantir um nível de amortecimento maior do que para a mitigação das vibrações induzidas pelo vento.

Tem vindo a ser efectuados extensos estudos analíticos e verificações experimentais no domínio da sísmica que levaram, por exemplo, à sua utilização como elemento de reforço em edifícios existentes nos Estados Unidos durante a década de 90 [Soong e Dargush, 1997].

Estes dispositivos colocam-se geralmente nos edifícios na zona entre pisos em que o deslocamento relativo entre pisos e a velocidade atingem valores máximos. No entanto os arquitectos e donos de obra discordam muitas vezes desta localização uma vez que desta forma os dispositivos interferem com a organização espacial e obstruem a visão interna. Vários autores têm vindo a propor soluções alternativas para contornar este problema [Kim et. al., 2006] tendo sido sugerida, por exemplo, a colocação de amortecedores viscoelásticos em zonas articuladas ou ainda em zonas de ligação (passadiços) entre edifícios altos para fazer face a acções sísmicas (Figura 61).

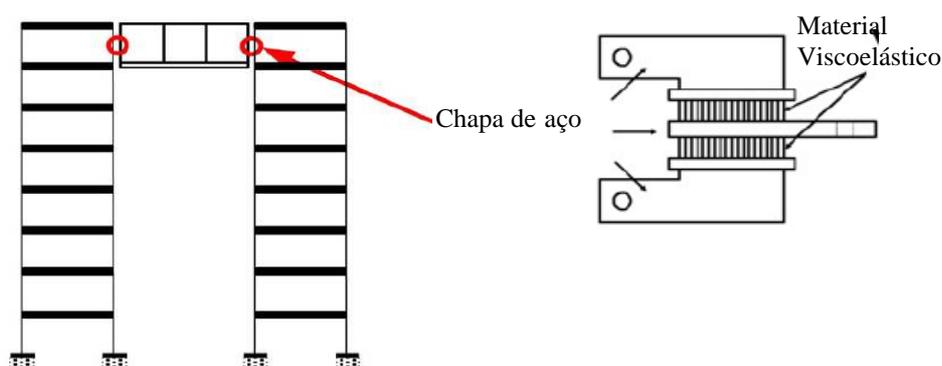


Figura 61 – Representação esquemática de ligação entre dois edifícios e detalhe de dispositivo viscoelástico colocado na estrutura, adaptado de [Oliveira, 2009]

Um exemplo de aplicação de amortecedores viscoelásticos corresponde à solução adoptada para o edifício Gentile Fermi (Itália). Trata-se de uma estrutura que sofreu danos muito consideráveis durante a ocorrência do sismo de Setembro de 1997, na região de Umbria-Marche.

O projecto de reforço sísmico incluiu a instalação, entre os elementos estruturais do primeiro piso e do segundo piso e os elementos estruturais do segundo e terceiro piso, de sistemas de contraventamento simples em aço e em aço com dissipadores viscoelásticos. Na totalidade foram colocados 33 amortecedores viscoelásticos com diferentes níveis de rigidez [Figueiredo, 2008]. No entanto, os resultados de ensaios efectuados sobre a estrutura com os referidos dispositivos incluídos [Antonucci et. al, 2001], permitiu concluir que se trata de uma solução insuficiente para garantir o adequado funcionamento face a acções sísmicas em domínio elástico de todos os restantes elementos estruturais. Desta forma foi preconizado posteriormente uma solução de reforço sísmico convencional dos pilares menos resistentes [Figueiredo, 2008].



Figura 62 – Edifício Gentile Fermi, Fabriano, Itália: a) vista geral do exterior e b) detalhe de dispositivo colocado [Antonucci, 2001]

Em 2001 a empresa Dampotech desenvolveu um novo dissipador que aliou as propriedades dos amortecedores visco-elásticos com as dos amortecedores por fricção criando o denominado F-VEDD – “Friction-Viscoelastic Damper Device”. Este dispositivo combina as vantagens dos mecanismos de dissipação de energia visco-elástica com as dos mecanismos de dissipação de energia por fricção (atrito). Tal como é mostrado na Figura 63, este sistema é composto por um parafuso pré-esforçado, que atravessa e junta as pastilhas com funcionamento por atrito e visco-elástico, com as placas de aço. O parafuso juntamente com molas em cada um dos extremos permite manter a força de amortecimento necessária. Este aparelho permite uma resposta adequada para sismos de diferentes magnitudes. Para as vibrações induzidas pela acção do vento e para pequenos sismos, apenas a componente visco-elástica fica activa. Para sismos de grande magnitude, o mecanismo de dissipação de energia por atrito é também mobilizado [DAMPETECH, 2001].

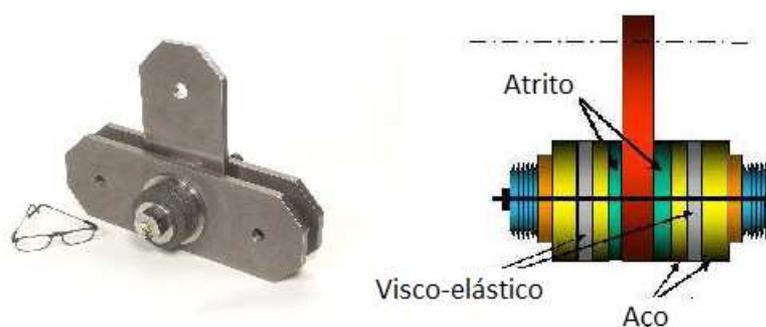


Figura 63 - Dissipador misto visco-elástico e por fricção [DAMPETECH, 2001]

Admitindo funcionamento a baixos níveis de vibração, como é o caso do vento e de pequenos sismos, só reage o componente viscoelástico. Para sismos de magnitudes elevadas o mecanismo de fricção é igualmente mobilizado sendo a energia dissipada tanto por meio do componente viscoelástico como por meio do componente de fricção. O ciclo histirético correspondente para este tipo de dispositivos desenvolvidos pela empresa DAMPETECH apresenta-se na Figura 64.

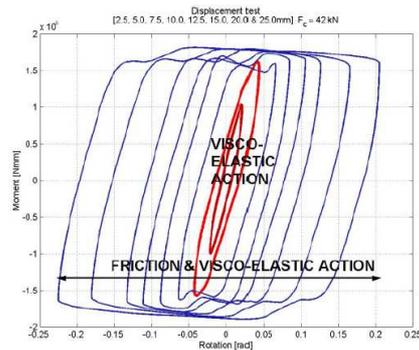


Figura 64 - Ciclo histérico de dispositivo F-VEDD [DAMPETECH, 2001]

Mais recentemente registos de novos dispositivos viscoelásticos tem vindo a ser apresentados [Ibrahim et. al., 2007], referindo-se o novo dispositivo em que o comportamento viscoelástico comum surge melhorado pela introdução de elementos de aço que participam na dissipação de energia. A estes novos dispositivos pode ser atribuída a denominação de amortecedores visco-plásticos. Os amortecedores viscoplásticos consistem num bloco de material viscoelástico de elevado nível de amortecimento colocado entre duas chapas de aço especialmente “bent” de uma determinada forma para amplificar as deformações no dispositivo.

Em situações de ocorrência de baixos níveis de vibrações, o dispositivo funciona como um amortecedor viscoelástico dissipando energia por meio de extensões axiais amplificadas e suprimindo as vibrações tanto por meio das características de rigidez axial como de amortecimento viscoelástico do dispositivo. Para níveis de vibração extrema, o dispositivo funciona como um dispositivo combinado, em que uma parcela significativa da dissipação de energia ocorre por meio da cedência dos elementos de aço sendo o restante energia de dissipação viscoelástica. Estes dispositivos introduzem rigidez ao nível do sistema estrutural tanto por meio dos elementos de aço como por meio do material viscoelástico [Oliveira, 2009]

De acordo com estudos realizados [Chang et. al., 1992] [Chang et al.1993a] [Chang et. al, 1993b] [Chang et. al, 1994] [Chang et. al, 1995], observou-se que no projecto /dimensionamento destes dispositivos é necessário contabilizar factores como a temperatura ambiente, a frequência de excitação, bem como o número de ciclos de deformações a que este possa estar sujeito [Soong, et al., 1997]. Para baixas frequências ou altas temperaturas, o material comporta-se elasticamente, como se de um material elástico ideal se tratasse, enquanto que para altas frequências ou baixas temperaturas, o material dissipa pouca energia comprovando que a optimização do

dispositivo em termos energéticos é conseguida para níveis de frequências e temperaturas intermédias [Oliveira, 2003].

Vários testes recorrendo a modelos à escala real, tem vindo a ser realizados [Ashour e Hanson, 1987], [Lin et al., 1991], [Fujita et al., 1991], [Aiken et al., 1992, 1994], [Foutch et al., 1993] e [Chang et al., 1993a, 1995].

Os resultados obtidos, em conjunto com simulações numéricas, tem vindo a permitir que se desenvolva um conjunto de procedimentos, linhas orientadoras, para o dimensionamento de estruturas com amortecedores visco-elásticos suplementares [Sadek, et al., 1996]:

- i) Análise estrutural sem os dispositivos, a fim de determinar esforços e resistência dos elementos da estrutura;
- ii) Determinar o coeficiente de amortecimento desejável, para o qual o edifício permanece em regime elástico;
- iii) Determinar a rigidez a acrescentar através do método MSE;
- iv) Determinar a área de amortecimento necessária;
- v) Determinar o número, dimensões e localização dos amortecedores;
- vi) Verificar a resistência nas extremidades dos amortecedores;
- vii) Realizar uma análise espectral;
- viii) Verificar se os deslocamentos entre pisos permanecem dentro dos limites;
- ix) Realizar uma análise dinâmica não-linear do conjunto estrutura+amortecedores VE.

#### 2.1.2.4. Amortecedores de Fluido Viscoso

Outras substâncias, em que se incluem determinados tipos de fluídos viscosos, que pelas suas características podem ser convenientemente empregadas de forma a atingir o nível desejado de protecção passiva.

De facto, a utilização de *Viscous Fluid Dampers* na mitigação dos efeitos das acções sísmicas já se encontra bastante generalizado [Harris e Crede, 1976], tendo-se vindo a efectuar um esforço significativo nos últimos anos com o objectivo de

desenvolver os referidos dispositivos para aplicações estruturais [Soong e Dargush, 1997], nomeadamente na mitigação das vibrações induzidas por sismos em vários tipos de estruturas de militares, industriais ou de edifícios.

Nos amortecedores de fluido viscoso, um pistão força a passagem do fluido por um pequeno orifício gerando calor e conseqüentemente dissipação de energia. Estes dispositivos compreendem um pistão-cilíndrico hidráulico com um fluido viscoso e um tubo que liga as duas câmaras separadas pela cabeça do pistão (Figura 69 e Figura 70)

Para implementação em estruturas o cilindro pode ser ligado à própria estrutura cuja vibração se pretende mitigar e o êmbolo do pistão conectado ao sistema de contraventamento. O pistão move-se relativamente ao cilindro preenchido com o fluido viscoso. A força dissipativa desenvolvida entre o fluido viscoso e o cilindro absorve energia reduzindo a vibração estrutural [Cheng e Jiang, 1998].

Os fluidos a usar neste tipo de dispositivos devem apresentar uma viscosidade constante e bem conhecida, referindo-se o caso do óleo ou do silicone como bons exemplos de fluidos usados em amortecedores de fluido viscoso de uma forma muito recorrente.

De uma forma geral este tipo de dispositivos apresenta uma boa fiabilidade, no entanto é importante não esquecer que a viscosidade do fluido pode sofrer alterações significativas com a variação de temperatura [Taylor, 1996] [Ou et. al, 2007].

Convém não esquecer que amortecedores puramente viscosos não traduzem um aumento ao nível da rigidez do sistema estrutural em que se encontram incluídos. O comportamento destes sistemas de protecção depende da taxa de variação do deslocamento relativo nas duas extremidades do dispositivo, o que prova a sua dependência da velocidade e não directamente do deslocamento.

A relação geral entre a força que surge no dispositivo de fluido viscoso e a velocidade do sistema estrutural pode ser definida com base na equação:

$$F_v = c \left| \dot{x} \right|^\alpha \text{sign}(\dot{x}) \quad (5)$$

em que  $F_v$  corresponde à força gerada pelo dispositivo,  $c$  o coeficiente de amortecimento do dispositivo de fluido viscoso,  $F_N$  a reacção normal actuante no

dispositivo,  $\dot{x}$  a velocidade relativa entre as duas extremidades do dispositivo e  $\alpha$  a constante da velocidade dependente do fluido utilizado.

A constante de amortecimento  $c$  depende das características de dimensionamento do dispositivo, por exemplo do seu diâmetro e da área do orifício por onde passa o fluido. A definição do fluido usado nos dissipadores vai determinar os valores da constante de velocidade, que tem repercussões ao nível da evolução da curva força-velocidade, o que pode ser comprovado por observação da Figura 65.

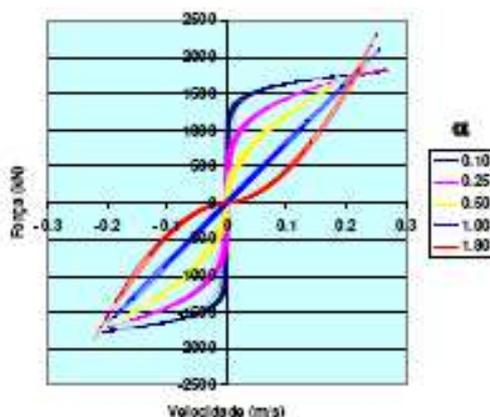


Figura 65 - Relação força-velocidade em amortecedores de fluido viscoso [Guerreiro, 2006]

O tipo de fluido usado no dispositivo determina a forma do ciclo de dissipação. De facto, se  $\alpha < 1$  ocorre um grande aumento da força de amortecimento para valores baixos de velocidade e um pequeno aumento da força de amortecimento para valores elevados de velocidades sendo dissipada uma grande quantidade de energia por cada ciclo desde o início do movimento. Neste domínio o dispositivo viscoso é designado por amortecedor viscoso. Este tipo de dispositivos é geralmente usado na mitigação de acções sísmicas por responderem com uma força máxima limitada e por apresentarem uma maior capacidade de amortecimento que os restantes valores de constante de velocidade. No entanto se  $\alpha$  for superior à unidade então os dispositivos passam a ser denominados por sistemas de absorção de choque – *shock absorbers* - sendo sensíveis apenas a velocidades elevadas. Este tipo de dispositivos podem ser utilizados quando se pretende libertar a estrutura para acções com velocidades reduzidas (variações de temperatura, retracção, fluência) associada a uma fixação face a acções com velocidades elevadas (sismos) [Figueiredo, 2008].

A variação da constante de velocidade, mantendo todas as restantes propriedades do dispositivo inalteráveis, permite obter diferentes relações força-velocidade (Figura 66) e diferentes ciclos dissipativos (Figura 67):

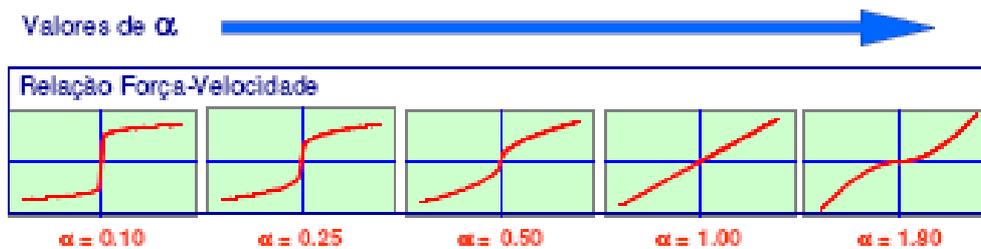


Figura 66 - Relação força-velocidade em amortecedores de fluido viscoso [Guerreiro, 2006]

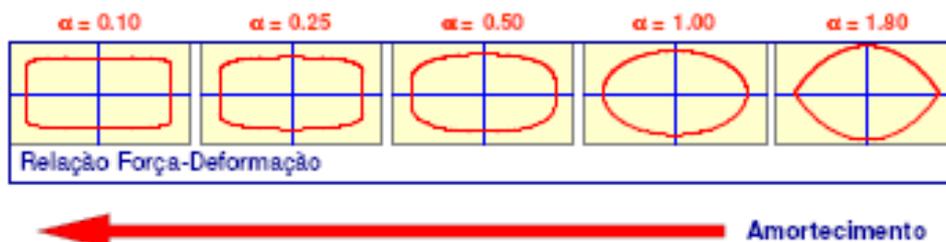


Figura 67 - Ciclos dissipativos em amortecedores de fluido viscoso [Guerreiro, 2006]

Após avaliação do desempenho de diversos amortecedores de fluido viscoso admitindo diferentes valores para os parâmetros de amortecimento e de velocidade,  $c$  e  $\alpha$ , respectivamente, foi possível [Guerreiro et. al, 1998] comparar o comportamento de amortecedores histiréticos e de fluido viscoso na avaliação da resposta sísmica de viadutos. Assim, quanto menor for o valor de  $\alpha$  para um mesmo valor de  $c$ , maior é a área contida no ciclo, o que traduz uma melhor capacidade de amortecimento dos dispositivos de fluido viscoso. De uma forma objectiva, o estudo referenciado permitiu concluir que os amortecedores de fluido viscoso permitem a obtenção de soluções mais eficazes em termos de controlo simultâneo em forças e em deslocamentos [Oliveira, 2009].

Um exemplo de dispositivos de fluido viscoso corresponde ao Amortecedor Viscoso Parede (Viscous Damping Wall - VDW), ilustrado na Figura 68.

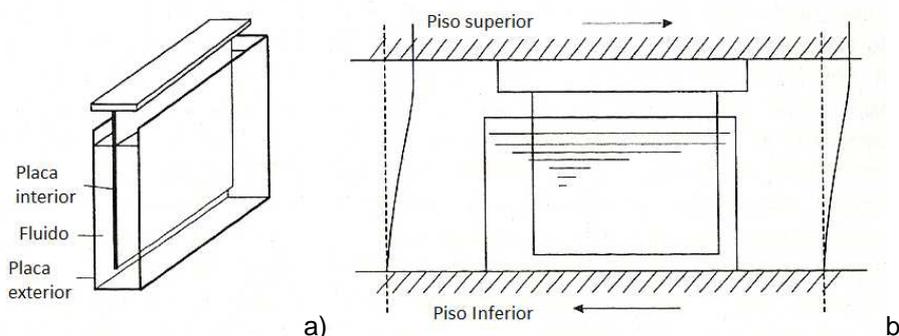


Figura 68 - Viscous Damping Wall: a) Detalhe de dispositivo e b) Mecanismo de funcionamento do dispositivo, adaptado de [Soong e Dargush, 1997]

Este dispositivo, proposto e desenvolvido inicialmente pela Sumitomo Construction Company, compreende uma placa metálica que simula um pistão, inserido num fino reservatório preenchido por um líquido viscoso. O movimento da

placa metálica encontra-se restringido a movimentos no seu plano. Quando se procede à sua instalação o pistão (placa interior) é fixo ao piso superior, enquanto que o correspondente reservatório (placa exterior) é fixo ao piso inferior. Movimentos relativos entre pisos provocam deformações por corte no líquido e conseqüentemente a dissipação de energia. Este tipo de dispositivo é muito eficiente na geração de forças de restituição, absorção de energia e na redução da resposta global de estruturas em que se encontram incluídos devido à grande superfície onde o fluido de viscosidade elevada actua [Yeung e Pan, 1998]. Refere-se que quanto maior for a viscosidade do líquido mais energia é dissipada no dispositivo [Soong, et al., 1997].

Em estudos realizados [Arima et al., 1988], observou-se que, para um modelo à escala real de 4 pisos, com VD Walls, a redução na resposta do edifício às acelerações se situava entre 66% a 80%. Em outros estudos [Miyazaki e Mitsusaka, 1992], é demonstrado que 170 VD Walls aplicados a um edifício, com 78m de altura e estrutura metálica na cidade de Shizouka, Japão, traduziram um aumento de 20-35% de amortecimento com respectiva redução na resposta do edifício às acelerações entre 70% a 80%. [Sadek, et al., 1996].

Outros estudos mais recentes que incluíram ensaios em plataforma sísmica [Li e Reinhorn, 1995] permitiram estabelecer uma comparação entre estes amortecedores viscosos parede e dispositivos de fluido viscoso mais convencionais e também com amortecedores por fricção. Os resultados obtidos permitiram concluir que de facto os amortecedores viscosos parede apresentam uma grande eficiência, sendo possível alcançar um coeficiente de amortecimento da ordem de 50% em oposição aos outros dispositivos em que este coeficiente atinge um máximo de apenas 28%.

Existe ainda, uma outra “classe” de amortecedores de fluido viscoso que se baseia no comportamento do fluido no interior de um reservatório fechado. Aqui os pistões actuam com o objectivo de forçar a passagem do fluido através de pequenos orifícios. Como resultado, atingem-se elevados níveis de dissipação de energia. No entanto, no projecto adequado do interior destes dispositivos, é importante um elevado grau de sofisticação. [Soong, et al., 1997].

A título exemplificativo apresentam-se os dispositivos Taylor e Jarrett. O primeiro, ilustrado na Figura 69, corresponde a um dispositivo cilíndrico que contém um óleo compressível à base de silicone. O referido óleo é forçado a circular por acção de um pistão com cabeça em bronze. A circulação através do orifício é compensada por um termóstato bi-metálico, que permite que a operação ocorra entre os -40 a 70°C.

Este género de dispositivo possui um comportamento linear viscoso e é insensível às variações de temperatura. Vários autores [Constantinou e Symans 1992], [Constantinou et al., 1993] tem vindo a realizar diversos estudos analíticos e experimentais em edifícios com amortecedores viscosos fabricados pela Taylor Devices Inc [Sadek, et al., 1996] entre outras

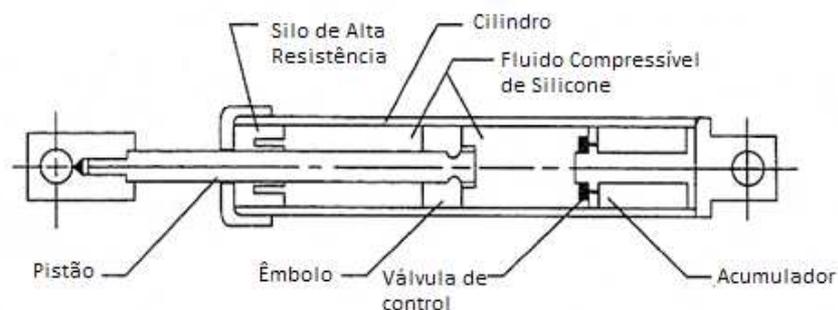


Figura 69 - Dispositivo Taylor, adaptado de [Soong, e Dargush, 1997]

Um outro exemplo de amortecedores de fluido viscoso corresponde ao dispositivo Jarret, que se apresenta na Figura 70.

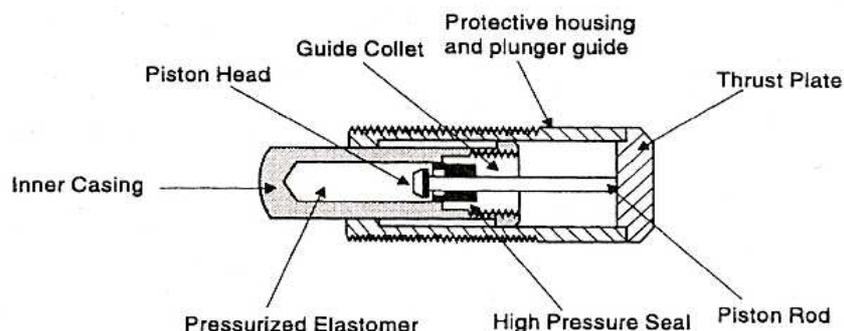


Figura 70 - Dispositivo Jarret, adaptado de [Soong, e Dargush, 1997]

Este dispositivo utiliza um elastómero pressurizado à base de silicone com o intuito de garantir rigidez e amortecimento extra. Vários autores têm vindo a desenvolver estudos analíticos e experimentais em modelos reduzidos, comprovando a sua aplicabilidade no dimensionamento sísmo-resistente. [Pekcan et al., 1995] [Soong, et al., 1997].

É ainda de referir que se tem verificado um número considerável de implementações de amortecedores de fluido viscoso em conjunto com vários tipos de sistemas de isolamento. Por exemplo, Chiarugi et al. [1986] relataram que este tipo de dispositivos de fluido viscoso foram utilizados pela primeira vez, em 1974, numa ponte italiana. Subsequentemente, Grenier [1991] fez um levantamento dos amortecedores

de fluido viscoso utilizados adicionalmente em pontes italianas, em que foi contabilizado apenas o seu desempenho à compressão [Soong e Dargush, 1997].

Mais recentemente a aplicação à escala real de dispositivos Taylor do tipo amortecedores de fluido viscoso tem vindo a ser desenvolvida e implementada com sucesso em estruturas de engenharia civil como forma de minimizar as vibrações do vento e das acções sísmicas. Até meados da década de 90 o número de aplicações deste tipo de dispositivos já atingia um número considerável com tendência para aumentar.

Este tipo de dispositivos também tem vindo a ser utilizados em edifícios de alvenaria de interesse histórico, como é o caso do Woodland Hotel na California, uma estrutura de 4 pisos em alvenaria datada dos anos 20. Na sua reabilitação, que ficou concluída em 1995, foram utilizados 16 *Viscous Fluid Dampers* de 450kN [Soong e Dargush, 1997].



Figura 71 - Hotel Woodland, California: a) vista geral do exterior [Taylor Devices Inc, 2009] e b) detalhe dos dispositivos colocados [Taylor Devices Inc, 2009]

Mais recentemente estes dispositivos tem vindo a ser generalizados a outras zonas do mundo para além dos Estados Unidos, como seja o Japão onde já se reportam aplicações a edifícios com mais de 10 pisos [Soong e Dargush, 1997].

Em anos recentes, amortecedores viscosos têm sido implementados em um largo número de estruturas, muitas vezes combinados com sistemas de isolamento sísmico. Por exemplo, em 1995, amortecedores viscosos foram implementados num sistema de isolamento de base, para 5 edifícios em San Bernardino County Medical Centre (Figura 72), localizado muito perto de duas grandes falhas. Os 5 edifícios necessitaram, num total, de 233 amortecedores viscosos não lineares.

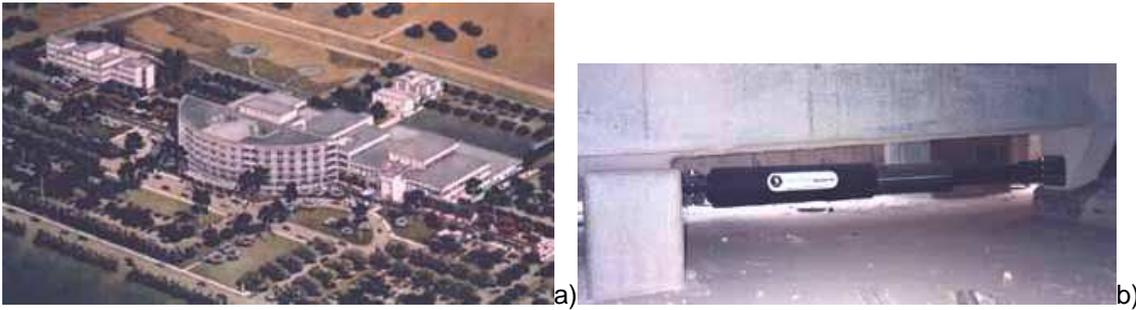


Figura 72 - San Bernardino County Medical Centre: a) vista geral do exterior [Taylor Devices Inc, 2009] e b) detalhe de colocação dos dispositivos [Taylor Devices Inc, 2009]

O recurso à implementação de dissipadores viscosos para a melhoria do comportamento face a acções dinâmicas é nos dias que correm uma opção bastante viável tanto em estruturas pré-existentes como em estruturas novas. Como exemplo de aplicação numa estrutura recente indica-se

Refere-se ainda a implementação de amortecedores de fluido viscoso em pontes, salientando-se por exemplo os viadutos de aproximação à grande ponte Seo-Hae, localizado a cerca de 70km a sudoeste da capital Seoul. A estrutura principal apresenta um comprimento total de 5280m, dos quais cerca de 2200m necessitaram da implementação de estratégia de protecção anti-sísmica. Foi identificada uma solução óptima para a estrutura com recurso a amortecedores de fluido viscoso, tendo sido colocados 54 dispositivos entre a superestrutura e todos os pilares que não se encontravam fixos nem sobre qualquer junta de expansão [Infanti et. al., 2004]

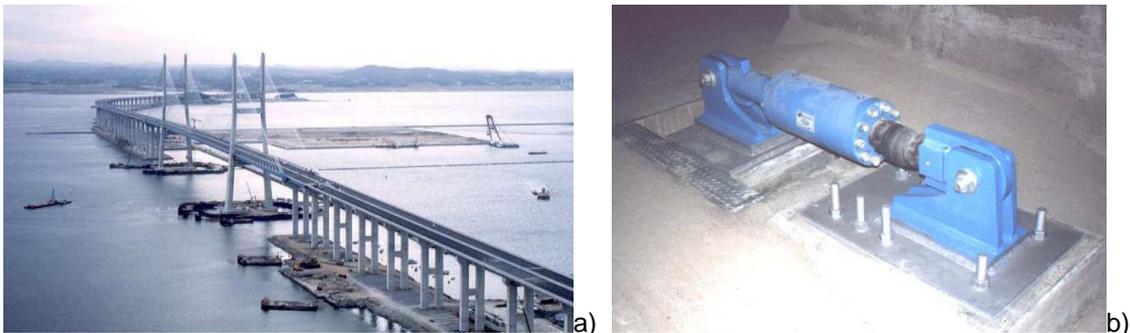


Figura 73 – Ponte Seo-Hae, Seoul, Korea: a) vista geral da estrutura e viadutos de aproximação e b) detalhe do dispositivo colocado [Infanti, 2001]

Após a primeira aplicação de sucesso deste tipo de tecnologia, outros projectos se foram seguindo, fazendo uso do mesmo tipo de filosofia de dimensionamento aplicada à ponte Seo-Hae: Ponte Ok-Yeo (Figura 74), Ponte Chun-Su (Figura 75), Ponte E-Po (Figura 76), Ponte Kang-Dong (Figura 77), Ponte Dong-Yun (Figura 78), Segunda Ponte Nam-Chang, Ponte Chu Ryung, Ponte Chun-Chun, Ponte Su-Jik, Ponte Back-Won, Ponte Han-Jik, entre outras.



Figura 74 – Ponte Seohae, Seoul, Korea: a) visão geral da estrutura e b) detalhe de colocação do dispositivo [Infanti et. al, 2004]



Figura 75 – Ponte Chun-Su, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação do dispositivo [Infanti et. al, 2004]



Figura 76 – Ponte E-Po, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação de dispositivos na direcção transversal e longitudinal [Infanti et. al, 2004]

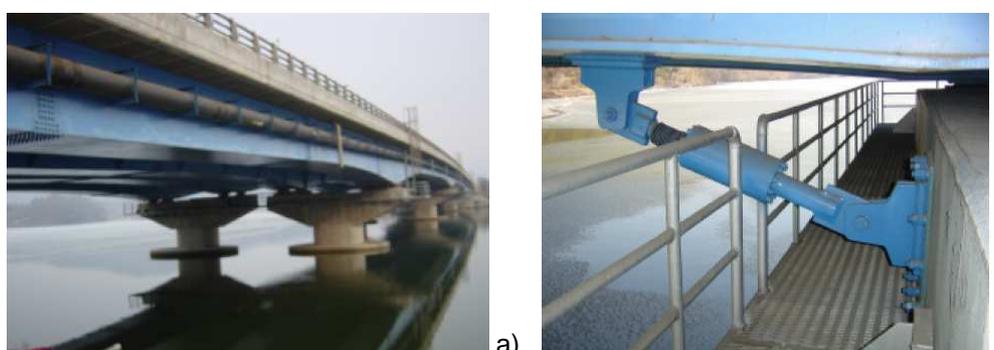


Figura 77 – Ponte Kang-Dong, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação de dispositivos [Infanti et. al, 2004]



Figura 78 – Ponte Dong-Yu, Korea: a) vista geral da estrutura e b) detalhe de colocação de dispositivo na direcção transversal [Infanti et. al, 2004]

Desde a primeira aplicação de amortecedores de fluido viscoso na Korea, que remonta ao ano 2000, mais de 11km de pontes e viadutos apresentam protecção por meio de cerca de 225 amortecedores de fluido viscoso colocados pela empresa FIB Industriale [Infanti et. al., 2004]

A nível europeu as características e desempenho de amortecedores de fluido viscoso tem vindo a ser bastante investigadas em instituições académicas e pela indústria. Referem-se os estudos de vanguarda desenvolvidos pela FIB Industriale (Itália) nos seus laboratórios, bem como a investigação conduzida sobre dispositivos da FIB em instituições independentes, nomeadamente no Centro de Investigação em Engenharia Sísmica da Universidade de Berkeley na Califórnia e na Instalação de ensaios da Boeing também situada na Califórnia em Canoga Park. Tem também vindo a ser realizados variados testes em modelos reduzidos dos amortecedores viscosos implementados, pela State University of New York at Buffalo, e descritos em [Soong e Constantinou, 1994].

Refere-se ainda a existência de amortecedores viscosos com capacidade de restituição elástica, derivada da compressibilidade do fluido utilizado. Este tipo particular de amortecedores de fluido viscoso foi implementado numa ponte da República Dominicana (Figura 79a), localizada sobre o rio Higuamo.

Nesta estrutura, com um vão central de 390m, foram incluídos dissipadores viscosos com restituição elástica (Figura 79b). Estes dispositivos permitem o controlo dos deslocamentos resultantes das solicitações sísmicas na direcção longitudinal [Figueiredo, 2008]

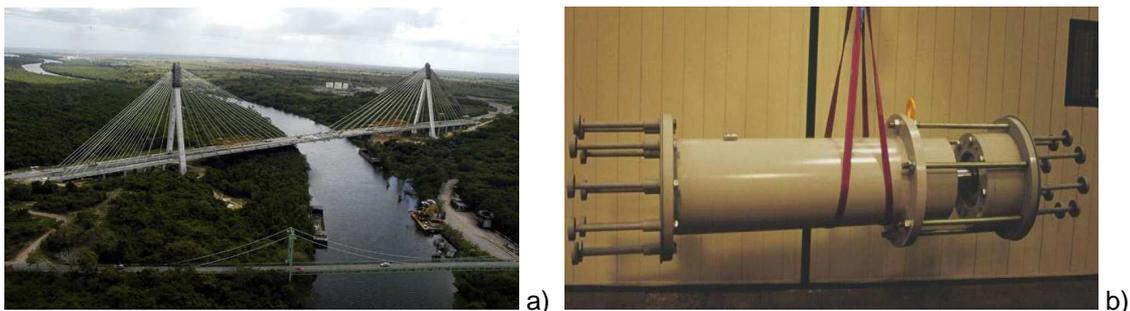


Figura 79 – Ponte sobre o rio Higuamo, República Dominicana: a) vista global [google images, 2009] e b) dispositivo colocado [Castellano, 2004]

Outro exemplo ilustrativo da implementação de amortecedores de fluido viscoso em estruturas reais corresponde à Igreja “Dives in Misericórdia” localizada em Roma (Figura 80a). O edifício apresenta uma arquitectura bastante diferente da estrutura das igrejas convencionais, tendo sido a existência de três paredes curvas de betão armado pré-fabricado branco uma das suas características que mereceu grande cuidado por parte da equipa de projecto. No dimensionamento da maior destes três paredes em forma de vela foi necessária a consideração de medidas não convencionais de dimensionamento sísmico, nomeadamente a colocação de 32 dissipadores viscosos (Figura 80b). A colocação destes sistemas permitiu reduzir os deslocamentos sísmicos para valores inferiores a 10mm [Figueiredo, 2008]. Todos os elementos constituintes dos dispositivos, em aço inoxidável, foram ensaiados em laboratório [Castellano, 2004] tendo sido obtidos excelentes resultados tanto a nível da compatibilização com modelos teóricos como em termos de capacidade de dissipação de energia.

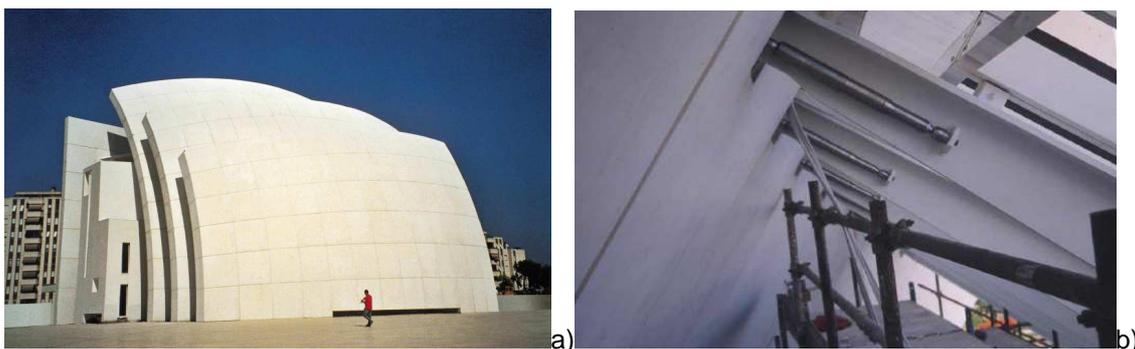


Figura 80 – Igreja “Dives in Misericórdia”, Roma, Itália: a) visão global da zona oeste e b) detalhe da colocação dos dispositivos [Castellano, 2004]

A nível de estruturas não correntes como é o caso, por exemplo, dos estádios de *baseball*, também se tem registado aplicações deste tipo de sistemas de protecção sísmica. Indica-se o New Pacific Northwest Major League Baseball Park (Figura 81a), localizado em Seattle, no qual foram integrados na cobertura oito amortecedores de

fluido viscoso (Figura 81b) para protecção face a acções sísmicas até uma magnitude de 8.5 na escala de Richter [Taylor Devices, 2009].

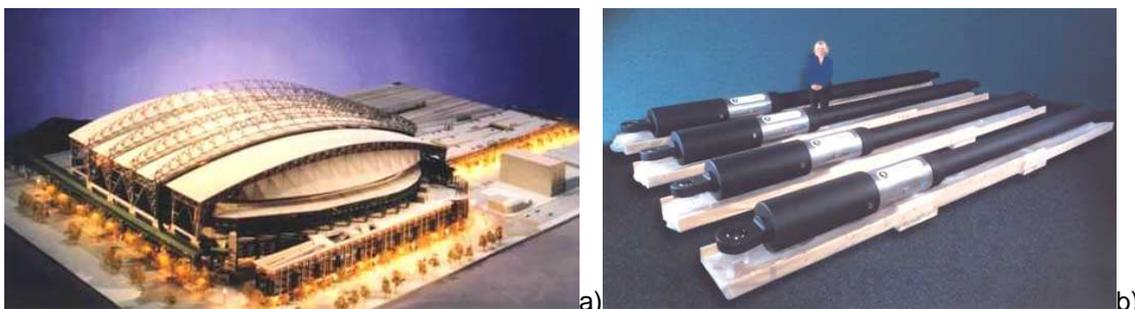


Figura 81 – Pacific Northwest Major League Baseball Park, Seattle, EUA: a) aspecto geral da estrutura e b) dispositivos colocados [Taylor Devices Inc, 2009]

Os dispositivos foram instalados entre a cobertura e as colunas de suporte (Figura 82a e Figura 82b), apresentando cerca de 7m de comprimento, um alcance de +- 38cm e um peso de 4.5tons cada.

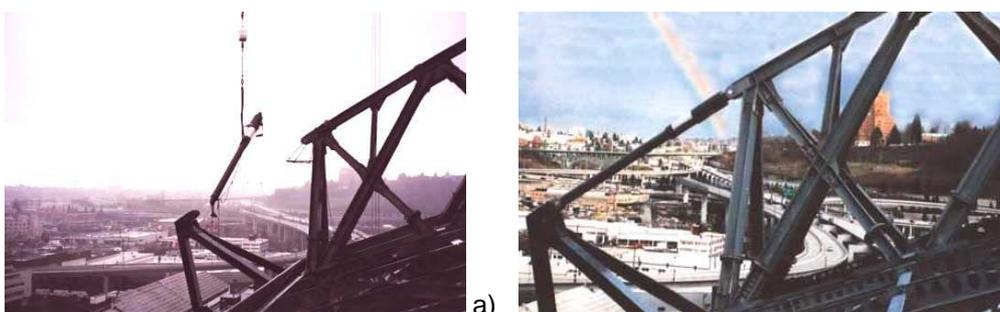


Figura 82 – Pacific Northwest Major League Baseball Park, Seattle, EUA: a) colocação de dispositivos de protecção e b) dispositivos colocados [Taylor Devices Inc, 2009]

Referem-se ainda situações de aplicação conjunta de amortecedores de fluido viscoso com outros tipos de sistemas de protecção passiva, nomeadamente com sistemas de isolamento de base constituídos por blocos em elastómero cintado. Estes últimos por não possuírem grande capacidade de dissipação de energia funcionam bastante bem, quando associados em paralelo com aparelhos que apresentem maior capacidade dissipativa como é o caso dos amortecedores de fluido viscoso. No sistema conjunto, os elementos de isolamento de base garantem uma reduzida rigidez horizontal ao nível da superestrutura face às acções sísmicas, enquanto que os aparelhos dissipadores concentram em si a função de dissipação de energia conferindo amortecimento adicional à estrutura [Figueiredo, 2008]. Identificaram-se como exemplos de aplicação deste sistema de protecção sísmica duas estruturas: Los Angeles City Hall [Taylor, 2009] e a Ponte Rion-Antirion [Infanti e tal., 2004].

Desde que o Los Angeles City Hall (Figura 83a) foi construído, em meados da década de 20, a zona tem vindo a ser fustigada por uma série de sismos devastosos,

tendo a maioria deles causado danos elevados à estrutura. Na sequência dos sismos de 1971 (Loma Prieta), 1987 (Los Angeles) e 1994 (Northridge), observaram-se danos extensos ao nível dos pesos mais elevados, nomeadamente grandes fendas nos painéis de enchimento em alvenaria e nas paredes de betão. Após o sismo de Northridge, foi decidido reforçar a estrutura por meio de uma solução combinada entre isolamento de base e amortecedores de fluido viscoso.

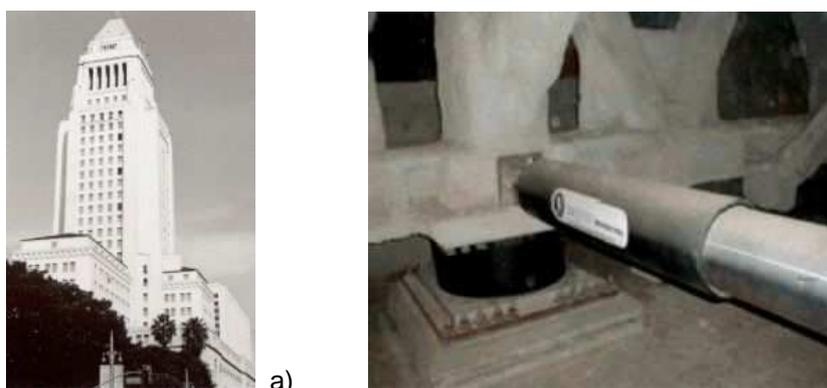


Figura 83 – City Hall, Los Angeles, EUA: a) visão global do exterior e b) dispositivo colocado [Taylor, 2009].

A solução escolhida compreendeu a colocação de cerca de 416 apoios elastómerico associados em paralelo com 52 amortecedores de fluido viscoso (Figura 83b). Cada um dos amortecedores colocados produz uma força de 180 toneladas. Para otimizar a resposta da torre da estrutura foi decidido, posteriormente, colocar 14 dispositivos de fluido viscoso, cada um deles com força de 135 toneladas. O reforço sísmico desta estrutura ficou concluído em 2001.

#### 2.1.2.5. Amortecedores electro-inductivos

Trata-se de um novo tipo de dispositivos desenvolvido pela indústria italiana, ALGA, e a Universidade de Pavia, o Politécnico de Milão e a ENEA. O conceito de dissipar energia por meio de electricidade é simples e inovador, sendo a dissipação de energia conseguida à custa da conversão de energia mecânica em calor.

A deformação causada pelos movimentos rápidos associados às acções sísmicas externas, é transferido para os dispositivos e usado como fonte de energia primária que gera energia eléctrica que de seguida é dissipada sob a forma de calor, o que permite reduzir e limitar o efeito das solicitações sísmicas [ALGA, 2009]. Até ao momento foram desenvolvidos dois tipos de amortecedores electro-inductivos do tipo passivo: lineares (Figura 84a) e rotativos (Figura 84b).



a)



b)

Figura 84 – Amortecedores electro-inductivos: a) linear [Kawashima Lab, 2004] e b) rotativo [ALGA, 2009]

Se comparados com sistemas hidráulicos, com níveis de desempenho semelhantes, apresentam como vantagens [ALGA, 2009]:

- i) Reduzidas necessidades de manutenção;
- ii) Adaptáveis a qualquer tipo de carregamento;
- iii) Resposta imediata, mesmo para deslocamentos mínimos, não dependendo como os sistemas hidráulicos da compressibilidade dos materiais constituintes;
- iv) Elevada estabilidade;
- v) Insensíveis a variações de temperatura ambiente;
- vi) Não mostram efeitos do envelhecimento;
- vii) Não apresentam limitações ao nível do número de ciclos de funcionamento.

Um sistema electro inductivo do tipo linear (Figura 84a) é basicamente constituído por duas chapas exteriores com magnetos permanentes e uma chapa interna de material condutivo não magnético e que se move entre as duas chapas exteriores.

Um sistema electro-inductivo do tipo rotativo (Figura 84b) é constituído por um perfil tubular roscado, um disco rotativo em alumínio ou liga de cobre-níquel localizado entre magnetos permanentes e placas de suporte fixas. A deformação causada pela acção dinâmica é transferida para o dispositivo e utilizada como fonte principal de geração de energia eléctrica, que posteriormente será dissipada por conversão em calor. Torna-se necessário garantir que o disco rotativo e as partes fixas não se danifiquem com o calor gerado durante o funcionamento do dispositivo [Figueiredo, 2008]. O desempenho deste tipo de sistemas depende da velocidade relativa do

movimento imposto pelo que é possível compará-los a amortecedores de fluido viscoso [ALGA, 2009]

Os amortecedores electro-inductivos podem ser usados, para além da protecção passiva, como elementos de sistemas de protecção semi-activa ou activa [Figueiredo, 2008].

Por se tratarem de dispositivos muito recentemente desenvolvidos e estudados analiticamente e experimentalmente [Forni et. al, 2007 [Ranieri, 2007] não existem até ao momento registos da sua implementação em estruturas reais.

#### 2.1.2.6. Amortecedores de Massa Sintonizada

O objectivo de incorporar amortecedores de massa sintonizada a uma determinada estrutura é basicamente o mesmo do que o que se encontra associado a qualquer dos outros mecanismos dissipadores de energia previamente considerados: a redução da energia ao nível dos elementos estruturais primários aquando da acção de forças externas resultantes das mais variadas solicitações, em que se podem incluir as acções sísmicas.

A redução de energia é acompanhada pela transferência de alguma da energia vibracional para o próprio amortecedor de massa sintonizada, que na sua forma mais simples consiste num sistema auxiliar massa-mola amortecedor ligado à estrutura principal.

Os conceitos modernos subjacentes aos amortecedores de massa sintonizados para aplicações estruturais, nomeadamente em edifícios, têm as suas raízes nos absorvedores de vibrações dinâmicas estudados em 1909 por Frahm [Frahm, 1909 e Der Hartog, 1956].

Tal como é ilustrado de uma forma esquemática na Figura 85 este dispositivo consiste na sua forma mais simples num oscilador de 1 grau de liberdade constituído por uma massa ( $m$ ) ligada a uma massa principal ( $M$ ) por meio de uma mola de rigidez  $k$  e um mecanismo de amortecimento ( $c$ ).

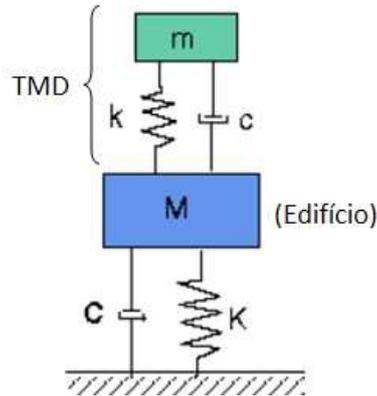


Figura 85 - Esquema de funcionamento de um amortecedor de massa sintonizado, adaptado de [Soong e Dargush, 1997].

Os primeiros estudos efectuados sobre este tipo de sistemas foram desenvolvidos por Den Hartog [Ormondroyd e Den Hartog, 1928] e incidiram na teoria dos amortecedores de vibração dinâmicos com e sem amortecimento na ausência de amortecimento no sistema principal. Foram também desenvolvidos e estudados os princípios básicos e o procedimento mais adequado para uma correcta selecção de parâmetros de amortecimento [Soong e Dargush, 1998].

Em 1935 Hahnkamm determinou a rigidez óptima do sistema, conceito que acabou por ser incluído, no mesmo ano, por DenHartog no seu livro *Mechanical Vibrations*. Em 1946 Brock determinou o factor de amortecimento óptimo para Amortecedores de Massa Sintonizada. Em 1956 foi publicada uma versão revista e actualizada do livro de Den Hartog, tendo já incluído o novo factor determinado por Brock. No início da década de 60, quase sete anos depois, encontrou factores semelhantes após comparação de respostas com frequência harmónica e frequência estacionária. Já em 1979, Luft [Abrosini et. al, 2004] determinou os parâmetros óptimos para um sistema principal amortecido e um amortecedor de massa sintonizado não amortecido sujeito a uma excitação aleatória do tipo ruído branco [Ospina, 2008]

Em 1982, Warburton [Warburton, 1982] apresentou os parâmetros óptimos para amortecedores ligados a um sistema principal sem amortecimento ou amortecimento muito reduzido, submetido a forças harmónicas ou a excitações aleatórias do tipo ruído branco, tendo obtido uma forma de simplificar estruturas com muitos graus de liberdade em sistemas simples de um grau de liberdade. Estas últimas apresentam a particularidade de vibrarem predominantemente em torno de um único modo de vibração. Neste caso considera-se apenas a contribuição do modo correspondente [Ospina, 2008].

Posteriormente vários autores [Xu e Igusa, 1992] [Jensen et. al, 1992] continuaram a estudar o comportamento de amortecedores de massa sintonizada para implementação em estruturas para mitigação de acções dinâmicas. Os primeiros [Xu e Igusa, 1992] estudaram as características dinâmicas de estruturas com AMSs sujeitas a forças harmónicas ou de banda larga, tendo encontrado forma de representar múltiplos dispositivos em função de um amortecedor de massa sintonizada equivalente, desde que as frequências sejam próximas. O trabalho desenvolvido pelos segundos autores incidiu sobre o estudo de como a incerteza associada aos parâmetros do sistema principal condiciona a eficácia dos dispositivos para uma solicitação aleatória de ruído branco [Ambrosini et. al, 2004].

No final da década de 90 [Rana e Soong, 1998] foi realizado um estudo com o objectivo de determinar os valores óptimos dos parâmetros dos amortecedores de massa sintonizada de modo a melhorar a sua eficiência. Este estudo permitiu concluir que, tanto em estruturas de um grau de liberdade com amortecimento alto como em estruturas de um grau de liberdade com amortecimento baixo, os amortecedores de massa sintonizada funcionavam muito bem.

Posteriormente os mesmos autores estudaram estruturas com três graus de liberdade equipadas com amortecedores de massa sintonizada múltiplos, sintonizando-os com as frequências dos três primeiros modos da estrutura principal, tendo obtido resultados muito bons para a situação em que a estrutura vibrava no primeiro modo e resultados menos bons quando vibrava no segundo ou no terceiro modos [Ospina, 2008].

Já entrando no terceiro milénio foi optimizado o estudo anteriormente desenvolvido por Xu e Igusa [Xu e Igusa, 1992], tendo sido comprovada a eficácia dos sistemas amortecedores de massa sintonizada utilizando estruturas com vários graus de liberdade submetidas a cargas sísmicas [Lin et. al, 2001]. Ainda no mesmo ano [Pinkaw e Fujino, 2001] foram estudados, em estruturas de um grau de liberdade sujeitas a cargas harmónicas, amortecedores de massa sintonizada semi-activos com amortecimento variável. Este estudo permitiu concluir a eficácia dos sistemas de massa semi-activos, uma vez que apresentam um desempenho análogo ao de AMSs passivos com quatro vezes mais massa.

O estudo de Xu e Igusa [Xu e Igusa, 1992] continuou a ser optimizado [Zuo e Nayfeh, 2003] [Zuo e Nayfeh, 2004]. Nas actualizações efectuadas foi considerada

uma solicitação aleatória actuando em estruturas com múltiplos graus de liberdade equipadas com amortecedores de massa sintonizados múltiplos [Ospina, 2008].

Mais recentemente alguns autores [Lee et. al., 2006] optimizaram o cálculo de estruturas de um grau de liberdade (SDOF) ou de vários graus de liberdade (MDOF) com amortecedores de massa sintonizada incluídos, minimizando a resposta no domínio da frequência e mostrando a eficácia da sua teoria por meio de simulações numéricas com recurso a modelos relativamente complexos [Ospina, 2008].

As primeiras versões de amortecedores de massa sintonizada empregavam mecanismos muito complexos para os elementos de apoio e de amortecimento, compreendiam grandes massas, ocupavam muito espaço e eram muito dispendiosos. As versões mais recentes têm vindo a ser dimensionada para minimizar estas limitações. Cada vez mais os dispositivos se tornam mais compactos em tamanho, não requerendo sistemas de controlo sofisticados, permitem a mitigação em várias direcções, sendo denominados de multidireccionais, e apresentam montagem, manutenção e eventual modificação muito fáceis.

A massa e a rigidez nos amortecedores de massa sintonizada são definidas de maneira que o aparelho fique sintonizado a uma frequência ligeiramente inferior à frequência do movimento que se pretende controlar, isto é da frequência da estrutura que se pretende mitigar. Quando a estrutura é actuada por uma acção dinâmica, o mecanismo de amortecimento (amortecedor) e a mola reagem em conjunto sobre a estrutura. A partir deste momento a massa passa a oscilar no sentido contrário ao movimento da estrutura, reduzindo vibrações e deslocamentos. O objectivo não é mais do que provocar o aparecimento de forças de inércia que de alguma maneira contrariem, ou até mesmo anulem, o movimento induzido pela acção dinâmica (vento ou sismo). O mecanismo de funcionamento consiste na absorção da vibração por transferência da energia cinética entre os vários modos de vibração [Soong e Spencer Jr, 2002]. O movimento da massa relativamente à estrutura principal pode ser muito grande quando o sistema se encontra devidamente ajustado, fornecendo desta forma uma oportunidade de consumir uma quantidade substancial de energia no dispositivo.

A acção dos amortecedores de massa sintonizada é semelhante a um aumento do amortecimento na estrutura principal, daí a denominação de amortecedores de massa. Devem ser preferencialmente colocados em zonas em que a deflecção da estrutura é maior [Housner et. al, 1997], sendo normalmente colocados no topo dos

edifícios ou a meio-vão nas pontes, por ser a localização onde o seu efeito se torna mais eficaz.

Sob uma carga harmónica simples a massa principal  $M$  pode permanecer completamente estacionária quando a frequência natural do amortecedor incorporado se encontra sintonizada com a frequência de excitação.

A eficiência destes dispositivos é dependente da razão entre as massas do amortecedor de massa sintonizado e da massa móvel da própria estrutura, da razão entre frequências do AMS e da frequência da estrutura a controlar (que se considera idealmente igual à unidade) e do coeficiente de amortecimento do amortecedor de massa sintonizado, que traduz como é que o dispositivo dissipa a energia.

Uma das restrições associadas ao uso de amortecedores de massa sintonizada na mitigação de vibrações, prende-se com facto de estruturas reais possuírem vários modos de vibração e estes dispositivos apenas conseguirem ser sintonizados para uma determinada frequência (um dado modo de vibração). No modo de vibração para o qual o edifício se encontra sintonizado, geralmente o modo fundamental, a resposta é reduzida de uma forma considerável, enquanto que nos restantes modos, a resposta da estrutura pode ser agravada.

Como alternativa para atenuar mais modos de vibração, pode-se colocar uma maior quantidade de AMSs, cada um deles sintonizado para uma determinada frequência pré-definida e compatível com os diferentes modos de vibração da estrutura que se pretenda mitigar.

Associado surge um outro problema e grande desvantagem deste tipo de dispositivos que é a necessidade de reservar um espaço de dimensões significativas para a sua instalação. Daí que quanto maior for o número de dispositivos colocados mais gravosa se torna a situação [Oliveira, 2003].

O efeito da implementação de um amortecedor de massa sintonizado encontra-se ilustrado na Figura 86 sendo possível identificar a excelente eficiência destes dispositivos junto da ressonância da estrutura em que estão incluídos.

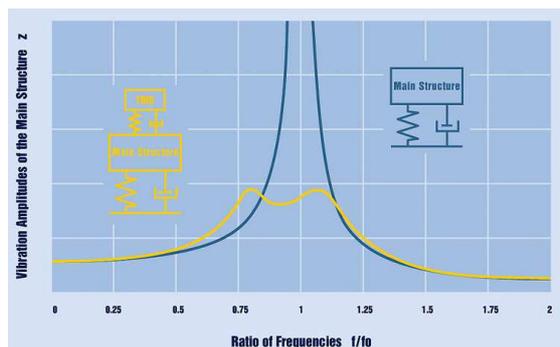


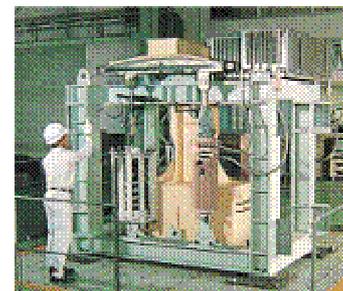
Figura 86 – Função de resposta em frequência de um amortecedor de massa sintonizado [Gerb, 2009]

O amortecimento do sistema principal foi também incluído na análise dos amortecedores de vibração dinâmicos desenvolvida por Bishop e Welbourn [1952]. No seguimento do trabalho acima referido foi concebido um processo de optimização por Falcon et al [1967] no sentido de obter uma resposta de pico mínima e um amortecimento efectivo máximo no sistema principal [Soong e Dargush, 1997].

Quanto à eficiência deste sistema na redução da resposta de estruturas, ela revela-se alta quando a excitação for sinusoidal ou de banda estreita [Pranesh e Sinha, 2000]. No entanto, no caso de ocorrer um movimento do solo muito forte, a estrutura pode comportar-se inelasticamente, aumentando o período da estrutura e tornando o amortecedor de massa sintonizado não sintonizado com a estrutura [Pranesh e Sinha, 2000]. Por estas razões este sistema é geralmente utilizado no controlo de vibrações do vento e, menos frequentemente, para mitigação das forças resultantes de acções sísmicas.

Os amortecedores de massa sintonizada são igualmente usados com carácter temporário durante as operações de construção de estruturas esbeltas, como as torres de pontes suspensas, para protecção de vibrações por parte do vento. Um exemplo de aplicação, para mitigação da acção dinâmica do vento durante a fase construtiva, corresponde à ponte Akashi-Kaikyo (Figura 87a), que à data da sua inauguração em 1998 era considerada a maior ponte suspensa do mundo. Nesta estrutura os AMSs foram colocados (Figura 87b) em cada uma das torres de 300m de altura em diferentes alturas de construção para redução das vibrações impostas pelo vento e por eventuais sismos [Cooper, 1998]. Como curiosidade refere-se ainda que durante a fase construtiva desta ponte ocorreu o sismo de Kobe, estando a falha que lhe deu origem localizada precisamente no meio do estreito cruzado pela ponte. Na altura do sismo as torres já se encontravam concluídas e verificou-se, após inspecção, que não existiam danos ao nível dos principais elementos estruturais devido à existência dos

supramencionados amortecedores de massa sintonizada que garantiram a segurança estrutural das torres e a inexistência de danos [Billington, 2001].



a) *Figura 87 - Ponte Akashi-Kaikyo, Japão: a) visão geral e b) amortecedor de massa sintonizada colocado nas torres [HBSE, 200]*

Desde a colocação do primeiro amortecedor de massa sintonizada na torre Centerpoint na Austrália [ENR, 1971] [Kwok e MacDonald, 1987] com o objectivo de reduzir as vibrações induzidas pelo vento, que o número e variedade de dispositivos amortecedores de massa sintonizada instalados em edifícios, pontes e torres tem vindo a crescer não só para fazer face a acções do vento mas também com o intuito de minimizar os efeitos de acções sísmicas gravosas [Soong e Dargush, 1997]. As primeiras aplicações foram dirigidas no sentido de ajudar edifícios a resistirem a solicitações do vento. Mais recentemente, tem vindo a ser realizados estudos numéricos e experimentais sobre amortecedores de massa sintonizada utilizados na redução da resposta de estruturas a acções sísmicas.

Como referido no parágrafo anterior, a primeira estrutura do mundo a incluir um amortecedor de massa sintonizado foi a Torre Centerpoint localizada em Sydney (Austrália) [ENR, 1971] [Kwok e MacDonald, 1987]. A estrutura corresponde a um edifício de escritórios encimado por uma torre, totalizando o conjunto altura total de 324.8m (Figura 88). A servir como estrutura de fornecimento de água e protecção contra incêndios, foi colocado no topo de torre um tanque de água que em conjunto com amortecedores hidráulicos funciona como amortecedor de massa sintonizado para reduzir os movimentos induzidos pelas acções dinâmicas do vento. O tanque que apresenta uma forma de toro com 2.13m de altura e de largura e com uma capacidade de 135000 l foi colocado no topo da estrutura (Figura 88).

Posteriormente foi adicionada uma massa secundária de cerca de 40tons num anel de ancoragem intermédio (Figura 88), com o objectivo de aumentar também o amortecimento associado ao 2º modo de vibração. Esta configuração resulta num aumento de amortecimento de 1% para 1.2% e de 0.4% para 1.5% nos primeiros dois modos, respectivamente [Soong e Dargush, 1997] A energia associada com os

movimentos relativos entre a torre e o tanque de água é dissipada por meio dos amortecedores hidráulicos, instalados tangencialmente ao tanque e ancorados ao chão. Os resultados obtidos da medição de acelerações mostraram que as acelerações induzidas pelo vento foram reduzidas entre 40% a 50% [Kwok, 1984] [Kwok e MacDonald, 1990].

Uma outra aplicação pioneira de amortecedores de massa sintonizada corresponde à Torre John Hancock (Boston) de 244m de altura [ENR, 1997]. Nesta estrutura (Figura 89) foram instalados dois amortecedores de massa sintonizada em extremos opostos do 58º andar para contrabalançar o movimento de torção. Cada unidade media cerca de 5.2mx5.2mx1m e era essencialmente uma caixa de aço cheia de chumbo, pesando 300 ton e ligada à estrutura do edifício por meio de um sistema de absorção de choques. O sistema é activado com movimentos de cerca de 3mg, momento a partir do qual os pratos de aço, sobre os quais os dispositivos estão apoiados, são lubrificados com óleo, de modo a que as massas fiquem livres para deslizar [Campbell, 1995]. Este sistema permite reduzir a resposta da estrutura em cerca de 50% [Wiesner, 1979].



*Figura 88 – Torre Center Point  
[Images Google, 2009]*



*Figura 89 – Torre John Hancock  
[Berlinoir, 2008]*

Outra aplicação pioneira de amortecedores de massa sintonizada foi usada em 1978 no edifício Citicorp de Nova Iorque (Figura 90) [Peterson, 1980]. A este edifício, de 278m de altura, foi adicionado um sistema de cerca de 9.14mx9.14mx3.05m composto por um bloco de betão com 410tons equipado com dois mecanismos de amortecimento em mola, que funcionam nas duas direcções perpendiculares (norte-sul e este-oeste). O sistema foi instalado no 63º andar, sendo que a esta elevação o edifício pode ser representado por uma simples massa modal de 20000tons à qual o AMS se encontra ligado. O sistema é activado a um limiar de aceleração crítica de

3mg por meio da elevação hidráulica da massa de betão o que permite o movimento completo do bloco, que é regulado por dois activadores hidráulicos controlados por computador que empurram e puxam simultaneamente o bloco simultaneamente nas direcções norte-sul e este-oeste por forma a garantir que o sistema se comporte como um AMS passivo bi-axial “ideal” [Wiesner, 1979]. O bloco, que assenta numa série de 12 suportes equilibrados por pressão hidráulica tem o seu movimento impedido por duas molas sintonizadas com a frequência natural do edifício. Testes e observações efectuadas ao longo da vida do edifício permitiram concluir que esta solução de protecção produz aproximar o coeficiente de amortecimento efectivo da estrutura a 4%, quase quatro vezes superior ao valor efectivo do amortecimento da estrutura. Esta situação permite reduzir a resposta em acelerações induzida por acções dinâmicas, nomeadamente a acção do vento, a cerca de 50% do valor inicial, para as duas direcções perpendiculares em simultâneo [Soong e Dargush, 1997].

Não se registam aplicações de amortecedores de massa sintonizada apenas nos Estados Unidos. Assim refere-se também, como um dos primeiros exemplos de aplicação, a torre Nacional Canadiana (CN Tower), localizada em Toronto [Soong e Dargush, 1997]. A torre (Figura 91) datada de 1976, com cerca de 553m incluindo uma antena de aço com 102m, necessitou da colocação de dois AMSs com forma de anel em aço com 0.35m de largura, 0.30m de altura e diâmetros de 2.4m e 3.0m, respectivamente. Cada anel, suportado por três vigas de aço ligadas aos lados do mastro da antena, concentra uma massa de cerca de 9tons. A ligação dos anéis às vigas é feita por meio de quatro rolamentos universais que permitem o movimento em todas as direcções. Adicionalmente quatro amortecedores hidráulicos montados na parte lateral do mastro e ligados ao centro de cada rolamento permitem a dissipação de energia. À medida que os anéis se movimentam para um lado e para o outro, o sistema de amortecedores hidráulicos dissipa a energia introduzida na estrutura e reduz a resposta de estrutura. Os amortecedores de massa sintonizada incluídos na torre foram dimensionados por Nicolet, Carrier, Dressel and Associates, Ltd em colaboração com Vibration Acoustics, Ltd. Os dois dispositivos foram colocados a 488m e 503m de altura, ajustados ao segundo e quarto modos de vibração para minimizar as deflexões da antena. O primeiro e terceiro modos, por apresentarem as mesmas características que a estrutura de betão que suporta a antena de 102m não necessitam da introdução de amortecimento adicional por via de um sistema do tipo amortecedor de massa sintonizado. Refere-se ainda que esta estrutura deteve durante cerca de 31 anos, até 2007, o recorde de estrutura mais alta do mundo.

A torre do porto de Chiba, terminada em 1986, foi a primeira estrutura no Japão a ser equipada com amortecedores de massa sintonizada (. Esta estrutura com 125m de altura, em aço, pesa cerca de 1950tons. Os primeiros modos de vibração correspondem a frequências de 0.444Hz e 0.370Hz para as direcções X e Y, respectivamente. O amortecimento para os modos fundamentais foi estimado a 0.5%. Na análise para os modos mais elevados foram assumidos coeficientes de amortecimento proporcionais às frequências. O objectivo de incluir os amortecedores de massa sintonizada nesta estrutura foi, à semelhança de outras, aumentar o amortecimento para os primeiros modos de vibração em X e Y. A Figura 92 mostra uma perspectiva geral da estrutura. O sistema de mitigação de vibrações utilizado foi produzido pela empresa Mitsubishi Steel Manufacturing Co, Ltd sistema e dimensionado de forma a apresentar uma razão de massas relativa à massa modal do primeiro modo de cerca de 1/120 e 1/80 nas direcções X e Y, respectivamente, o que corresponde a uma massa de 15tons. As frequências foram ajustadas a 0.446Hz e 0.367Hz nas direcções X e Y, respectivamente, e o coeficiente de amortecimento atingiu valores de 15%. O deslocamento relativo máximo do amortecedor de massa sintonizado relativamente à torre foi registado como tendo atingido cerca de +-1m em cada uma das direcções principais. Este dispositivo permitiu uma redução de deslocamentos da ordem dos 40%. Posteriormente foi instalado um actuador hidráulico anexo ao amortecedor de massa sintonizado que melhora consideravelmente as características de funcionamento e amortecimento de um sistema puramente passivo [Soong e Dargush, 1997].



*Figura 90 – Citicorp Center  
[Citicorp, 2009]*



*Figura 91 – Canadian National  
Tower [CN Tower, 2009]*



*Figura 92 – Chiba Port Tower  
[CPT images google, 2009]*

Para além da anteriormente referida, Chiba Port Tower, foram construídas no Japão, entre outras estruturas, a Fukuoka Tower, Crystal Tower, Yokohama Landmark

Tower, Rokko-Island P&G Building, Sea Hawk Hotel & Resort [Ospina, 2008] [Kareem et. al., 1999].

A Fukuoka Tower (Figura 93), com uma altura total de 157m e uma massa de cerca de 4000ton, encontra-se equipada desde a sua construção em 1989 com amortecedores de massa sintonizada de cerca de 30tons [Ospina, 2008] o que permite uma redução considerável tanto de deslocamentos como acelerações impostas por acções dinâmicas.

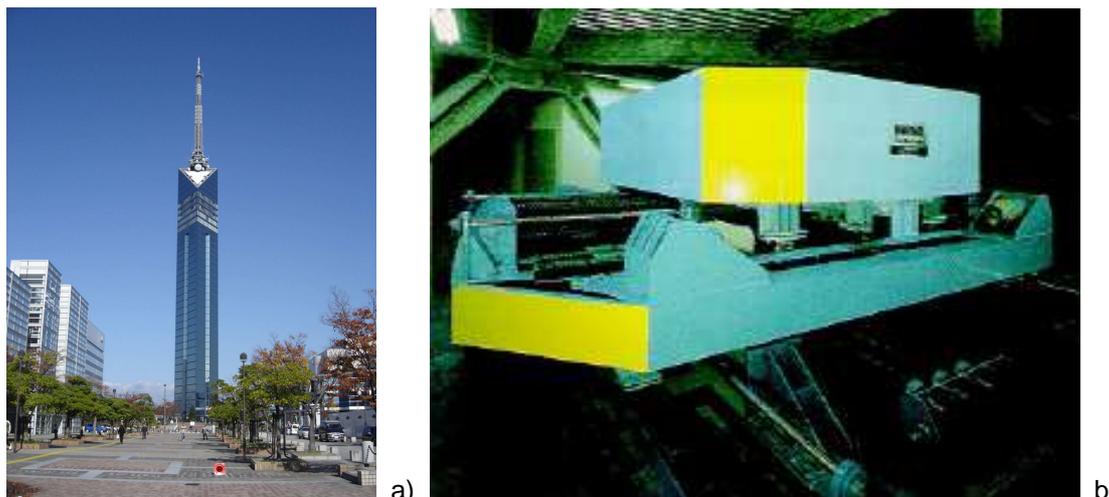


Figura 93 – Fukuoka Tower, Fukuoka, Japão: a) Vista exterior [FT images google, 2009] e b) AMS colocado [Mitsubishi, 2005]

A Crystal Tower (Figura 94a) é um edifício de 37 andares construído no ano de 1990. Apresenta frequências dos primeiros modos de vibração da ordem de 0.25Hz e 0.33Hz nas direcções Norte-Sul e Este-Oeste, respectivamente. Seis dos nove elementos de refrigeração estão pendurados das vigas de topo do tecto e utilizados como pêndulos de massa (Figura 94 e Figura 94c), sendo que quatro deles têm um pêndulo 4m de comprimento e deslizam na direcção Norte-Sul, enquanto os outros dois têm um comprimento de pêndulo de cerca de 3m e deslizam na direcção Este-Oeste.

A presença de amortecedores óleo-hidráulicos ligados aos referidos pêndulos, nas duas direcções, permite a dissipação da energia pretendida. Os seis elementos de refrigeração supra referidos constituem um conjunto amortecedor de massa sintonizada com 540tons que permite reduzir as vibrações laterais da estrutura produzida pelo vento até 50% do valor sem dispositivo.

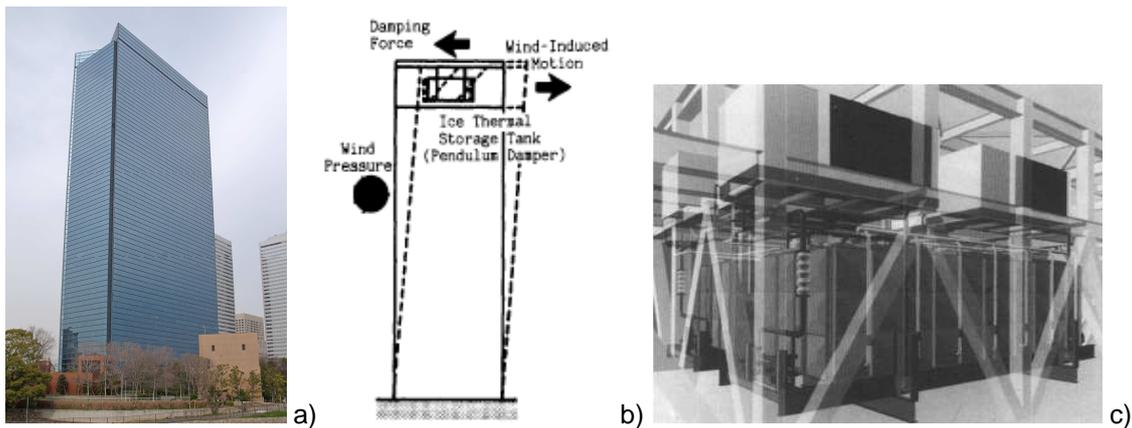


Figura 94 – Crystal Tower, Osaka, Japão: a) Vista exterior [CT images google, 2009], b) representação esquemática do funcionamento do AMS [Nagase e Hisatoku, 1992] colocação dos AMS junto do sistema de refrigeração [Nagase e Hisatoku, 1992]

O Yokohama Landmark Tower (Figura 95a), uma estrutura com 73 pisos, corresponde ao edifício mais alto do Japão. Esta estrutura possui dois AMS (Figura 95b) localizados no 71º piso a cerca de 282m de altura, com uma disposição em cantos opostos do edifício, análogo ao encontrado no edifício John Hancock (Boston).

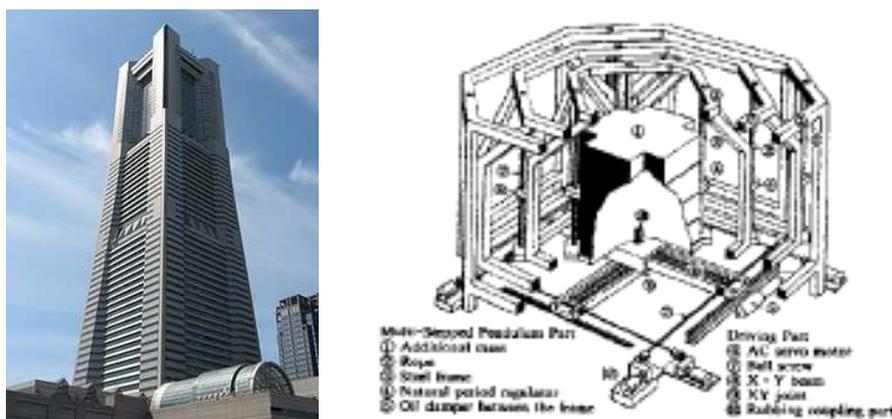


Figura 95 – Yokohama Landmark Tower, Yokohama, Japão: a) Vista do exterior [YT Wikipedia, 2009], b) representação esquemática do AMS colocado [Kareem et. al., 1999]

Aplicações mais recentes incluem a instalação de amortecedores de massa sintonizada na torre de controlo de 67.5m de altura do Aeroporto Nacional de Washington (Figura 96a) [Banalvakar e Isyumov, 1998] que contribuiu para um aumento de cerca de 3% no amortecimento inicial da estrutura. Esta solução foi escolhida após terem sido estudados vários tipos de dispositivos de protecção e compreendeu a colocação de um amortecedor de massa sintonizada com cerca de 13tons. Este foi o primeiro dispositivo deste género colocado em torres de controlo de tráfego aéreo na América do Norte. Refere-se ainda que esta tecnologia também tem sido implementada com sucesso no Japão, onde as torres de controlo aéreo com estrutura em aço se encontram bastante difundidas, inclusivamente para resistirem a acções sísmicas gravosas. O amortecedor de massa sintonizada instalado no

Aeroporto de Washington foi ensaiado, com o objectivo de avaliar o seu desempenho, por meio de um dispositivo de agitação dinâmica especialmente concebido para o efeito. O amortecedor de massa sintonizado é continuamente monitorizado por meio de um modem ligado à Universidade de Western Ontário. Os registos obtidos durante a passagem de ventos fortes, por exemplo de furacões, comprovam o sucesso deste tipo de dispositivos na mitigação de acelerações horizontais [Banavalkar, 1999]



Figura 96 – Vista do exterior da torre de controlo de tráfego aéreo do Aeroporto de Washington, Washington, EUA [Cooper, s/d]

O hotel mais alto do mundo, o Burj Al Arab (Figura 97a), localizado no Dubai, Emirados Árabes Unidos, também foi, à data da sua construção (1999) equipado com Amortecedores de Massa Sintonizados (Figura 97b). Esta estrutura de 321m inclui 11 amortecedores distribuídos ao longo da sua altura, o que permite mitigar vibrações induzidas por acções dinâmicas do vento e das ondas e assim evitar o desconforto dos seus ocupantes. Para além disso a colocação dos sistemas acima referidos permite minimizar os danos ocorridos na sequência de um sismo [Ospina, 2008].



Figura 97 – Hotel Burj Al Arab, Dubai, Emirados Árabes Unidos: a) Vista global do exterior [BAA, 2009], b) pormenor de colocação do amortecedor de massa sintonizado [Gerb, 2009] e c) detalhe de amortecedor de massa sintonizado [Gerb, 2009]

Com a entrada no novo milênio novas estruturas foram sendo construídas tendo na sua constituição amortecedores de massa sintonizada, salientando-se por exemplo o Passadiço do Millennium para peões (Figura 98 e Figura 99), a Trump Tower em Nova Iorque (Figura 100), o Taipei 101 e a plataforma em balanço sobre o rio Colorado, também chamada de Grand Canyon Skywalk.

O Passadiço do Millennium (Figura 98a e Figura 98b) em Londres apresentou vibrações excessivas induzidas pelos transeuntes. Este passadiço, com aproximadamente 325m de comprimento total, apresenta três vãos que se desenvolvem de norte para sul com 81m, 144m e 108m, respectivamente. No dia da sua inauguração milhares de pessoas começaram a atravessá-la, o que induziu fortes vibrações laterais muito acima dos limites de serviço.



Figura 98 – Passadiço do Millennium, Londres, Reino Unido: a) Vista global [MB, 2009], b) perspectiva aérea [Gerb, 2009]

Por esta razão foi necessário instalar dispositivos que mitigassem as referidas vibrações. A solução adoptada incluiu 26 pares de amortecedores de massa sintonizada (Figura 99a e Figura 99b), perfazendo um total de 52 dispositivos, localizados ao longo dos três vãos. Para além disso, a estrutura conta ainda com 37 amortecedores de fluido viscoso que permitem a redução das vibrações horizontais melhorando o seu comportamento global [Gomes, 2006].



Figura 99 – Passadiço do Millennium, Londres, Reino Unido: a) AMS vertical [Gerb, 2009], e b) AMS horizontal durante a colocação [Gerb, 2009]

A Trump World Tower em Nova Iorque (Figura 100a), com os seus 269m de altura, é considerada o mais alto edifício residencial do mundo. Esta estrutura, atendendo às suas características é muito vulnerável a acções dinâmicas e como tal foi dimensionada com um amortecedor de massa sintonizado com cerca de 600 toneladas incluído (Figura 100b). O dispositivo, que foi colocado num piso técnico localizado no topo dos 90º piso, permite o aumento do conforto dos ocupantes do edifício através da redução de acelerações e deslocamentos impostos por ventos fortes e eventuais acções sísmicas.

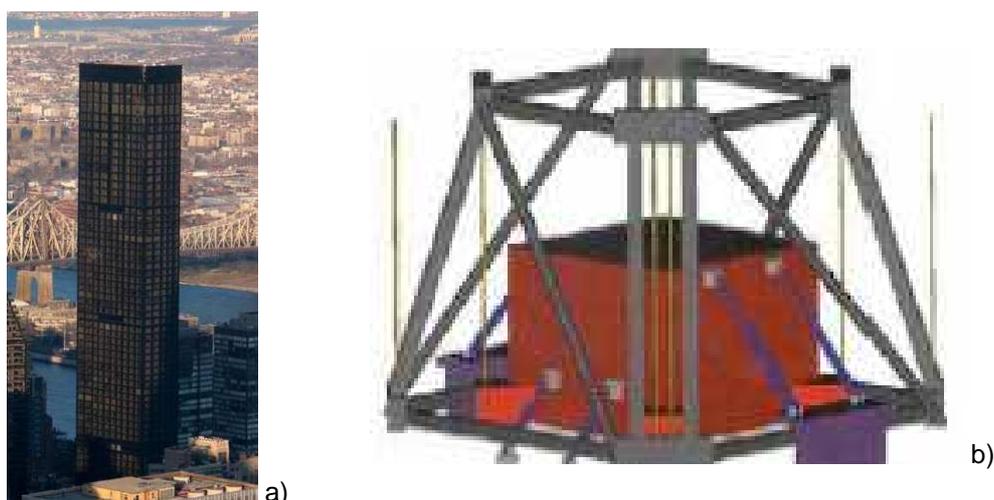


Figura 100 – Trump Tower, New York, EUA: a) Vista do exterior e b) representação esquemática do amortecedor de massa sintonizada colocado [TT, 2009]

O Taipei 101 (Figura 101a) data de 2004 e corresponde ao edifício construído e habitado mais alto do mundo, sendo denominado uma das sete maravilhas da engenharia da actualidade. O seu nome deriva da sua localização geográfica, Taipei situa-se em Taiwan e 101 é o número de andares do prédio.

Trata-se de um edifício muito imponente, com paredes em vidro verde azulado que tem a capacidade de suportar impactos até 8 toneladas. Possui o maior amortecedor de massa sintonizada, em forma de pêndulo, do mundo, tendo sido dimensionado para suportar ventos até 216Km/h e sismos de grande magnitude, fazendo do edifício uma estrutura bastante estável.

O amortecedor de massa sintonizado utilizado encontra-se localizado entre os andares 88 e 92 (Figura 101b) e corresponde a uma esfera de 5.5m de diâmetro (Figura 101c), constituída por 41 camadas de aço soldadas (Figura 101d), que pesa aproximadamente 662tons.

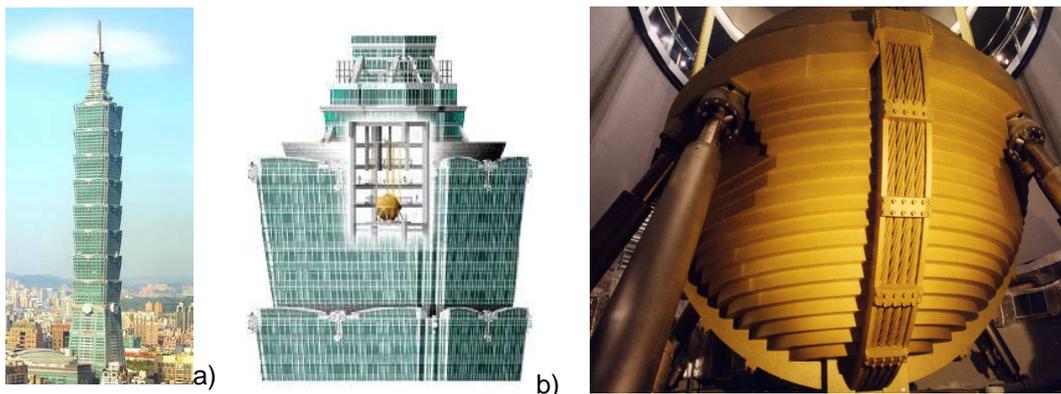


Figura 101 - Edifício de 101 pisos de Taipei: a) vista global do exterior [images google, 2009], b) detalhe do topo [Taipei 101, s/d], e c) aspecto global do amortecedor de massa sintonizado [Taipei 101, s/d]

Este dispositivo permite redução da oscilação do edifício em cerca de 40%. Além do referido dispositivo a estrutura possui mais dois amortecedores de massa sintonizada junto do pináculo de topo (Figura 102, cada um com o peso de 4,5tons, que permitem aumentar a sua estabilidade face a ventos muito fortes

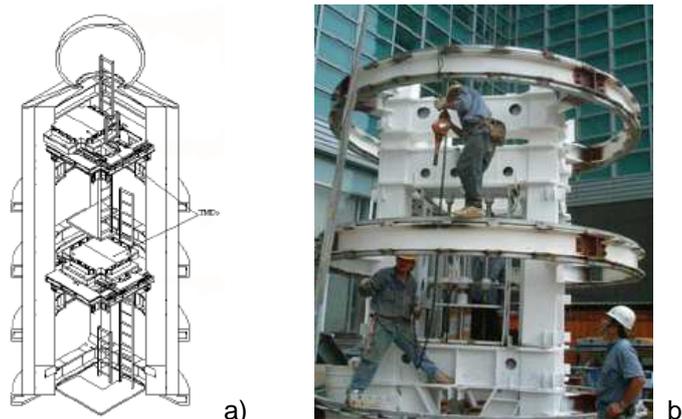


Figura 102 – Taipei 101, Taipei, Taiwan: a) Representação esquemática dos amortecedores de massa sintonizada colocados no pináculo [Haskett et. al., s/d] e b) Instalação dos amortecedores de massa sintonizada do pináculo [Taipei 101, s/d]

Mais recentemente, em 2007, foi inaugurada no Arizona (EUA) sobre o Grand Canyon uma estrutura que inclui na sua constituição dispositivos do tipo amortecedores de massa sintonizados para mitigação de vibrações. Trata-se de uma estrutura que corresponde a uma plataforma de balanço em forma de ferradura usada como miradouro e situada a cerca de 1200m acima do nível do rio Colorado (Figura 103a).

Esta plataforma foi construída em vidro de 10.2cm de espessura e tem capacidade para suportar 70 toneladas, o que equivale a uma lotação de 800 pessoas. Por razões de segurança é interdita a entrada a mais de 120 pessoas em simultâneo. Originalmente foram dimensionados 4 amortecedores de massa sintonizada (Figura

103b) que se localizavam dentro das vigas no centro do raio da ferradura, o que permitia resistir a vibrações produzidas pelos transeuntes, a ventos de 160Km/h e a sismos de magnitude 8 na escala de Rischter.

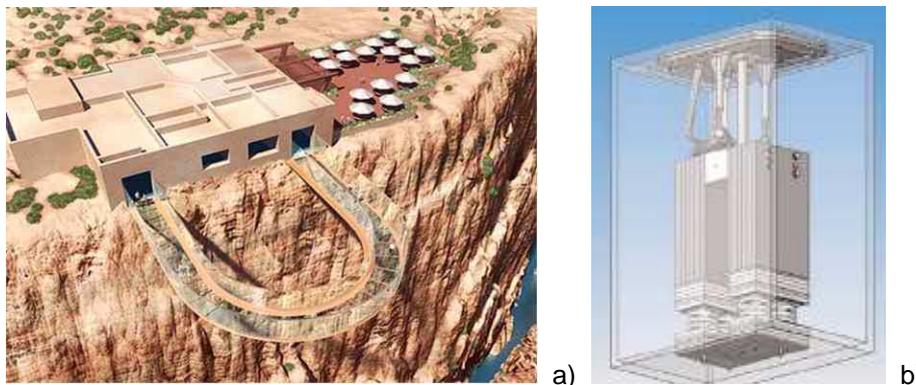


Figura 103 – Plataforma de balanço sobre o Grand Canyon, Arizona, EUA: a) Vista aérea [Skywalk, 2010] e b) Representação esquemática de amortecedor de massa sintonizado colocado [Skywalk, 2010]

A eficácia dos amortecedores de massa sintonizada pode ser aumentada por meio da ligação de uma massa auxiliar com um actuador, de maneira a que, a sua resposta fique fora de fase com a resposta da massa sintonizada.

Os amortecedores de massa sintonizada e as suas variedades constituem uma grande percentagem de sistemas de amortecimento actualmente utilizados. Não só têm sido aplicados em edifícios como também em chaminés, pontes e outras instalações industriais na Alemanha, Arábia Saudita, Austrália, Bélgica, Canadá, Japão, Paquistão, Reino Unido.

Os amortecedores de impacto [Masni e Caughey, 1966] [Reed, 1967] constituem forma alternativa prática e singular de sistemas inerciais do tipo amortecedores de massa sintonizada. Os dispositivos têm normalmente a forma de pequenas massas rígidas suspensas no topo de um recipiente montado de lado na estrutura, como esquematizado na Figura 104.

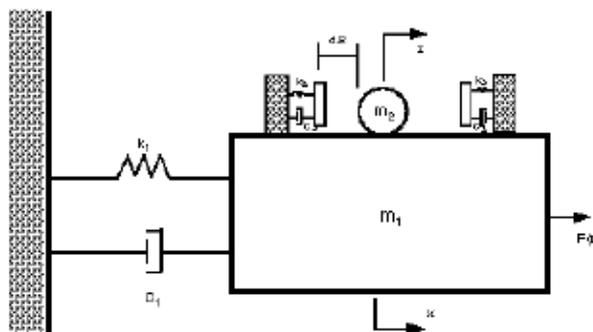


Figura 104 – Esquematização das partes constituintes de um amortecedor de impacto [Kareem et. al, 1999]

O recipiente está construído num tamanho específico, de modo a que haja um espaço óptimo entre a massa suspensa e o recipiente, permitindo que ocorram colisões entre os dois enquanto a estrutura oscila. Enquanto a distância de intervalo constitui um parâmetro importante na construção destes sistemas, o comprimento de suspensão e o tamanho da massa são igualmente de extrema importância, determinando a frequência do sistema. Este tipo de amortecedor é particularmente eficaz para mastros e estruturas em forma de torre com oscilações num plano estando a ser amplamente utilizadas, em particular em mastros colocados no topo de telhados [Koss e Melbourne, 1995].

Embora os amortecedores de impacto tenham sido largamente utilizados para controlar vibrações de lâminas em turbinas e ferramentas mecânicas, a sua aplicabilidade para controlo de vibrações em estruturas é ainda relativamente limitada [Ying e Semercigil, 1991].

As primeiras aplicações de amortecedores de impacto sob a forma de correntes revestidas de plástico foram utilizadas nas antenas de comunicação da marinha [Kareem et. al, 1999]. Estas aplicações pioneiras, designadas de amortecedores de corrente suspensa, provaram que os deslocamentos podiam ser significativamente reduzidos através do impacto das correntes revestidas [Reed, 1967]. Este tipo de amortecedores de impacto constituídos por correntes revestidas a borracha alojadas em cilindros, alia os benefícios do impacto não elástico à fricção interna adicional dos elos das correntes roçando uns nos outros. A aplicação desta tecnologia foi efectuada de uma forma repetida em torres, mastros ou postes de iluminação na Austrália e no Japão com o objectivo de controlar as vibrações causadas pelas acções dinâmicas, como por exemplo ventos fortes [Kareem et. al., 1999].

É importante não esquecer e frisar que os amortecedores de massa sintonizada são dispositivos cujo estudo e implementação se encontra em franco desenvolvimento um pouco por todo o mundo. O interesse crescente pelo seu uso no controlo de vibrações de estruturas submetidas a acções sísmicas resultou em alguns desenvolvimentos e inovações. Uma abordagem interessante foi adoptar o amortecedor de massa sintonizada de capacidade activa, surgindo os amortecedores de massa activos (*Active Mass Damper*) e os amortecedores de massa híbridos (*Hybrid Mass Damper*). Estes sistemas serão abordados em secções posteriores do presente relatório.

### 2.1.2.7. Amortecedores de Líquido Sintonizado

Uma variante dos amortecedores de massa sintonizada corresponde aos denominados amortecedores de líquido sintonizado.

Os princípios básicos envolvidos na aplicação de um amortecedor de líquido sintonizado para redução da resposta dinâmica de estruturas são semelhantes aos dos amortecedores de massa sintonizada, mas neste caso em particular, a massa secundária é introduzida sob a forma de um líquido e ajustada para permitir absorção das vibrações dinâmicas.

Nos amortecedores de líquido sintonizado um líquido, com determinadas características, é usado para fornecer todas as características necessárias ao sistema secundário, o que nos amortecedores de massa sintonizada era feito pela massa. No entanto, a agitação do líquido torna a resposta da estrutura altamente não-linear. O amortecimento associado a este tipo de dispositivo resulta do fenómeno de *sloshing*, da quebra de onda (*breaking waves*) e do próprio impacto do líquido nas paredes do recipiente [Yalla e Kareem, 1999]. Os amortecedores de líquido sintonizado compreendem os amortecedores de *sloshing* e os amortecedores de coluna de líquido sintonizado, conforme o esquematizado na Figura 105.

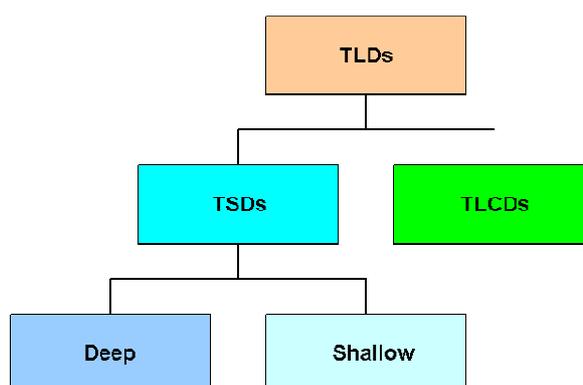


Figura 105 - Esquematização da “família” de amortecedores de líquido sintonizado, adaptado de [Kareem et. al, 1999]

Tratam-se de dispositivos que tem vindo a tornar-se, desde os trabalhos de Welt e Modi [Welt e Modi, 1984a] [Welt e Modi, 1984b] e Fujino [Fujino et. al, 1988] e da implementação proposta para o aeroporto de Nagasaki [Tamura et. al, 1988] na década de 80, a forma mais popular de dispositivos de amortecimento baseados em inércia com mecanismos indirectos de dissipação de energia [Sakai et. al, 1989] [Kareem, 1990] [Fujino et. al, 1992] [Kareem, 1993] [Kareem e Tognarelli, 1994].

Em particular, os amortecedores de *sloshing* são extremamente práticos, sendo actualmente sugeridos, por exemplo, como alternativa para situações de existência de tanques de água em edifícios. Desta forma a introdução de divisórias internas poderá tornar os tanques de armazenamento de água aptos para funcionarem como amortecedores de líquido sintonizado, sem afectarem de uma forma potencialmente negativa a utilidade funcional da existência de tanques de armazenamento de água em estruturas.

A consideração de apenas uma pequena massa dinâmica adicional ao edifício, resultante da massa de água existente no dispositivo, permite que estes sistemas reduzam a resposta em acelerações a 1/3 da resposta original da estrutura, dependendo da quantidade de massa de líquido [Tamura et. al, 1995]. Esta razão, associada às reduzidas exigências associadas à sua manutenção, têm sido responsáveis pela sua ampla utilização [Kareem et. al, 1999].

Um amortecedor de *sloshing* traduz uma estrutura de um grau de liberdade que utiliza o movimento das ondas de um líquido e a acção do amortecimento, em reservatórios parcialmente cheios de líquido, para absorver energia de vibração das estruturas em que se encontram incluídos. O reservatório é concebido de tal modo que a frequência fundamental das ondas de superfície do líquido geradas durante a solicitação fiquem sintonizadas ou ajustadas com a frequência fundamental do edifício. A frequência do líquido é determinada pela densidade, comprimento e largura do reservatório e altura do líquido.

Os princípios básicos do movimento do líquido no interior dos amortecedores de *sloshing* podem ser representados de uma forma muito simplificada de acordo com o esquematizado na Figura 106.

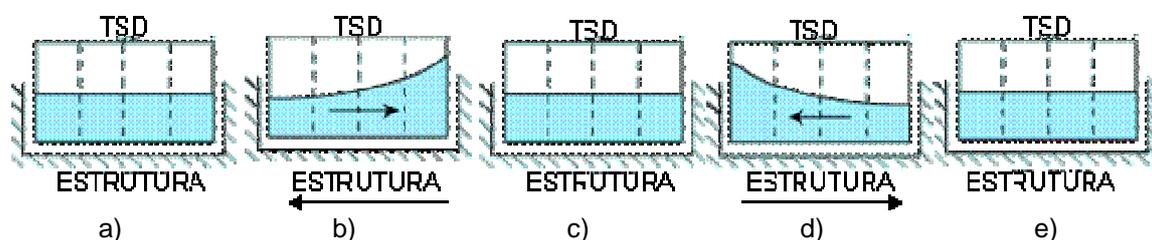
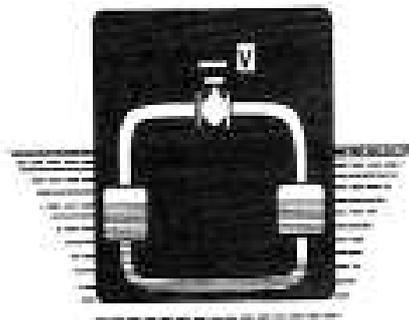


Figura 106 - Esquemática do funcionamento de amortecedores de *sloshing*, adaptado de [Robinson et. al., 2007]

Assim, na ausência de qualquer solicitação dinâmica (vento ou sismo) a estrutura não se move e o fluido no interior do amortecedor de *sloshing* permanece inalterado (Figura 106a). Quando a acção dinâmica tem início, a estrutura começa a oscilar e a onda de líquido move-se na direcção oposta à da estrutura devido à sua

inércia gravítica (Figura 106b a Figura 106d). O movimento do fluido é amortecido devido à turbulência causada pela existência de algumas restrições ao fluxo (partículas em suspensão, telas, grelhas, saliências). A oscilação da estrutura é reduzida e este ciclo volta a repetir-se ao longo da duração da acção dinâmica. Finalmente a acção dinâmica termina e o líquido volta à posição inicial (Figura 106e). Quando a estrutura começa a ser solicitada por acções dinâmicas (vento ou sismos), o líquido entra em ressonância fora de fase com a estrutura e a energia é dissipada simplesmente pelo escoamento do líquido, ou pelo fluxo do fluido através de dispositivos incluídos que aumentam o amortecimento (telas, grelhas, saliências na configuração geométrica) ou que oferecem resistência à passagem das ondas formadas. Em implementações reais, e para serem atingidos determinados objectivos, podem ser usadas diferentes formas geométricas de reservatórios como TSDs, salientando-se as mais simples as que correspondem a superfícies rectangulares e circulares. Enquanto que um tanque rectangular permite ajuste de duas frequências diferentes em duas direcções ortogonais, os tanques circulares apenas permitem sintonizar uma mesma frequência em duas direcções ortogonais.

Os modernos amortecedores de líquido sintonizado têm as suas origens no protótipo apresentado e patenteado por Frahm no início do século XX [Den Hartog, 1956]. Frahm sintonizou a frequência do movimento da água nos dois tanques interligados (Figura 107) à frequência fundamental de balanço do navio em que se encontravam incluídos com o objectivo principal de reduzir com sucesso a componente correspondente do movimento. Esta medida proposta por Frahm foi adoptada em vários grandes transatlânticos alemães [Den Hartog, 1956].



*Figura 107 - Tanque anti balanço para navios patenteado por Frahm [Den Hartog, 1956]*

Mais recentemente o mesmo conceito foi usado na redução de movimentos oscilatórios de período elevado em satélites espaciais [Carrier e Miles, 1960] [Alfriend, 1974]. Na Figura 108 apresenta-se de uma forma esquemática de um modelo típico usado em satélites.



Figura 108 - Anel parcialmente cheio de líquido para aplicação em satélites [Fujino et. al., 1988]

Para descrever o comportamento dos amortecedores de líquido sintonizado podem ser usados, entre outros, modelos lineares mais simplificados baseados na analogia com o amortecedor de massa sintonizada equivalente e na teoria linear das ondas de águas rasas (*shallow water wave theory*) [Sun, 1991] [Sun et. al., 1992] [Sun et. al., 1995], o modelo não-linear de rigidez e amortecimento [Yu, 1997] [Yu et. al., 1999] e o modelo sloshing-slammin [Yalla e Kareem, 1999] [Kareem, 2001]. Em trabalhos posteriores será dada mais ênfase aos modelos disponíveis na literatura para simulação do comportamento dos amortecedores de líquido sintonizado sendo não só apresentados e descritos os referidos anteriormente como outros existentes na literatura e anteriormente objecto de programas de investigação.

Relativamente aos amortecedores de massa sintonizada, as vantagens associadas à utilização dos amortecedores de líquido sintonizado incluem o seu baixo custo inicial, a facilidade da sintonização da frequência e a manutenção praticamente desnecessária. Adicionalmente, refere-se a facilidade associada ao ajuste da frequência pela simples alteração do volume de líquido contido (por exemplo por meio da variação da altura).

Para além disso os amortecedores de líquido sintonizado fornecem uma excelente reserva de água no topo dos edifícios, ou eventualmente a outro nível se se pretender mitigar um modo de vibração que não o primeiro, para situações de combate a incêndio. No entanto, os fenómenos que ocorrem no seu interior (*sloshing, breaking waves*) em presença, por exemplo, de orifícios, redes ou grelhas são altamente não lineares afectando directamente a resposta estrutural [Soong e Spencer Jr., 2002].

Este tipo de dispositivo pode ser construído com diversas formas geométricas. Por exemplo, em recipientes cónicos a secção horizontal varia ao longo do eixo vertical, o que para alturas de líquido elevadas (*deep water waves*) ou para pequenas

amplitudes de excitação traduz uma maior massa efectiva e uma maior área de superfície livre. Para além disso a partir de um determinado valor de altura de líquido ocorre uma variabilidade mais rápida da frequência fundamental, com a altura de líquido, do que o observado em amortecedores de líquido sintonizado circulares regulares [Casciati et. al., 2003].

Alguns estudos experimentais têm vindo a ser desenvolvidos em conjunto com tentativas de modelação numérica no sentido de estudar o comportamento de Amortecedores de Líquido sintonizado incluídos em estruturas. Referem-se a título de exemplo, como percursos nesta área, o programa experimental conduzido por Welt e Modi durante a década de 80 [Welt e Modi 1984a] [Welt e Modi, 1984b] e os estudos paramétricos sobre a resposta da oscilação em regime livre de tanques circulares desenvolvida em [Fujino et. al, 1988].

No primeiro caso foi aplicada uma excitação sinusoidal a uma série de configurações de tanques em forma de toro parcialmente cheios com, diferentes diâmetros internos e externos, diferentes alturas de água e diferentes formas de secção transversal. Em alguns dos casos testados foram colocados deflectores internos e tubos perfurados e fez-se variar a amplitude e frequência da solicitação numa gama bastante alargada de valores. Os resultados obtidos incidiram preferencialmente sobre os valores de massa adicionada e coeficientes de amortecimento, que caracterizavam a magnitude e a fase da força de sloshing resultante do movimento do líquido no interior dos amortecedores de líquido sintonizado estudados. Foi encontrada uma boa concordância com os valores teóricos, quando em presença de oscilações de pequena amplitude. Neste caso em particular os resultados mostraram que o coeficiente de amortecimento é muito sensível à razão entre frequências da estrutura e do próprio dispositivo dissipador ( $\alpha$ ), com um máximo de cerca de 1.0, em que se verifica uma tendência de inversão de sinal da massa adicionada. Isto é, de facto, uma característica da condição de ressonância. Com o aumento da amplitude de oscilação, observou-se uma redução do amortecimento, que é concordante com outros estudos desenvolvidos [Soong e Dargush, 1997]

Os resultados de Fujino [Fujino et. al, 1988] mostraram que, para pequenas amplitudes, o amortecimento introduzido depende fortemente da razão entre as frequências do tanque e da estrutura ( $\alpha$ ) em que este se encontra incluído, com um valor máximo de 1.0. Esta observação apresenta-se como compatível com a teoria linear e fornece bases muito concretas para a questão da sintonização. Para amplitudes de excitação mais elevadas, o amortecimento adicional do sistema é

reduzido dependendo muito menos da razão entre frequências ( $\alpha$ ) devido às não-linearidades que ocorrem associadas ao movimento do líquido. Nesta extensão, a sintonização é muito menos crítica sendo os pequenos desvios na altura da água pouco importantes. Regra geral, o amortecimento adicional,  $\Delta\delta$ , é altamente dependente da amplitude de excitação,  $A$  [Soong e Dargush, 1997].

Os estudos experimentais anteriormente mencionados permitiram concluir ainda que a utilização de líquidos de elevada viscosidade não era necessariamente preferível à utilização de água pura. Por exemplo em muitos dos dispositivos de fluido viscoso apresentados anteriormente o nível de amortecimento produzido era proporcional à viscosidade do líquido que entrava na sua constituição, sendo desejável a utilização de materiais de elevada viscosidade. Contudo, para os amortecedores de líquido sintonizado existe um nível óptimo de amortecimento de dissipação que irá maximizar todo o amortecimento efectivo do sistema estrutural. Desta forma, nem sempre líquidos de alta viscosidade são a opção mais acertada. O aumento da rugosidade do fundo dos dispositivos pode ser por si só suficiente para originar efeitos análogos ao aumento de viscosidade [Soong e Dargush, 1997]

Apesar do excelente funcionamento dos amortecedores de líquido sintonizado pode no entanto acontecer que se a onda formada durante a ocorrência de uma dada acção dinâmica não diminuir imediatamente após o fim da excitação, alguma da energia absorvida pelo dispositivo pode ser transferida de volta para a estrutura [Sun e Fujino, 1994].

Os amortecedores de líquido sintonizado apresentam grande eficiência à data da sua instalação, tendo sido verificado em alguns casos que ao fim de 10 anos sem qualquer tipo de manutenção dos dispositivos a sua eficácia se reduz drasticamente devido, por exemplo, a fenómenos de evaporação do líquido (água) [Zivanovic et. al., 2005]. Esta questão toma maiores proporções se a colocação do dispositivo for efectuada em estruturas localizadas em zonas muito quentes ou com grandes amplitudes térmicas anuais. Refere-se ainda que adicionalmente e devido à baixa densidade da água, em certas situações são necessários dispositivos com dimensões consideráveis, comparativamente com amortecedores de massa sintonizada metálicos com o mesmo nível de desempenho.

Com a intenção de otimizar o efeito de *sloshing* foi proposto um amortecedor de líquido sintonizado com fundo não plano inclinado a 30°. Após estudos exaustivos [Gardarsson et. al., 1998] [Olson e Reed, 2000] [Gardarsson et. al, 2001] sobre esta

geometria foi possível concluir que, atendendo ao efeito suavizado do elemento mola, este sistema apresenta um uso mais eficiente do fenómeno de *sloshing* da água.

A optimização da dissipação de energia ao nível dos dispositivos pode ser conseguida com recurso à introdução de partículas ao líquido, que, quando em vibração colidem umas de encontro às outras fornecendo dissipação adicional. Nesta situação em particular, e considerando a introdução de partículas de polietileno, tem vindo a ser efectuados diversos estudos com resultados muito positivos [Casciati et. al, 2003] [Chalmers e Bailey, 2007].

No entanto e apesar das melhorias observadas para determinadas situações convêm não esquecer que os amortecedores de líquido sintonizado carecem de uma análise e dimensionamento cuidadosos.

Segundo vários autores [Fujino et. al., 1992], [Wakahara et. al.,1992] os amortecedores de líquido sintonizado são eficientes na redução da resposta de uma dada estrutura quando submetida a acções harmónicas e do vento sendo a sua aplicabilidade para protecção sísmica ainda objecto de estudo. Segundo alguns autores [Soong e Constantinou, 1994], testes efectuados na mesa sísmica da Universidade de Kyoto demonstraram algumas limitações na sua aplicação. Os testes referidos incidiram sobre um amortecedor de líquido sintonizado colocado sobre uma estrutura metálica de três andares, que foi submetida a uma aceleração de  $0,25\text{m/s}^2$ . Os resultados obtidos indicavam a existência de uma redução ao nível da resposta da estrutura, no primeiro modo de vibração não sendo, no entanto, eficaz para modos de vibração superiores. Esta observação comprova a adequabilidade e eficácia deste tipo de dispositivos em situações em que as estruturas vibrem fundamentalmente num determinado modo de vibração, o que regra geral se observa para o primeiro modo de vibração.

A ideia de aplicar amortecedores de líquido sintonizado com o objectivo de controlar as vibrações em estruturas de engenharia civil teve a sua génese em meados da década de 80. Na prática, os amortecedores de líquido sintonizado foram primeiramente usados para suprimir vibrações indesejadas induzidas pelo vento em estruturas esbeltas.

Posteriormente, Bauer [Bauer, 1984a] sugeriu a utilização de recipientes rectangulares completamente preenchidos com dois fluidos imiscíveis para que a resposta da estrutura em que estavam incluídos fosse amortecida através do movimento do interface entre fluidos.

No final da década de 80 Welt e Modi [Welt e Modi, 1989a] [Welt e Modi, 1989b] foram dos primeiros a sugerir e otimizar a introdução de amortecedores de líquido sintonizado em edifícios como forma de reduzir a resposta durante a ocorrência de ventos fortes e acções sísmicas gravosas [Soong e Dargush, 1997].

Embora não sejam de uso muito comum nos Estados Unidos, os amortecedores de líquido sintonizado tem vindo progressivamente a ser aplicados em outros países. Aparentemente as primeiras aplicações a estruturas em engenharia civil tiveram lugar no Japão como parte de estudos à escala real [Tamura et al., 1995]. Neste estudo foi aplicado um número de amortecedores de líquido sintonizado a estruturas reais de forma a avaliar a sua eficácia. O estudo orientou-se no sentido de comparar o desempenho de edifícios sujeitos a vibrações induzidas pelo vento antes e após instalação de referidos dispositivos.

Nos exemplos de aplicação de amortecedores de líquido sintonizado para protecção e controlo de estruturas no Japão incluem-se 6 amortecedores de *sloshing* de águas rasas (*shallow*), 1 amortecedor de *sloshing* de águas profundas (*deep*) e 5 amortecedores de coluna de líquido, salientando-se a torre do aeroporto de Nagasaki (1987), a Torre da marina de Yokohama (1987), o hotel Prince Shin-Yokohama (1992) e as torres de controlo de tráfego aéreo de nos aeroportos de Haneda e Narita (1993) [Soong e Dargush, 1997].

Na Austrália indica-se, a título informativo, a aplicação destes dispositivos à Hobart Tower [Kareem et.al., 1999]. Nas primeiras aplicações de amortecedores de *sloshing* foram usados tanques circulares para os modelos de águas rasas (*shallow*) e tanques rectangulares para os modelos de águas profundas (*deep*), enquanto que para os amortecedores de coluna de líquido sintonizada foi proposta a utilização de recipientes tradicionais em forma de U. Estas primeiras aplicações permitiram comprovar o excelente desempenho para estruturas sujeitas a vibrações dinâmicas de pequena amplitude (ventos fortes) na medida em que permitem reduzir a sua resposta a cerca de 30% da resposta original [Maebayashi et. al., 1993]. A sua aplicação a estruturas para mitigação de acções sísmicas também é adequada, estando ainda pouco difundida, sendo expectável, com base em investigação desenvolvida e em curso, avançar com valores de redução de RMS e de valores de pico da resposta em acelerações e deslocamentos entre 25 a 35% da resposta original da estrutura [Soong e Dargush, 1999].

Os amortecedores de líquido sintonizado da torre do aeroporto de Nagasaki (Figura 109a) [Tamura et. al, 1995] constituíram inicialmente apenas uma instalação temporária destinada a medir a eficácia do conceito de subjacente aos referidos dispositivos na redução de vibrações. O aeroporto foi construído em 1974 numa ilha na baía de Omura, tendo a sua torre de controlo, construída numa estrutura em aço, cerca de 42m de altura. A torre tem as primeiras frequências de vibração de 1.07Hz em ambas as direcções principais com correspondente coeficiente de amortecimento crítico de cerca de 0.9%. Na torre do aeroporto de Nagasaki foram usados 25 amortecedores líquido sintonizado circulares em vários níveis com diâmetros de 0.38m e altura de 0.50m, divididos em camadas de 0.077m (Figura 109b) cheios de água a uma altura de 0.048m, dos quais 12 foram colocados na sala de controlo e os restantes nos patamares das escadas na parte superior da torre. A massa total de cada amortecedor de líquido sintonizado era de cerca de 38kg, o que corresponde a uma massa total de aproximadamente 950kg, proporcionando nos modos principais uma relação entre massa do dissipador e da estrutura ( $\mu$ ) de 0.015.

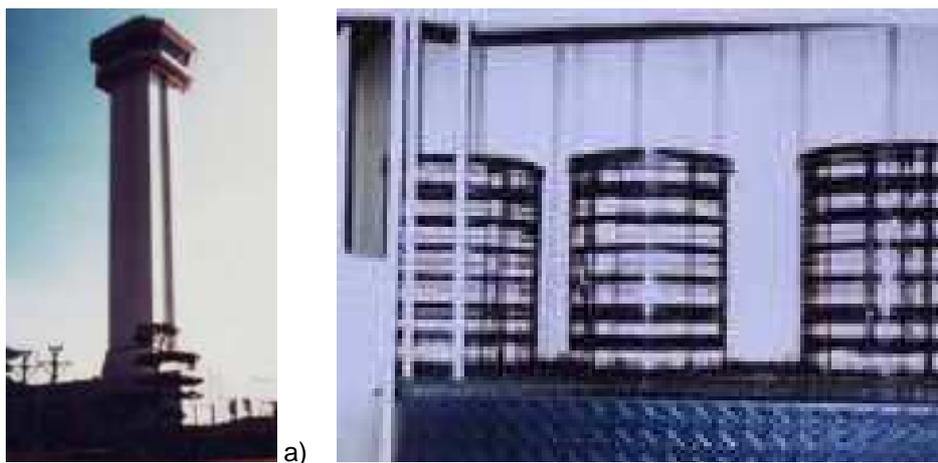


Figura 109 - Torre do aeroporto de Nagasaki, Japão: a) Vista do exterior [Tamura, s/d] e b) detalhe de conjunto de amortecedores de líquido sintonizado [Soong e Dargush, 1997]

Os dispositivos encontravam-se muito bem ajustados à estrutura, tendo uma primeira frequência de ressonância em torno de 1,02Hz. Com vista a avaliar o desempenho dos amortecedores de líquido sintonizado foram previamente efectuadas medições ao nível da resposta do edifício (velocidade e direcção do vento e a aceleração e deslocamento da torre) para comparação com a situação após inclusão de amortecedores de líquido sintonizado [Tamura e tal., 1995].

O amortecedor de líquido sintonizado colocado na torre teve como efeito a redução da amplitude das vibrações. No entanto constatou-se a presença de outro fenómeno para além do *sloshing*, o fenómeno de pulsação (*beating phenomena*) que

ocorreu porque a água não foi capaz de dissipar uma quantidade de energia suficiente. Uma vez que a energia da torre não foi dissipada na sua totalidade, o remanescente ficou na estrutura produzido o referido fenómeno (não tão positivo como se se tratasse apenas de *sloshing*). A ocorrência desta situação em particular ficou a dever-se ao facto de o sistema se ter transformado num sistema de 2 graus de liberdade com duas frequências de vibração muito próximas. No entanto, foi possível eliminar este efeito por meio da introdução de partículas em suspensão ao líquido que ajudaram a amortecer o movimento de *sloshing* do líquido no interior dos dispositivos. O amortecedor de líquido sintonizado colocado na torre teve como efeito a redução da amplitude das vibrações, mesmo para velocidades do vento superiores, com a resposta da estrutura reduzida em cerca de 35% para velocidades do vento da ordem dos 20m/s [Tamura et. al, 1995].

Instalou-se igualmente um sistema de amortecedores de líquido sintonizado no farol da Marina de Yokohama (Figura 2.80) durante o ano de 1987. A torre tem 100m de altura, estrutura em treliça de aço com uma frequência fundamental de 0.55Hz e um coeficiente de amortecimento de 0.6%. Nesta aplicação foi usado um sistema que incluía um conjunto de 39 amortecedores de *sloshing*, cada um deles constituído por 10 camadas, instalados no topo do farol. Os amortecedores de líquido sintonizado utilizados nesta situação eram circulares com diâmetro de 0.5m, sendo que cada camada se encontrava-se cheia com 0.021m de água. A massa assim introduzida corresponde a cerca de 1% da massa total do modo fundamental de vibração. Esta instalação permitiu uma redução de cerca de 2/3 do valor da aceleração associada a um aumento do amortecimento para 4.5% [Tamura et al. 1995], o que corresponde a uma clara melhoria de comportamento da estrutura.

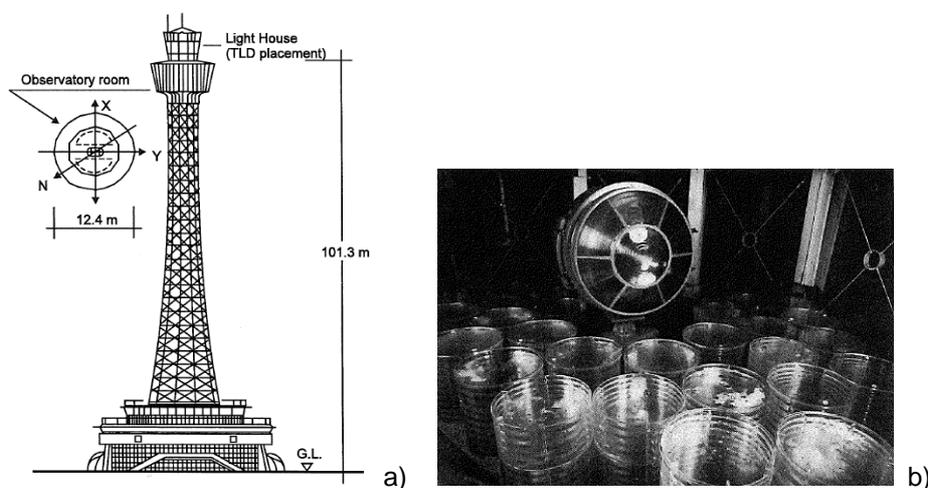


Figura 110 - Farol da marina de Yokohama, Japão: a) representação esquemática da colocação dos amortecedores de líquido sintonizado e b) aspecto geral dos amortecedores de líquido sintonizado [Soong e Dargush, 1997]

Uma outra aplicação de amortecedores líquido sintonizado do tipo amortecedores de *sloshing* a estruturas no Japão corresponde à Gold Tower (Figura 111 situada em Chiba no Japão. Foram colocados 16 dispositivos MCC Aqua Damper em forma de cubo no topo da estrutura de 158m para a mitigação de vibrações dinâmicas. Cada um destes dispositivos encontrava-se cheio de água, perfazendo um total de 10 toneladas o que corresponde a cerca de 1% do peso da torre, e equipado com redes de fios de aço, o que permitia o aumento da dissipação resultante na direcção do movimento do líquido.

A frequência do dispositivo é ajustada por alteração no comprimento do tanque e na altura de água. O amortecimento, por outro lado, é ajustado por manipulação ao nível das redes de aço. Este sistema, muito em particular, comprovou ser bastante vantajoso por [Kareem et. al., 1999]:

- i) Não existir fricção mecânica no sistema e, portanto ele é muito eficaz mesmo para pequenas amplitudes de oscilação;
- ii) Uma falha do sistema ser virtualmente impossível;
- iii) Ser eficaz contra os movimentos fortes dos sismos e dos ventos;
- iv) O período ser fácil de ajustar;
- v) O sistema não ser particularmente caro nem de difícil manutenção.

Nesta estrutura em particular constatou-se que a resposta da estrutura com amortecedores de líquido sintonizado melhorou cerca de 50% relativamente à resposta da estrutura inicial sem dispositivos



a)



b)

Figura 111 - Gold Tower, Japão: a) visão global do exterior [GT, s/d] e b) protótipo de amortecedor de *sloshing* colocado [Yalla, 2001]

Um modelo alternativo de amortecedores de líquido sintonizado de camadas múltiplas foi colocado, em 1992, no Hotel Shin Yokohama Prince (Figura 112). A solução, adotada para esta estrutura de 149m, compreendeu 30 conjuntos de amortecedores de líquido sintonizado circulares. Os tanques de cada conjunto, em fibra de plástico reforçado, tinham um diâmetro de 2m e altura de água no seu interior de 0.124m dispostas em 9 camadas proporcionando uma relação de massas com a estrutura de cerca de 1% e sintonizando a frequência do movimento ressonante da água (*sloshing*) para 0.31Hz, valor compatível com a frequência fundamental do hotel. Cada camada estava equipada com 12 saliências internas instaladas de uma forma radial simétrica a fim de impedir o movimento de remoinho do líquido, garantir o amortecimento adicional adequado e permitir uma melhor dissipação de energia durante o movimento da água. Os conjuntos de sistemas dissipadores foram colocadas na periferia do último andar.

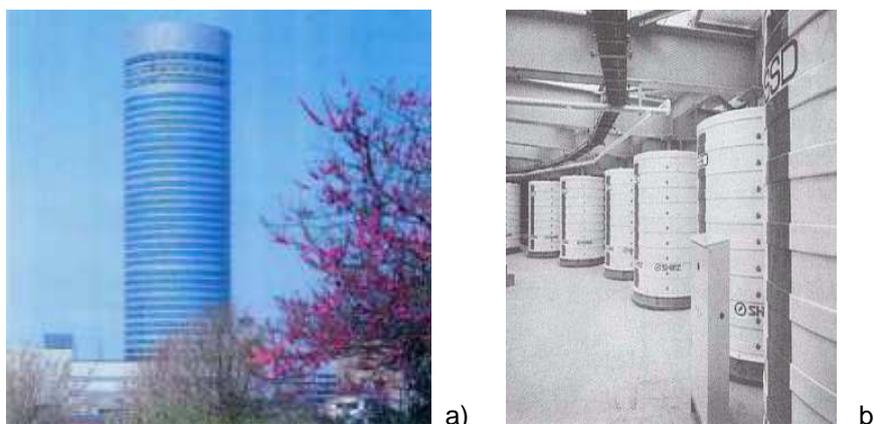


Figura 112 - Hotel Shin-Yokohama Prince, Japão: a) Vista exterior [Tamura, s/d] e b) amortecedores de líquido sintonizado instalados na cobertura [Dankook University, 2006]

A título exemplificativo do seu bom desempenho refere-se que a velocidades do vento de 25m/s o sistema reduziu a resposta da estrutura em termos de aceleração cerca de 50%. [Tamura et. al, 1995] permitindo satisfazer com sucesso os níveis mínimos de percepção exigidos pelas normas vigentes no Japão.

As torres de controlo do aeroporto internacional de Tóquio foram também protegidas com recurso a amortecedores de líquido sintonizado. Na torre de controlo de tráfego aéreo do aeroporto de Haneda (Tóquio) (Figura 113), que apresenta cerca de 77,6m de altura, foram instalados, em 1993, amortecedores de líquido sintonizado sob a forma de 1400 tanques de polietileno contendo água, partículas em suspensão e uma pequena quantidade de conservantes.

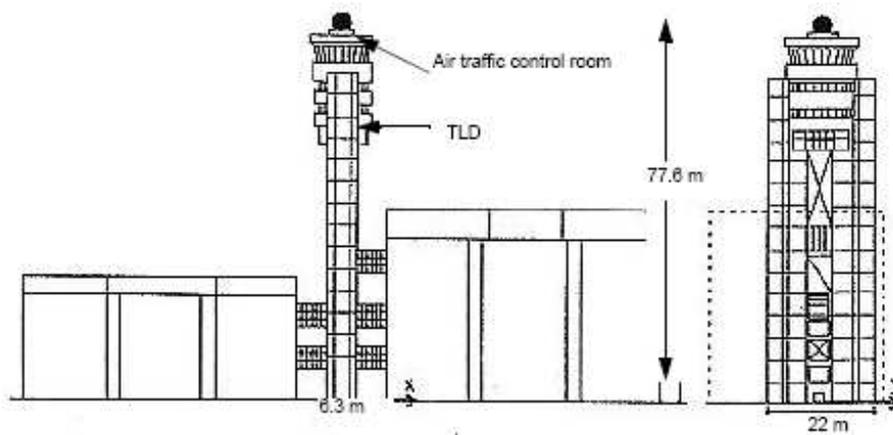


Figura 113 - Representação esquemática da torre de controlo de tráfego aéreo do Aeroporto Internacional de Tóquio em Haneda, Japão [Tamura et. al., 1996].

O excelente desempenho dos amortecedores de líquido sintonizado colocados na torre de controlo de tráfego aéreo foi comprovado tendo-se verificado uma redução, em valores RMS de aceleração, da situação sem dispositivos para a situação com os dispositivos incluídos e sintonizados com a frequência da estrutura, de cerca de 60%. Os valores do coeficiente de amortecimento atingiram valores da ordem dos 7.6% [Soong e Dargush, 1997]. Nesta situação a massa correspondente aos amortecedores de líquido sintonizado é aproximadamente 3.5% da massa do primeiro modo da torre e a sua frequência foi otimizada a 0.743Hz

Os referidos tanques (Figura 2.84a) são cilindros circulares com cerca de 0.125m de altura, 0.6m de diâmetro, com torneiras de injeção e 4 entalhes cónicos na parte superior e na base. Estes entalhes permitiram que os tanques fossem empilhados em conjuntos de 6, em prateleiras de armação de aço, como se pode identificar na Figura 114b

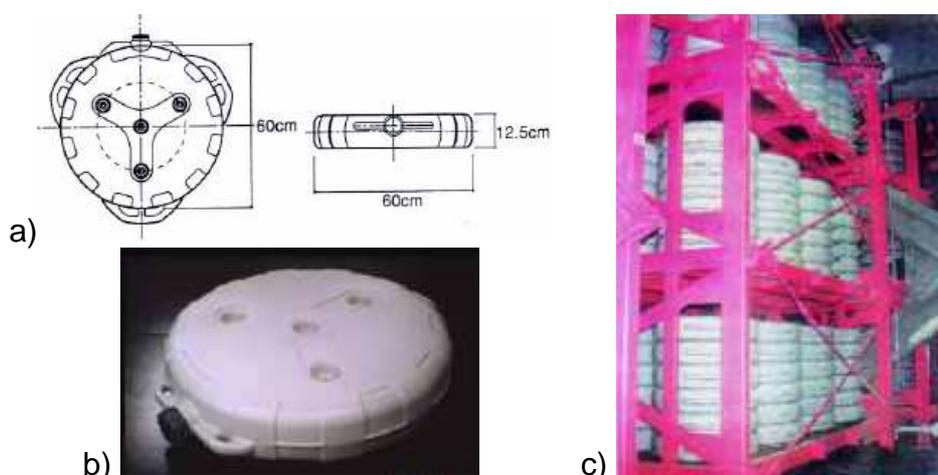


Figura 114 - Aeroporto Internacional de Tóquio em Haneda, Japão: a) Representação esquemática de unidade de amortecedores de líquido sintonizado [Tamura et. al., 1996] b) Protótipo de amortecedores de líquido sintonizado [Tamura et. al., 1996] e c) amortecedores de líquido sintonizado instalados em suportes de aço [Tamura et. al., 1996].

Mais recentemente, os amortecedores de líquido sintonizado foram propostos para a mitigação de vibrações dinâmicas na Millennium Tower situada na baía de Tóquio, Japão (Figura 115a). Nesta estrutura, com data de conclusão prevista para o ano de 2009, atendendo à sua altura, cerca de 840m, e à sua exposição a furacões e sismos de elevada magnitude foi necessário prever-se um controlo rigoroso face às vibrações dinâmicas induzidas pelas acções referidas.

Adicionalmente aos blocos de aço colocados no topo foram também incluídos tanques de água que apresentam na sua constituição canais condutores. Esta solução permitia uma protecção meramente passiva em condições normais. No entanto, e para acções dinâmicas crescentes os tanques, sensores incluídos nos tanques accionam um mecanismo de bombagem mudando o modo de controlo passivo para activo [Sudjic, 1993]. O conceito subjacente aos amortecedores de líquido sintonizado circulares colocados na torre encontra-se esquematizado na Figura 115b a Figura 115.

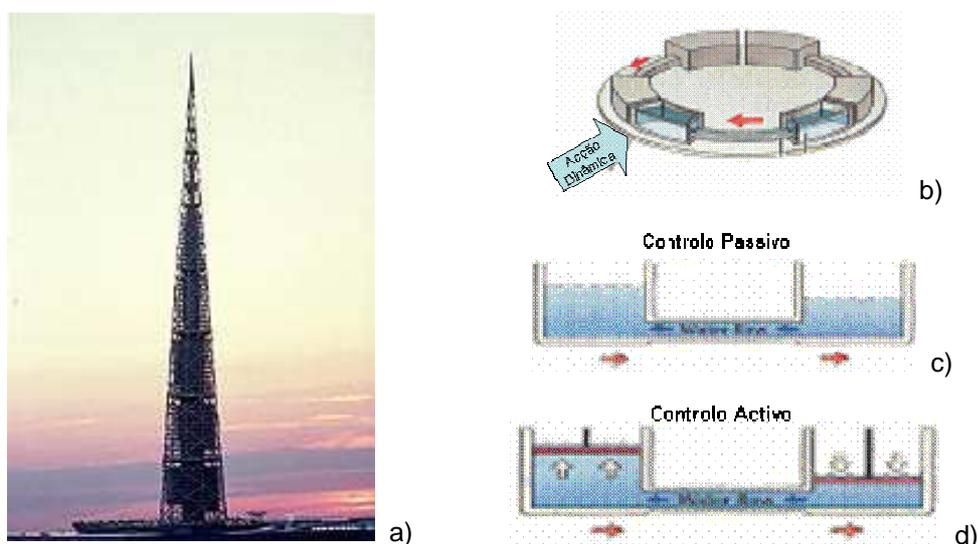


Figura 115 – Millennium Tower, Tóquio, Japão: a) Visão global da estrutura [MT, 2007], b) Representação esquemática do funcionamento de amortecedor de líquido sintonizado, c) controlo passivo de uma unidade de amortecedor de líquido sintonizado e d) controlo activo de uma unidade de amortecedor de líquido sintonizado, adaptado de [Yalla, 2001]

A utilização de partículas em suspensão, à semelhança de outros estudos, permite uma maior dissipação de energia durante o movimento de *sloshing*. As partículas adicionadas eram cilíndricas, ocas e flutuantes em polietileno. A energia nas torres de controlo do aeroporto de Tóquio foi dissipada por meio de efeitos de fricção na superfície da água que aumentaram devido ao aumento da área de superfície de colisão entre as partículas adicionadas.

No projecto do Shanghai World Financial Center foi proposto equipá-lo com oito amortecedores de líquido Sintonizado. Estes dispositivos, cada um deles com 7.5m de

diâmetro e divididos em seis camadas, ficariam colocados ao nível do 91º piso. A instalação destes dispositivos de 800tons, o que corresponde a uma razão de massas de cerca de 1%, tinha como objectivo principal a redução o deslocamento entre pisos e as acelerações de pico e RMS para valores dentro dos limites aceitáveis, quando comparados com as normas vigentes [Hori e Nakashima, 1998].

No entanto, derivado ao tempo decorrido entre o início e a conclusão da sua construção (1997-2008) e atendendo a determinadas evoluções técnico-científicas que se operaram no período anterior foi necessário efectuarem-se algumas alterações muito concretas no que refere ao sistema de mitigação de vibrações. Assim, apesar das inúmeras vantagens associadas, optou-se por incluir não amortecedores de líquido sintonizado passivos, mas sim amortecedores de massa sintonizados activos, o que permite de um comportamento e desempenho mais controlado. A descrição e imagens deste sistema apresentam-se mais adiante na secção correspondente.

Um exemplo mais próximo da utilização de amortecedores de líquido sintonizado na protecção de estruturas face a acções dinâmicas foi observado na nova extensão em torre do Tribunal Europeu de Justiça no Luxemburgo [Georgakis et al., 2005]. Ensaio em túnel de vento provaram que o edifício seria susceptível a grandes acelerações induzidas pelo vento. Um vasto número de opções para reduzir as vibrações induzidas foi considerado, entre elas aumento da rigidez estrutural e outro tipo de amortecedores. Foi então proposto um sistema de amortecedores de líquido sintonizado para o edifício como sendo uma solução económica bastante viável. O amortecedor de líquido sintonizado proposto reduziu a vibração do edifício muito abaixo do nível aceitável de acelerações, aumentou em 5 vezes o amortecimento e reduziu em cerca de 35% a resposta estrutural relativamente à acção dinâmica do vento. Os amortecedores de líquido sintonizado usados permitiram não só a redução do nível de aceleração considerado como aceitável para o conforto humano bem como a redução dos custos de manutenção associados à fadiga da estrutura.

Os amortecedores de líquido sintonizado estão progressivamente a ser considerados como uma forma eficaz e económica para resolver o problema do amortecimento começando a ser introduzidas em estruturas novas, por exemplo a ponte aérea de Gatwick [Samaras e tal., 2005].

No entanto, e apesar das vantagens, a sua utilização não se encontra ainda devidamente difundida sendo necessário aprofundar a investigação na tentativa de alargar o espectro de utilização deste tipo de dispositivos a outros tipos de estruturas.

Correntemente quer os modelos de amortecedores de *sloshing* baseados na teoria de ondas de águas profundas (*deep water waves*) e na teoria de ondas de águas pouco profundas (*shallow water waves*) que se baseiam na amplitude do movimento do fluido e em esquemas de fragmentação de onda para proporcionar o amortecimento adicional necessário tem vindo a ser usados um pouco por todo o mundo.

Nos modelos de águas pouco profundas (*shallow water*) assume-se que a dissipação de energia se faz através da acção viscosa e fragmentação da onda, embora mais recentemente [Yalla, 2001] tenha verificado e modelado o impacto ou fenómeno de *slamming* para amplitudes de excitação elevadas. A inclusão de partículas em flutuantes tem sido igualmente uma escolha muito adequada para o aumento da capacidade de dissipação de energia.

Em amortecedores de líquido sintonizado de águas profundas (*deep water*) a mera introdução de partículas em suspensão não é suficiente para aumentar a capacidade dissipativa do fluido. Neste último caso para uma dissipação de energia mais eficiente é necessária a introdução de deflectores ou grelhas. Contudo, na maioria dos casos a totalidade da massa de água não contribui para proporcionar a massa dinâmica dos modelos teóricos [Kareem e Sun, 1987]

Recentemente tem vindo a ser estudada uma variante dos amortecedores de líquido sintonizado corresponde aos amortecedores de coluna de líquido sintonizado para aplicação na mitigação de vibrações induzidas pelo vento, pelas ondas marítimas e por sismos em estruturas esbeltas (edifícios altos e pontes de grandes vãos) e plataformas *offshore*.

Estes dispositivos (Figura 116) consistem em reservatórios com a forma de U rigidamente ligados à estrutura cujas acções dinâmicas se pretende mitigar. A energia é dissipada por intermédio do movimento do líquido no interior do tubo através de um orifício.

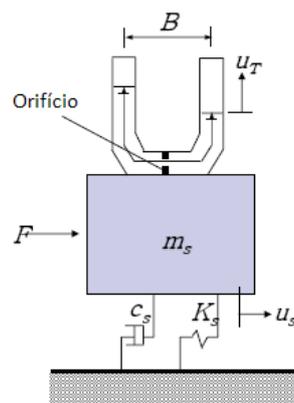


Figura 116 – Esquematização de amortecedor de coluna de líquido sintonizado

Os amortecedores de coluna de líquido são relativamente simples de implementar em edifícios existentes. Podem, no entanto, ser combinados com sistemas de controlo activo, com o objectivo de funcionarem como sistemas híbridos. Ao contrário dos amortecedores de massa sintonizada não necessitam de espaço para o movimento da massa, podendo-se variar o amortecimento através do ajuste do orifício. De acordo com investigação efectuada na área [Kwok et. al., 1991] [Xu et. al., 1992] e tal como qualquer dispositivo sintonizado, os amortecedores de coluna de líquido sintonizado são mais eficientes na redução da resposta de estruturas sujeitas a acções harmónicas ou do vento.

Estes dispositivos têm vindo a ser implementados, para além de em estruturas de engenharia civil, em estabilização de navios e satélites [Souza et. al, 2006]. Tal como os amortecedores de massa sintonizada e os amortecedores de líquido sintonizado, a eficácia dos amortecedores de coluna de líquido sintonizado depende do ajuste adequado entre frequências e o valor do amortecimento associado.

Como exemplos de aplicação deste tipo de dispositivos salienta-se a investigação conduzida sobre plataformas *offshore* [Lee et. al., 2006], em que se verificou que de facto os amortecedores de coluna de líquido sintonizado apresentam um excelente desempenho na mitigação de vibrações induzidas pela acção dinâmica das ondas marítimas.

Além das várias implementações de amortecedores de *sloshing* existem também registos de algumas aplicações de amortecedores de coluna de líquido sintonizado, incluindo situações com mecanismos que permitem o ajuste do período com repercussões directas ao nível da frequência. Ao equipar um amortecedor de coluna de líquido sintonizado com um mecanismo deste tipo, o comportamento do líquido no dispositivo pode ser regulado.

Uma estrutura que integra uma destas tecnologias inovativas disponíveis para um dimensionamento estrutural sustentável corresponde à Random House Tower (Figura 117a), localizada em New York. Trata-se do primeiro edifício alto nos Estados Unidos a incluir amortecedores de coluna de líquido sintonizado (Figura 117b). Como é sabido este tipo de dispositivos corresponde a uma variação dos denominados amortecedores de massa sintonizada. Nos amortecedores de coluna de líquido sintonizados é criado o mesmo efeito do que nos amortecedores de massa sintonizada por substituição do sistema bloco de massa, mola e amortecedor pelo movimento da água ou de qualquer outro líquido escolhido para o efeito. Todo o líquido no interior do dispositivo em forma de “U” funciona da mesma forma que o bloco de massa no amortecedor de massa sintonizado. O líquido no seu movimento ascendente e descendente em oposição nos elementos verticais do “U” funciona como mola de restituição, produzindo a frequência natural do movimento do líquido pretendida, que é ajustada para vibrar com uma frequência próxima da da estrutura em que o dispositivo se encontra incluído. O amortecimento é introduzido por meio de um orifício colocado na direcção da trajectória da água permitindo a dissipação de energia derivada da turbulência ocorrida na água.

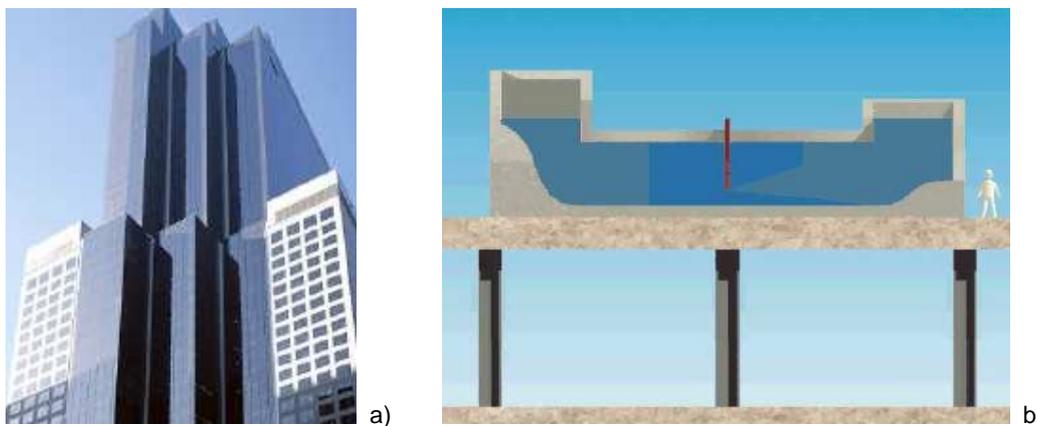


Figura 117 – Random House Tower, New York, EUA: a) Vista do exterior [Tamboli, s/d] e b) representação esquemática amortecedor de coluna de líquido sintonizado colocado [Robinson e Kala, 2007]

A utilização de uma abordagem inovadora de dimensionamento com recurso a dispositivos do tipo amortecedores de coluna de líquido sintonizado oferece muitos benefícios, nomeadamente a nível imediato no decréscimo tanto dos deslocamentos entre pisos como das acelerações de topo. Diversos estudos têm servido para demonstrar que, de facto, a resposta da estrutura a ventos fortes e a acções sísmicas surge reduzida em quase 40% fruto da introdução de amortecedores de coluna de líquido sintonizado [Tamboli, s/d].

O Comcast Centre (Figura 118a) tem 58 pisos distribuídos pelos seus 297m de altura. Trata-se do maior edifício de Philadelphia e um dos maiores dos Estados Unidos. O exterior do edifício apresenta um revestimento de vidro levemente tingido, não reflexivo e de baixa emissividade [Robinson e Kala, 2007]. Para evitar movimentos excessivos resultantes da acção dinâmica do vento, o edifício inclui um amortecedor de coluna de líquido sintonizado de betão com duas câmaras preenchidas por 1135500 litros de água (Figura 118b).

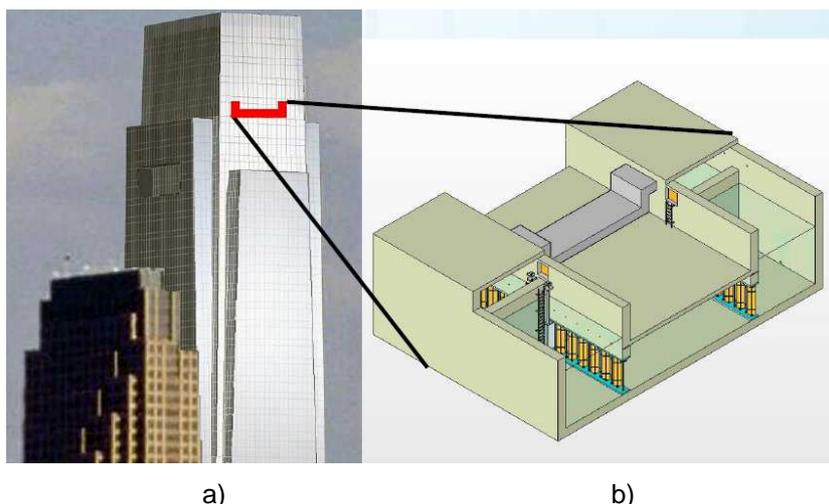


Figura 118 – Comcast Center, Philadelphia, EUA: a) Vista do exterior [Robinson e Kala, 2007] e b) Representação esquemática do amortecedor de coluna de líquido sintonizado colocado [Robinson e Kala, 2007]

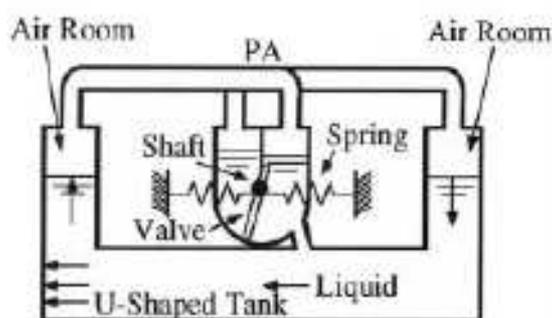
O amortecedor de coluna de líquido sintonizado do Comcast Center é o maior dispositivo deste tipo existente no mundo. Nas primeiras fases de concepção de projecto, foi pensado deixar espaço para o dispositivo no topo de edifício. Atendendo à geometria da estrutura e aos níveis de comportamento em serviço exigidos foi proposta a colocação apenas de um grande dispositivo em vez da situação mais típica que corresponde a dois dispositivos amortecedores de coluna de líquido sintonizado perpendiculares entre si. O dispositivo colocado é quase tão largo como longo, o que corresponde a uma configuração invulgar, encontrando-se dividido em dois compartimentos internos com um certo grau de independência para evitar o escoamento fora do eixo o que traduziria perda de eficiência do dispositivo. A escolha de amortecedores de coluna de líquido sintonizado para mitigação de vibrações dinâmicas da estrutura do Comcast Center permitiu uma poupança global de gastos estruturais da ordem dos vários milhões de dólares.

Um sistema amortecedor de coluna de líquido sintonizado com mecanismo de ajuste de período foi instalado no último andar do edifício de 26 pisos correspondente ao Hotel Cosima (Tóquio, Japão), actualmente denominado Hotel Sofitel (Figura

119a). Este sistema era constituído por um tanque rectangular, em forma de U, um par de câmaras de ar e um equipamento que permitia o ajuste directo da frequência (Figura 119b). Quando o tanque se movia na direcção horizontal, o fluido movimentava-se tanto na direcção horizontal como na direcção vertical. Desta forma, o ar existente numa das câmaras de ar é comprimido enquanto que na outra câmara a pressão do ar se reduz. As flutuações de pressão sinusoidais induzem o movimento do fluido no tanque subsidiário em forma de U, dando origem ao movimento da válvula, do eixo e das molas.



a)



b)

Figura 119 – Hotel Cosima, Tóquio, Japão: a) Vista do exterior e b) representação esquemática do detalhe do mecanismo de ajuste da frequência [Shimizu e Teramura, 1994]

O dispositivo instalado no hotel supramencionado corresponde a um amortecedor de coluna de líquido sintonizado bidireccional de base rectangular com quatro elementos (PA), colocados entre as duas câmaras de ar, que permitem o ajuste da frequência. Este dispositivo tem um peso total de 58tons, dos quais cerca de 36 tons correspondem ao peso efectivo do líquido [Shimizu e Teramura, 1994].

O alargamento do conceito destes dispositivos a estratégias de controlo activo tem vindo a ser amplamente estudado. Podem no entanto ser combinados com sistemas de controlo activo, com o objectivo de funcionarem como sistemas híbridos [Hitchcock e Kwok, 1993], amortecedores de coluna de líquido sintonizado adaptáveis [Kareem, 1994], amortecedores de bomba de inércia, sistemas de orifício dependente da amplitude e sistemas de múltiplos orifícios como medidas eficazes de introdução de amortecimento secundário em estruturas [Kareem et al. 1999].

Numa comparação entre desempenho de amortecedores de massa sintonizada, amortecedores de líquido sintonizado e amortecedores de coluna de líquido sintonizada [Sadek et. al., 1996], é possível concluir-se que todos eles

contribuem para redução da resposta da estrutura estando, no entanto, muito dependentes da frequência de excitação.

A grande vantagem que os amortecedores de líquido sintonizado apresentam relativamente a outros sistemas do tipo dissipadores de energia (baseados no amortecimento) é a sua simplicidade. Todas as características de amortecimento são fornecidas pelo tanque de água. Assim o amortecimento resulta do movimento da água sendo o mecanismo de restituição efectuado pela acção da gravidade. Esta simplicidade significa que são dispositivos de instalação barata e que requerem um mínimo de manutenção no futuro. Contrariamente ao que acontece com os amortecedores de massa sintonizada e com os demais dispositivos passivos o movimento encontra-se contido no próprio dispositivo (neste caso dentro do tanque) não sendo como tal requerido espaço adicional fora do tanque [Tamboli, s/d].

Adicionalmente às suas capacidades a nível estrutural, os amortecedores de líquido sintonizado também oferecem vantagens ao nível do desenvolvimento sustentável. Em termos de benefícios ambientais, a água no interior dos tanques pode ser também usada para a extinção de fogos bem como em sistemas de armazenamento de água para refrigeração (ar-condicionado).

Para além disso, os sistemas amortecedores de líquido sintonizado (de coluna ou não) preservam recursos naturais, na medida em que substituem por água o betão, aço, ou outros materiais estruturais necessários para melhorar o controlo da estrutura face a acções dinâmicas gravosas.

Em termos de benefícios económicos, os amortecedores de líquido sintonizado impõem requisitos mínimos ao nível da manutenção. Mais se adianta que a eficácia dos amortecedores de líquido sintonizado aumenta à medida que a estrutura em que se encontram incluídos se tornam menos rígidas devido à inevitável fissuração do betão ou ao desgaste dos elementos não estruturais ao longo do tempo.

Mais importante ainda, é de salientar também que as metodologias tradicionais que permitem a redução dos deslocamentos entre-pisos e das acelerações fornecendo à estrutura mais massa e rigidez através da utilização de materiais estruturais adicionais, têm provado ser extremamente dispendiosas.

A utilização de amortecedores de líquido sintonizado como forma de redução de acelerações e de deslocamentos relativos entre pisos, enquanto a própria estrutura do edifício fica orientada para suportar esforços e requisitos associados à segurança

estrutural apresentam perspectivas económicas e ambientais muito apelativas. Por último, os benefícios associados à saúde incluem o bem-estar e conforto dos ocupantes resultantes da redução das acelerações e deslocamentos entre pisos, o que proporciona um melhor ambiente de trabalho que ajuda a aumentar a produtividade [Tamboli, s/d].

O desempenho óptimo exigido a um sistema é conseguido por meio do ajuste da frequência natural desejada. Com um amortecedor de líquido sintonizado isto é conseguido apenas com recurso à mudança da altura de água no interior do tanque para que a relação entre a altura de água e o comprimento do reservatório seja a requerida para o referido ajuste de frequências.

Enquanto a frequência natural de um amortecedor de líquido sintonizado pode ser ajustada de forma simples pela altura da água,  $h$ , e pela dimensão do tanque na direcção da solicitação,  $L$ , há no entanto limitações de cariz prático para a altura de água e portanto com repercussões muito directas na frequência obtida para uma determinada configuração geométrica de tanque incluído numa estrutura com frequência bem definida.

Para melhor resolver o problema referido no parágrafo anterior, a investigação tem vindo a dar passos largos no sentido de arranjar dispositivos que permitam que o mesmo dispositivo dissipador de energia se mantenha eficaz mesmo em situações em que as estruturas em que estes dispositivos se encontram incluídos sofram uma mudança considerável nas suas características dinâmicas e, portanto, na sua frequência de vibração [Shimizu e Teramura, 1994]. Com estes dispositivos os Amortecedores de Líquido Sintonizado podem ser construídos como um grande tanque, em vez de, como nas situações mais frequentes implementadas em estruturas reais, se usarem múltiplos recipientes de dimensões inferiores.

Os amortecedores de líquido sintonizado podem ser adicionados aos edifícios após construção; podem ser “arrumados” em qualquer espaço disponível sendo pouco provável a utilização de quaisquer medidas de reforço adicional ao nível da estrutura. Isto pode ser constatado no Hotel Shin Yokohama Prince onde a única alteração à estrutura inicial foi a colocação de sensores de água nos pisos com o objectivo de detectar eventuais roturas que ocorressem nos tanques [Tamura et al., 1995].

Os amortecedores de líquido sintonizado podem ser igualmente eficientes em edifícios assimétricos através da incorporação de tanques rectangulares. Esta solução fornece frequências naturais diferentes em cada uma das direcções principais de

vibração. Não existe entanto um limiar de excitação para a sua eficácia por isso mesmo para menores amplitudes de movimento do edifício estes tipos de sistemas de protecção têm algum efeito.

Em edifícios típicos médios a altos, os amortecedores de líquido sintonizado permitem alcançar níveis de amortecimento efectivo da ordem dos 3% a 4% do amortecimento crítico, o que corresponde a valores muito aceitáveis e que permitem melhorar de uma forma significativa o comportamento das estruturas em que se encontrem incluídos.

Contudo, identificaram-se algumas desvantagens uma vez que nem toda a massa de água existente no interior dos dispositivos é usada para contrabalançar o movimento da estrutura. Esta situação dá origem a gastos extra em termos de acréscimo de peso à estrutura, sem o benefício de um correspondente controlo ao nível da resposta dinâmica

A maior desvantagem dos amortecedores de líquido sintonizado é, no entanto, a falta de conhecimento das suas características fundamentais e explicação dos fenómenos que ocorrem no seu interior.

O seu comportamento é extremamente não-linear particularmente para elevadas amplitudes de excitação. A sua utilização não se encontra ainda difundida como seria de esperar uma vez que o sistema não pode ser analisado de uma forma fácil. A título de exemplo, a água não é tão densa como o aço, que é frequentemente utilizado nos amortecedores de líquido sintonizado, sendo necessário para alcançar uma razão de massas óptima um grande volume de água (por exemplo por meio de um conjunto de vários dispositivos).

O amortecimento fornecido por água límpida tem sido sempre abaixo do valor do amortecimento óptimo sendo necessário melhorá-lo, por exemplo por meio de introdução de partículas em suspensão [Tait et al., 2005].

Tem, no entanto, vindo a ser do propostos modelos simplificados que permitam explicar os fenómenos que ocorrem no interior dos amortecedores de líquido sintonizado bem como otimizar as suas características fundamentais de desempenho.

#### 2.1.2.8. Materiais “Inteligentes”

Os materiais “inteligentes” pertencem a uma classe de materiais que pode ser incorporada em membros estruturais ou componentes de sistemas como sensores embebidos ou mesmo como elementos actuadores capazes de alterar o comportamento estrutural em resposta a estímulos externos de intensidade considerável. Dado que alguns destes materiais fornecem alternativas bastante atractivas como forma de dissipação de energia em sistemas estruturais podem ser inseridos como membros potenciais de uma família não convencional de dispositivos dissipadores de energia [Soong e Dargush, 1997].

No universo dos materiais “inteligentes” os que mais recentemente tem mostrado uma maior incidência como dispositivos de protecção são as ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys*), Elementos piezoeléctricos (*Piezoelectric Elements*), Fluidos electrorreológicos e magnetoreológicos (*Electrorheological e Magnetorheological Fluids*).

As ligas com memória de forma surgiram recentemente e constituem um tipo de material ainda com muito potencial por explorar. Basicamente, estas ligas podem ser divididas em dois tipos, em função das propriedades que apresentam: ligas com superelasticidade e ligas com memória. As primeiras recuperam a forma inicial espontaneamente e imediatamente quando descarregadas, enquanto as últimas possuem o efeito de memória, isto é, recuperam a forma inicial quando expostas a uma determinada temperatura, após o descarregamento. Estas ligas podem ser feitas de vários metais (cobre, zinco, alumínio, níquel, titânio, magnésio, etc.). Todos estes materiais apresentam como características semelhantes como a superelasticidade, que ocorre de uma forma alternada e dependente da fase (martensítica ou austenítica) em que as ligas são estáveis à temperatura ambiente. As ligas com memória de forma encontram-se disponíveis sob a forma de cabos ou barras com diferentes características, sendo que os cabos só existem na fase austenítica enquanto que as barras existem tanto na fase austenítica como na fase martensítica.

As vantagens associadas ao comportamento e manutenção destes materiais são notáveis, referindo-se a ausência de custos de manutenção, a ausência de deformações residuais permanentes ou de degradação das características mecânicas.

Os dispositivos que incluem estes materiais na sua constituição apresentam maior fiabilidade de comportamento ao longo do tempo. No entanto a manufactura

destes materiais envolve processos complexos, uma vez que se torna necessário conhecer de uma forma muito clara, objectiva e concisa o processo termo-mecânico envolvido e a dependência da temperatura, o que resulta em altos custos de produção e implementação.

Para além disso é importante não esquecer que, devido à sua sensibilidade a alterações na composição, pequenas modificações nos componentes das ligas com memória de forma podem traduzir mudanças drásticas das propriedades mecânicas que podem potenciar alterações indesejáveis no comportamento dos dispositivos dos quais fazem parte [DesRoches e Smith, 2003].

As ligas com memória de forma têm aplicabilidade nos diversos campos da ciência, identificando-se diferentes ligas: Níquel-Titânio (NiTi), Cobre-Alumínio-Níquel (CuAlNi), Cobre-Zinco-Alumínio (CuZnAl), Ferromangânês-Silica (FeMnSi) e Magnésio-Cobre (MgCu). A utilização recente destes dispositivos como medidas de dimensionamento e reabilitação anti-sísmica tem vindo a generalizar-se.

Para aparelhos de protecção passiva, as melhores ligas são as de níquel-titânio (NiTi), devido às suas propriedades super elásticas, baixa sensibilidade à temperatura, grande resistência à corrosão e à fadiga. Estas ligas apresentam também elevada durabilidade e extraordinária resistência à fadiga. As ligas com memória de forma apresentam uma combinação de vantagem de comportamento e manutenção, associadas a um desempenho mais fiável e constante ao longo do tempo. Não necessitam de manutenção, nem tão pouco apresentam deformações residuais permanentes ou degradação das características mecânicas, durante toda a vida útil da estrutura. A sua super elasticidade e grande resistência à fadiga durante ciclos de grandes tensões constituem vantagens muito importantes. Recuperam a posição inicial da estrutura no final do sismo, ao mesmo tempo que controlam os deslocamentos durante a mesma acção. Controlam também a força transmitida para a superestrutura.

Utilizando estes materiais, os deslocamentos estruturais podem ser controlados durante a ocorrência de um sismo simultaneamente com o controlo da força transmitida à estrutura. Adicionalmente a estrutura fica com capacidade de recuperar a sua posição inicial após uma determinada acção sísmica [Dolce e Marnetto, 2000].

O primeiro exemplo de aplicação em engenharia civil destas ligas registado é o projecto de reabilitação da Igreja de S. Giorgio (Figura 120a), localizada em Trigano, Itália. Na reabilitação da torre sineira após o sismo de 15 de Outubro de 1996 foram

usadas 4 barras pré-esforçadas com dispositivos do tipo ligas com memória de forma (SMA) nos cantos da torre para aumentar a resistência da estrutura à flexão. As barras pré-esforçadas foram ancoradas às partes superior e inferior da torre como indicado na Figura 120b

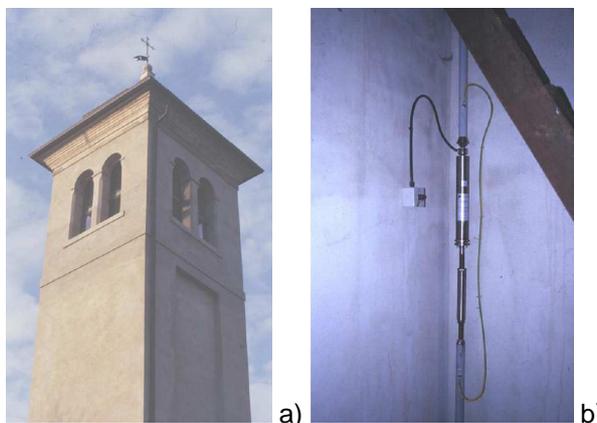


Figura 120 - Igreja de S. Giorgio Trigano, Itália: a) Aspecto geral da torre sineira e b) dispositivo com memória de forma colocado [Castellano, 2001]

Outro exemplo de aplicação destes dispositivos na reabilitação de estruturas corresponde à Basílica de S. Francisco em Assis (Figura 121a). Esta estrutura apresentou danos severos na sequência do sismo de Marche e Umbria (1997) (Figura 121b, tendo sido necessário proceder-se à sua reabilitação e reforço.

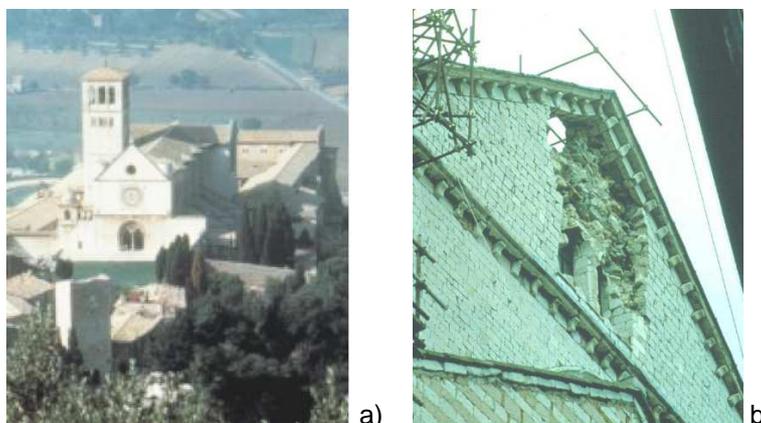


Figura 121 - Basílica de S. Francisco, Assis, Itália: a) Vista geral do exterior e b) danos no frontão resultantes do sismo de 1997 [Castellano, 2001a]

Neste caso particular optou-se pela utilização de dispositivos constituídos por materiais superelásticos com memória de forma (Figura 122a) que foram colocados entre o telhado e o frontão (Figura 122b, Figura 122c e Figura 122d) com o objectivo de reduzir o nível de forças sísmicas transmitidas. Para níveis de vibração reduzidos, os dispositivos introduzidos não permitem valores de deslocamentos significativos, enquanto que para vibrações elevadas (sismos), a rigidez dos dispositivos é reduzida

permitindo controlar os deslocamentos das paredes de alvenaria sem qualquer decréscimo ao nível da força.

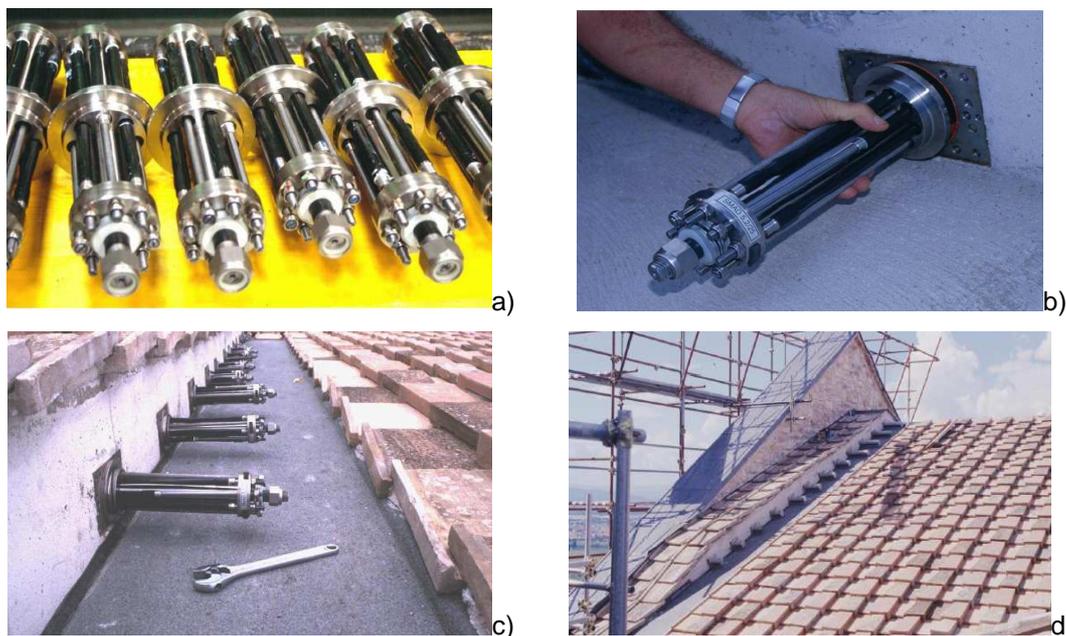


Figura 122 – Sistemas usados na reabilitação e reforço da Basílica de S. Francisco, Assis, Itália: a) Detalhe dos dispositivos, b) detalhe da colocação, c) detalhe de colocação e d) aspecto final do reforço [Castellano, 2001b]

Os sistemas de protecção com recurso a ligas com memória de forma podem ser igualmente aplicados em pontes ou viadutos. Como exemplo disso refere-se, por exemplo, a implementação de um sistema de isolamento de base variável associado a barras constituídas por ligas com memória de forma em pontes de auto-estradas [Wilde et. al, 2000]. Neste caso em particular as diferentes respostas dos dispositivos constituídos por ligas com memória de forma a diferentes níveis de extensão são usadas para controlo dos deslocamentos dos apoios de borracha que constituem o sistema de isolamento de base a vários níveis de excitação.

Adicionalmente as ligas com memória de forma permitem a recuperação rápida da posição da estrutura após a ocorrência de uma dada acção sísmica devido à resposta superelástica dos constituintes da liga. A baixos níveis de vibração as ligas com memória de forma garante uma ligação mais rígida entre os pilares e o tabuleiro. No caso de sismos de magnitude intermédia a tensão transmitida induz a ocorrência de uma transformação martensítica, o que permite aumentar o amortecimento do dispositivo. Para sismos de magnitude elevada, os dispositivos actuam como dispositivos de controlo em deslocamentos, introduzindo amortecimento histirético devido ao endurecimento da liga após ter sido completada a fase de transformação.

Simultaneamente, observa-se um aumento da capacidade dissipativa com a histírese que ocorre na liga com memória de forma [Oliveira, 2009].

Materiais piezoelétricos são aqueles que apresentam a propriedade electromecânica que poderem combinar campos elásticos e eléctricos. Quando incluídos num sistema estrutural potenciam a geração de corrente eléctrica, desde que actuados por forças ou tensões. Este efeito recebe a denominação de efeito piezoelétrico directo. A situação inversa pode igualmente ocorrer; assim quando sujeitos a corrente eléctrica os materiais piezoelétricos induzem tensões ou deformações denominando-se este efeito de efeito piezoelétrico inverso. Qualquer destes efeitos é importante e interessa à área de controlo, dado que o efeito directo permite a obtenção de informações a nível das estruturas propriamente ditas, enquanto que o efeito inverso pode ser usado directamente na área do controlo estrutural [Soong e Dargush, 1997].

Atendendo às suas propriedades têm vindo a ser integrados em dispositivos de protecção piezoelétricos e estes aplicados no controlo de vibrações em sistemas aeroespaciais, de robótica, de micro-mecânica e mais recentemente a elementos estruturais, como vigas, lajes, treliças [Bailey e Hubbard, 1985] [Tzou e Gadre, 1989] [Tzou e Tseng, 1990] [Tzou, 1992].

Comparativamente com outros tipos de dispositivos, os sensores e actuadores piezoelétricos são bastante eficientes numa gama alargada de frequências. Para além disso apresentam maior simplicidade, são mais fiáveis, compactos e leves [Soong e Dargush, 2007]. Actualmente conhecem-se três tipos de actuadores piezoelétricos para implementação no controlo de vibrações dinâmicas.

O tipo mais popular corresponde a actuadores distribuídos nos elementos da estrutura, como por exemplo em vigas, lajes, pórticos estruturais. Alguns dos primeiros estudos foram desenvolvidos sobre elementos de viga com camadas piezoelétricas a cobrir todo o comprimento do elemento [Bailey e Hubbard, 1985] [Burke e Hubbard, 1987] [Burke e Hubbard, 1988].

A investigação desenvolvida nesta área resultou num conjunto de directrizes para o dimensionamento das referidas camadas piezoelétricas. Mais tarde o interesse da investigação voltou-se para o estudo de estruturas de laje com as camadas piezoelétricas funcionando como sensores ou actuadores. Foram desenvolvidas teorias para estes últimos elementos [Tzou e Gadre, 1989] [Lee e Moon, 1989] [Lee e Moon, 1990] [Tzou, 1992] com base nos princípios de Love e

Hamilton, muito embora as verificações experimentais tenham ficado limitadas a estruturas do tipo viga. [Soong e Dargush, 1997]

O segundo tipo corresponde a uma solução em que os actuadores piezoelétricos são colocados de uma forma descontinuada ou incorporados em elementos estruturais. Um dos primeiros estudos nesta área foi conduzido admitindo deformações uniformes em todo o elemento [Crawley e Luís, 1987], tendo sido obtidos modelos analíticos estáticos e dinâmicos simplificados. Foram ainda efectuados três diferentes tipos de ensaios experimentais sobre protótipos de vigas em arco com actuadores piezoelétricos segmentados colados ou embebidos nos elementos estruturais. Posteriormente [Crawley e Anderson, 1990] foram ainda desenvolvidos modelos mais adequados da interacção entre deformações induzidas pelos actuadores piezoelétricos e as estruturas unidimensionais. [Soong e Dargush, 1997]

Finalmente o terceiro tipo compreende actuadores discretos para o controlo de parâmetros discretos das estruturas, como exemplo elementos de treliça com massas nos nós. Diversas descrições relacionadas com a concepção e dimensionamento de sensores e actuadores piezoelétricos discretos, assim como de estudos experimentais na área, podem ser encontradas em [Shibara et. al, 1992] [Edberg et. al, 1992] [Preumont et. al, 1992].

No entanto, e embora tenham vindo a ser desenvolvidos grandes progressos na investigação e aplicação de tecnologias de controlo com recursos a materiais piezoelétricos, a sua possível implementação a grandes estruturas de engenharia civil permanece ainda uma incógnita necessitando de verificações cuidadas. [Soong e Dargush, 1997]

Os materiais electrorreológicos e magnetorreológicos serão descritos mais adiante na secção correspondente aos sistemas de protecção semi-activa de fluido controlável.

## **2.2. Sistemas Activos**

Os sistemas de protecção activa são aqueles que a partir de dados obtidos através da monitorização constante da estrutura, têm a capacidade de reagir contrariando o movimento imposto pela acção sísmica [Jerónimo, 2001].

Um sistema de protecção activo (Figura 123) compreende um conjunto de sensores, um processador (ou computador) e actuadores. Os sensores encontram-se colocados junto à estrutura para medir tanto as excitações externas como as variáveis da resposta estrutural. A informação obtida dos sensores é registada e processada em tempo real, permitindo determinar a cada instante o comportamento da estrutura e determinar as forças necessárias fornecer para alcançar o equilíbrio. O grau de melhoramento da resposta encontra-se limitado apenas pelas capacidades do sistema de controlo [Oliveira, 2009].

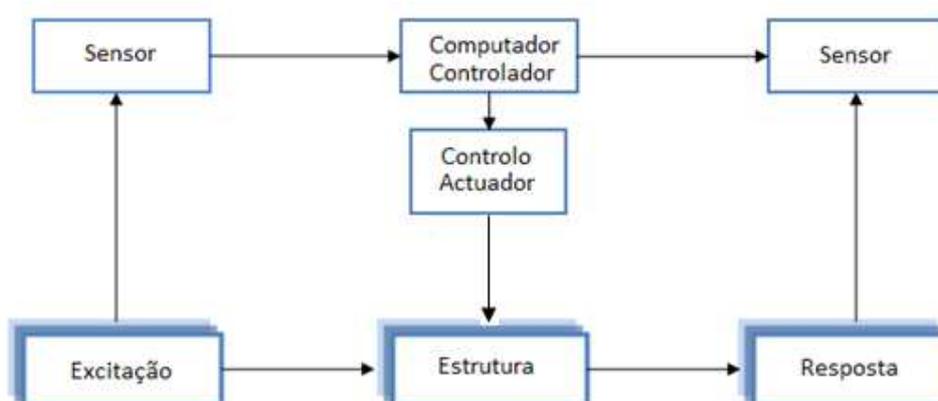


Figura 123 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema de protecção activa, adaptado de [Spencer Jr. e Soong, 1999].

A reacção ao movimento sísmico pode ser concretizada através da acção de actuadores hidráulicos colocados na base da estrutura, que em função dos deslocamentos registados, impõem o movimento necessário para reduzir a resposta dinâmica o que permite mitigar o efeito do sismo [Oliveira, 2003].

O intervalo de tempo decorrente entre a recolha da informação por parte dos sensores e a aplicação das forças pelos actuadores hidráulicos deverá ser o mais curto possível uma vez que, se tal não acontecer, poderá decorrer uma inversão do movimento da estrutura e as forças aplicadas pelo sistema de controlo podem prejudicar o comportamento da estrutura em vez de o melhorar.

Atendendo à escala de forças a serem impostas, os actuadores hidráulicos integrantes deste tipo de sistemas devem apresentar uma capacidade significativa, razão pela qual os sistemas de protecção activa são mecanismos de grandes dimensões, o que na maioria das vezes traduz dificuldades práticas associadas à sua instalação.

Adianta-se ainda que são sistemas que necessitam de fornecimento de grandes quantidades de energia, o que poderá ser um grande obstáculo à sua

implementação, especialmente durante a ocorrência de um sismo uma vez que nesta situação são muito frequentes as falhas ou eventuais cortes de corrente inviabilizando todo o sistema de protecção sísmica [Oliveira, 2009].

Os sistemas activos podem ser aplicados em situações muito diversas com a vantagem de escolha dos objectivos de controlo para cada situação em particular.

A título de exemplo refere-se que se, num determinado instante, a maior preocupação estiver relacionada com o conforto humano durante situações não-críticas, os sistemas activos poderão ser ajustados para apresentarem maior sensibilidade a pequenas vibrações. No entanto esta alteração particular não inviabiliza o facto extremamente importante de que, durante acções dinâmicas importantes, como sejam ventos fortes e sismos importantes, o sistema possa ser ajustado no sentido de permitir o nível desejado de segurança estrutural [Oliveira, 2009].

Os referidos sistemas de protecção activos, baseiam-se na supressão de vibrações introduzidas pelas acções dinâmicas (vento ou sismo), através da criação de uma força de acção externa que, aplicada à estrutura considerada, permita a modificação desejável ao nível do comportamento dinâmico da mesma [Suhardjo et al., 1990].

A força de acção externa, pode ser usada tanto para adicionar ou dissipar energia ao nível da estrutura [Housner et al., 1997]. Com um mecanismo de controlo activo adequado, a segurança em serviço de uma estrutura pode ser garantida, durante a aplicação de acções dinâmicas, dentro de determinados limites, previamente estabelecidos [Suhardjo et al., 1990].

Relativamente ao controlo é corrente identificarem-se dois tipos: *feedback control* e *feedforward control*. O primeiro consiste na medição das variáveis da resposta estrutural (deslocamento, velocidade, aceleração relativa, etc.) e na consequente utilização da informação obtida para calibrar as forças a introduzir no sistema. No *feedforward control* as forças dos actuadores são reguladas pela excitação medida, o que pode ser obtido, no caso de excitação sísmica, medindo as acelerações na base da estrutura. Existe ainda a possibilidade de efectuar um controlo misto denominado *feedback-feedforward*, sendo um tipo de controlo que apresenta um nível complexidade elevado [Oliveira, 2003].

Segundo o modelo matemático, o controlo activo de estruturas pode-se classificar em:

- i) Controlo linear, em que as equações e operações matemáticas envolvidas são lineares;
- ii) Controlo não-linear, em que as operações são não-lineares;
- iii) Controlo de tempo variável em que as funções e parâmetros de controlo variam com o tempo;
- iv) Sistemas de controlo de tempo discreto em que os parâmetros de controlo variam em intervalos de tempo discretos;
- v) Sistemas de controlo de parâmetros distribuídos em que os parâmetros correspondem a funções tridimensionais;
- vi) Sistemas de controlo determinísticos em que todas as operações matemáticas envolvidas no processo são determinísticas;
- vii) Sistemas de controlo estocásticos, em que as equações e operações são estocásticas.

Como resultado de esforços desenvolvidos ao nível da investigação, principalmente nas últimas duas décadas, a protecção activa de estruturas contra acções intensas, nomeadamente os sismos, tem vindo a ser gradualmente aplicado a estruturas em engenharia civil.

Para além disso tem-se observado que a protecção activa de vibrações tem vindo a despertar grande atenção nos últimos anos, tanto nos círculos académicos como pelos engenheiros estruturalistas, e que ao nível das técnicas utilizadas tem-se vindo a observar um rápido progresso tanto na área da investigação como no campo de aplicações práticas.

Como exemplo deste rápido desenvolvimento refere-se, a título meramente de curiosidade, que no Japão o número de artigos subordinados a este tema e publicados em Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers – Part C, duplicou nos últimos dez anos. Dentre estas estas publicações observou-se um crescimento estável ao nível dos referentes ao controlo robusto, tipicamente o controlo  $H_{\infty}$  e o controlo do modo de escorregamento. Ressalva-se ainda que os trabalhos, efectuados e em

curso, não se resumem só a puras simulações numéricas, mas também a programas de verificação experimental [Seto, 1998].

Em muitas destas estruturas, sejam elas edifícios correntes ou pontes, os meios activo de protecção tem vindo a substituir os meios puramente passivos anteriormente mencionados [Seto, 1998].

É um facto, que, no Japão muitos edifícios, incluindo um hotel de 70 pisos e um complexo de escritórios de 52 pisos, já empregam estratégias de protecção activa para o controlo do movimento resultante da acção do vento ou dos sismos [Spencer Jr. e Sain, 1997].

Em termos de realização conhecem-se vários tipos de sistemas de protecção activa, dos quais se salientam, por exemplo, os amortecedores activos de massa (*Active Mass Dampers*), os sistemas activos de rigidez ou amortecimento variável (*Active Variable Stiffness Dampers*), os cabos activos (*Active Cables*), os sistemas de contraventamento activo (*Active Bracing*), os dispositivos activos de controlo de deformação (*Active Deformation Control*), Apêndices aerodinâmicos activos (*Active Aerodynamic Appendages*) e isolamento de base activo (*Active Base Isolation*).

Diversos estudos numéricos em edifícios com controlo activo levaram a um número interessante de conclusões, que se tornam úteis para análise, projecto e implementação dos sistemas de controlo activo em estruturas de edifícios. Foi observado que a colocação do controlador nos pisos mais elevados requer menos força de controlo para atingir elevadas reduções na resposta [Yang, 1975].

O sistema de cabos activos, quando aplicado a um edifício sujeito à acção do vento, fornece um controlo mais eficiente, tanto para os deslocamentos como para as acelerações do edifício, que o controlo de um sistema amortecedor de massa sintonizado, pois fornece uma maior força de controlo [Abdel-Rohman e Leipholz, 1983].

No entanto, foi observado por Singh e Matheu [1997], que a magnitude da força necessária por parte do actuador, para edifícios sujeitos a acções sísmica, é maior no sistema de cabos que no amortecedor de massa sintonizado activo. Mais, para o controlo do amortecedor activo de massa sintonizado, as frequências sintonizadas para que o máximo de redução à resposta ocorra, são diferentes para diferentes estratégias de controlo.

Foi observado que o máximo de redução na resposta, não ocorre necessariamente na frequência fundamental, que é normalmente a frequência sintonizada. Foi demonstrado que a aplicação de controlo em modo de escorregamento num edifício com um amortecedor activo de massa sintonizado pode gerar respostas elevadas no edifício devido à interacção de ambos [Adhikari e Yamaguchi, 1997].

Quando os dados disponíveis são insuficientes para o desenvolvimento de uma solução precisa, constatou-se que a solução tem um desempenho (*performance*) superior, se os sensores e actuadores se localizarem nos últimos pisos [Yang, 1975].

Yang e outros [Yang et al., 1987] demonstraram que os algoritmos óptimos de controlo instantâneo são mais eficientes que o *Riccati Feedback Control*. No entanto, observa-se um considerável melhoramento nos resultados, quando *Riccati Feedback Control* mede variáveis de resposta estrutural, tais como acelerações relativas e velocidades [Rofooei e Tadjbakhsh, 1993].

Muitas outras conclusões sobre algoritmos de controlo estão apresentadas nos trabalhos de Yang e outros [Yang et al., 1994 [ Yang et. al, 1996] [Abdel-Rohman et al., 1993]. De uma forma geral pode-se admitir que a maioria dos esquemas de controlo convencional para estruturas de engenharia civil, assumindo o encastramento solo-base, é válida para uma determinada amplitude de deslocamento e velocidades [Yang et al., 1996].

No entanto existem inúmeros problemas associados à aplicação do controlo activo, limitando a sua implementação em larga escala. Para além da necessidade de existência de uma grande fonte de energia para a implementação do controlo existem outros problemas que se passam a citar:

- i) Erros de modelação. Modelar uma estrutura com um número limitado de graus de liberdade é geralmente uma fonte de erro, daí que o algoritmo de controlo baseado no modelo muitas vezes não consegue controlar de uma forma eficaz a estrutura real;
- ii) Capacidade de resposta (*time delay*). Existe um intervalo de tempo entre o instante em que a resposta é sentida e o instante em que a força de controlo é aplicada. Como resultado, pode ocorrer uma dessincronização da força aplicada, causando instabilidade e um controlo ineficiente;

- iii) Controladores e sensores limitados. Não é possível colocar sensores e controladores em todos os pontos idealmente necessários. A sua optimização é algo a ter em conta, no entanto o recurso a dados incompletos pode tornar o controlo da estrutura pouco eficaz;
- iv) Incertezas nos parâmetros e identificação de sistemas. Estas incertezas podem resultar de falhas ao nível do conhecimento da capacidade resistente da estrutura e do comportamento não-linear, podendo resultar na perda de eficácia do sistema de controlo;
- v) Fiabilidade. A fiabilidade do sistema de controlo activo é questionável, devido principalmente à pouca frequência em que é realmente activada, às operações relacionadas com a sua manutenção, À disponibilidade de energia na altura do episódio e, ainda, a barreiras psicológicas eventualmente criadas por parte dos ocupantes/utentes;
- vi) Questões relacionadas com rentabilidade e necessidades de hardware.

### **2.2.1. Amortecedores Activos de Massa**

Dos vários sistemas de protecção activa, pode-se dizer que os amortecedores activos de massa são dos que apresentam características de maior fiabilidade ao nível da resposta. A sua aplicabilidade a edifícios foi amplamente estudada, tanto experimental como analiticamente, durante os anos 80. Entre 1989 e 1995 reportaram-se mais de vinte aplicações deste tipo de sistemas em edifícios Japoneses [Spencer Jr., Strain, 1997].

O seu funcionamento é semelhante ao dos Amortecedores de Massa Sintonizados passivos referidos anteriormente na secção 2.1.2.6. e consiste numa massa ligada à estrutura por meio de uma mola, um amortecedor e um actuador responsável pela introdução de forças ao nível da massa activa. Para além destes elementos junta-se ainda um algoritmo de controlo que analisa a resposta estrutural dinâmica e determina, com base na análise da resposta, a força de controlo necessária para guiar a massa no sentido de contrariar a resposta. Estas forças regulam o movimento da massa, compensando a vibração da excitação por meio de forças de inércia geradas [Balendra et. al, 2001].

As forças induzidas por um Amortecedor de Massa Activo são limitadas apenas pela massa do próprio dispositivo e pela capacidade do actuador a ele associado.

A investigação científica desenvolvida sobre os amortecedores de massa activos têm vindo a demonstrar que melhoram a redução de vibrações estruturais a um nível mais elevado do que os correspondentes dispositivos passivos.

Os maiores benefícios relativamente aos amortecedores de massa sintonizada passivos correspondem à redução da massa associada ao próprio amortecedor e aos níveis mais elevados de eficiência que se conseguem alcançar. Alguns autores [Kwok e Samali, 1995] provaram que a eficácia da utilização de amortecedores de massa sintonizada na redução de vibrações induzidas pela acção dinâmica do vento em estruturas altas pode ser melhorada cerca de 30% pela simples adição de um sistema de controlo activo [Oliveira, 2009]. Para além disso a investigação permitiu ainda provar a sua eficiência não só para acções dinâmicas do vento, mas para acções sísmicas [Kwok e Samali, 1995] [Yamamoto et. al., 2001].

Para além de serem usados nos edifícios para protecção estrutural constante, podem ainda ser utilizados temporariamente durante a construção de estruturas flexíveis e esbeltas, como é o caso das pontes suspensas. Outro tipo de aplicação corresponde ao reforço de estruturas.

De facto, a maior vantagem dos amortecedores de massa activos, corresponde ao facto de não serem muito intrusivos ao nível do sistema estrutural, o que comprova a sua adequabilidade para situações de reforço de estruturas existentes.

As implementações deste tipo de sistemas de massa são muito usuais em estruturas altas, sob a forma de massas especiais adicionadas ou reservatórios contendo água ou gelo, também usados com outras funcionalidades na estrutura do edifício [Oliveira, 2009].

A primeira implementação em escala real deste tipo de dispositivos ocorreu no final da década de 80 no Kyobashi Seiwa Building (Figura 124), um edifício de 11 pisos em estrutura metálica com uma área em planta de 423m<sup>2</sup>. O edifício está localizado em Chuo-Ku, Tóquio.

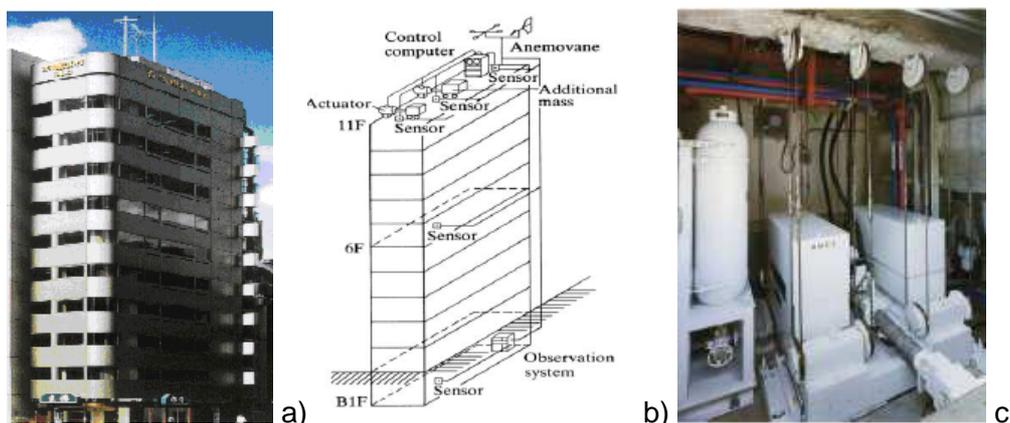


Figura 124 - Edifício Kyobashi Seiwa, Tóquio: a) Vista exterior [Kareem et. al, 2001]; b) esquematização da colocação do sistema de protecção activa do tipo amortecedor de massa sintonizada [Soong e Spencer Jr., 2002] e c) unidade de amortecedor de massa sintonizada colocado [Kareem et. al, 2001]

Neste caso o sistema de protecção sísmica consistiu num conjunto de dois amortecedores de massa activos, em que o primeiro, com um peso de 4ton, foi usado para movimentos transversais e o segundo, com um peso de 1ton, foi empregue para reduzir o movimento de torção.

Como se pode observar na Figura 124b) as massas são actuadas por uma bomba hidráulica de 22 kW tendo sido colocados na cave, 6º e 11º pisos sensores O computador de controlo que comanda a nível global as operações foi colocado no último piso. A função principal deste tipo de sistemas consistiu na redução das vibrações do edifício quando sujeito às acções de ventos fortes e/ou de sismos moderados, e conseqüentemente aumentar o conforto dos ocupantes do edifício [Spencer Jr e Soong, 1999].

O controlo do desempenho e da fiabilidade destes amortecedores tem vindo a ser determinados com base em observações efectuadas durante períodos de tempo consideravelmente extensos. No entanto a maioria destes sistemas de protecção activa têm sido desenvolvidos apenas para acções intensas do vento e acções sísmicas moderadas. Pelo que se torna necessário que se efectuem melhorias ao nível dos sistemas para que se consigam abranger também as acções sísmicas de maior intensidade [Yamamoto et. al., 1998].

Um amortecedor de massa activo, usando como massa móvel um heliporto localizado no topo de um edifício foi instalado em Osaka (Japão) no edifício Applause Tower (Figura 125).

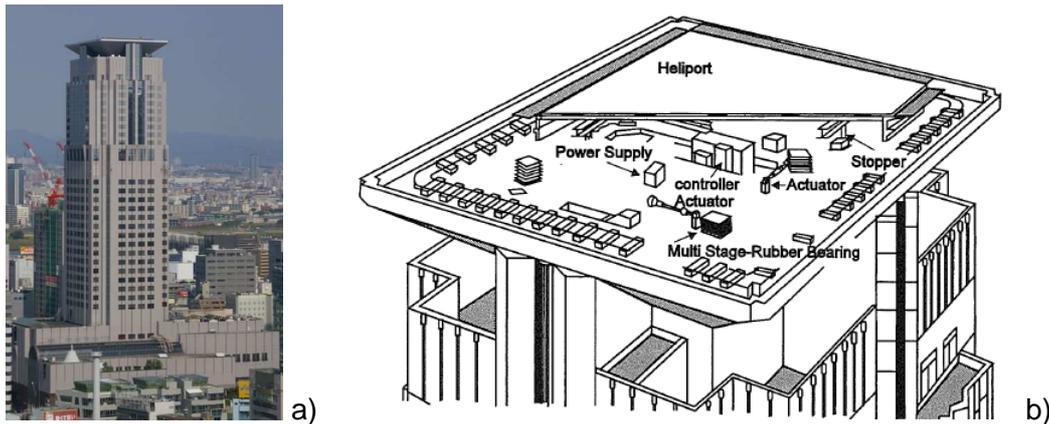


Figura 125 - Edifício Applause Tower, Osaka, Japão: a) Vista do exterior e b) Representação esquemática do amortecedor de massa activo [Takenaka Co., 2001].

Este edifício, que corresponde a uma luxuosa unidade hoteleira, tem que apresentar um elevado nível de conforto aos seus ocupantes tendo sido necessário integrar a referida medida de supressão de vibrações dinâmicas impostas por ventos fortes ou sismos de magnitude intermédia.

O heliporto, com um peso de cerca de 480 toneladas, é suportado por vários níveis de apoios em borracha (elastómericos) tendo dois actuadores por direcção que são usados para suprimir os movimentos de torção da massa oscilante.

A resposta deste edifício sem amortecedor de massa activo foi simulada com recurso a uma análise computacional [Yamamoto et. al, 2001] e posteriormente comparada com a resposta real da estrutura quando sujeita a um tufão e a um sismo. Em ambas as situações verificou-se um excelente desempenho deste tipo de dispositivo com o pico da resposta reduzido de uma forma bastante significativa. Para além disso foi também possível verificar um aumento do coeficiente de amortecimento de 1.4% para 10.6%.

O complexo Shinjuku Park Tower (Figura 126), localizado em Shinjuku-Ku, Tóquio, é mais um exemplo de uma estrutura em que foram implementados dispositivos activos para controlo de vibrações dinâmicas. O complexo, composto por três edifícios, é constituído por uma estrutura em metal parcialmente reforçada com paredes de betão e apresenta uma área total de 264100m<sup>2</sup>. As características de cada um dos três elementos são as seguintes: Torre S com 235 de altura e 54 pisos elevados, Torre C com 209 m de altura e 47 pisos e a Torre N com 182m de altura e 41 pisos acima do solo. O edifício no qual foram introduzidos dispositivos do tipo amortecedores de massa sintonizados é composto por 52 pisos (Torre S) que se desenvolvem em altura mais 5 caves enterradas, com um peso de 130000ton acima

do solo. Devido à sua forma esbelta é muito susceptível a vibrações transversais e por torção.



Figura 126 – Complexo Shinjuku Park Tower, Tóquio: a) Visão global do exterior [SPT, 2009] e b) perspectiva do complexo de edifícios vista do solo

O sistema activo utilizado, denominado Trigon, é composto por 3 dispositivos de controlo instalados ao nível do 39º piso em apenas um dia. Cada uma das massas de controlo tem 110ton, o que corresponde a um total de 0.25% da massa da estrutura. O deslocamento máximo admissível do pêndulo é de cerca de 1.1m. Tem um período ajustado de 3,7258s, correspondendo a uma frequência de vibração de cerca de 0.26Hz, e um motor com uma capacidade de 75kW. O esquema de funcionamento do dispositivo encontra-se definido na Figura 127.

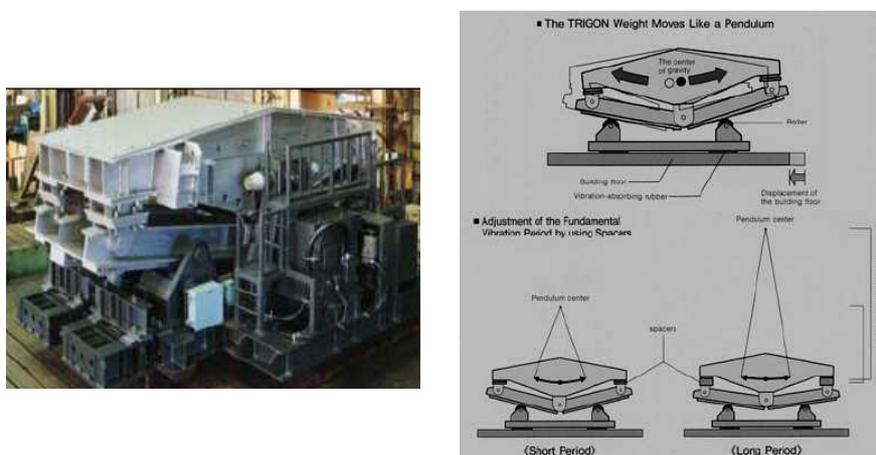


Figura 127 - Sistema Trigon colocado no Edifício Shinjuku Tower, Tóquio: a) Detalhe do dispositivo; b) esquema de funcionamento [Soong e Spencer Jr., 2002].

O sistema visa mitigar as vibrações associadas com o primeiro modo, tendo como principais repercussões para além de redução de acelerações e deslocamentos no topo um acréscimo de 5-10% ao nível do amortecimento. Em termos de deslocamentos traduz uma redução de 33% a 50% no topo. O custo total do sistema

implementado traduz um acréscimo de custos de apenas 0.5% do custo total de construção.

Como anteriormente referido o edifício do Shanghai World Financial Center (Figura 128) apresenta na sua constituição dois amortecedores activos de massa sintonizada que permitem protegê-lo de desastres naturais como ventos fortes e sismos. Os dispositivos encontram-se colocados abaixo dos pisos panorâmicos ao nível do 90º piso e permitem a redução do bambolear do edifício. Os amortecedores massa sintonizada utilizam sensores para detectar eventuais movimentos de bambolear do edifício, estando ligados a um computador de controlo.



Figura 128 – Shanghai World Financial Center, Shanghai, Japão: a) Vista do exterior e b) detalhe construtivo do amortecedor activo de massa sintonizado [SWFC Wikipedia, 2009]

Porém, a aplicação de sistemas de massa activos não se tem limitado exclusivamente ao Japão. Um sistema de amortecedores activos de massa foi concebido para incorporação na Torre de TV (Figura 129) de 340m de altura localizada em Nanjing na Republica Popular da China [Reinhorn et. al., 1998].

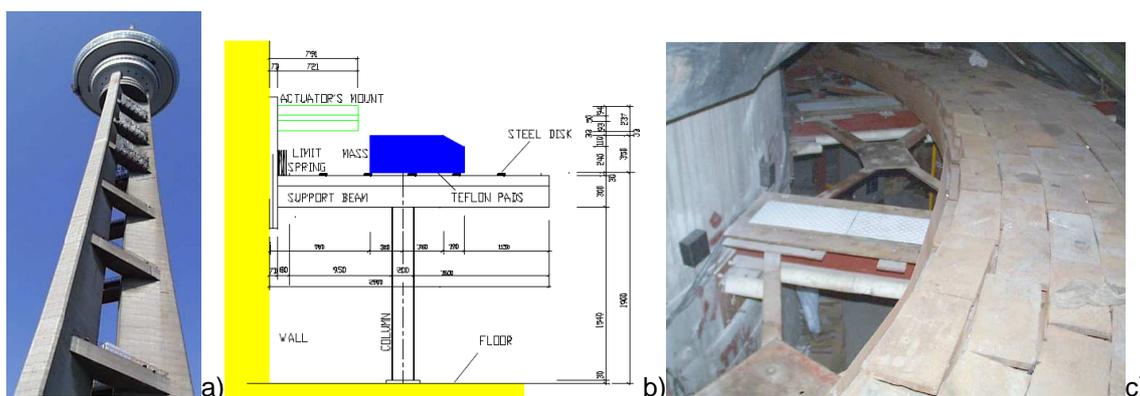


Figura 129 – Torre de TV, Nanjing, R.P. China: a) visão global do exterior, b) representação esquemática da colocação da massa sobre o apoio em Teflon e c) detalhe da colocação da massa sobre o apoio em Teflon [Reinhorn et. al, 2000]

Devido a limitações de espaço, os sistemas passivos que foram inicialmente propostos não puderam ser incorporados. O sistema activo implementado consiste

numa massa de cerca de 60 toneladas, em forma de anel, o que corresponde a cerca de 1% da massa da torre. A referida massa apresenta um raio exterior de 4.75m e um raio interior de 3.9m, desliza sobre apoios em Teflon e é controlada por três actuadores servo-hidráulicos com um curso de  $\pm 1.5\text{m}$  [Kareem et. al, 1999]. A instrumentação colocada e que permite monitorização do desempenho do sistema de controlo, foi efectuada com recurso a 6 acelerómetros e 3 sensores de deslocamentos colocados em cada um dos actuadores hidráulicos [Reinhorn et. al, 2000].

### **2.2.2. Sistemas Activos de Amortecimento e Rigidez Variável**

Relativamente aos sistemas activos de amortecimento e rigidez variável, pode-se dizer que estes são responsáveis pelo controlo de uma forma “activa” da rigidez de um edifício através do uso de algoritmos *feedforward* que apresentam interruptores *on-off* de rigidez variável cuja função não é mais do que permitir o estabelecimento de um estado anti-ressonante durante a ocorrência dos sismos [Kobori et al., 1993]. Desta forma, o sistema minimiza a resposta do edifício por meio de uma energia de controlo muito inferior ao verificado para outro tipo de sistemas activos, mantendo a segurança e protegendo os equipamentos mesmo na sequência de sismos severos.

De facto com sistemas que permitam um controlo activo não-ressonante dos efeitos através do controlo de rigidez variável com amortecimento passivo usando os referidos dispositivos de amortecimento e rigidez variável, observam-se grandes reduções ao nível da resposta quando comparadas com situações verificadas em edifícios dimensionados contra as acções sísmicas [Nasu et al., 1998] e sem qualquer tipo de sistema de protecção activa incluído.

A sua instalação requer a colocação de grandes suportes em forma de V-invertido em cada nível nos dois extremos da estrutura com o objectivo de impedir o movimento de translacção. Cada equipamento é ligado ao dispositivo de rigidez variável, que é activado pela abertura da válvula de que dispõe. Quando esta válvula é fechada o sistema é bloqueado.

Ao analisar os movimentos sísmicos actuantes verifica-se que a válvula altera a frequência da estrutura de um modo bastante razoável, ao seleccionar a rigidez mais adequada para o edifício a partir dos dados disponíveis, e fechando ou abrindo os diferentes componentes do sistema para o conseguir. Desta forma o comportamento

ressonante da estrutura pode ser eliminado através de ajustes bem sucedidos ao nível da sua rigidez [Sakamoto, 1993].

Na Figura 130 apresenta-se um esquema de colocação de um sistema activo de amortecimento e rigidez variável usado para controlo activo de estruturas de edifícios.

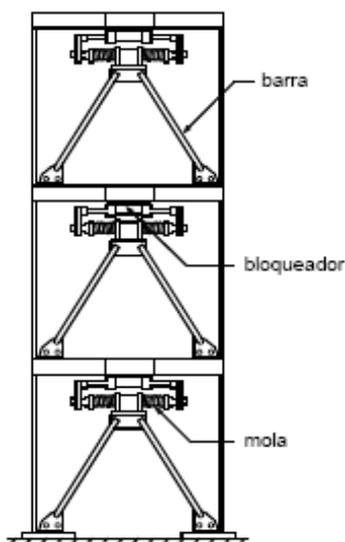


Figura 130 – Representação esquemática da colocação de um sistema de dispositivos de amortecimento e rigidez variável num edifício [Moutinho, 1998]

Uma aplicação pioneira deste tipo de sistemas corresponde à efectuada em 1990, para controlo e observação, no edifício que alberga a plataforma sísmica do complexo Kajima Technical Research Institute, em Tóquio (Figura 131).

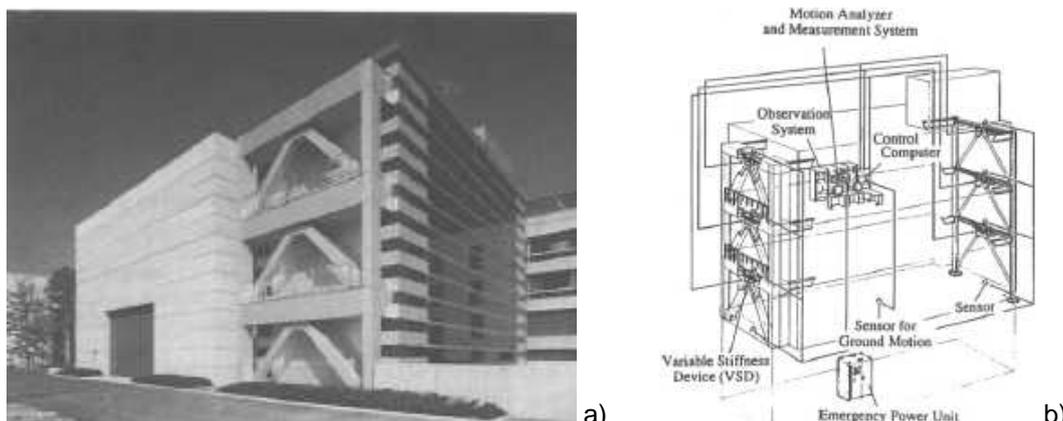


Figura 131 – Kajima Technical Research Institute, Tóquio, Japão a) Vista do exterior do edifício e b) representação esquemática da colocação dos sistemas activos de amortecimento e rigidez variável [Sakamoto e Koboril, 1995]

Os sensores colocados na base da estrutura permitem a análise dos movimentos ao nível do 1º piso. A informação obtida é enviada para o controlador do sistema activo de amortecimento e rigidez variável, que faz accionar o sistema se a

aceleração verificada no piso exceder um determinado valor e altera a rigidez da estrutura ao seleccionar a rigidez óptima para conseguir melhores níveis de desempenho associados a níveis mais baixos da resposta.

Estes sistemas activos de amortecimento e rigidez variável são alimentados a 20W, o que em situação de falha de energia pode ser reactivado por um simples gerador de emergência que se encontra a ele acoplado.

Pode-se ainda afirmar que se trata de uma solução que reduz eficazmente a resposta em sismos reais [Sakamoto, 1993], sendo o seu desempenho monitorizado de uma forma continuada.

### **2.2.3. Cabos Activos**

O controlo activo usando cabos estruturais tem sido um dos mecanismos mais estudados. Este tipo de sistema de protecção dinâmica foi primeiramente proposto por Freyssinet durante o ano de 1960 e compreende um conjunto de cabos ligados a servomecanismos electrohidráulicos (actuadores) que permitem a introdução de forças de controlo adequadas a cada solicitação dinâmica a que a estrutura fica sujeita. A tensão introduzida nos cabos que se encontram ligados aos actuadores pode ser continuamente modificada permitindo um controlo constante das forças no sistema estrutural.

Uma das razões para este tipo de sistema de controlo gozar nos dias de hoje de um grande favoritismo em detrimento de outros prende-se com o facto de muitas vezes os cabos já existem nas estruturas, tendo apenas de ser adaptado um sistema de controlo activo. Desta forma o controlo por cabos activos tira partido de elementos estruturais existentes minimizando adições extensas ou modificações ao nível do sistema estrutural. Trata-se de uma solução muito atractiva no caso, por exemplo, de reabilitação e reforço de estruturas pré-existentes

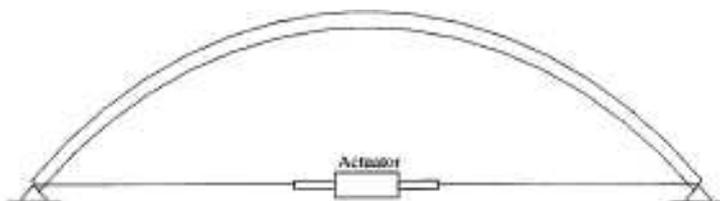
Este tipo de dispositivos de protecção activa podem ser implementados em diferentes tipos de estruturas, como é o caso de estruturas esbeltas, altas, flexíveis, em pontes e até mesmo em plataformas *offshore*.

Em implementações em edifícios o actuador pode ser fixo na base da estrutura, enquanto que os cabos se ligam ao actuador e a uma das lajes (por exemplo ao nível

do primeiro piso) diagonalmente e simetricamente permitindo a introdução de forças de controlo não só horizontais mas também verticais [Oliveira, 2009].

O conceito dos cabos activos tem vindo também a ser estudado [Pinto e Gonçalves, 2000] para implementações em vigas curvas, que são por exemplo utilizadas como arcos em muitas estruturas de engenharia civil.

As estruturas em arco quando sujeitas a cargas aplicadas transversalmente apresentam frequentemente uma relação carga-deslocamento altamente não-linear. A investigação na área propõe para situações deste tipo, quando sujeitas a acções dinâmicas, um sistema de cabos activos que permite controlar as oscilações de vigas simplesmente apoiadas prevenindo, por exemplo, fenómenos graves de instabilidade. Na Figura 132 apresenta-se esquematizado um sistema de cabos activos implementado numa estrutura em arco.



*Figura 132 – Representação esquemática de implementação de sistema de cabos activos [Pinto e Gonçalves, 2000].*

Nesta situação em particular observa-se que o sistema de cabos activos estabelece a ligação entre dois suportes, em que um deles se apresenta como fixo e o outro é livre de se mover na direcção horizontal.

A investigação desenvolvida nesta área permitiu concluir que sistemas de controlo com funcionamento não-linear permitem uma elevada redução ao nível da resposta dinâmica e desempenho das estruturas a que se encontra associados [Oliveira, 2009].

Para além das situações indicadas anteriormente, os cabos activos podem também ser incluídos, com um excelente nível de desempenho a nível do controlo dinâmico, em pontes de tirantes.

De facto, atendendo ao aumento verificado ao nível dos vãos, este tipo de pontes tem-se tornado cada vez mais vulnerável à instabilidade por fenómenos de flutuação bem como às vibrações induzidas pelo vento e pelo tráfego. O controlo activo permite que neste tipo de cabos seja efectuada uma modificação das tensões,

tendo como repercussão directa uma melhoria significativa do movimento dinâmico do tabuleiro [Oliveira, 2009].

Existem outros sistemas em que os actuadores são colocados nos cabos das pontes de tirantes permitindo o controlo do esforço normal em cada um dos cabos (Figura 133). Desta forma, com o actuador colocado nos cabos, a tensão nos cabos pode ser alterada em tempo real com a consequente repercussão ao nível do comportamento dinâmico do tabuleiro.

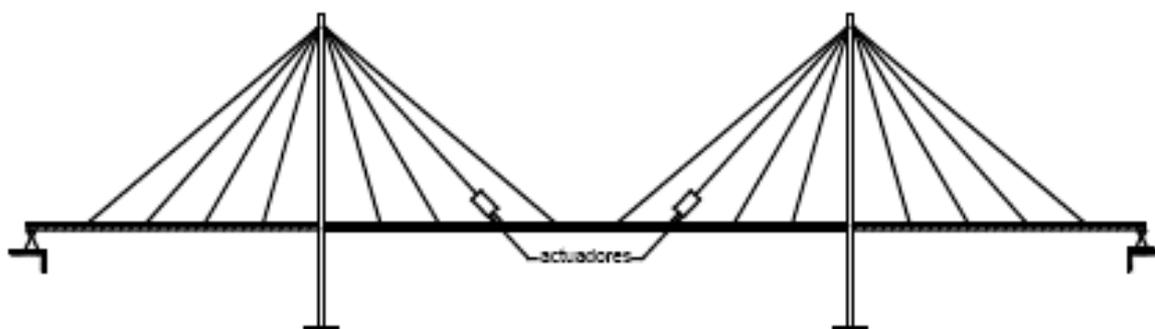


Figura 133 – Colocação de cabos activos em tirantes de pontes atirantadas [Moutinho, 1998].

No caso de viadutos, os sistemas de cabos activos podem igualmente ser implementados mas em estreita interacção com escoras permitindo, deste modo, controlar as forças verticais ao nível no tabuleiro.

Outra solução corresponde à conjugação de sistemas de cabos activos com elementos verticais ligados rigidamente ao tabuleiro. Esta solução corresponde à aplicação de momentos de controlo por fenómenos de variação de tensão nos próprios cabos activos [Moutinho, 1998]

A implementação de cabos activos em estruturas reais tem vindo a ser debatida e estudada por muitos autores [Achkire, 1997] [Moutinho, 1998], sendo necessário acompanhar a investigação com ensaios laboratoriais que permitem obter conclusões acerca da sua eficiência. Os cabos activos podem ser implementados de formas diversificadas, atendendo ao tipo de estrutura e características da acção dinâmica que se pretende mitigar

Como exemplo de ensaios laboratoriais indicam-se, a título de exemplo, os estudos de Chung [Chung, 1999] e de Spencer Jr e outros [Spencer Jr et. al, 1998]. Este último caso, que traduz a implementação de cabos activos em estruturas de edifícios quando sujeitos a solicitações horizontais, compreendeu um estudo sobre um modelo à escala de um pórtico de 3 pisos (Figura 134)

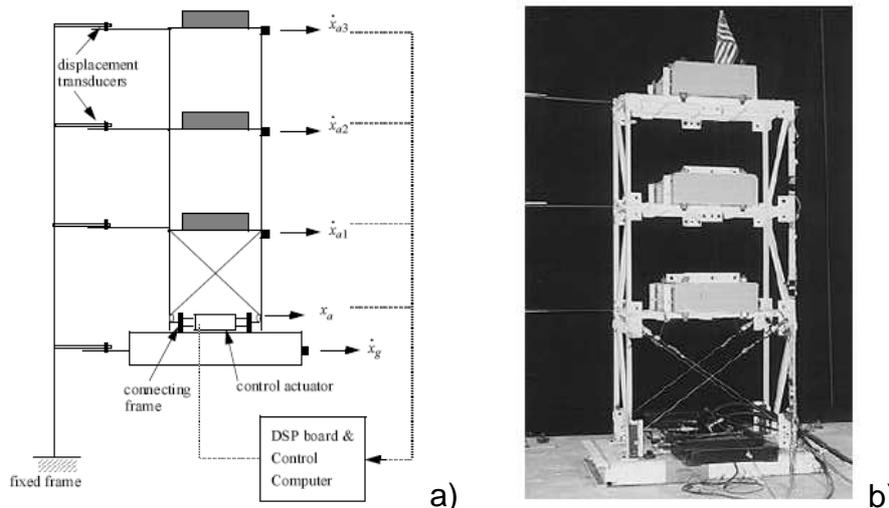


Figura 134 – Pórtico de 3 pisos com cabos activos: Representação esquemática do dispositivo de ensaio e b) modelo ensaiado [Spencer Jr. et. al., 1998].

Neste caso em particular, uma das extremidades de um cabo activo encontra-se ligada a um dos nós do piso superior enquanto a outra extremidade se encontra ligada ao êmbolo de um actuador localizado no piso imediatamente inferior. O actuador encontra-se devidamente fixado à base, e o cabo deverá passar por um sistema de roldana localizada no nó diametralmente oposto do piso inferior. Em paralelo, monta-se um outro cabo que apresenta um traçado simétrico relativamente ao outro e também ligado ao êmbolo do actuador.

Assim, e quando tudo se encontra devidamente conectado, é possível, através do movimento ao nível do êmbolo, introduzir na estrutura porticada não só forças de controlo na direcção horizontal em ambos os sentidos mas também forças na direcção vertical [Moutinho, 1998].

No caso dos viadutos é possível adoptarem-se sistemas de cabos activos conjugados com escoras, o que permite a introdução no tabuleiro de forças de controlo na direcção vertical. Outra hipótese corresponde à conjugação entre os referidos cabos activos e elementos verticais rigidamente conectados ao tabuleiro. Estes elementos verticais permitem a aplicação de momentos de controlo por variação da tensão nos cabos [Moutinho, 1998].

Em estruturas reais refere-se a colocação de cabos activos em pontes na zona da Normandia (França). Na Figura 135 apresentam-se detalhes de uma das referidas pontes e da zona de ancoragem do cabo e ligação ao sistema de controlo.

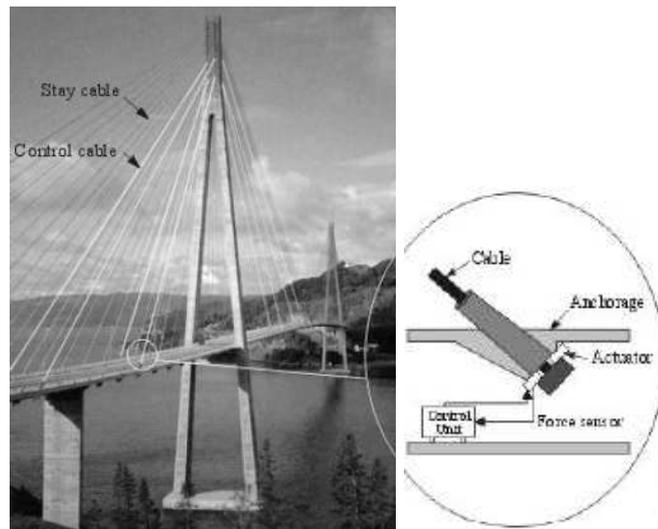


Figura 135 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema protecção por via de cabos activos, adaptado de Spencer Jr. e Soong, 1999].

Indica-se ainda a implementação de cabos activos em pontes nos Estados Unidos da América, referindo-se a título exemplificativo a Bayview Bridge sobre o rio Mississípi (Figura 136).



Figura 136 - Bayview Bridge, Mississipi, EUA [BB, s/d].

Esta situação corresponde a uma ponte com dois montantes em betão em forma de H e um tabuleiro misto em aço e betão. O vão principal apresenta cerca de 274m e os dois vãos laterais cerca de 134m cada, perfazendo um comprimento total de 542m. A ponte têm um total de 56 cabos, sendo que 28 suportam o vão principal e 14 suportam cada um dos vãos laterais. No controlo deste sistema foi usado um algoritmo de controlo gaussiano linear quadrático com o objectivo de minimizar os custos associados [Dutta et. al, s/d]

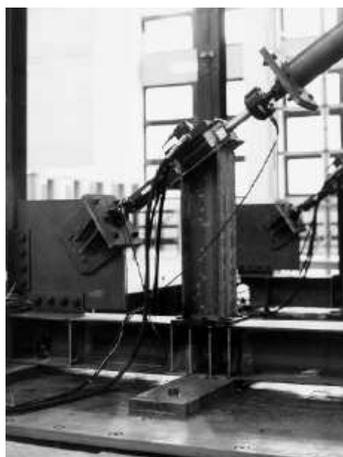
À semelhança dos demais dispositivos de protecção sísmica, os resultados experimentais e analíticos obtidos aliados com as medições efectuadas em estruturas reais (acelerações, deslocamentos, forças) permitem confirmar que é possível

alcançar reduções significativas do movimento estrutural usando sistemas de protecção baseados em princípios de controlo activo [Soong e Reinhorn, 1993].

#### 2.2.4. Sistemas de Contraventamento Activos

Os sistemas de contraventamento activos são usualmente utilizados em aplicações em edifícios e compreendem um conjunto de perfis metálicos na forma de um V invertido ligados a um actuador que permite a introdução de forças axiais no sistema, aumentando a rigidez do sistema estrutural e consequentemente reduzindo a resposta estrutural. Os actuadores associados a este sistema de protecção permitem a expansão e contracção longitudinal do sistema de contraventamento metálico. A força axial nos elementos de contraventamento é controlada por meio da rigidificação ou relaxação do sistema de acordo com um algoritmo de controlo, o que permite a melhoria do comportamento dinâmico global da estrutura [Zhang e Roschke, 1999].

A investigação deste tipo de sistemas tem vindo a ser desenvolvida, principalmente por meio de programas de ensaios experimentais (Figura 137) em estruturas à escala real [Soong, 1994] [Loh et. al, 1999]. A resposta face diversas solicitações sísmicas é registada, sendo a resposta provável da estrutura não controlada estimada por meio de simulações analíticas.



*Figura 137 – Sistema de contraventamento activo: a) Representação esquemática de dispositivo de ensaio e b) detalhe do dispositivo ensaiado [Loh et. al, 1999].*

Os resultados obtidos permitem concluir que os sistemas de contraventamento activos permitem uma redução uniforme ao nível das respostas modais, com picos de funções de transferência da estrutura controlada tomando valores bastante inferiores, o que traduz também um aumento do amortecimento. Para além disso os sistemas

controlados por meio de sistemas de contraventamento activos permitem atingir reduções muito significativas, da ordem dos 50%, ao nível dos deslocamentos relativos e das acelerações absolutas e da ordem dos 30%, para valores RMS de deslocamentos e de acelerações, em situações de solicitação sísmica gravosa.

### **2.2.5. Deflectores aerodinâmicos de geometria variável**

Os deflectores aerodinâmicos de geometria variável constituem outro tipo de dispositivos de controlo principalmente utilizados para diminuição de deslocamentos resultantes das solicitações dinâmicas do vento sobre edifícios altos.

A posição do dispositivo pode ser modificada de uma forma contínua no tempo, de maneira a adoptar a posição que mais favoreça a redução dos deslocamentos.

Apesar de mais utilizado em estruturas de edifícios a implementação deste tipo de dispositivos tem vindo alargada a outras estruturas, nomeadamente na redução de oscilações em tabuleiros de pontes e viadutos [Moutinho, 1998].

### **2.2.6. Dispositivos Activos de Controlo de Deformação**

Outro tipo de sistema de protecção activa proposto por vários investigadores corresponde aos denominados dispositivos activos de controlo de deformação. Estes sistemas destinam-se principalmente ao controlo de vibrações verticais em tabuleiros de pontes, associadas fundamentalmente à passagem de veículos, e tirando partido das características de elevada resistência do betão.

Os dispositivos são constituídos por barras de aço pré-esforçado ancoradas lateralmente no tabuleiro, e distribuídas ao longo da ponte. Entre as vigas longitudinais do tabuleiro, colocam-se almofadas de ar constituídas por material maleável, que podem tomar diversas formas, dependendo da pressão do ar introduzida. Fazendo variar a altura das almofadas de ar com determinada rapidez, torna-se possível introduzir uma acção de controlo eficiente que permita reduzir consideravelmente o nível de deslocamentos expectável no tabuleiro.

Na Figura 138 apresenta-se uma representação esquemática de um tabuleiro sem qualquer dispositivo activo de controlo de deformação incluído (Figura 138a) e duas hipóteses de funcionamento da mesma estrutura com os referidos dispositivos incluídos em diferentes zonas do vão (Figura 138b e Figura 138c).

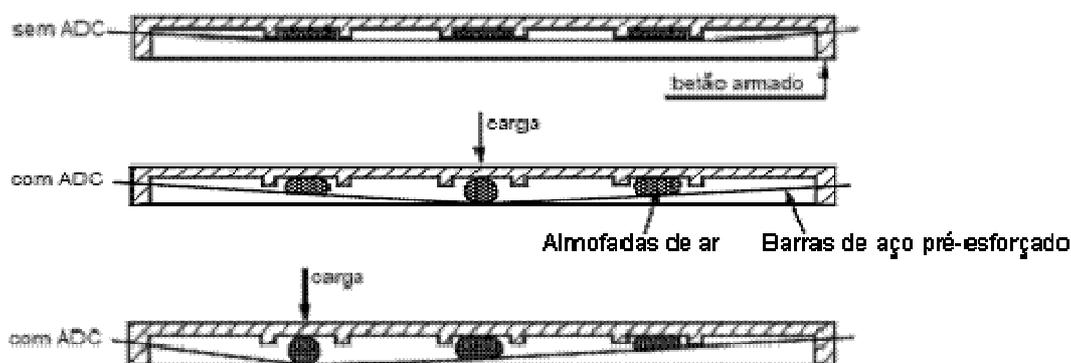


Figura 138 – Dispositivos activos de controlo de deformação: a) Situação sem dispositivo, b) situação com dispositivos e carga vertical aplicada a  $\frac{1}{2}$  vão e c) situação com dispositivo e carga vertical aplicada a  $\frac{1}{4}$  de vão, adaptado de [Moutinho, 1998]

## 2.2.7. Apêndices Aerodinâmicos Activos

A ideia de aplicar apêndices aerodinâmicos activos em pontes suspensas com grandes vãos foi pela primeira vez introduzida por Ostenfeld e Larsen [Ostenfeld e Larsen, 1992], inspirados pelos princípios anteriormente usados na estabilização de superfícies na indústria das aeronaves. Inicialmente foram sugeridos dois conceitos base: o primeiro consiste na mudança activa da geometria lateral por meio de um elemento colocado no tabuleiro da ponte com o objectivo de alterar o padrão de fluxo em torno dele e assim reduzir as vibrações induzidas pela acção dinâmica do vento (Figura 139a), enquanto que o segundo consiste na adição de superfícies de controlo por baixo dos bordos do tabuleiro (Figura 139b).

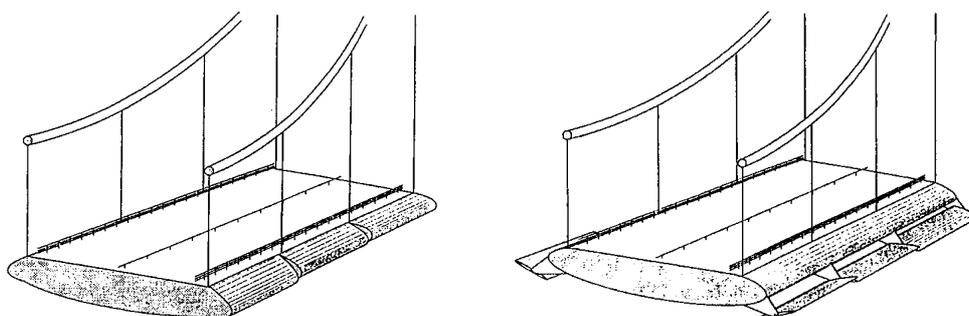


Figura 139 – Esquema de colocação de apêndices aerodinâmicos activos [Hansen e Thoft-Christensen, s/d].

No último caso a rotação das superfícies por meio de actuadores hidráulicos produz forças aerodinâmicas que estabilizam a estrutura, com o aumento da velocidade crítica do vento [Caetano, 2007].

O uso de apêndices aerodinâmicos como dispositivos de controlo activo destinados a reduzir oscilações induzidas por ventos fortes em longas pontes suspensas e em edifícios altos apresenta inúmeras vantagens, sendo a mais atractiva, quando comparada com os restantes métodos de controlo estrutural, o facto de permitir explorar a energia da própria acção dinâmica instabilizante no controlo da estrutura.

Desta forma, elimina a necessidade de um fornecimento de energia externa para produzir o controlo adequado, referindo-se como única energia fornecida a necessária para operar o posicionamento do apêndice aerodinâmico. Estes elementos aerodinâmicos, normalmente em chapas de aço, também denominados *flap* ou entalhes, são colocados excentricamente e desenvolvem-se paralelamente ao eixo da ponte em que se encontram colocados.

A ideia fundamental é colocar este tipo de elementos acima ou abaixo do tabuleiro da ponte e de maneira a ficarem suficientemente afastados do tabuleiro na zona não perturbada pelo fluxo de vento. A presença deste tipo de elementos altera o tipo de solicitações aero-elásticas que actuam na estrutura, contribuindo para o aumento da sua velocidade de flutuação.

Para além disso nos apêndices aerodinâmicos o ângulo de rotação varia de uma forma controlada no tempo [Nissen et. al, 2004]. O objectivo principal do controlo é garantir que a estrutura permanece estável para todas as velocidades do vento até um determinado valor último de velocidade de dimensionamento [Cobo DelArco e Aparecio, 1999]

Tem vindo a ser desenvolvidos estudos experimentais sobre este tipo de dispositivos permitindo concluir que, para diversas consições de vento, é possível atingir-se uma redução da ordem dos 50% do valor de pico da velocidade [Soong et. al, 1991].

Referem-se os estudos efectuados sobre diferentes configurações de Apêndices Aerodinâmicos Activos para as Pontes sobre o Estreito de Messina (Itália) [Leto, 1994] [Zasso et. al, 1996], Great Belt East (Dinamarca) [Nissen et. al., 2004] e sobre o estreito de Gibraltar (Gibraltar) [Astiz, 1998]. No entanto este tipo de sistema

não é o mais adequado para implementação em estruturas que se encontrem muito vulneráveis a acções sísmicas [Soong et. al, 1991].

Todavia a sua implementação prática em estruturas reais é muito complexa, sendo necessário o dimensionamento de dois ou três sistemas de controlo paralelo no sentido de evitar que uma eventual falha de um elemento de controlo origine o colapso da estrutura [Caetano, 2007].

### **2.2.8. Isolamento de Base Activo**

No dimensionamento sísmico o isolamento de base corresponde a um mecanismo bastante útil para melhorar a resposta de uma estrutura face a excitações dinâmicas, como é o caso das acções sísmicas.

Muitos investigadores têm vindo a demonstrar a viabilidade deste tipo de sistemas, o que tem levado à sua implementação em muitas estruturas reais espalhadas um pouco por todo o mundo, nomeadamente ao nível das zonas de sismicidade elevada.

Os sistemas de isolamento puramente passivos baseiam-se na dissipação de energia por histírese ou por atrito, com as correspondentes repercussões ao nível do amortecimento introduzido [DeVore et. al, 2007].

No entanto, os sistemas de isolamento de base passivos podem sofrer danos irrecuperáveis devido a excessivos níveis de deformação, com as correspondentes limitações ao nível da capacidade de absorção de energia e da protecção global da estrutura. Um sistema de isolamento de base equipado com um dispositivo de controlo activo pode necessariamente ultrapassar este problema.

Os sistemas de isolamento de base activos compreendem um sistema de isolamento de base conjugado com actuadores de controlo activo, como pode ser observado na Figura 140. Os actuadores hidráulicos são responsáveis pelo fornecimento do amortecimento necessário ao sistema de isolamento de base.

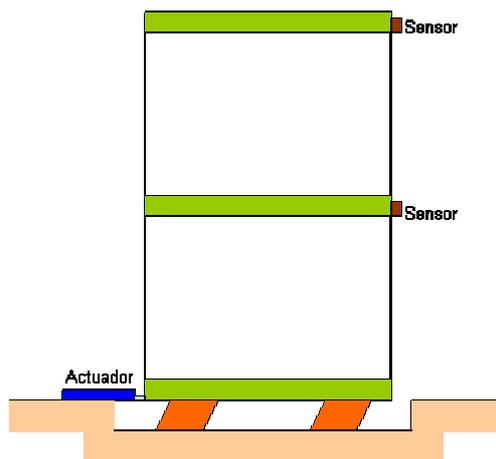


Figura 140 – Esquematização do funcionamento do isolamento de base activo, adaptado de [Spencer Jr, 2000].

Os sistemas de isolamento de base activo mantêm algumas das características dos correspondentes sistemas passivos, nomeadamente ao nível da flexibilidade horizontal e da capacidade de absorção de energia durante a deformação.

De facto, os sistemas de isolamento de base activos apresentam um extraordinário desempenho na redução de vibrações por permitirem o fornecimento de capacidades de absorção de energia adicionais. Os sensores colocados estrategicamente na estrutura permitem o registo contínuo dos movimentos estruturais.

Este tipo de sistema de isolamento de base apresenta uma grande adaptabilidade a diferentes excitações do solo e a possibilidade de controlar vários modos de vibração em simultâneo.

A grande desvantagem deste tipo de isolamento de base prende-se com o facto de, para o seu adequado funcionamento, requerer o fornecimento externo de grande quantidade de energia [Lee et. al, 2005].

O estudo do controlo de vibrações em edifícios altos quando sujeitos a acções dinâmicas do vento e de sismos tem vindo a ser desenvolvido tanto experimentalmente como analiticamente por diversos autores [Fur et. al, 1996] [Lee et. al, 2005] [DeVore et. al, 2007].

Na maioria dos casos tratam-se de estudos comparativos em que se incluem para além das soluções sem qualquer tipo de protecção dinâmica, as soluções com recurso a controlo activo (em deslocamentos, em velocidade, em acelerações ou completo) e as soluções com recurso a sistemas passivos homólogos. Os

deslocamentos máximos entre pisos e as acelerações máximas surgem, como expectável, para os casos sem qualquer tipo de protecção.

O isolamento de base puramente passivo é capaz de restringir de uma forma muito eficiente os deslocamentos relativos entre pisos e máximas acelerações nos pisos, ainda que os deslocamentos ao nível da base permaneçam bastante grandes.

Com a utilização do isolamento de base activo é possível, mantendo as acelerações nos pisos controladas, uma redução muito significativa nos deslocamentos da base.

### 2.3. Sistemas Híbridos

Um sistema de protecção híbrido (Figura 141) é definido como um sistema que emprega uma combinação de dispositivos passivos e activos [Housner et al., 1997].

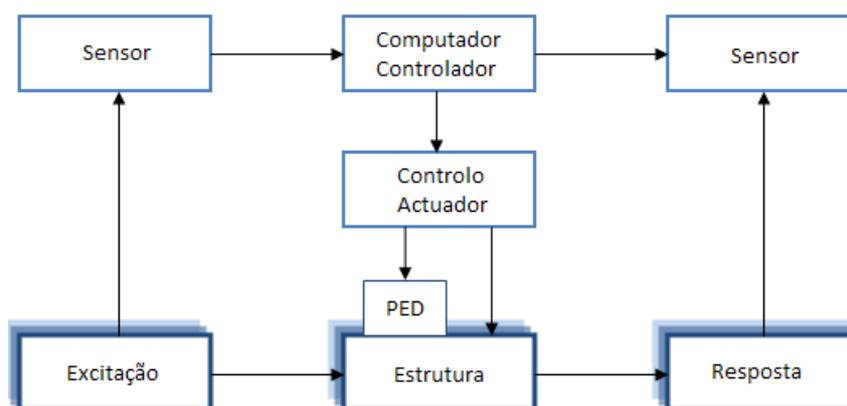


Figura 141 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema de protecção híbrido, adaptado de Spencer Jr. e Soong, 1999.

Um sistema híbrido corresponde a todo e qualquer sistema que junte dois ou mais tipos de dispositivos de protecção diferentes. Atendendo ao facto de coexistirem em operação diversos dispositivos, nos sistemas híbridos verifica-se uma atenuação das restrições e limitações inerentes a cada um dos dispositivos a funcionar sozinho.

Os sistemas de controlo híbridos tem vindo receber mais atenção dos investigadores nos últimos anos, uma vez que permitem a redução da resposta estrutural de uma forma mais eficiente do que os sistemas passivos sem, no entanto, necessitarem de tanta energia como os sistemas puramente activos.

O controlo por meio de sistemas de protecção híbridos parece ser mais eficiente na mitigação de acções de sismos do que a parcela de funcionamento puramente activo [Cheng e Jiang, 1998].

Adicionalmente verifica-se que a protecção híbrida resultante deste tipo de sistemas pode ser mais fiável do que um sistema puramente activo, ainda que o funcionamento dos sistemas de protecção híbrida seja um pouco mais complexo.

A pesquisa efectuada ao nível dos sistemas de protecção permite que se distingam diferentes tipos de sistema de protecção híbridos que se encontram em contínuo desenvolvimento, sendo frequentemente propostos novos sistemas com diferentes combinações de dispositivos.

Atendendo à grande quantidade de sistemas híbridos actualmente disponíveis torna-se bastante complicado enumerá-los todos. Por uma questão de exemplificação salientam-se os amortecedores híbridos de massa (*Hybrid Mass Damper*), o isolamento de base híbrido (*Hybrid Base Isolation*) [Spencer Jr. e Sain, 1997] e a combinação de um dispositivo passivo de fluido viscoso com um actuador hidráulico.

As estratégias de protecção híbrida tem vindo a ser amplamente investigadas nos últimos anos com o intuito de permitir a exploração do seu potencial ao nível do aumento da fiabilidade e da eficácia das estruturas controladas [Soong e Reinhorn, 1993], quando comparadas com dispositivos puramente passivos ou puramente activos.

É importante mencionar o facto de serem as tecnologias de controlo híbridas as mais aplicadas na actualidade em engenharia civil, com particular incidência sobre os sistemas de amortecimento híbridos de massa.

### **2.3.1. Amortecedores Híbridos de Massa**

Desde a sua primeira aplicação em 1989 [Fujita, 2002] os amortecedores híbridos de massa têm vindo a ser muito utilizados na supressão de vibrações causadas por ventos fortes e sismos moderados em estruturas de edifícios

Os amortecedores híbridos de massa não são mais do que uma combinação de um amortecedor de massa sintonizado com um actuador de controlo activo. A

capacidade deste dispositivo reduzir a resposta estrutural baseia-se principalmente no movimento natural do amortecedor de massa sintonizado. As forças provenientes do actuador de controlo activo são empregues no aumento da eficiência do amortecedor híbrido de massa e, ainda, no aumento da sua robustez relativamente a mudanças operadas ao nível das características dinâmicas da estrutura. Durante a solicitação dinâmica um sistema controlado por computador com um determinado algoritmo de controlo a força imposta reduzindo as vibrações na estrutura [Soong e Spencer Jr., 2000].

A energia e forças necessárias para operar um amortecedor híbrido de massa típico são bastante menores do que aquelas associadas a um amortecedor “completamente” activo de massa que apresente um desempenho do mesmo nível [Spencer Jr. e Sain, 1997].

Para além disso a grande diferença entre um amortecedor híbrido de massa e um amortecedor de massa activo baseia-se no facto de a rigidez e o amortecimento do primeiro ser fornecida pelo componente amortecedor de massa sintonizada, enquanto que no segundo a rigidez e/ou o amortecimento no segundo serem fornecidas pelo nível de força activa [Cao e Li, 2004]

Tem-se observado um grande desenvolvimento ao nível da investigação dos dispositivos integrantes dos sistemas de protecção híbridos e dos próprios sistemas, por exemplo Tanida e outros [Tanida et al., 1991] desenvolveram um amortecedor de massahíbrido em forma de arco que tem vindo a ser utilizado em numerosas aplicações.

Para além de amortecedores híbridos em forma de arco conhecem-se ainda os com forma de V, que apresentam como principal vantagem o facto de apresentarem um período fundamental de fácil ajuste. Três destes últimos dispositivos, com massa total de 330ton, foram instalados no Shinjuku Park Tower, o maior edifício do Japão em termos de área de piso. Os amortecedores híbridos de massa podem também ser utilizados eficazmente em aplicações de reforço de estruturas [Spencer Jr. e Sain, 1997].

A pesquisa, no que refere a este tipo de sistemas de protecção, tem vindo a intensificar-se muito nos últimos anos. Desta forma pode-se dizer que os investigadores têm vindo a estudar vários métodos de controlo possível para os amortecedores híbridos de massa. Vários autores [Shing et al., 1994], [Kawatani et al., 1994], [Petti et al., 1994], [Suhardjo et al., 1992] [Spencer Jr. et al., 1994]

consideraram algoritmos de controlo otimizados no dimensionamento de amortecedores híbridos de massa. Outros [Tamura et al., 1994] conseguiram propor uma técnica de controlo melhorada na qual o resultado atingido era variável com o nível de excitação contabilizado em cada pancada provocada pelo vento ou sismo e, ainda, com limitações relacionadas com o controlo de força. Paralelamente Niiya e outros [Niiya et al., 1994] propuseram um algoritmo de controlo *ad hoc* para amortecedores híbridos de massa que permitia contabilizar certas limitações e características inerentes a cada uma das acções: vento ou acções sísmicas [Spencer Jr e Sain, 1997].

Um exemplo de aplicação de amortecedores híbridos de massa corresponde ao sistema instalado, em 1991, no edifício Sendagaya INTES, Tóquio (Figura 142).

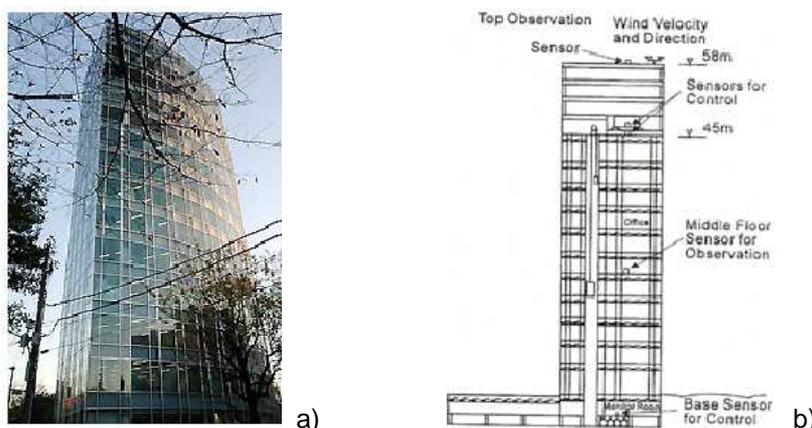


Figura 142 - Edifício Sendagaya INTES, Tóquio: a) Vista exterior; b) Esquema da colocação do sistema amortecedor híbrido de massa e respectivos sensores de controlo [Higashino e Aizawa, 1993].

O sistema amortecedor híbrido de massa usado foi instalado no 11º piso, sendo constituído por duas massas (Figura 143), suportadas por blocos de elastómero, cujo objectivo é controlar os movimentos transversais e de torção da estrutura. Os blocos de elastómero tem como função reduzir a energia consumida no dispositivo assim como garantir movimentos suaves das massas. A capacidade de controlo activo é fornecida pelos actuadores hidráulicos [Soong e Spencer Jr., 2002].

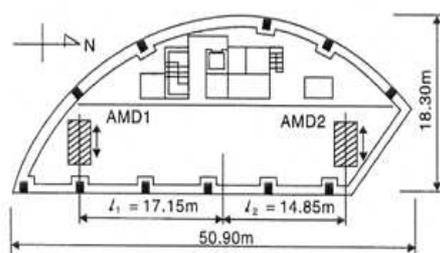


Figura 143 - Planta do edifício Sendagaya INTES, Tóquio com identificação da localização dos dois amortecedores híbridos de massa que constituem o sistema de protecção híbrido [Higashino e Aizawa, 1993].

À semelhança de muitas outras estruturas que se encontram protegidas por meio de sistemas híbridos o edifício Sendagaya INTES foi monitorizado, tendo sido obtidos registos suficientes para avaliar o desempenho do sistema AHM, quando o edifício foi sujeito a ventos fortes. A título de exemplo, pode-se referir que a resposta da estrutura no modo fundamental foi reduzida entre 18 a 28% tanto para movimentos de translação como para a torção [Soong, et al., 2002].

Relativamente às primeiras configurações de amortecedores híbridos de massa propostas foram surgindo, de acordo com resultados de programas de investigação experimentais e analíticos, alternativas, de onde se salienta o pêndulo de vários níveis.

Assim, a título de exemplo indicam-se duas implementações de dispositivos amortecedores híbridos de massa colocados na Yokohama Landmark Tower em Yokohama (Figura 144) o edifício mais alto do Japão e na TC Tower em Kaohsiung, Taiwan.

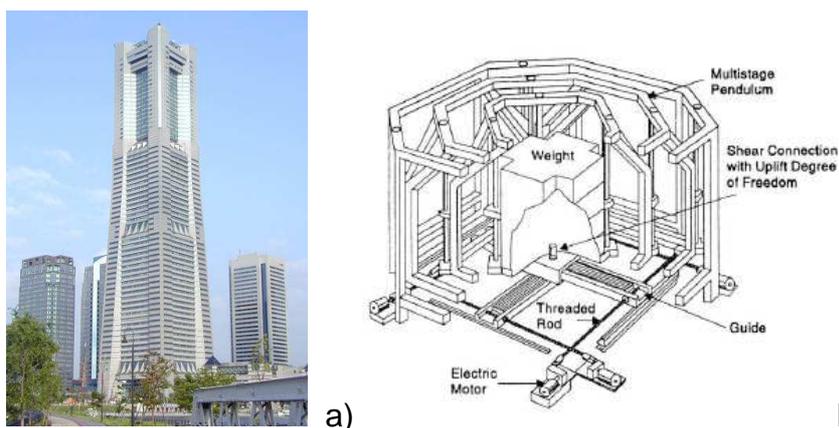


Figura 144 - Yokohama Landmark Tower, Yokohama: a) Vista do exterior [YT, 2009] e b) esquema do pêndulo amortecedor híbrido de massa de vários níveis [Yamazaki et al., 1993].

A Yokohama Landmarket Tower, uma estrutura mista em aço e betão armado, apresenta 296m de altura, 70 pisos e pesa cerca de 260000tons. Em 1993 foi instalado a cerca de 282m de altura um sistema de protecção híbrido constituído por dois dispositivos do tipo pêndulo de três níveis, cada um deles apresentando uma massa de 170 toneladas [Spencer Jr. e Sain, 1997] e funcionando em duas direcções com um sistema de molas sintonizadas e um sistema de controlo com um servomotor [Yamazaki et al., 1992].

O sistema de controlo regula a massa adicional por meio de um sistema feedback usando como variáveis de estado o deslocamento e a velocidade da massa e do piso no qual o dispositivo se encontra colocado [Yamazaki et al., 1992]. Testes conduzidos sobre a estrutura permitiram concluir que, de facto, a implementação deste

tipo de sistema de controlo híbrido permite reduzir a resposta do edifício face às acções dinâmicas do vento em cerca de 50% [Kareem et. al., 1999]

Paralelamente surgiu o sistema Duox amortecedor híbrido de massa que compreende um amortecedor de massa sintonizado controlado activamente por uma massa auxiliar. Como exemplo da instalação deste tipo de dispositivos indica-se o edifício Ando Nishikicho em Chiyoda-Ku, Tóquio (Figura 145).

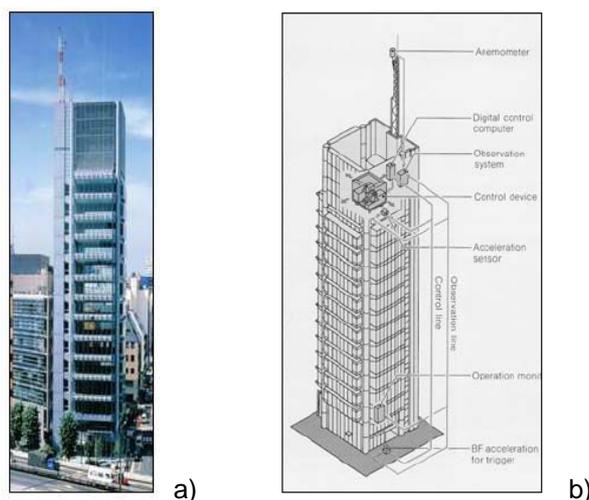


Figura 145 - Edifício Ando Nishikicho, Tóquio: a) Vista do exterior; b) esquematização da colocação do sistema de protecção híbrida Duox [Soong e Spencer Jr., 2002].

O edifício, de estrutura em aço, é constituído por 14 pisos elevados e 2 caves. Acima do solo, o edifício tem um peso de 260ton. O sistema de protecção foi colocado no último piso e é constituído por 2 amortecedores de massa híbridos, um para cada direcção, colocados na parte superior de um amortecedor de massa sintonizado puramente passivo.

O amortecimento do amortecedor de massa sintonizado passivo é conseguido por meio de um amortecedor a óleo. O amortecedor de massa sintonizado tem um peso de 18ton, cerca de 0.3% a 0.8% do peso total do edifício, enquanto que cada um dos AMSs tem um peso 2ton, cerca de 10% a 15% do peso do AMS.

O sistema referido denomina-se Duox e o seu esquema de funcionamento encontra-se ilustrado na Figura 146.

O sistema Duox funciona no pressuposto de que se o sistema de controlo activo falhar, o controlo mínimo é sempre assegurado pelo funcionamento do Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS).

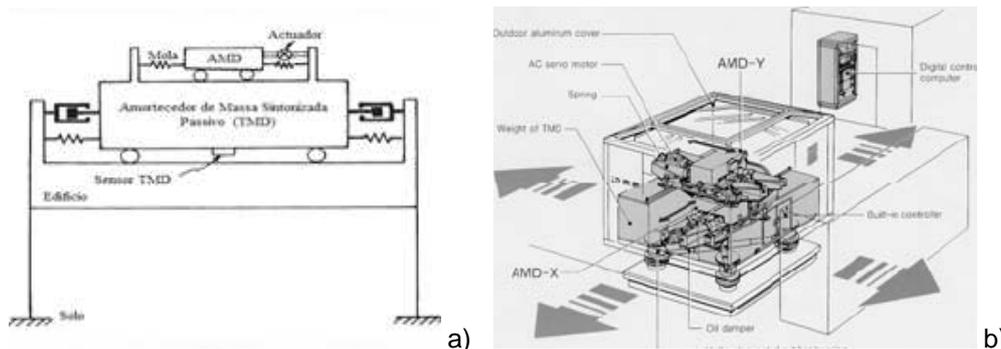


Figura 146 - Edifício Ando Nighikichon, Tóquio, Japão: a) Esquema de funcionamento 2D; b) esquema de funcionamento 3D [Soong e Spencer Jr., 2002].

Ensaio efectuados sobre a estrutura permitiram mostrar que este tipo de sistema de protecção apresenta uma grande eficiência, traduzindo um aumento de amortecimento para cerca de 6.4% na direcção X e de 8.5% na direcção Y, reduzindo os deslocamentos cerca de 58% e 30% nas direcções X e Y, respectivamente, e reduzindo as acelerações cerca de 69% e 52% nas direcções X e Y, respectivamente.

Outra estrutura que beneficia da instalação de sistemas de protecção híbridos corresponde à Osaka Resort City (ORC) 200 Symbol Tower, Osaka, Japão (Figura 147).

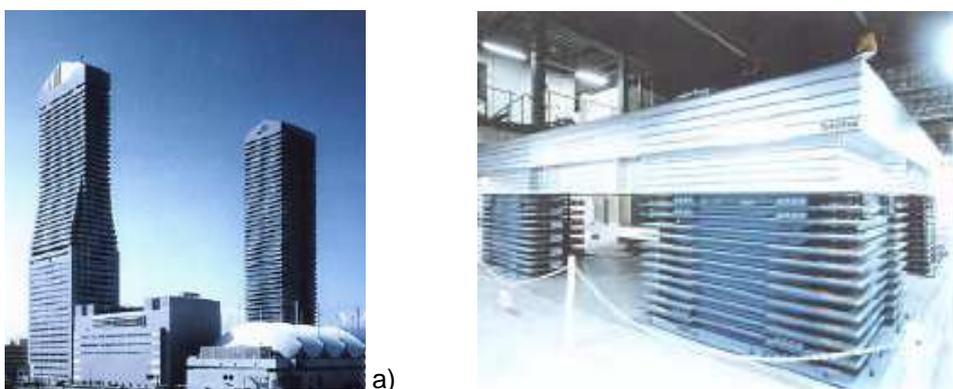


Figura 147 – Osaka Resort City (ORC) Symbol Tower, Osaka, Japão: a) Vista global do exterior; b) unidade de amortecedor híbrido de massa instalada [Kareem et. al, 1999].

No último piso desta estrutura foram colocados dois amortecedores híbridos de massa, com o objectivo de reduzir vibrações por torção e vibrações laterais na direcção transversal. Os sistemas colocados comportam-se como amortecedores híbridos de massa na direcção transversal e como amortecedores de massa sintonizados na outra direcção, cada um deles pesando cerca de 100 tons, com movimento permitido de  $\pm 1$ m e máxima força de controlo de cerca de 70kN.

Indicam-se ainda como implementações de sistemas de protecção híbridos em estruturas reais o pêndulo de dois níveis incluído no Hotel RIGHA Royal, Japão

(Figura 148) e os dois amortecedores híbridos de massa colocados na torre de controlo de tráfego aéreo do Aeroporto Internacional de Kansai, Japão (Figura 149).



Figura 148 – Hotel RIGHA Royal, Japão: a) Vista global do exterior; b) unidade de amortecedor híbrido de massa instalado [Kareem et. al, 1999].



Figura 149 – Aeroporto Internacional de Kansai, Kansai, Japão: a) Visão global do exterior; b) unidade de amortecedor híbrido de massa colocada na torre de controlo de tráfego aéreo [Kareem et. al, 1999].

### 2.3.2. Isolamento de Base Híbrido

Outra classe de sistemas de protecção híbrida francamente desenvolvida é a que corresponde ao isolamento de base híbrido. Esta classe, à semelhança da referida anteriormente, tem vindo a ser investigada pelos especialistas e pode ser frequentemente encontrada em sistemas de isolamento de base activo, consistindo na combinação de um sistema de isolamento de base passivo com um actuador de controlo que permita complementar o desempenho de um sistema puramente passivo.

Como é sabido, os sistemas passivos, em que se incluem os sistemas de isolamento de base, encontram-se limitados na sua capacidade de adaptação à

mudança de solicitações o que, com a adição de um dispositivo de controlo activo, pode ser alterado. Desta forma a adição de dispositivos de controlo activo permite que se possa atingir potencialmente um desempenho bastante superior sem aumento significativo ao nível dos custos.

De uma forma geral as vantagens de um sistema de isolamento de base híbrido compreendem a redução das vibrações resultantes de uma acção sísmica a cerca de 50% - 30% das vibrações originais da mesma estrutura.

Para além disso, e porque o movimento no sistema é muito ligeiro, dificilmente ocorrerão danos ao nível do equipamento no interior do edifício em que se encontram incluídos, sendo assegurado o funcionamento da estrutura.

O custo de instalação de um sistema de isolamento de base híbrido em estruturas novas corresponde a cerca de 3% dos custos totais de construção, enquanto que quando é instalado numa estrutura pré-existente existe uma redução significativa, quando comparada com outras estratégias de reabilitação e reforço, no tempo de trabalho para a sua implementação e nos custos associados.

Do ponto de vista ambiental, verifica-se também, aquando da implementação deste tipo de sistemas híbridos, uma redução dos resíduos dos produtos usados na construção.

Para implementação em estruturas reais é, à semelhança dos restantes sistemas de protecção sísmica, necessário que se efectuem estudos e testes de verificação e validação do seu desempenho. Indicam-se a título exemplificativo os trabalhos de variados autores [Riley et. al, 1998] [Chang et. al., 2002] [Lin et. al, 2003] [Lin et. al, 2007].

No primeiro caso [Riley et. al., 1998] foi ensaiado um sistema híbrido constituído por apoios deslizantes combinados com um actuador ligado entre a fundação e a base da estrutura.

A Figura 150 e a Figura 151 representam a estrutura ensaiada com sistema de isolamento híbrido ao nível da base e um detalhe do sistema de isolamento híbrido, respectivamente.

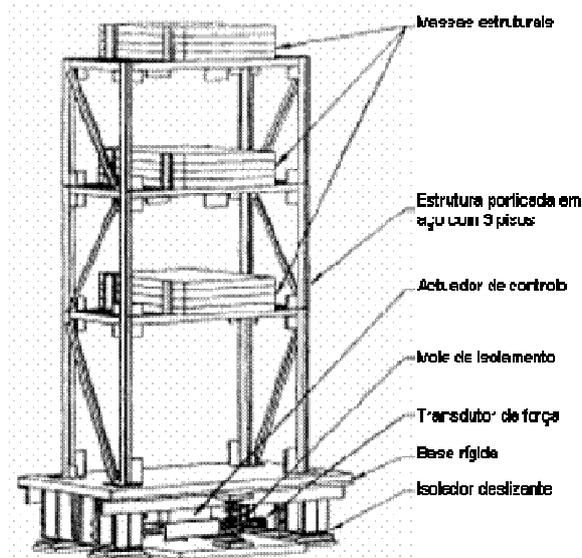


Figura 150 – Estrutura ensaiada, adaptado de [Riley et. al, 1998].

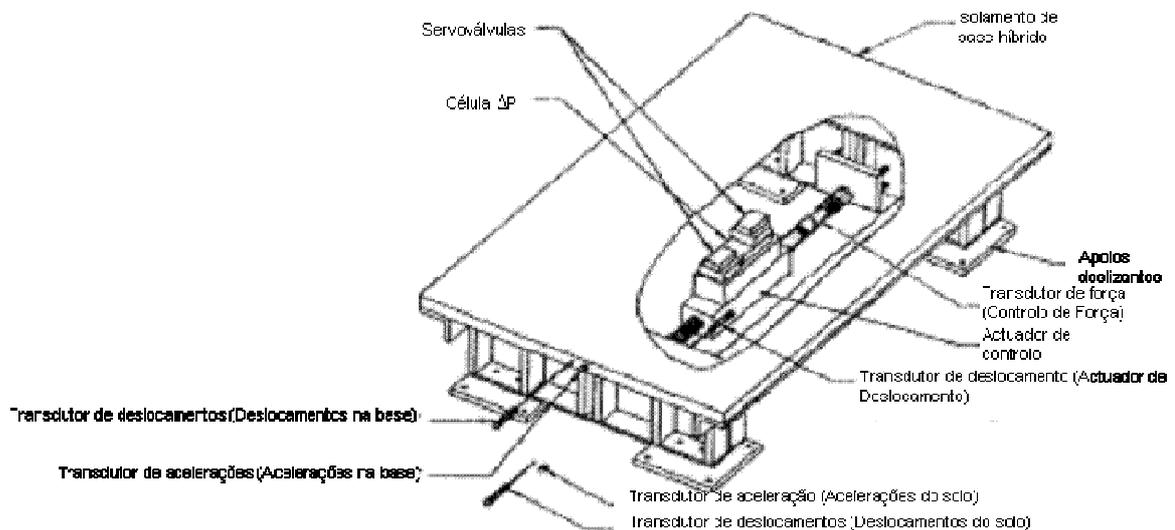


Figura 151 – Sistema de isolamento de base híbrido constituído por apoios deslizantes (passivo) e um actuador (activo), adaptado de [Riley et. al, 1998].

Os resultados mostram que o sistema de controlo incluído permite a redução significativa da resposta em termos de valores de pico e da energia imposta, provando que muitos dos problemas de implementação de algumas tecnologias de protecção sísmica podem ser superados por meio da inclusão de sistemas de controlo adequadamente concebidos ou de outros dispositivos de protecção resultantes da evolução científico-tecnológica [Riley et. al, 1998].

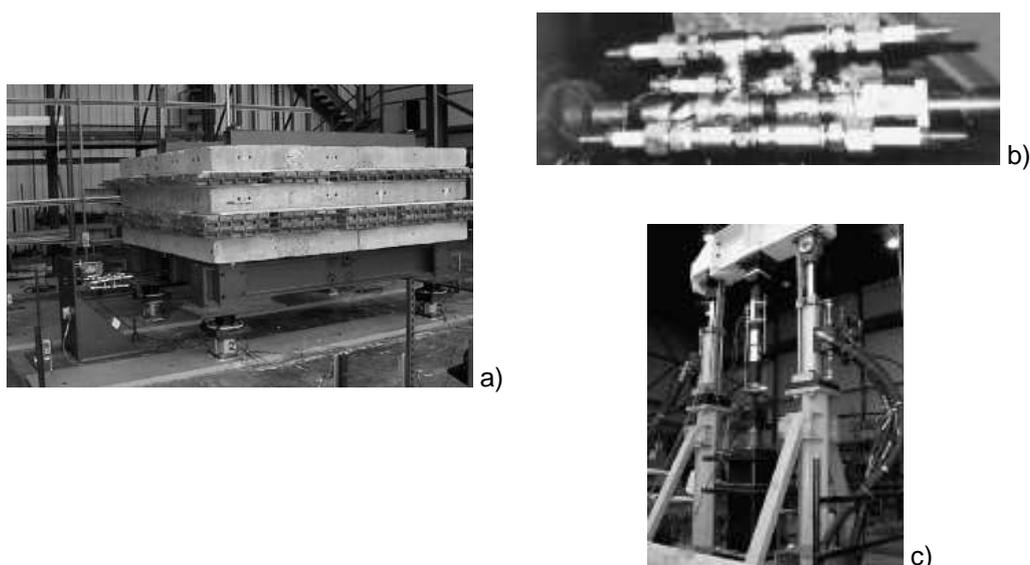
Foi escolhido para o efeito um sistema de controlo não-linear, ideal para a avaliação de muitas questões de ordem prática, para além disso os resultados obtidos desta situação em particular são aplicáveis a uma panóplia de sistemas activos e híbridos. O trabalho desenvolvido permitiu concluir, com base em modelos experimentais realistas, a validade dos algoritmos de controlo não-lineares. Mesmo

contabilizando as limitações físicas e imperfeições existentes, estes sistemas de controlo podem permanecer estáveis e eficazes em implementações em estruturas reais [Riley et. al., 1998].

Refere-se ainda que os resultados obtidos experimentalmente permitem provar que os sistemas de isolamento de base híbrido podem ser usados na redução da resposta estrutural, fornecendo mais protecção à estrutura em que se encontram incluídos e aos seus conteúdos.

Os sistemas de isolamento de base híbrido reduzem a resposta estrutural em termos de deslocamentos relativos, forças de corte basal e energia acumulada na estrutura. O desempenho dos sistemas híbridos é superior ao do isolamento sísmico passivo, sendo esta superioridade no entanto resultante de se estar em presença de um sistema muito mais complexo.

Um programa experimental extenso que se focalizou no estudo da resposta de pontes protegidas por sistemas de isolamento de base híbridos foi também conduzido na Universidade de Berkeley [Chang et. al, 2002]. Estes sistemas híbridos (Figura 152a) compreendiam duas componentes passivas: apoios de isolamento e dispositivos de amortecimento suplementares. Estes últimos correspondiam a dois tamanhos de amortecedores de fluido viscoso (Figura 152b e Figura 152c), que apresentavam uma lei de variação da força proporcional à velocidade.



*Figura 152 – Sistema de isolamento de base híbrido ensaiado na Universidade de Berkeley: a) Dispositivo de ensaio, b) amortecedores de fluido viscoso pequenos e c) amortecedores de fluido viscoso grandes [Chang et. al, 2002].*

Referem-se também os estudos desenvolvidos sobre um dispositivo híbrido (Figura 153) que combina um sistema em pêndulo com um dispositivo semi-activo do tipo amortecedor de fluido magnetoreológico. Os objectivos principais do estudo prenderam-se com a exploração da simplicidade e da fiabilidade de sistemas de isolamento de base tradicionais ligados com outros dispositivos, também de elevada fiabilidade, mas que apresentam a particularidade de mudarem de características muito rapidamente.

Um amortecedor magnetoreológico assemelha-se muito com os amortecedores viscosos lineares ordinários, exceptuando que o cilindro do dispositivo se encontra preenchido com um fluido especial que contém partículas polarizadas muito pequenas.

A viscosidade do fluido pode ser modificada muito rapidamente de líquido a semi-sólido ou vice-versa. O rápido ajuste do amortecedor magnetoreológico ao ambiente envolvente permite que o sistema de isolamento de base híbrido apresente um desempenho seguro para um vasto espectro de solicitações sísmicas próximas ou afastadas.

O pêndulo corresponde ao apoio do sistema, permitindo uma força de restituição adequada com um mínimo de fricção ou atrito. Idealmente as forças de atrito devem ser eliminadas, criando um sistema de isolamento sem atrito, no entanto, e sabendo que as situações ideais são extremamente difíceis de alcançar, as imperfeições presentes no sistema podem originar respostas indesejáveis.

Paralelamente ao pêndulo funciona um amortecedor magnetoreológico semi-activo que fornece a força de amortecimento necessária, sendo controlado em deslocamentos e acelerações (*Fuzzy control*). Este tipo de estudo prova que uma combinação de um sistema de isolamento puramente passivo, como é o caso do pêndulo de fricção, com um dispositivo semi-activo ajustável, como é o caso do amortecedor magnetoreológico, podem proporcionar o controle robusto de vibrações em grandes estruturas de engenharia civil que necessitem de protecção face a uma vasta gama de acções sísmicas.

Este tipo de sistema permite, para além da elevada fiabilidade identificada, um baixo consumo de energia associado ao controlo e um elevado nível de dissipação de energia [Lin et. al, 2003].



Figura 153 – Sistema híbrido de isolamento de base constituído por um conjunto de pêndulo (passivo) e amortecedor magnetoreológico (semi-activo) – Dispositivo de ensaio

Mais recentemente os mesmos autores [Lin et. al, 2007] desenvolveram estudos sobre um sistema híbrido (Figura 154) constituído por um sistema de isolamento de base convencional, do tipo apoios elastoméricos de elevado amortecimento (HDRB), e um amortecedor magnetoreológico sujeito a três tipos de controlo diferentes (em deslocamentos, velocidades e acelerações).

Os ensaios experimentais mostraram que a componente passiva do sistema (HDRB) permite a redução das acelerações absolutas da massa, mas permitem também deslocamentos bastante elevados. Se os deslocamentos observados excederem as especificações de dimensionamento, que podem ocorrer em situações de acções sísmicas gravosas, o sistema de isolamento pode entrar em colapso e falhar.

Como resultado o amortecimento adicional fornecido por um amortecedor magnetoreológico semi-activo é preciso no controlo de deslocamentos. Os benefícios da adição de um amortecedor magnetoreológico a um sistema de isolamento de base são claros e evidentes, especialmente para a protecção contra sismos violentos [Lin et. al, 2007].

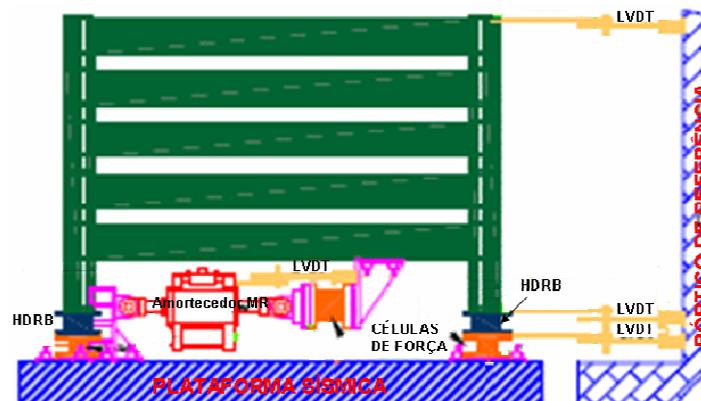


Figura 154 – Sistema híbrido de isolamento de base constituído por um conjunto de apoios elastoméricos (passivo) e amortecedor magnetoreológico (semi-activo) – Dispositivo de ensaio com identificação

Como exemplos de implementação deste tipo de sistemas de protecção sísmica em estruturas reais refere-se o incluído num edifício de escritórios com 130m de altura (Figura 155a) e localizado em Umeda, Osaka, Japão.

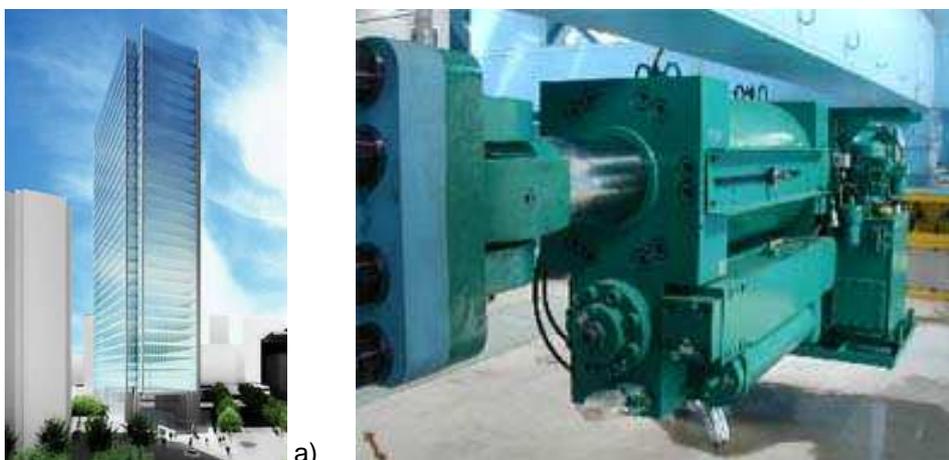


Figura 155 – Edifício de escritórios, Osaka, Japão: a) Vista global do exterior [Takenaka, 2001] e b) amortecedor multifunções [Takenaka, 2001].

Nesta estrutura, cuja construção foi concluída em finais de 2002, foi colocado um sistema de isolamento de base híbrido constituído por diferentes tipos de apoios lineares (Figura 156a) e elastoméricos com núcleo de chumbo (Figura 156b), que lhe conferem a capacidade de suporte a cargas verticais, de deformação horizontal e de amortecimento, associados com amortecedores multifunções (Figura 155b) que lhe conferem um grau adicional de amortecimento [Takenaka, 2001].

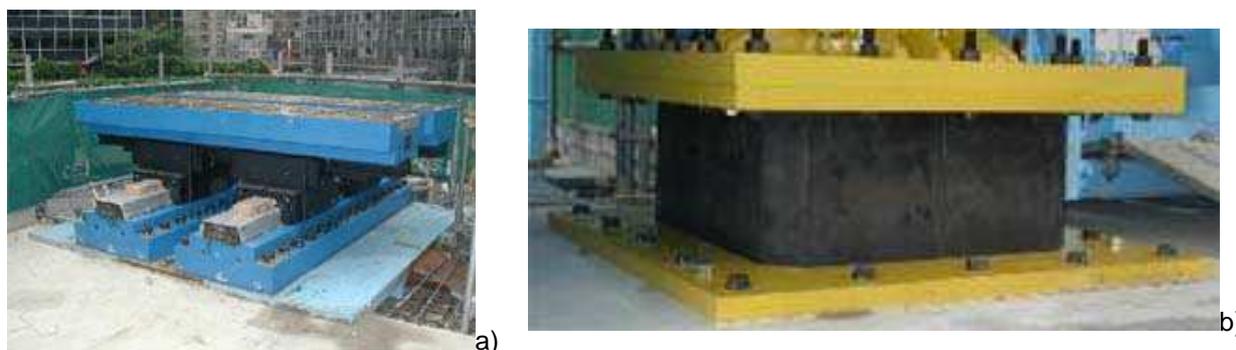


Figura 156 – Edifício de escritórios, Osaka, Japão: a) Apoio linear [Takenaka, 2001]; b) apoio elastomérico com núcleo de chumbo [Takenaka, 2001].

### 2.3.3. Amortecedores de Fluido Viscoso com Actuador Hidráulico

Outro tipo de dispositivo para a protecção semi-activa de estruturas corresponde a um sistema combinado que compreende um amortecedor de fluido viscoso e um sistema de controlo activo com um actuador hidráulico e sensores de

aceleração. Este sistema foi objecto de extensos estudos experimentais [Chang e Jiang, 1998] [Zhang et. al., 2006], tendo para o efeito sido incluído numa estrutura metálica (Figura 157), ligado a dois níveis consecutivos por meio de um sistema de contraventamento.

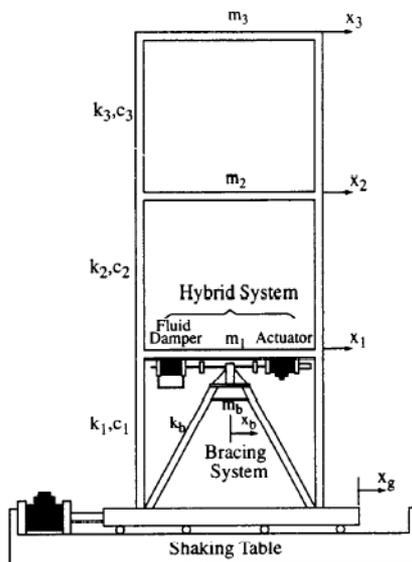


Figura 157 – Esquematização de colocação de um protótipo de um sistema híbrido constituído por um amortecedor de fluido viscoso e um actuador hidráulico activo [Cheng e Jiang, 1998].

Tanto a estrutura do amortecedor viscoso como do actuador activo são ligadas ao chão do modelo estudado, enquanto que os êmbolos dos pistões dos dois dispositivos se encontram soldados aos elementos de contraventamento.

Para esta circunstância a estratégia de controlo definida deverá garantir o equilíbrio entre uma situação em que se maximiza o funcionamento do dispositivo passivo (amortecedor viscoso) e em que se minimiza a energia do sistema activo (contraventamento com actuador hidráulico).

Em certas situações [Zhang et. al., 2006] é possível dimensionar o sistema passivo para sismos de magnitude pequena a moderada e o controlador activo para ser disparado e funcionar plenamente para solicitações sísmicas de magnitude elevada, sempre que a resposta da estrutura onde se encontra inserido ultrapasse um determinado patamar (por exemplo em deslocamentos) pré-definido.

No entanto, se assim for conveniente, podem-se definir mais patamares, identificando-se, neste caso, de uma forma clara e distinta zonas de activação e funcionamento apenas do elemento passivo, do conjunto elemento passivo + actuador activo ou, fundamentalmente, do actuador activo.

Quando funciona o conjunto elemento passivo + actuador activo este último gera uma força que combinada com a força gerada no elemento passivo permite manter os deslocamentos na estrutura dentro de um determinado limite. Se a resposta da estrutura superar o limite anterior, o sistema híbrido ajusta de uma forma automática o funcionamento do actuador activo gerando uma força controlo mais elevada compatível com uma redução eficaz da resposta estrutural.

Os resultados obtidos dos estudos experimentais referidos permitiram concluir que, de facto, o sistema híbrido é mais eficiente que o correspondente dispositivo passivo e que comparando com o elemento activo o funcionamento e eficácia são semelhantes, embora necessitando de um fornecimento de energia muito inferior. [Oliveira, 2009] As vantagens da implementação deste tipo de sistema híbrido ficam assim comprovadas.

## **2.4. Sistemas Semi-Activos**

Na sequência de estudos exaustivos sobre os sistemas de protecção passiva e activa, os investigadores tem vindo a estudar e a desenvolver uma nova geração de dispositivos de controlo: os denominados sistemas de controlo semi-activo, que combinam as melhores características de outros dispositivos afins.

Possuindo a adaptabilidade dos sistemas activos, sem a tendência para a instabilidade, os sistemas semi-activos podem responder de uma forma rápida e instantânea a rajadas de vento súbitas ou a acções sísmicas e proporcionar um amortecimento independente do nível de excitação, contrariamente aos sistemas puramente passivos que funcionam, na maioria das vezes, com níveis de amortecimento não-óptimos.

Trabalhos anteriores revelam que os sistemas semi-activos permitem que atingir os níveis de desempenho obtidos pelos sistemas activos sem o risco de instabilização ou necessidade de fornecimento de grande quantidade de energia [Spencer e Sain, 1997].

Dado que os dispositivos não introduzem qualquer quantidade de energia mecânica no sistema, as necessidades energéticas são relativamente baixas, garantindo que o sistema pode continuar operacional mesmo em situações de

solicitações extremas, como é o caso das acções sísmicas, com fornecimento de energia por meio de baterias [Kareem et. al, 1999]

Um sistema de controlo semi-activo pode ser definido como um sistema que requer uma pequena fonte de energia para operar e utiliza o movimento da estrutura para desenvolver forças de controlo, com intensidades ajustáveis por intermédio de uma fonte de energia externa. As forças de controlo são desenvolvidas com base na resposta de sensores que medem o nível de excitação ou capacidade de resposta da estrutura (Figura 158).

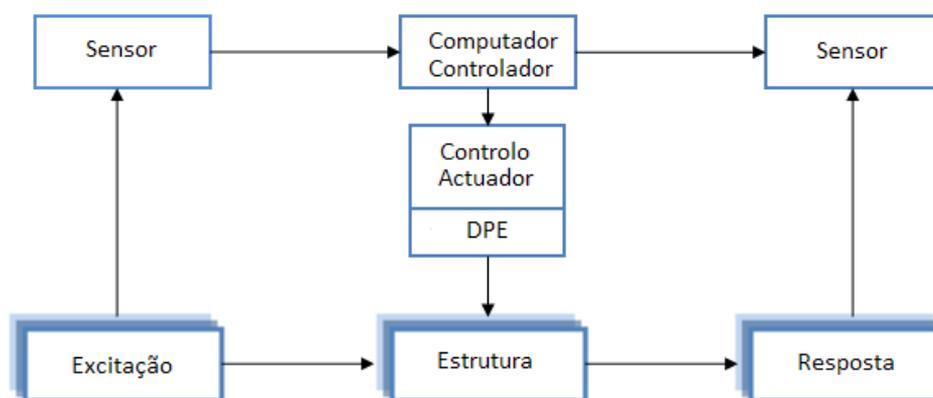


Figura 158 - Esquema de funcionamento de estrutura com sistema de protecção semi-activa, adaptado de [Spencer Jr. e Soong, 1999].

Só muito recentemente é que os sistemas de controlo semi-activos foram considerados para aplicações de controlo estrutural. Genericamente, um sistema de controlo semi-activo tem a sua origem num sistema de controlo passivo, que foi subsequentemente modificada para permitir o ajustamento das suas propriedades mecânicas. Por exemplo, dissipadores de energia que dissipem energia, ou por intermédio de deformação de líquidos viscosos, ou por intermédio da passagem de água por orifícios, ou através de fricção pendular, foram modificados com o intuito de se comportarem como semi-activos.

Tal como um sistema de controlo activo, é o controlador que monitoriza a resposta dos sensores e gera um sinal para o dispositivo semi-activo. No entanto, tal como os sistemas de controlo passivo, as forças de controlo são desenvolvidas como resultado do movimento da própria estrutura. As forças de controlo desenvolvidas resultam de um ajustamento apropriado (baseado no algoritmo de controlo pré-determinado) das propriedades mecânicas do sistema de controlo semi-activo. Além disso, as forças de controlo em muitos dos sistemas de controlo semi-activo, actuam primeiro em oposição ao movimento do sistema estrutural e assim promovem uma estabilidade global da estrutura.

Os sistemas de protecção semi-activa pertencem a uma determinada classe de sistemas activos para a qual os requisitos de energia externa são insignificantes. A atenção merecida por este tipo de dispositivos nos últimos anos pode ser atribuída ao facto de apresentarem a grande adaptabilidade dos dispositivos de protecção activa, sem requererem as grandes fontes de energia associadas [Spencer Jr e Sain, 1997] e, ainda, o de apresentarem uma elevada fiabilidade à semelhança do que acontece com os sistemas passivos.

As estratégias de controlo baseadas em dispositivos semi-activos surgem como uma forma de combinar as características fundamentais tanto dos sistemas de protecção passivos como dos activos, obtendo-se tecnologias de controlo altamente viáveis para a protecção de sistemas estruturais em engenharia civil contra acções sísmicas e do vento [Spencer Jr e Sain, 1997].

Tipicamente um sistema semi-activo não pode adicionar energia mecânica ao sistema estrutural, como tal limitados o *input* (ou entrada) e o *output* (ou saída) a estabilidade é garantida e o sistema passa a ser controlado como os sistemas passivos.

Os sistemas semi-activos necessitam apenas de uma pequena porção de energia externa para operarem e utilizam o movimento gerado na estrutura para desenvolver as forças de controlo [Symans e Constantinou, 1999]. Como tal, e por contraste com os dispositivos de protecção activos, os dispositivos de protecção semi-activos não potenciam a instabilização dos sistemas estruturais.

Estudos preliminares indicam que sistemas de protecção semi-activos implementados de uma forma apropriada apresentam um desempenho significativamente melhor do que sistemas passivos e permitem que se atinja quase a totalidade do desempenho de sistemas totalmente activos, permitindo a redução efectiva da resposta da estrutura durante a mobilização de um amplo conjunto de condições de solicitações dinâmicas [Spencer Jr e Sain, 1997].

Os sistemas de protecção semi-activos foram propostos pela primeira vez durante os anos 20, por meio de uns absorvedores de choque que utilizavam massas suportadas elasticamente para activar as válvulas hidráulicas do sistema não necessitando de forças externas ou válvulas solenoidais para direccionar o escoamento do fluido dentro do amortecedor [Karnopp et al. 1974] [Karnopp et al., 1975].

De forma a reduzir a resposta das estruturas face uma determinada acção sísmica, tem vindo a ser implementados alguns sistemas de controlo semi-activo, principalmente devido ao facto de serem bastante práticos [Kobori, 1998] e permitirem uma melhor percepção e controlo do que efectivamente acontece. Importa não esquecer que alguns sistemas denominados de activos na literatura, como sejam os sistemas activos de amortecimento e rigidez variável, não são mais do que dispositivos de protecção semi-activa [Kobori, 1998].

Existem fundamentalmente dois tipos de dispositivos semi-activos: aqueles que são constituídos por fluidos especiais com características controláveis e aqueles que utilizam um sistema mecânico para modificar o comportamento do dispositivo de controlo. Os dispositivos semi-activos podem então ser classificados, de acordo com o esquematizado na Figura 159, em [Kurata et al., 1999]:

- i) Amortecedores semi-activos de fluído controlável (*Semi-active controllable fluid dampers*);
- ii) Amortecedores de fricção controlável (*Controllable friction dampers*);
- iii) Amortecedores de rigidez variável (*Variable stiffness Dampers*);
- iv) Amortecedores viscosos (*Semi-active viscous dampers*);
- v) Amortecedores Semi-activos de Massa e de Líquido Sintonizado (*Semi-active Tuned Mass Dampers e Semi-active Tuned Liquid Dampers*);
- vi) Amortecedores hidráulicos (*Hydraulic Dampers*).

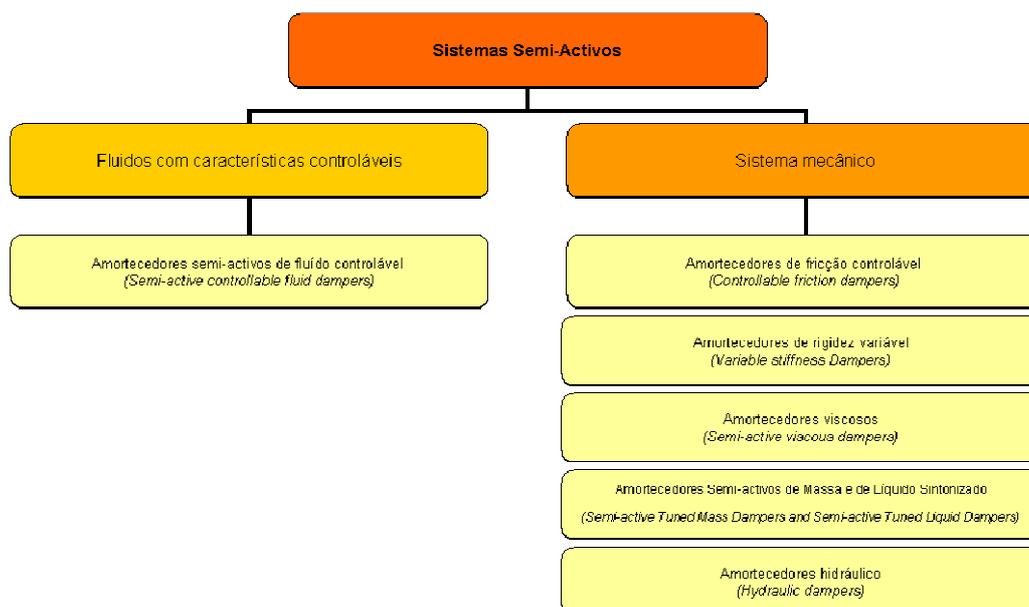


Figura 159 – Tipos de sistemas semi-activos

Com a primeira aplicação em estruturas reais proposta em início da década de 80 [Hrovat et. al., 1983], os dispositivos de protecção semi-activa são soluções de protecção dinâmica com futuro promissor. Actualmente existe já um volume considerável de investigação ao nível das aplicações deste tipo de dispositivos nos mais diversos campos da engenharia.

#### **2.4.1. Amortecedores de Fluido Controlável**

A motivação subjacente ao desenvolvimento de fluidos controláveis em aplicações semi-activas foi em parte resultado muito directo das tentativas infrutíferas de utilização de válvulas que respondessem suficientemente depressa para regular os dispositivos semi-activos com orifício de uma forma eficiente e eficaz. Dado que estes modelos de fluido controlável não necessitam de elementos móveis, como as referidas válvulas, foram encarados como uma tecnologia viável para aplicação em estruturas de engenharia civil.

Actualmente encontram-se a ser estudadas duas formas de amortecedores de fluido controlável: os amortecedores Electrorreológicos (*electrorheologic dampers*) [Stevens et. al, 1984] [Gavin e Hanson, 1994] [Morishita e Mitshi, 1992] [Ehrgott e Marsi, 1993] [Morishita e Ura, 1993] [Makris et. al., 1995] e os amortecedores magnetoreológicos (*magnetorheologic dampers*) [Spencer et. al, 1996], que são capazes de produzir um desempenho de controlo comparável aos sistemas activos, mas sem os requisitos energéticos nem mesmo o risco potencial envolvido na introdução de energia adicional ao sistema. Estes são pois dispositivos que utilizam, respectivamente, materiais electrorreológicos ou magnetoreológicos na sua constituição. Estes materiais têm capacidade de mudar de um estado de fluido viscoso com escoamento livre para um estado semi-sólido numa questão de mili-segundos quando sujeitos a campos eléctricos ou magnéticos.

O fluido no interior do aparelho é constituído por micro-partículas não coloidais (Figura 160a), polarizadas magneticamente ou electricamente, dispersas em mineral ou óleo de silicone. Quando um campo magnético ou um campo eléctrico é aplicado, são formadas cadeias de partículas alinhadas com a direcção do campo imposto (Figura 160b) que restringem o movimento do fluido, dando-se uma mudança repentina no comportamento reológico do fluido e este torna-se num semi-sólido, exibindo comportamento visco-elásticos [Soong, et al., 2002].

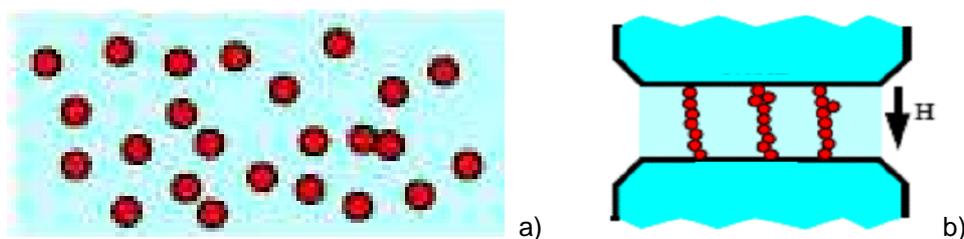


Figura 160 - Comportamento dos fluidos magnetoreológicos e electroreológicos: a) sem campo aplicado e b) com campo aplicado, adaptado de [Yang, 2001].

A característica essencial destes fluidos é a capacidade da mudança reversível de líquido viscoso com escoamento livre linear para semi-sólido com uma tensão de cedência controlável em milisegundos [Serino, 2002].

A intensidade do campo magnético e do campo eléctrico podem ser controladas por meio de um algoritmo adequado, produzindo as forças de amortecimento necessárias para melhorar o comportamento dinâmico do sistema. No entanto, o seu funcionamento pode assemelhar-se ao funcionamento de um dispositivo de fluido viscoso se por qualquer razão não for fornecida corrente a uma bobine que se encontra enrolada em torno da cabeça do pistão.

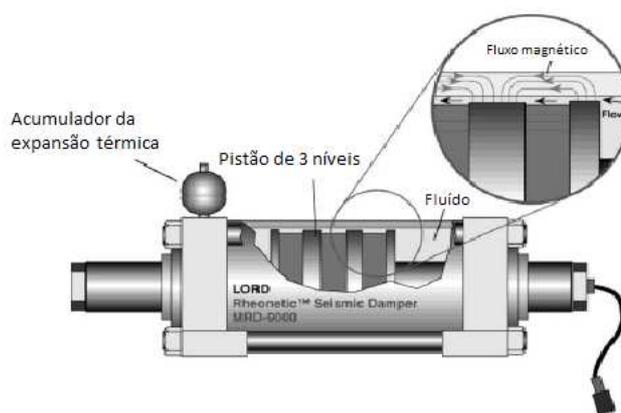


Figura 161 - Amortecedor de fluido controlável do tipo magnetoreológico, adaptado de [Spencer Jr. e Soong, 1999].

Nos últimos anos tem vindo a ser concebidas e desenvolvidas as mais diversas aplicações deste tipo de materiais, nomeadamente em amortecedores, embraiagens e travões aplicáveis nos mais diversos domínios da engenharia. O fornecimento deste tipo de fluidos já se encontra disponível no mercado, sendo fornecido por algumas empresas dedicadas à área dos sistemas de protecção, salientando-se a Lord [Lord, 2008].

Um aparelho com fluidos magnetoreológicos ou electroreológicos tem a vantagem de não possuir partes amovíveis além do pistão, o que torna estes aparelhos bastante seguros, simples e fiáveis.

Recentemente, os fluidos electoreológicos tem vindo a ser preteridos relativamente aos fluidos magnetoreológicos, uma vez que o seu desempenho é geralmente limitado pela quebra do campo eléctrico enquanto que para os fluidos magnetoreológicos o desempenho depende da máxima saturação magnética da partícula.

É importante referir ainda que as partículas de ferro são aquelas que apresentam a maior capacidade de saturação magnética, o que as torna excelentes para incluírem os fluidos magnetoreológicos. Para além disso salienta-se ainda que os fluidos magnetoreológicos apresentam uma tensão de cedência cerca de 20 a 50 vezes do que a tensão de cedência dos fluidos electoreológicos [Casciati et. al, 2006]. Para ambos os tipos de fluido a tensão de cedência cresce, numa razão directa, com a intensidade do campo aplicado [Symans e Constantinou, 1999].

Além disso, têm vindo a ser provado que, os fluidos magnetoreológicos apresentam resposta muito rápida, sendo por isso particularmente adequados para as aplicações semi-activas da engenharia sísmica [Serino, 2002]. Apresentam ainda como característica o facto de suportarem temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$  com pequenas variações nas tensões de cedência, e de poderem ser controlados com baixa voltagem (12-24V) com uma corrente eléctrica de 1 a 2 amperes [Soong Spencer Jr., 2002].

O comportamento dos fluidos magnetoreológicos no interior dos dispositivos semi-activos correspondentes e as correspondentes forças de amortecimento podem ser simulados por intermédio de modelos fenomenológicos, referindo-se a:

- i) Um modelo composto por elementos viscosos e de atrito em paralelo [Ruangrassamee, 2002];
- ii) Um modelo Bingham de viscoplasticidade, que consiste num elemento de fricção de Coulomb em paralelo com um amortecedor linear de funcionamento viscoso [Symans e Constantinou, 1999];
- iii) Um modelo melhorado constituído por um arranjo entre molas lineares, amortecedores lineares viscosos e um elemento histirético de Bouc-Wen [Symans e Constantinou, 1999].

Adicionalmente, e uma vez que não existe qualquer força de controlo directamente aplicada à estrutura pelo dispositivo mas somente o ajuste da resistência

do dispositivo, a instabilidade associada ao controlo não ocorre, sendo necessária apenas uma reduzida quantidade de energia, o que torna dispositivos semi-activos de fluido magnetoreológico muito fiáveis [Chang e Roschke, 1998].

Em estudos recentes a eficácia de dispositivos de fluido magnetoreológico (Magnetorheological Dampers) como parte integrante de sistemas de protecção de edifícios face à ocorrência de acções sísmicas tem vindo a ser demonstrada tanto experimental como analiticamente.

Os amortecedores magnetoreológicos não são mais do que dispositivos semi-activos que oferecem uma combinação promissora de características desejáveis, tornando-os uma escolha atractiva para aplicações ao nível da engenharia civil. Para além disso são dispositivos que requerem um mínimo de energia, podem responder rapidamente a mudanças ao nível dos dados fornecidos, geralmente espera-se que sejam pouco dispendiosos, e são considerados como bastante fiáveis porque apresentam poucas partes móveis.

As primeiras investigações experimentais focaram-se na utilização de apenas um amortecedor magnetoreológico no controlo de uma estrutura de vários pisos. No final da década de 90 efectuaram-se ainda testes num amortecedor magnetoreológico de 20ton colocado na Universidade de Notre Dame, que demonstrou que estes dispositivos podem fornecer forças da magnitude esperada para aplicações ao nível do controlo estrutural à escala real [Spencer et al., 1996] [Spencer et al., 1997a] [Spencer et al., 1997b].

No entanto, e por que estes dispositivos serem altamente não lineares, um dos principais desafios na aplicação desta tecnologia é o desenvolvimento de algoritmos de controlo adequados. No seguimento destas observações foi desenvolvido um algoritmo de controlo optimizado revisto baseado em registos passados das acelerações para ser usado conjuntamente com este tipo de amortecedor. Posteriormente têm sido efectuadas investigações analíticas que estenderam esta aproximação optimizada ao caso em que se empregam amortecedores múltiplos [Yi et al., 1998].

Podem-se encontrar aplicações práticas deste tipo de dispositivos na generalidade dos lares nas suspensões das máquinas de lavar (Figura 162) ao nível da engenharia automóvel, nas suspensões dos veículos onde os amortecedores tradicionais são substituídos por amortecedores magnetoreológicos (Figura 163) com características adaptáveis a diversas condições de funcionamento [Delphi, 2005], e da

engenharia civil, em pontes de tirantes (Figura 164) para mitigação de vibrações excessivas nos tirantes e em estruturas de edifícios (Figura 165).

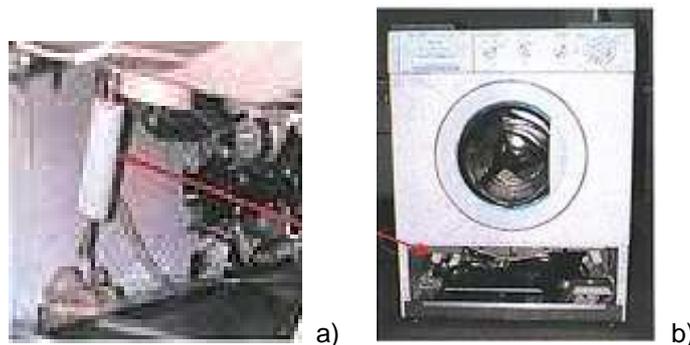


Figura 162 - Implementação de amortecedor de fluido controlável magnetoreológico em máquinas de lavar: a) Detalhe do dispositivo colocado [NASA, 2009] e b) estrutura com dispositivo colocado [NASA, 2009]



Figura 163 - Implementação de amortecedor de fluido controlável Magneo-reológico na indústria automóvel: a) Detalhe do dispositivo colocado [IMAGES GOOGLE, 2009] e b) Chevrolet Corvette [IMAGES GOOGLE, 2009]



Figura 164 - Implementação de amortecedor de fluido controlável magnetoreológico em pontes: a) Detalhe do dispositivo colocado [DTL, 2009] e b) Ponte Dong Ting Lake, China [DTL, 2009]

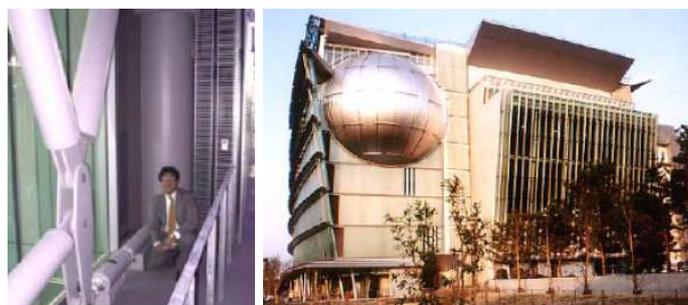


Figura 165 - Implementação de amortecedor de fluido controlável do tipo magnetoreológico em estruturas de edifícios: a) Detalhe do dispositivo colocado [DTL, 2009] e b) Nihon-Kagaku-Miraikan Museum, Japão [DTL, 2009]

Para além destas soluções começam também a emergir soluções híbridas com isolamento de base (Figura 166)



Figura 166 - Implementação de solução híbrida entre amortecedor de fluído controlável magnetoreológico e isolamento de base em estruturas de edifícios: a) detalhe do dispositivo colocado [Fujitani et. al, 2003] e b) exemplo de aplicação [Fujitani et. al, 2003]

#### 2.4.2. Amortecedores de fricção controlada

Os amortecedores de fricção controlada (*Controllable Friction Dampers*) utilizam analogamente aos correspondentes dispositivos passivos, a força gerada pela fricção entre duas superfícies para dissipar a energia de excitação. A força de fricção gerada resulta do produto entre o coeficiente de fricção e a reacção normal, podendo o comportamento ideal de um amortecedor de fricção controlada assemelhar-se ao de um elemento de Coulomb.

$$F = \mu F_N(t) \text{sen}(\dot{x}) \quad (6)$$

A energia dissipada por ciclo de movimento é controlada pela reacção normal do dispositivo e só acontece após o ponto de escorregamento, isto é, quando os dois corpos começam a escorregar um relativamente ao outro. Este ponto específico é controlado pela força normal imposta, que deverá ser função do tipo de movimento induzido. Antes deste ponto de escorregamento ser alcançado o dispositivo só introduz rigidez ao sistema, enquanto que após ser atingido é produzido um ciclo histérico que permite a dissipação de energia [Oliveira, 2009].

Desta forma, considerando situações em que ocorrem excitações reduzidas verifica-se que a reacção normal se encontra a níveis muito elevados e o dispositivo não é accionado, enquanto que em circunstâncias em que se verifique que a reacção normal é reduzida surgem grandes deslocamentos mesmo para

pequenas excitações [Nishitani et. al, 2000]. O efeito de amortecimento que o dissipador fornece ao sistema estrutural é do tipo histirético [Nishitani et. al, 2000].

Este tipo de dispositivos semi-activos é frequentemente utilizado como amortecedores energéticos sem contraventamento lateral em estruturas ou como componentes em sistemas de isolamento deslizantes [Symans e Constantinou, 1999]. Outros autores [Akbay e Aktan, 1990] [Akbay e Aktan, 1992] [Fujii e Feng, 1992] [Dowdell e Cherry, 1994] [Fujita et. al., 1994] [Pandya, 1996] [Gavin et. al, 2001] têm vindo a investigar este género de dispositivos para implementação na protecção sísmica de estruturas.

Já em 1990 foi proposto por Akbay e Aktan [Akabay e Aktan, 1990] [Akabay e Aktan, 1992] um sistema de contraventamento por fricção resultante de escorregamento, enquanto que em 1992 Feng investigou um sistema de isolamento híbrido – o chamado sistema de fricção por escorregamento controlável – que foi desenvolvido usando apoios de fricção controlável [Fujii e Feng, 1992].

Posteriormente, Dowdell e Cherry [Dowdell e Cherry, 1994] propuseram um amortecedor de fricção com força de escorregamento variável e ainda um amortecedor de fricção *on-off*.

Hirai, Naruse e Abiru [1996] fizeram investigações ao nível de um tipo particular de CFD com recurso à utilização de actuadores piezoeléctricos. Foi ainda observado que estes últimos sistemas apresentam uma grande eficácia, para sismos que apresentem uma larga gama de intensidades, comparativamente com situações em que foram aplicadas medidas convencionais de protecção passiva [Gavin, et al., 2001].

Mais recentemente foi proposto um sistema deste tipo para o controlo da resposta de estruturas de vários graus de liberdade. No sistema proposto o amortecedor ajusta a sua reacção normal com o objectivo de manter um factor de ductilidade constante, definido como a razão entre o nível de deslocamentos por escorregamento.

O estudo incluiu um programa de simulações numéricas de uma estrutura representativa de um edifício real com três pisos, para a qual foram obtidos excelentes resultados de desempenho, nomeadamente ao nível da redução da resposta estrutural.

### 2.4.3. Amortecedores de rigidez variável

Um amortecedor de rigidez variável apresenta a capacidade de modificar a sua rigidez e, por consequência, as características fundamentais de vibração dos sistemas estruturais em que se encontram incluídos. Tais sistemas tem vindo a ser estudados para o controlo de resposta sísmica de estruturas [Kobori et al., 1993] [Nemir et al., 1994], [Loh e Ma, 1994], [Yamada e Kobori, 1995], [Yang et al., 1996] [Nagarajaiah, 1997].

A título de exemplo, indica-se o estudo efectuado por Kobori et al. [1993] no qual é referido que o principal objectivo do sistema passa pelo controle da rigidez do edifício, com o objectivo de estabelecer a condição de não-ressonância durante um sismo.

O principal objectivo de fazer variar a rigidez do dispositivo de protecção está relacionado com o facto de se pretender evitar uma ressonância e, como tal, prevenir contra respostas estruturais negativas. Da relação entre frequência, massa e rigidez para um sistema de um grau de liberdade podem-se obter conclusões muito concisas acerca da influência da alteração da rigidez na frequência fundamental de vibração, uma vez que existe uma dependência directa entre rigidez e frequência. Desta forma, e escolhendo um algoritmo de controlo adequado, é possível melhorar o comportamento dinâmico de estruturas reais introduzindo ou retirando rigidez ao dispositivo [Oliveira, 2009].

Em sistemas de rigidez variável geralmente o método utilizado consiste em criar instantaneamente restrições em pontos críticos, que corresponde precisamente àqueles em que se colocam os dispositivos de rigidez variável. Referem-se como elementos usados alguns tipos de juntas especiais, certos tipos de contraventamento e molas [Sanchez e Suarez, 2005].

Tratando-se de dispositivos de rigidez variável, podem funcionar com rigidez nula ou com um valor de rigidez máxima, sendo o seu funcionamento para diferentes níveis de rigidez alcançado por meio da ligação ou da libertação sucessiva de determinados elementos constituintes do próprio dispositivo [Medeot, R; 2000].

É possível que a variação da rigidez se possa fazer de uma forma gradual e contínua, embora existam algumas limitações ao nível dos elementos estruturais, tendo sido desenvolvidas até ao momento, nesta área, abordagens meramente teóricas [Ribakov, Y., 2002].

Uma das desvantagens deste tipo de sistemas corresponde à sua elevada sensibilidade a atrasos temporais, com a possibilidade de piorar a resposta estrutural em vez de melhorá-la. Para ultrapassar este problema tem vindo a ser propostas alternativas salientando-se por exemplo o dispositivo de rigidez e amortecimento variável constituído por um sistema de contraventamento ligado a um pistão cilíndrico hidráulico proposto por [Tan, P. et al; 2004], sendo a rigidez adicional fornecida, quando necessário, pelo sistema de contraventamento integrante do dispositivo.

O esquema de um dispositivo de rigidez variável semi-activo é ilustrado na Figura 167. Quando a estrutura atinge a posição de deslocamento máximo e começa o movimento na direcção oposta, os aparelhos de dissipação de energia são activados e a rigidez das escoras torna-se nula, dando origem a que a energia sísmica absorvida se dissipe. Quando o aparelho está desactivado, as escoras funcionam como parte da estrutura com uma determinada rigidez e absorvem a energia sísmica. Uma vez que a estrutura passa pelo ponto de retorno duas vezes num período, a estrutura é capaz de modificar as propriedades de vibração e dissipar energia sísmica duas vezes em cada período.

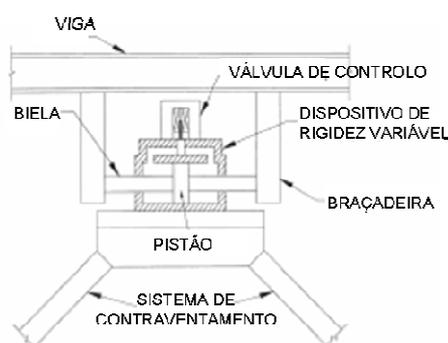


Figura 167 – Esquematização de um amortecedor semi-activo de rigidez variável, adaptado de [Kamagata e Kobori, 1994].

No que respeita a eficiência de estratégias de controlo associadas a este dispositivo foi possível concluir-se que a redução da resposta aumenta com a taxa de incremento da rigidez [Xinghua, Y., 2000] [Oliveira, 2009].

Reportam-se ainda trabalhos de investigação anteriores na área dos sistemas semi-activos de rigidez variável, desenvolvidos durante a década de 90 [Kobori et. al, 1993] [Kamagata e Kobori, 1994].

No primeiro caso [Kobori et. al, 1993] foi construída uma estrutura com três pisos e contraventada a todos os níveis, o que correspondia, considerando as possibilidades de o contraventamento estar “bloqueado” ou “não-bloqueado”, a 8 níveis de rigidez diferentes. Dependendo do estado do contraventamento a frequência

da estrutura podia variar entre 1.0Hz a 2.5Hz, respectivamente para as situações totalmente desbloqueada e completamente bloqueada. Trata-se de um sistema que se mantém operacional em situação de ocorrência de sismos severos, uma vez que a quantidade de energia consumida para o seu funcionamento é relativamente pequena, quando comparada, por exemplo, com outro tipo de dispositivos.

No segundo caso [Kamagata e Kobori, 1994] foi implementado um dispositivo de abertura regulável num sistema semi-activo de rigidez variável. Os dispositivos estudados foram colocados, na direcção longitudinal, em ambos os lados de uma estrutura. Os resultados obtidos dos estudos analíticos e experimentais efectuados permitiram concluir que estes dispositivos são de facto bastante eficientes na redução da resposta estrutural. A rigidez da estrutura em que o dispositivo se encontra incluído é controlada de forma a serem estabelecidas condições de não-ressonância durante a ocorrência de acções sísmicas. Os dispositivos estudados por Kamagata e Kobori são constituídos por um cilindro equilibrado com uma válvula de controlo solenoide normalmente fechada incluída no tubo que liga as duas câmaras do cilindro. A válvula solenoide pode estar aberta ou fechada. Quando a válvula solenoide se encontra aberta o fluido escoar livremente e desengata a ligação entre o sistema de contraventamento e a viga, enquanto que quando se encontra fechada o fluido não consegue escoar, o que bloqueia o sistema de contraventamento. Pelo contrário se a válvula se encontra fechada o fluido não consegue escoar bloqueando o movimento da viga do sistema de contraventamento.

A pesquisa desenvolvida permitiu tirar excelentes conclusões acerca de eficácia deste tipo de dispositivos, uma vez que os resultados obtidos traduzem uma redução de acelerações em quase 70% e de deslocamentos em aproximadamente 30%.

#### **2.4.4. Amortecedores semi-activos viscosos**

Um dissipador semi-activo viscoso compreende um cilíndrico hidráulico que contém uma cabeça de pistão que separa os dois lados do cilindro. Quando tem início o ciclo de funcionamento do pistão, o fluido que se encontra no interior do cilindro é forçado a passar por pequenos orifícios a grande velocidade. A pressão diferencial registada na cabeça do pistão, assim como a força gerada, é controlada por uma válvula de controlo de fluxo ligada às duas partes do cilindro.

Desta forma o amortecimento associado aos aparelhos de viscosidade variável é ajustado pela taxa de abertura da válvula de controlo do escoamento no interior do dispositivo. Assim o coeficiente de amortecimento é modificado de forma a reduzir de uma forma adequada a resposta em termos de acelerações durante a ocorrência de uma determinada acção dinâmica gravosa (sismos violentos).

Em circunstâncias que ocorram perturbações dinâmicas ligeiras ou na eventualidade de falha de fornecimento energético o sistema funciona como se de um amortecedor passivo se tratasse [Coelho, 2008].

Uma das configurações propostas (Figura 168 para este tipo de dispositivos corresponde a uma solução na qual o tamanho do orifício da válvula de comunicação entre os dois lados do cilindro é variável.

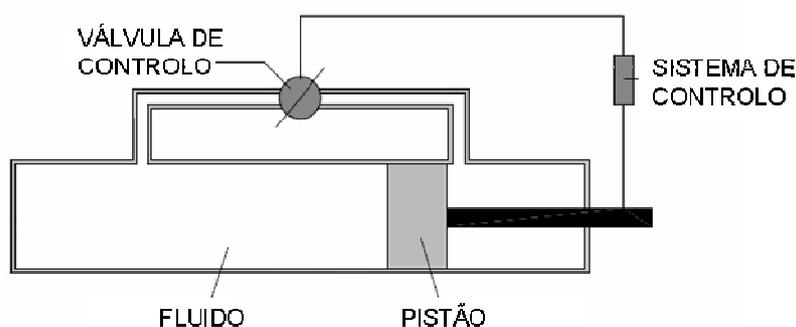


Figura 168 – Esquemática de um amortecedor semi-activo viscoso, adaptado de [Oliveira, 2009].

O ajuste da abertura do orifício é feito por meio de um algoritmo que controla as forças de amortecimento envolvidas, permitindo uma alteração controlada das capacidades dissipativas do elemento [Soong e Spencer Jr., 2000].

Muitos têm sido os trabalhos de investigação desenvolvidos sobre este género particular de sistemas de protecção sísmica. Aplicações deste género de dispositivos para protecção sísmica têm sido amplamente investigadas [Kawashima et al., 1992] [Kawashima et al., 1993] [Mizuno et al., 1992] [Shinozuka et al., 1992] [Patten et al., 1993] [Patten et al., 1994], [Sack et al., 1994] [Kuo et al., 1994] [Symans et al., 1994] [Symans et al., 1995] [Symans et al., 1996a] [Symans et al., 1996b], [Kurata et al., 1994], [Lee et al., 1994] [Liang et al., 1995] [Polak et al., 1994] [Yang et al., 1996] [Loh e Ma, 1996] [Sato et al., 1996].

#### **2.4.5. Amortecedores semi-activos de massa e de líquido sintonizado**

Como já foi indicado na secção correspondente, um amortecedor de massa sintonizada consiste essencialmente num sistema de 1º grau de liberdade, do tipo “massa-mola-amortecedor”, que é colocado, preferencialmente, ao nível do último andar de um edifício de vários pisos. As características dinâmicas deste sistema encontram-se ajustadas ou sintonizadas de modo a controlar o movimento da estrutura à qual está acoplado. Alguns autores [Kelly e Hasegawa, 1992] [Abe, 1996] investigaram sistemas semi-activos de amortecimento de massa sintonizada, em que as características dinâmicas do sistema são controláveis.

Os amortecedores de líquido sintonizado semi-activos, analogamente ao referido na secção 2.1.2.7 para os correspondentes sistemas passivos, são semelhante aos amortecedores de massa sintonizada semi-activos, excepto no sistema massa-mola-amortecedor que no caso particular dos amortecedores de líquido sintonizado é substituído por um reservatório preenchido por líquido.

Alguns autores [Lou et al., 1994], [Haroun et al., 1994] [Abe et al., 1996] desenvolveram trabalhos de investigação ao nível dos amortecedores de líquido sintonizado semi-activos. Com o intuito de melhorar a eficácia dos amortecedores de líquido sintonizado para movimentos estruturais com frequências elevadas foi proposto um sistema semi-activo de amortecedor de líquido sintonizado [Lou et al., 1994]. O comportamento do sistema é controlado, tal como a frequência natural do *sloshing* através da variação do comprimento do tanque hidráulico, ajustando uma divisória rotativa no interior do tanque.

#### **2.4.6. Amortecedores hidráulicos**

Finalmente para os amortecedores hidráulicos (*Hydraulic Dampers*) pode-se dizer que uma das suas partes constituintes é um fluido necessariamente viscoso. Este tipo de amortecedor tem sido frequentemente aplicado em isolamento de vibrações de choque em sistemas aeroespaciais ou de defesa.

A primeira utilização bem documentada de grandes amortecedores hidráulicos foi efectuada por militares no sentido de reduzir o coice dos grandes canhões.

Karnopp [Karnopp, 1990] introduziu isoladores semi-activos usando o esquema de amortecimento em *sky-hook*. Patten e outros [Patten et al., 1998] desenvolveram uma primeira abordagem ao nível das características físicas de um absorvedor hidráulico de vibrações semi-activo.

Um benefício imediato dos amortecedores hidráulicos é que são especialmente eficazes na minimização das forças que actuam ao nível dos pilares dos edifícios. Para além disso reduzem ainda os deslocamentos relativos e as forças de corte que estão em fase com os momentos de encurvadura dos pilares [Gavin, et al., 2001].

### **3. Aplicações práticas em Portugal**

Actualmente existem um pouco por todo o mundo cerca de 5000 estruturas em que foram aplicados os mais variados tipos de sistemas de protecção sísmica. Dessas aplicações destaca-se, por exemplo, o isolamento sísmico. Países como o Japão, Federação Russa e República Popular da China lideram no número de aplicações. Em países como Turquia, Grécia, Indonésia ou Chile, começa-se agora a génese da aplicação deste tipo de sistemas.

É de salientar que a nível Europeu, o número de aplicações tem vindo a aumentar, graças ao desenvolvimento preconizado pela Itália, por um lado, como líder mundial no número de aplicações em património histórico, por outro, como fabricante e exportador de aparelhos para aplicação noutros países europeus e mundiais.

Em Portugal a aplicação de sistemas de protecção sísmica não é uma área nova, uma vez que desde há uns largos anos tem vindo a ser implementados em obras de arte (pontes e viadutos) seja desde a construção seja como elemento de reforço, como forma de protecção contra acções dinâmicas (vento e sismos).

Os primeiros dispositivos a serem implementados correspondem a apoios deslizantes. Posteriormente surgiram as implementações de apoios elastoméricos simples seguidas dos apoios elastoméricos de elevado amortecimento.

Mais recentemente surgiram aplicações de dispositivos de fluido viscoso, que para além de permitirem deformações a longo termo e resultantes de gradientes térmicos, garantem simultaneamente alguma segurança da estrutura em que se encontram incluídos face a acções dinâmicas [Azevedo e Guerreiro, 2007].

Tem-se registado também, para além dos referidos, bastantes implementações de amortecedores viscosos de impacto, amortecedores metálicos, amortecedores por atrito, entre outros, como sistemas de protecção passiva e ainda os mais recentes dispositivos semi-activo que aliam as vantagens de sistemas passivos sem os inconvenientes dos sistemas activos (nomeadamente a níveis energéticos).

Relativamente à aplicabilidade a estruturas de edifícios correntes Portugal ainda se encontra muito afastado relativamente a outros países com sismicidades análogas.

Existem algumas soluções para protecção dinâmica de estruturas que surgem dos objectivos específicos do dimensionamento e dos projectistas. No entanto a disponibilidade crescente deste tipo de dispositivos a nível de mercado aliada com uma evolução muito favorável a nível dos custos associados à sua implementação conduziu a que cada vez mais se optasse pela aplicação de soluções comerciais. De facto, os projectistas optam tendencialmente por empregar um dado tipo específico de solução dentro de um determinado período de tempo. [Oliveira, 2009]

Em termos de aplicações a pontes e viadutos em Portugal referem-se, por serem os mais recentes, os seguintes: Ponte Salgueiro Maia (1995), Ponte Vasco da Gama (1998), Viaduto do Loureiro (2001), Viaduto Real (2003), Viaduto sobre a Ribeira da Laje no Rio Grande da Pipa (2004) e a Ponte pedonal Pedro e Inês (2006).

Na Ponte Salgueiro Maia (Figura 169a), construída na zona de Santarém, foram incluídos ao nível dos pilares 92 dispositivos do tipo apoios elastoméricos de elevado amortecimento (Figura 169b), dos quais 44 foram colocados na direcção longitudinal e 48 na direcção transversal.

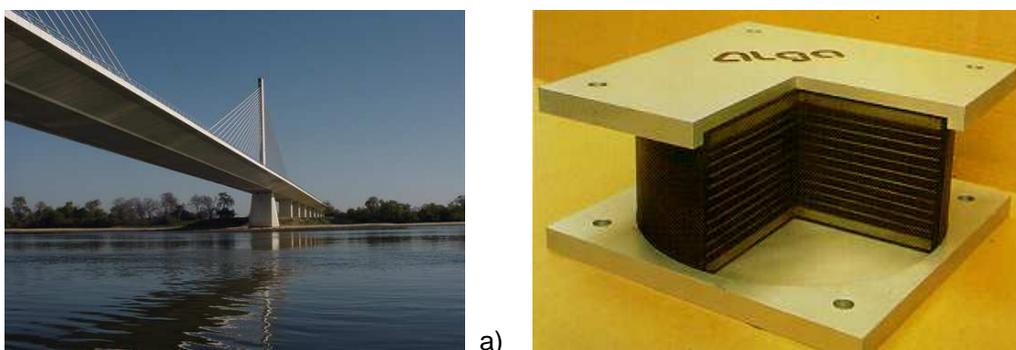


Figura 169 – Ponte Salgueiro Maia, Santarém, Portugal: a) Visão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].

Uma das pontes mais conhecidas a nível nacional corresponde à Ponte Vasco da Gama (Figura 170a), construída para ser a 2ª travessia do Tejo na zona de Lisboa.

Trata-se de uma ponte de tirantes com uma extensão de aproximadamente 13km e vão central de 420m.



Figura 170 – Ponte Vasco da Gama, Lisboa, Portugal: a) Visão global da estrutura [Imagens google, 2009] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].

A ponte tem uma esperança de vida de 120 anos, tendo sido projetada para suportar velocidades do vento de 250 km/h e resistir a um sismo 4,5 vezes mais forte do que o histórico Terramoto de Lisboa, em 1755, sismo estimado em 8,7 na escala de Richter. As fundações mais profundas, com um diâmetro de 2,2 m, foram conduzidas a uma profundidade de 95 metros abaixo do nível médio do mar [VG, 2009]. Na ponte, com o objectivo de mitigar acções dinâmicas, foram empregues amortecedores histiréricos (Figura 170b) entre o tabuleiro e os pilares.

O Viaduto do Loureiro (Figura 171a), localizado na zona de Lisboa, foi dimensionado para incluir na zona dos encontros dispositivos de protecção face a acções dinâmicas do tipo viscoso (Figura 171b) com uma constante  $\alpha=0.15$ .

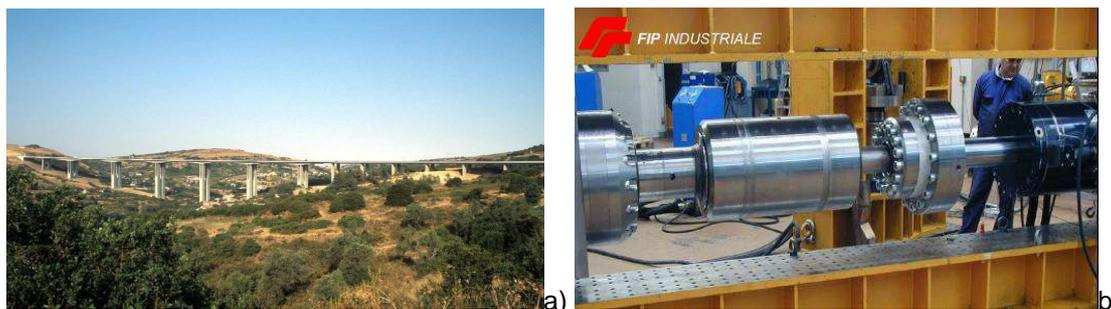


Figura 171 – Viaduto do Loureiro, Lisboa, Portugal: a) vVisão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].

O dimensionamento do Viaduto Real (Figura 172a) previu a implementação de uma solução para mitigação de acções dinâmicas com recurso a um tipo particular de amortecedores (Figura 172b) ligados a apoios deslizantes e aos pilares na zona central da superestrutura.

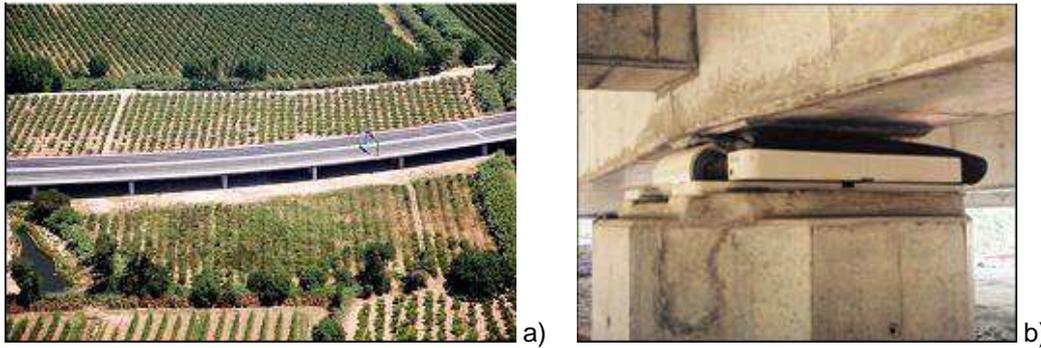


Figura 172 – Viaduto do Loureiro, Lisboa, Portugal: a) Visão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].

À semelhança do Viaduto do Loureiro, o Viaduto sobre a Ribeira da Laje no Rio Grande da Pipa (Figura 173) incorpora também amortecedores viscosos com a mesma constante ( $\alpha=0.15$ ). Trata-se de um viaduto duplo com 1300 m de comprimento, 35 m de largura e vão máximo de 58 m em viga-caixão unicelular com 3.20 m de altura constante.

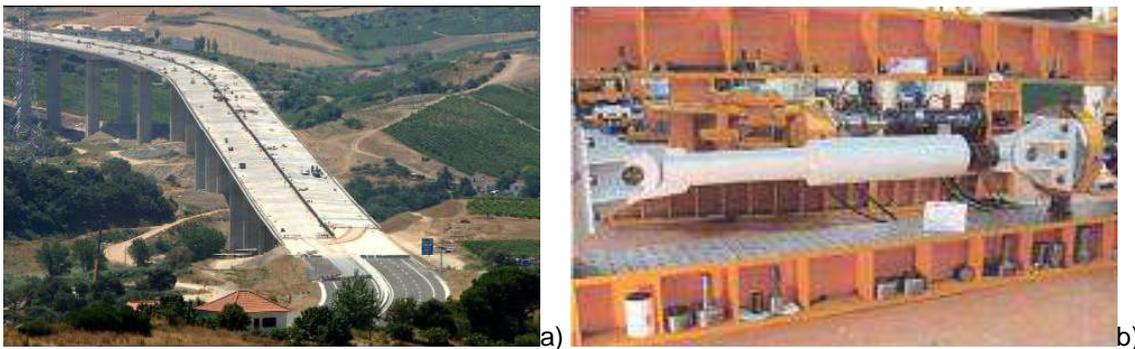


Figura 173 – Viaduto sobre a Ribeira da Laje no Rio Grande da Pipa, Lisboa, Portugal: a) Visão global da estrutura [Azevedo e Guerreiro, 2007] e b) detalhe de dispositivo colocado [Azevedo e Guerreiro, 2007].

A recentemente construída ponte pedonal Pedro e Inês (Figura 174), localizada em Coimbra sobre o rio Mondego, apresentava à data dos primeiros estudos dinâmicos desenvolvidos pelo projectista grande vulnerabilidade a vibrações induzidas por peões, tanto na direcção transversal como na direcção vertical, tendo sido necessário dimensionar um sistema de controlo.



Figura 174 – Visão global da Ponte Pedonal Pedro e Inês, Coimbra, Portugal [ViBest, 2006].

Para o efeito a escolha recaiu sobre um sistema de controlo passivo baseado na utilização de amortecedores de massas sintonizadas horizontais e verticais (Figura 175). A ponte tem um comprimento total de 275m e é composta por um arco central parabólico com um vão de 110m, e dois meios arcos laterais, em aço, apoiando com total continuidade um tabuleiro misto aço-betão [Caetano et. al, 2007].

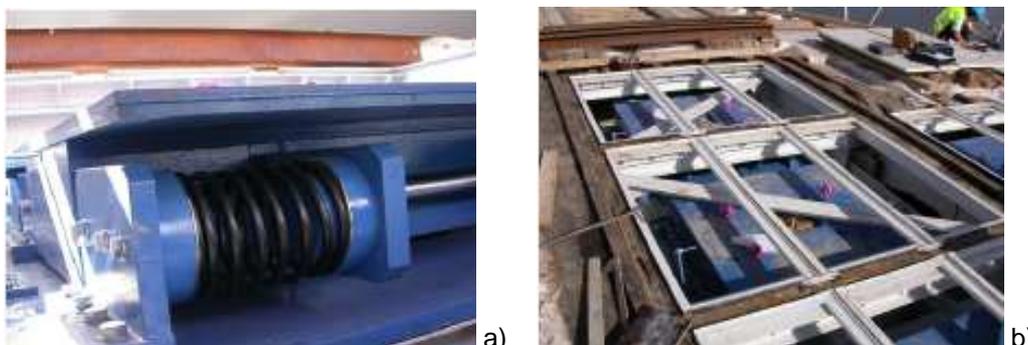


Figura 175 – Sistema de controlo implementado na Ponte Pedonal Pedro e Inês, Coimbra, Portugal: a) Detalhe de um dispositivo colocado [Caetano et. al, 2007] e b) dispositivo colocado no tabuleiro [Caetano et. al, 2007]

Em Portugal o primeiro registo de utilização de sistemas de protecção sísmica em estruturas de edifícios é recente. O Hospital da Luz é exemplo disso como sendo a primeira estrutura a incorporar dispositivos de isolamento sísmico [Martelli, 2007].

O Hospital da Luz é um complexo integrado de saúde, composto por dois edifícios independentes, destinando-se um a equipamento de saúde (hospital e residências medicalizadas) e outro a residências para a 3ª idade. O recurso ao isolamento de base surge como forma de responder à necessidade, por um lado, de atenuar as vibrações induzidas pela presença de duas galerias do metropolitano no atravessamento do terreno (percurso entre as estações do Colégio Militar e Carnide) e de um túnel rodoviário a construir (PDM de Lisboa), por outro, estando Lisboa localizada numa zona sísmica considerável, de se assegurar segundo a aplicação do artigo 33.º do REBAP, a operacionalidade destes edifícios após a ocorrência de um sismo intenso. A solução proposta corresponde a intercalar, nos elementos verticais da estrutura, aparelhos de apoios do tipo HDRB.

No dimensionamento do complexo de saúde foi necessário recorrer ao Eurocódigo 8 (EC8), na versão de Janeiro de 2003, por se tratar de um conjunto de estruturas de edifícios com a particularidade de apresentar isolamento de base. O edifício do hospital, encontra-se implantado numa área de 110 x 110m<sup>2</sup>, com 9 pisos, 6 dos quais sobre os apoios de isolamento. O isolamento de base é constituído por 195 apoios do tipo HDRB, localizados imediatamente abaixo do piso -1, num piso técnico criado com o propósito de facilitar o acesso aos mesmos. No que diz respeito

ao edifício das residências, este encontra-se implantado numa área de 55 x 110m<sup>2</sup>, tem um embasamento com 4 pisos, 1 dos quais enterrado. O isolamento de base é composto por 120 apoios do tipo HDRB, colocados também num piso técnico imediatamente acima dos órgãos de fundação. A inclusão de isolamento sísmico no complexo de saúde da Luz obrigou a que se tomassem determinadas medidas, no que refere a ligações das infra-estruturas de águas, esgotos, gás, energia eléctrica e telecomunicações ao edifício, bem como a nível de juntas de transição entre pavimentos ligados ao edifício e os pavimentos da sua envolvente exterior. Houve também necessidade de garantir entre outras coisas, o funcionamento dos elevadores até ao piso -3 no edifício do hospital, de garantir o deslocamento relativo no patim intermédio das escadas entre os pisos -1 e técnico no edifício do hospital.

Da Figura 176 à Figura 178 pode-se observar o pormenor de um apoio do tipo HDRB, a planta e os cortes do edifício, bem como a localização dos apoios, uma fotografia aérea do local na fase de construção, e o aspecto final do Hospital da Luz [Prazeres Ferreira, 2006], respectivamente.

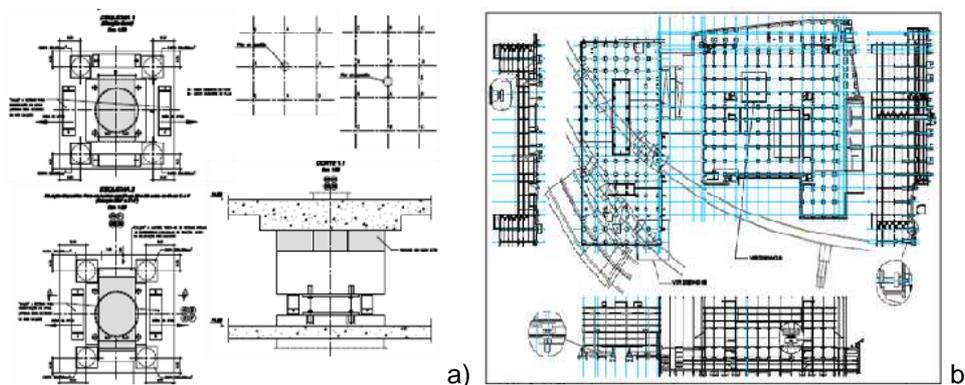


Figura 176 – a) Pormenor de um apoio HDRB utilizados no Hospital da Luz [Prazeres Ferreira, 2008] e b) Planta e cortes dos edifícios com localização dos apoios do Hospital da Luz [Prazeres Ferreira, 2008].



Figura 177 - Fotografia aérea da fase construtiva do Hospital da Luz [Prazeres Ferreira, 2008].



Figura 178 – Representação esquemática do aspecto final do complexo [Guerreiro et. al, 2008].

Existem no entanto registos de pelo menos mais duas estruturas de edifícios em Portugal que incluem medidas de protecção face a acções dinâmicas, não directamente relacionadas com a protecção sísmica. Nestas circunstâncias o principal objectivo prende-se com a necessidade de suprimir vibrações dinâmicas resultantes da passagem do metropolitano ou do comboio em vias adjacentes ou subjacentes. É no entanto importante não esquecer que embora destinadas a outro tipo de acções dinâmicas a implementação de soluções de protecção permitem também a redução das solicitações sísmicas a actuar nos elementos estruturais, devido à diminuição da frequência natural da estrutura relativamente à solução de base fixa. As estruturas identificadas correspondem ao Hotel Mundial e ao Teatro Municipal de Faro [Oliveira, 2009].

O Hotel Mundial (Figura 179a) encontra-se localizado sobre uma das linhas de metropolitano da cidade de Lisboa. Para prevenir vibrações excessivas resultantes da passagem do metropolitano foi adoptada uma solução de protecção dinâmica com recurso a apoios modulados em aglomerado de granulado de cortiça e elastómero (Figura 179b) [Venâncio et. al, 2004]. Desta forma é possível controlar as vibrações de modo que estas permaneçam dentro dos limites aceitáveis para o conforto dos ocupantes.



Figura 179 – Hotel Mundial, Lisboa, Portugal: a) Perspectiva do exterior [HM, 2009] e b) detalhe do sistema colocado [Venâncio et. al, 2004]

O Teatro Municipal de Faro (Figura 180a) localiza-se entre a EN 125 e a linha de caminho de ferro do Algarve, perto da Escola Superior de Enfermagem. Por ser necessário isolar o edifício dos ruídos exteriores resultantes, principalmente, da sua proximidade à linha de caminho de ferro o projectista optou por realizar a envolvente das zonas de palco e do auditório em paredes de betão armado, separadas do resto de edifício por meio de juntas. Trata-se de uma medida que reduz maioritariamente os sons de percussão, no entanto a adopção de determinados materiais para as juntas permite conferir ao edifício isolamento face a uma gama mais alargada de frequências.

A estrutura assenta em blocos de material elastomérico (Figura 180b) cuidadosamente escolhidos em função das solicitações verticais a suportar. Para absorção dos esforços de corte basal, nomeadamente as reacções horizontais da acção sísmica, foram escolhidos aparelhos de apoio e isolamento verticais, bem como as adequadas estruturas para o seu suporte. Relativamente às fundações em que, para as solicitações sísmicas, surgem tracções, foi necessário atirantar os maciços de fundação envolvendo-os por cima com apoios elásticos e perfis metálicos [Venâncio et. al., 2004]



Figura 180 – Teatro Municipal de Faro, Faro, Portugal: a) Perspectiva do exterior [TMF, 2009] e b) detalhe do sistema colocado [Venâncio et. al, 2004]

#### 4. Considerações finais

Com o presente estado dos conhecimentos pretendeu-se apresentar várias técnicas usadas na mitigação de vibrações em estruturas, nomeadamente no que respeita a dispositivos de controlo de movimento activos e passivos usados para melhorar o desempenho de estruturas face à acção dinâmica de ventos, por questões de conforto humano, bem como face a acções sísmicas.

Tentou-se contextualizar o assunto apresentando-se exemplos de aplicação dos referidos dispositivos em zonas dispersas um pouco por todo o mundo, salientando-se a Austrália, Canadá, Estados Unidos da América, Itália, Japão, Republica Popular da China e até mesmo em Portugal.

De facto, actualmente, o país em que se reporta maior número de implementações ao nível da protecção dinâmica de estruturas corresponde ao Japão, seguido muito de perto pelos Estados Unidos da América [Soong e Spencer Jr, 2002].

No entanto, e a par com o seu crescente desenvolvimento, a Republica Popular da China tem vindo a registar uma crescente aplicação deste tipo de sistemas, sendo o país em que se prevê a sua maior difusão e instalação nos próximos anos [Martelli, 2006].

No que a Portugal diz respeito, pode-se afirmar que a implementação deste tipo de sistemas de protecção dinâmica têm estado mais vocacionada quase em exclusivo para as pontes e viadutos. Existem, no entanto, alguns edifícios que incluem soluções que permitem a redução de vibrações, principalmente devido ao tráfego. Nestas circunstâncias, os sistemas permitem também, embora de uma forma mais ligeira, a redução dos efeitos indesejáveis das acções sísmicas em estruturas.

Actualmente, a primeira e única implementação de um sistema de protecção sísmica a edifícios corresponde ao complexo que compreende o Hospital da Luz e residências médicas assistidas. Infelizmente, os exemplos de aplicação em Portugal são muito reduzidos sendo seguramente necessárias mais aplicações para melhor proteger as estruturas existentes da ocorrência de acções sísmicas graves.

É natural que seja dada prioridade e primazia às estruturas cuja integridade e funcionamento pós-sismo seja vital, nomeadamente os edifícios da protecção civil, hospitais, polícia, bombeiros, centrais energéticas. Para além destes, devem ainda ser integrados em estratégias de protecção face às acções dinâmicas dos sismos os edifícios históricos que façam parte da herança cultural do nosso país e que representam sem sombra de dúvidas um campo de aplicação de extrema importância. [Oliveira, 2009]

De facto a inclusão de sistemas que introduzem amortecimento às estruturas às quais se encontram acoplados, como é o caso de muitos dos dispositivos indicados ao longo do presente documento, surge como uma excelente forma de melhorar o comportamento das estruturas face a acções dinâmicas.

No entanto, e apesar da aplicação de sistemas passivos se encontrar mais generalizada a nível global, nomeadamente em zonas de elevada sismicidade, como forma de, entre outras coisas, minimizar e controlar os efeitos dos sismos, são os sistemas activos, híbridos e semi-activos que agora começam a emergir, principalmente nos países indicados, não só ao nível da investigação mas também em aplicações mais práticas.

Em termos de verificações experimentais e ou analíticas do funcionamento e respectivo desempenho dos sistemas de protecção sísmica referidos anteriormente pode-se dizer que estas tem vindo a ser desenvolvidas nas últimas décadas, com uma maior incidência em países localizados em áreas de sismicidade média a elevada.

Em Portugal a investigação nesta área remonta a meados da década de 90, estando a sua aplicação a estruturas de edifícios correntes pouco implementada, principalmente atendendo ao facto de ainda não se terem obtido relações custo-benefício que sejam vantajosas.

Da descrição do estado actual dos conhecimentos, no que refere à protecção de estruturas ao nível do controlo de vibrações estruturais produzidas por sismos de magnitude considerável bem como ao nível dos deslocamentos máximos ou dos esforços máximos instalados nas estruturas, conclui-se que se torna necessário aprofundar mais o estudo e investigação em alguns dos dispositivos apresentados para melhor compreensão das suas características e das melhorias introduzidas ao nível de eventuais implementações no património edificado português. Os resultados do referido estudo serão objecto de futuras publicações.

## **5. Agradecimentos**

A investigação incluída neste documento foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito da Bolsa Individual de Doutoramento SFRH/BD/14340/2003 e pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

## BIBLIOGRAFIA

ABDEL-ROHMAN M. AND LEIPHOLZ, (1983), H.H.E Active Control of Tall Buildings, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, pp. 628-645.

ABDEL-ROHMAN M., SEBAKHY, O.A., AL-HALABI, M., (1993), Identification and Control of Flexible Civil Structures with Time-Delays. Vol. 47, N° 6, pp. 977-986.

ACHKIRE, Y., (1997), Active Tendon Control of Cable-Stayed Bridges, PhD Dissertation, Active Structures Laboratory, Université Libre de Bruxelles, Bélgica.

ADHIKARI R., YAMAGUCHI, H., (1997), Sliding Mode Control of Buildings with ATMD, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26. - pp. 409-422.

AIKEN, I., (2006), Energy Dissipation Devices, 100th Anniversary Earthquake Conference Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake, San Francisco, USA.

AIKEN, I.D., KELLY, J.M., (1990), Earthquake simulator testing and analytical Studies of two energy-absorbing systems for multistory structures, Report N°. UCB/EERC-90/03, University of California, Berkeley.

AKBAY, Z., AKTAN, H., (1990), Intelligent energy dissipation devices, Proceedings of the 4th. U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 427-435.

ALBERNAMI, F., CHAN, R., (2007), Experimental Study of Steel Slit Damper for Passive Energy Dissipation, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1058–1066.

ALEXANDER N.A.,  
<https://www.fen.bris.ac.uk/scen/teachingmaterial/seismicanalysis3/Chapter1.pdf> -  
Accessed 14/04/2008

ALFRIED, K., (1974), "Partially filled viscous ring nutation damper, Journal of spacecraft, 11(7), 456-462.

ALGA, (2009), [www.alga.it](http://www.alga.it), página consultada em Abril de 2009

AMBROSINI, D., CUITIÑO, G., REBECO, J., (2004), Eficiencia de AMS en estructuras sismorresistentes, Mecánica Computacional, Volume XXIII, Bariloche, Argentina

ARIMA F., MIYAZAKI, M., TANAKA, H., AND YAMAZAKI, Y., (1988), A study on building with large damping using viscous damping walls, Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, pp. 821-826.

ASTIZ, M.A., (1998), Flutter stability of very long suspension bridges, Journal of Bridge Engineering, Volume 3 (3), pp. 132–139.

ATC 17-1, (1993), Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, Applied Technology Council, San Francisco, California, Vol. 1 e 2.

ATC-40, (1996), Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings – Applied Technical Council, California Seismic Safety Commission, Report No SSC 96-01 (two volumes), Redwood City, California, U.S..

AUSTRALIA EARTH SCIENCE, (1995), Earth Science Australia [Online] // Earth Science Australia. - Earth Science Australia. - 29 de Maio de 2008. - <http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://earthsci.org/processes/geopro/seismic/sliding.gif&imgrefurl=http://earthsci.org/processes/geopro/seismic/seismic.html&h=249&w=341&sz=9&hl=pt-PT&start=3&tbnid=cN5ZCdbMGfLn6M:&tbnh=88&tbnw=120&prev=/images%3Fq%3D>.

BAA, 2009, Hotel Burj Al Arab 7 estrelas,

[http://www.wikidoido.com/Hotel\\_burj\\_al\\_arab\\_\(7\\_estrelas\)](http://www.wikidoido.com/Hotel_burj_al_arab_(7_estrelas)), consultado em Março de 2009

BAILEY, T, HUBBARD, J.E., (1985), Distributed Piezoelectric-polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Volume 8, Issue 5, pp. 605-611

BALENDRA, T, WANG, C., YAN, N, (2001), Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper, *Engineering Structures*, Volume 23, Issue 9, pp. 1054-1067, Elsevier, Setembro.

BANAVALKAR, P.V., (1999), A new twist on domed design, *Modern Steel Construction*, 5pp, Dezembro,

[http://www.modernsteel.com/Uploads/Issues/December\\_1999/9912\\_06\\_washingtonairport.pdf](http://www.modernsteel.com/Uploads/Issues/December_1999/9912_06_washingtonairport.pdf)

BANALVAKAR, P.V., ISYUMOV, N., (1998), Tuned Mass Damping System to control Wind-Induced Acceleration of Washington National Airport Air Traffic Tower Control Tower, *Proceedings of Structural Engineering World Congress*, San Francisco, CD-ROM, T179-2

BAUER, H.F., (1984a), Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: A new damper for excited structures, *Journal of Sound and Vibration*, 93(1), pp. 117-133.

BAUER, H.F., (1984b), New proposed dynamic absorbers for excited structures, *Vibration Damping Workshop Proceedings*, Lynn Rogers (ed.), DD1-DD27.

BB, (2009), Bayview bridge, [http://en.wikipedia.org/wiki/Bayview\\_Bridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Bayview_Bridge), consultado em Março de 2009

BERLINOIR, (2008), <http://berlinoir.wordpress.com/2008/08/01/neonoir/>, Agosto

BHATTI, M.A., PISTER, K.S., POLEK, E., (1978), Optimal Design of an Earthquake Isolation System, Report N.º UCB/EERC-78/22, University of California Berkeley, CA.

BREUKELMAN, B., IRWIN, P., GAMBLE, S., STONE, G., (1998), The practical application of vibration absorbers in controlling wind serviceability and fatigue problems, *Proceedings of Structural Engineers World Congress*, San Francisco, July.

BUCKL, I., (1986), Development and application of base isolation and passive energy dissipation: A world overview, *Proceedings of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation*, report Nº ATC-17, Applied Technology Council, Palo Alto, California, pp. 153-174, Março.

BURKE, S.E., HUBBARD, J.E., (1987), Active Vibration Control of Simply Supported Beam using a Spatially Distributed Actuator, IEEE Control System Magazine, Volume 8, pp. 25-30.

BURKE, S.E., HUBBARD, J.E., (1988), Distributed Actuator Control Design for Flexible Beams, Automatica, Volume 24, Issue 5, pp. 619-627.

CAETANO, E.S., (2007), Cable Vibrations in Cable-stayed bridges, Structural Engineering Documents – 9, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, 188 pp.

CALDWELL, D.B., (1986), Viscoelastic Damping Devices Proving Effective in Tall Buildings, AISC Engineering Journal, 23(4), pp. 148-150.

CAMPBELL, R., (1995), A True Tall Tale about the Hancock Tower, Boston Globe, pp. 28 e 34.

CARLSON, J., SPENCER JR., B., (1996), Magnetorheological fluid dampers for semi-active seismic protection, Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 115-129.

CARPENTER, J., (s/d), Devices used to prevent structural failure, <http://moment.mit.edu/documentLibrary/Paper011/paper011.html>

CARRIER, G., MILES, J., (1960), "On the annular damper for a freely precessing gyroscope, Journal of Applied Mechanics, 27, 237-240.

CASAROTTI, C., (2004), Bridge isolation and dissipation devices: state of art review in bridge isolation, structural seismic response and modeling of modern seismic isolation and dissipation devices, M.Sc Dissertation, Rose School, Pavia, Italy, 2004.

CASCIATI, F., MAGONETTE, G., MARAZZI, F., (2006), Technology of Semi-Active Devices and Application in Vibration Engineering, ISBN: 0-470-02289-2, John Wiley & Sons

CASTELLANO, M.G., (2001a), Innovative Technologies for Earthquake Protection of Architectural Heritage, FIB Internationale Technical report, NT 1561, 14pp, Novembre.

CASTELLANO, M.G., (2001b), Application of Seismic Devices to Italian Cultural Heritage Structures, FIB Internationale Technical report, NT 1562, 11pp, Novembre.

CHANDRA, R., MASAND, M., NANDI, S., TRIPATHI, C., PALL, R., PALL, A., (2000), "Friction Dampers for Seismic Control of La Gardenia Towers, South City, India", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, paper n° 2008, Auckland, New Zeland.

CHANG, K.C., SOONG, T.T., LAI, M.L., NIELSEN, E.J., (1993a), Development of a Design Procedure for Structures with Added Viscoelastic Dampers, Proceedings of ATC-17-1 on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Control, 2, pp. 473-484.

CHANG, K.C., SOONG, T.T., LAI, M.L., NIELSEN, E.J., (1993b), Viscoelastic Dampers as Energy Dissipation Devices for Seismic Applications, Earthquake Spectra, Volume 9, Issue 3, pp. 371-388.

CHANG, K.C., SHEN, K.L., SOONG, T.T., LAI, M.L., (1994), Seismic Retrofit of a Concrete Frame with Added Viscoelastic Dampers, 5th National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, Illinois.

CHANG, K.C., SOONG, T.T., OH, S-T., LAI, M.L., (1992), Effect of Ambient Temperature on Viscoelastically Damped Structure, ASCE, Journal of Structural Engineering, Volume 118, Issue 7, pp. 1955-1973

CHANG, K.C., SOONG, T.T., OH, S-T., LAI, M.L., (1995), Seismic Behaviour of Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers, ASCE, Journal of Structural Engineering, Volume 121, Issue 10, pp. 1418-1426.

CHANG C.C., GU M., (1999), Suppression of vortex-excited vibration of tall buildings using tuned liquid dampers. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics; 83:225-237.

CHANG, S.P., MAKRIS, N., WHITTAKER, A. S., THOMPSON, A. C. T., (2002), Experimental and analytical studies on the performance of hybrid isolation systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 31, Issue 2, pp. 421–443.

CHEN, W., HAROUN, M. A., LIU, F., (1996), "Large amplitude Liquid Sloshing in Seismically Excited Tanks," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, 653-669.

CHENG, F., JIANG, H., (1998), "Optimum control of a hybrid system for seismic excitations with state observer technique", Smart Materials and Structures, Volume 7, pp. 654-663, IOP, Outubro.

CHIARUGI, A., MELEGARI, A., SPINELLI, P., (1986), On the dynamic behaviour of bridge dampers under seismic excitation, 8ECEE, Vol. 5, Lisboa, Portugal, pp.73-80.

CITICORP, (2009), [www.aviewoncities.com](http://www.aviewoncities.com), consultado em Março de 2009

CLARK, P., HIGASHINO, M., KELLY, J. M., (2005), Performance of seismically isolated structures in the January 17, 1994 Northridge Earthquake, NISEE - National Information Service for Earthquake Engineering, Report, USA.

CLOUGH R.W., PENZIEN J., 1993, Dynamics of Structures – 2nd Edition – McGraw-Hill.

CN TOWER, (2009), [http://en.wikipedia.org/wiki/CN\\_Tower](http://en.wikipedia.org/wiki/CN_Tower), consultado em Março de 2009

COBO DELARCO, D., APARECIO, A.C., (1999), Improving Suspension Bridge Wind Stability with Aerodynamic Appendages, Journal of Structural Engineering, Volume 25, Issue 2, pp. 155-168, Elsevier, Janeiro.

CONSTANTINOU M. C., SYMANS, M. D., (1992), Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NCEER 92-00321992.

CONSTANTINOU M. C., SYMANS, M. D., TSOPELAS, P., AND TAYLOR, D. P., (1993), Fluid viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation, Proceedings of. ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive energy

Dissipation, and Active Control, Applied Technology Council, Redwood City ,Vol. 2. - pp. 581-592.

CONSTANTINOU M. C, (1994), "Protective systems for buildings: Applications of spherical sliding isolation systems", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, New York, USA

COOPER, J.D., (1998), " World's longest suspension bridge opens in Japan", Public Roads Magazine, Federal Highway Administration, Volume 62, Issue 1, USA, Julho/Agosto

COOPER, R., (s/d),<http://dc.about.com/od/transportation/a/NationalAirport.htm>

CORREIA, J., ANDRADE, A.M., 2007, Isolamento Sísmico e Base : Análise de custos/soluções construtivas, Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre. – Lisboa, Relatório, UTL, Instituto Superior Técnico.

CPT IMAGES GOOGLE, (2009), Chiba Port Tower, <http://images.google.com>, acesso em Março de 2009

CRAWLEY, E.F., LUIS, J., (1987), Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures, AIAA J., Volume 25, Issue 10, pp. 1373-1385.

CRAWLEY, E.F., ANDERSON, E.H., (1990), Detailed Models of Piezoelectric Actuation of Beams, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, Volume 1, Issue 1, pp. 4-25.

CT IMAGES GOOGLE, (2009), Crystal Tower, <http://images.google.com>, acesso em Março de 2009

DAMES , MOORE, (1979), Review of seismic isolation for nuclear structures, by R.R. Kunar e T. Maini, Report N° EPRI NP-1220-SR, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, pp. 1-106, October.

DAMPETECH, (2001), "F-VEDD: The multipurpose device", Dampetech Corporation website: <http://www.dampetech.com>, Dinamarca, recolhido em Janeiro de 2009

DANKOOK UNIVERSITY, (2006)

DAVENPORT, A.G., (1962), Buffeting of a Suspension Bridge by Storm Winds. Proceedings of the American Society of Civil Engineers; 88:233-268.

DELPHI, Delphi MagneRide, Chassis and Steering Systems, Engineering Note, Delphi Corporation, [www.delphi.com](http://www.delphi.com)

DESROCHES, R., SMITH, B, (2003), "Shape memory alloys in seismic design and retrofit: A critical review of the state of the art, potential and limitations", Journal of Earthquake Engineering, Volume 7, Issue 3, pp. 1-15, Imperial College Press, Setembro.

DEVORE, C., CHANG, C.M., SPENCER Jr., B.F., (2007), Active Base Isolation of Structures in Two Dimensions, Proceedings of the 2007 Earthquake Engineering Symposium for Young Researchers, Paper 01, Seattle, Washington, Agosto, <http://mceer.buffalo.edu/education/reu/2007/content/01 DeVore.pdf>

DIETLEVSEN, O, (1999), Structural Reliability Methods, John Wiley and Sons.

DEN HARTOG, J.P., (1956), Mechanical Vibrations, 4 th Edition, McGraw Hill, New York.

DOLCE, M., MARNETTO, R., (2000), "Passive seismic devices based on shape memory alloys", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, paper nº2386, Auckland , New Zeland

DOLCE, M., FORMI, M, MARTELLI, A., (s/d), International Trends of Application of Seismic Isolation System, TaikiSAITO Building Research Institute, Japan

DTL, (2009), Ponte DongTing Lake, China, [http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/newnl/enl\\_5.pdf](http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/newnl/enl_5.pdf)

DUARTE, R.T., FRANÇA, V., CARVALHO, E.C.; (1975), Estudos sísmicos do edifício Solmar – Estudo realizado para a firma TECNIAGRA Engenheiros Consultores, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Proc. 36/1/5257.

DUTTA, A.K., DUTTA, A., DEB, S.K., (s/d), Active control of a cable stayed bridge against seismic excitation, <http://www.iitg.ernet.in/iccms06/cd/pdf/c005.pdf>

EDBERG, D. L., BICOS, A.S., FULLER, C.M., TRACEY, J.J., FECHER, J.S., (1992), Theoretical and Experimental Studies of a Truss Incorporating Active Members, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, Volume 3, Issue 2, pp. 333-347.

EHRGOTT, R., MASRI, F., (1993), Structural control applications of an electrorheologicalc device, Proceedings of the International Workshop on Structural Control, pp. 115-129.

ENR, (1971), Tower cables handle wind, Water tank dampens it, Engineering News-Record, 23, Dezembro.

ENR, (1977), Tuned Mass Dampers Steady Sway of Skyscrapers in Wind, 14-15.

FALCÃO SILVA, M.J., OLIVEIRA, F., CAMPOS COSTA, A., MORAIS, P.G.; (2007), Ensaios experimentais de um sistema de redução de vibrações para protecção sísmica de estruturas, Encontro Nacional sobre a instrumentação científica e a metrologia aplicadas à Engenharia Civil – ICM 2007, LNEC, Lisboa, Portugal

FALCO, K.C., STONE, B.J., SIMCOCK, W.D., ANDREW, C., (1967), Optimization of Vibration Absorbers: A Graphical Method for Use on Idealizes Systems with Restricted Damping, Journal of Mechanical Engineering Science,9, pp. 374-381.

FALTINSEN, O. M., (1974), A Nonlinear Theory of Sloshing in Rectangular Tank, Journal of Ship Research, v. 18, n. 4, pp. 224-241, December 1974.

FALTINSEN, O.M., (1978), A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with twodimensional flow, Journal of Ship Research, Vol. 22, No. 3, Sept., pp. 193-202.

FALTINSEN, O.M., ROGNEBAKKE, O.F., (1999), Sloshing and slamming in tanks, Hydronav'99-Manouvering'99, Gdansk-Ostrada, Poland

FEDIW A.A., ISYUMOV N., VICKERY B.J., (1995), Performance of a sloshing water damper – Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics.

FENG, M., (1993), Application of hybrid sliding isolation system to buildings, Journal of Engineering Mechanics, 119, 2090-2108.

FERREIRA, J. P., (2008), Visita ao Hospital da Luz, Conferência: Colégio de Engenharia Civil Especialização em Estruturas - Ordem dos Engenheiros, Abril de 2008.

FIGUEIREDO, M., (2008), Reforço Sísmico por Dissipação Passiva de Viadutos de Betão Armado, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 174pp, Julho

FIB, (s/d), Seismic Devices

FITZGERALD T. F., ANAGNOS, T., GOODSON, M., AND ZSUTTY, T., (1989), Slotted bolted connections in aseismic design of concentrically braced connections. - [s.l.] : Earthquake Spectra, Vol. 5(2). - pp. 383-391.

FORNI, M., POGGIANTI, A., DE CANIO, G., RANIERI, N., MARIONI, A., BATTAINI, M., MEDEOT, R., FISCHER, S., CÓIAS, V., PAULA, R. CAPRA, A., 2007, Development of innovative anti-seismic systems in the framework of the LESSLOSS European integrated project, 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures. - Istanbul, Turkey.

FOX, L., GOODWIN, E. T., (1949). "Some new methods for the numerical integration of ordinary differential equations." Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 45, 373-388.

FRAHM, H., (1909), Device for Damped Vibrations of Bodies, U.S.Patent nº 989958, October.

FT IMAGES GOOGLE, (2009), Fukuoka Tower, <http://images.google.com>, acesso em Março de 2009

FUJINO, Y., SOONG, T.T., SPENCER JR B. F., (1998), Structural Control: Basic Concepts and Applications, Proceedings of the 1996 ASCE Structures Congress , Chicago, Illinois, <http://cee.uiuc.edu/sstl/papers/Tutorial.pdf>

FUJINO Y., SUN, L. M., PACHECO, B. M., AND CHAISERI, P., (1992), Tuned liquid damper (TLD) for Suppressing horizontal motion of structures, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118(10) - pp. 2017-2030.

FUJITA, T., KATSU, M., MIYANO, H., TAKANASHI, S., (1991), Development of active-passive mass damper using XY-motion mechanism and hydraulic actuator for vibration control of tall building, 1991 Asia-Pacific Vibration Conference, Melbourne, Australia.

FUJITANI et. al, (2003)

FULIN, Z., SPENCER JR., B.F., (1999), A new advance in seismic isolation, energy dissipation and control of structures, Seismological Press, Guangzhou, China, May.

FUR, L.S., YANG, H.T.Y., ANKIREDDI, S., (1996), Vibration Control of Tall Buildings under Seismic and Wind Loads, Journal of Structural Engineering, Volume 122, Issue 8, pp. 948-957, American Society of Civil Engineering - ASCE, Agosto.

GAVIN, H., ALHAN, C., OKA, N., (2001), Fault tolerance of semi-active seismic isolation, <http://www.duke.edu/~hpgavin/papers/index.html>.

GAVIN, H.P., HANSON, R.D., (1994), Electrorheological Dampers for Structural Vibration Suppression, Report N.º UMCEE 94-35, Department of Civil Engineering and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Harbor, MI.

GAVIN, H., HANSON, R., MCCLAMROCH, N., (1996), Control of structures using electroreological dampers, Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering.

GCS, (s/d), Grand Canyon Skywalker,

[http://www.motioneering.ca/user/doc/2006q2\\_at\\_the\\_moment.pdf](http://www.motioneering.ca/user/doc/2006q2_at_the_moment.pdf), consultado em Março de 2009

GEORGAKIS, C.T., KOSS, H.H., TOFFOL, W., (2005), Tuned Liquid Dampers for the new European court of justice – Luxembourg, Structural Engineering international, Vol. 4, pp 228-231.

GERADIN, M., RIXEN, D., (1994). Mechanical Vibrations, Theory and Application to Structural Dynamics, Wiley and Sons, New York.

GERB, (2009a), Tuned Mass Dampers - Applications,

<http://www.gerb.com/en/arbeitsgebiete/arbeitsgebiete.php?ID=140&kategorie=15>, consultado em Março de 2009

GOMES, D.H.M., (2006), Controle da Resposta Dinâmica de uma Passarela Pedestre da Cidade de Brasília com a utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília.

GOOGLE EARTH, (2007), (última visita em Novembro de 2007).

GT, (s/d), Gold Tower, [http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Gold\\_Tower\\_\(Japan\)](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Gold_Tower_(Japan)), consultado em Março de 2009

GUERREIRO, L., (1996), Isolamento Sísmico de Edifícios, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

GUERREIRO, L., AZEVEDO, J., VIRTUOSO, F., (1998), “Use of paraseismic dissipative devices in viaducts, Proceedings of the 11th Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.

GUERREIRO, L, FERREIRA, J.P., COLATO, G.P., CASTELLANO, G., BALDO, P., (2005), Base Isolation for Seismic Protection – The new hospital in Lisbon, IABSE Symposium, LNEC, Lisboa, Portugal, paper 149.

GUERREIRO, L., (2003), Sistemas de Isolamento Sísmico, Ciclo de Palestras em Engenharia Civil – 2003, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica.

GUERREIRO, L., (2006), Isolamento de Base, Apontamentos do Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal

HANSEN, H.I., THOFT-CHRISTENSEN, P., (s/d), Active Control of Long Bridges Using Flaps, Chapter 92, Aalborg University, Aalborg, Denmark, pp. 1159-1166.

HANSEN, H.I., THOFT-CHRISTENSEN, P., (s/d), Wind Tunnel Experiments with Active Control of Bridge section Model, Chapter 93, Aalborg University, Aalborg, Denmark, pp. 1167-1172.

HARRIS, C.M., CREDE, C.E., (1976), Shock and Vibration Handbook, 2nd Ed., McGraw Hill, New York.

HASKETT, T., BREUKELMAN, B., ROBINSON; J., KOTTELENBERG, J., (s/d), Tuned Mass Dampers under excessive structural excitations, <http://www.motioneering.ca/User/Doc/1273.pdf>, consultado em Março de 2009

HBSE, (2005), "Superstructure of suspension bridges – erection of main towers (Akashi-Kaikyo Bridge), retirado do website da Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited <http://www.jb-honshi.co.jp/english/technologies/super.htm> I, Janeiro de 2009

HIRAI, J., NARUSE, M., ABIRU, H., (1996), Structural control with variable friction dampers for seismic response, Proceeding of the 11th. World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México.

HITAKA, T., MATSUI, C., SAKAI, J., (2007), "Cyclic tests on steel and concrete-filled tube frames with Slit Walls", earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 36, Issue 6, pp. 707-727. Wiley, Maio.

HORI, T, NAKASHIMA, H., Structural Design of Shanghai World Financial Center, Proceedings of the Structural Engineers World Congress, CD-ROM, T105-3.

HOUSNER; G.W., (1957), Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the seismological society of America, Vol 47, pp 15-35.

HOUSNER, G.W., BERGMAN, L.A., CAUGHEY, T.K., CHASSIAKOS, A.G., CLAUS, R.O., MASRI, S.F., SKELTON, R.E., SOONG, T.T., SPENCER, B.F., YAO, J.T.P., (1997), Structural Control: Past, Present and Future, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, pp: 897-971, September.

HOUSNER, G. W., HAROUN, M. A., (1980). "Dynamic analyses of liquid storage tanks." Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, TNCEE, Istanbul, Turkey, 8, 431-438.

HSIEH, C.C., KAREEM. A., WILLIAMS, A.N., (1988), "Wave Phase Effects on Dynamic Response of Offshore Platforms," Proc. of the Offshore Mechanics and Arctic Engineering , ASME, Houston, TX.

IGUSA, T., XU, K., (1990), "Wide-band response characteristics of multiple sub-systems with high modal density." Proceedings of the Second International Conference on Stochastic Structural Dynamics, Wiley and Sons, New York, New York.

IGUSA, T., XU, K., (1991), "Vibration reduction characteristics of distributed Tuned Mass Dampers." Structural Dynamics, Recent Advances, Proceedings of the Fourth International Conference, Elsevier Applied Science, New York, New York, 596-605

IMAGES GOOGLE, (2009), <http://images.google.com>

INFANTI, S., (2001), Seismic Protection of Seohae Bridge Approaches through Viscous Dampers, FIP Industriale Technical Report, NT 1549, 9pp, Julho.

INFANTI, S., KANG, H.T., CASTELLANO, M.G., (2004), Retrofit of bridges in Korea using fluid viscous dampers, 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper 2211, Vancouver, Canada.

JENSEN, H., SETARCH, M., PECK, R., (1992), TMDs for Vibration Control of Systems with Uncertain Properties, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 118, No. 18, pp. 3285-3298.

JONSSON, I.G., (1966), Wave boundary layer and friction factors, proceedings of the 10thCCE, American Society of Civil Engineering, pp. 127-148.

KAREEM, A., (1990). "Reduction of wind-induced motion utilizing a Tuned Sloshing Damper." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36, 725-737.

KAREEM, A., KIJEWSKI, T, TAMURA, Y., (1999), Mitigation of motion of tall buildings with recent applications, Wind and Structures, 2(3), 201-251.

KAREEM, A., KLINE, S, (1995), Performance of Multiple Mass Dampers under Random loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(2), 348-361.

KAREEM, A., SUN, W.J., (1987), Stochastic Response of Structure with Fluid-Containing Appendages", Journal of Sound and Vibration, 119(3), pp. 348-361.

KARNOPP, D., CROSBY, M., HARWOOD, R., (1974), Vibration control using semi-active force generators, ASME Journal Engineering for Industry, 96(2), pp. 619-626.

KARNOPP, D., ALLEN, R., (1975), Semi-active control of multi-mode vibratory systems using the ILSM concept, ASME Journal Engineering for Industry, 98(3), pp. 914-918.

KAWATANI, M., YAMADA, Y., SHIMONO, M., MORI, A., (1994), Hybrid control of traffic-induced vibration of girder bridges, Proceedings of the First World Conference on Structural Control, Los Angeles, California, TA2:3-10, August.

KAWASHIMA K UNJOH S, (1993), Variable dampers and variable stiffness for seismic control of bridges // Proceedings of International Workshop on Structural Control. - Honolulu : [s.n.], pp. 283–97.

KAWASHIMA K UNJOH S, IIDA H, MUKAI H, (1992), Effectiveness of the variable damper for reducing seismic response of highway bridges // Proceedings of Second U.S.–Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges, PWRI. - Tsukuba Science City : [s.n.], pp. 479–93.

KAWASHIMA RESEARCH GROUP, (2004), Committee FIB TG7.4, 5th Meeting, Chapter 6, Pavia, Italy, [http://seismic.cv.titech.ac.jp/committee/FIB/PDF/\(5-Chapter6.pdf](http://seismic.cv.titech.ac.jp/committee/FIB/PDF/(5-Chapter6.pdf)

KELLY, J.M., SKINNER, R.I., HEINE, A.J., (1972), Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures, Bull. N.Z. Soc. Earthquake Engrg, 5(3), pp. 63-88.

KIM, J., RYU, J., CHUNG, L., (2006), "Seismic performance of structures connected by viscoelastic dampers", Engineering Structures, Volume 28, Issue 2, pp. 183-195, Elsevier, Janeiro.

KIM, Y. (2001), "Numerical simulation of Sloshing flows with impact loads," Applied Ocean Research, 23, 53-62.

KOBORI, T., (1998), Mission and perspective towards future structural control research, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Vol. 1, pp. 25-34, Kyoto, Japan.

KOBORI, T., TAKAHASHI, M., NASU, T., NIWA, N., OGASAWARA, K., (1993), Seismic response controlled structures with active variable stiffness system, Earthquake engineering & structural dynamics, 22(11): 925-41.

KOSS H. H., GEORGAKIS C.T., (2005), Wind Engineering for the new European Court of Justice, Luxembourg,

KOSS, L.L., MELBOURNE, W.H., (1995), Chain Dampers for Control of Wind-Induced Vibration of Tower and Mast Structures, Engineering Structures, 17(9), pp. 622-625.

KUO CC WU H, LIU L, SACK RL, EBRAHIMPOUR A, PATTEN WN, (1994), Semiactive structural control: a low cost fix for an infrastructure at risk, Proceedings of Structures Congress XII, ASCE, Atlanta : [s.n.], pp. 387–392.

KURATA N KOBORI T, TAKAHASHI M, NIWA N, KURINO H., (1994), Shaking table experiment of active variable damping system, Proceedings of First World Conference on Structural Control, Pasadena, [s.n.]

KURATA, N., KOBORI, T., TAKAHASHI, M., NIWA, N., MIDORIKAWA, H., (1999), Actual seismic response controlled building with semi-active damper system, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, pp. 1427-1447.

KWOK, K.C.S., (1984), Damping Increase in Building with Tuned Mass Damper, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Volume 110, Issue 11, pp. 1645-1649.

KWOK, K.C.S., MACDONALD, P.A., (1987), Wind-induced response of Sydney Tower, Proceedings of the First National Structural Engineering Conference, pp.19-24.

KWOK, K.C.S., MACDONALD, P.A., (1990), Full-scale Measurements of acceleration Response of Sydney Tower, Engineering Structures, Volume 12, Issue 3, pp. 153-162, Julho.

KWOK, K.C.S., SAMALI, B., (1995), Performance of Tuned Mass Dampers under wind loads, Engineering Structures, 17(9), 655-667.

KWOK K. C. S., XU, Y. L., SAMALI, B., (1991), Control of Wind-induced vibrations of tall structures by optimized tuned liquid column dampers / ed. in Y. K. Cheung J. H. W. Lee and A. Y. T. Leung (eds), Balkema : Computational Mechanics, pp. 249-254.

LEE, C., CHEN, Y., CHUNG, L., WANG, Y., (2006), Optimal Design Theories and Applications of Tuned Mass Dampers, Engineering Structures, Vol. 28, Issue 1, pp. 43-53.

LEE, C.K., MOON, F.C., (1989), Laminated Piezoelectric Plates for Torsion and Bending Sensors and Actuators, J. Acoust. Soc. Am., Volume 85, pp. 2432-2439.

LEE, C.K., MOON, F.C., (1989), Modal Sensors/Actuators, ASME Journal of Applied Mechanics, Volume 57, Issue 2, pp. 434-441.

LEE GC LIANG Z, TONG M, (1994), Innervated structures, Proceedings of First World Conference on Structural Control, Pasadena, [s.n.].

LEE, H.H., WONG, S.H., LEE, R.S., (2006), "Response Mitigation on the offshore floating platform system with Tuned Liquid Column Damper", *Ocean Engineering*, Volume 33, Issue 8/9, pp. 1118-1142, Elsevier, Junho.

LEE, H.J., JUNG, H.J., YUN, W.H., LEE, I.W., (2005), "Semi-active neuro-control using MR Dampers for base-isolated benchmark problem", the 18th KKCNN Symposium, Kaohsiung, Taiwan, December 2005

LEE, S.N., CHANG, K.C., HWANG, J.S., (2004), "Application of rolling type bearings for equipment isolation", *Proceedings of 2004 ANCER Annual Meeting (Asian Pacific Network of Centers for Earthquake Engineering Research)*, Honolulu, USA, July 2004.

LETO, I.V., (1994), Preliminary Design of the Messina strait bridge, *Proc. Inst. Civil Eng.—Civil Eng.* 102, pp. 122–129.

LE VEQUE, R., (2002), *Finite Volume Methods for hyperbolic problems*, Cambridge, University Press.

LEVY, R., MARIANCHIK, E., RUTENBERG, A., SEGAL, F., (2001), "A simple approach to the seismic design of friction dampers braced medium-rise frames", *engineering Structures*, Volume 23, Issue 3, pp. 250-259, Elsevier, Março.

LEVY, S., KROLL, W. D., (1951). "Errors introduced by step-by-step integration of dynamic response." *National Bureau of Standards Report*, February, National Bureau of Standards, New York.

LIANG Z TONG M, LEE GC, (1995), Real-time structural parameter modification (RSPM): development of innervated structures, Report No. NCEER 95-0012. - National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo

LI, H.N., LI, G., (2007), "Experimental study of structure with "dual function" metallic dampers", *Engineering Structures*, Volume 29, Issue 8, pp. 1917-1928, Elsevier, Agosto.

LIN, C., WANG, J., UENG, J., (2001), Vibration Control Identification of Seismically Excited MDOF structure – PTMD systems, *Journal of Sound and Vibration*, 240(1), pp. 87-115.

LIN, P.Y., ROSCHKE, P.N., LOH, C.H., CHENG, C.P., (2003), "Hybrid Controlled Base-Isolation System with Semi-Active Magnetorheological damper and Rolling Pendulum System", *Joint Workshop between the National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) and the Joint Research Center (JRC)*, Taipei, Taiwan, Novembro.

LIN, P.Y., ROSCHKE, P.N., LOH, C.H., (2007), Hybrid base-isolation with magnetorheological damper and fuzzy control, *Structural Control and Health Monitoring*, Volume 14, Issue 3, pp. 384–405, Publicado online a 13 de Março de 2006 in Wiley InterScience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)).

LOH, C.H., LIN, P.Y., CHUNG, C.P., (1999), Experimental Verification of Building Control using Active Bracing System, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 28, Issue 10, pp. 1099-1119, Wiley.

LOH C MA M, (1996), Control of seismically excited building structures using variable damper systems, *Engineering Structures.*, Vol. 18, Issue 4, pp. 279–287.

LORD, (2008), Lord Product Bulletins: MR Controllable Friction Dampers RD-1097-01, MR Damper RD-1005-3, Tactile Feedback Device, [www.lord.com](http://www.lord.com)

LUI, P. C., LOU, J. Y. K., (1990). "Dynamic coupling of a liquid-tank system under transient excitations." *International Journal of Ocean Engineering*, ASCE, 17(3), 263-277.

MACIOCE, P., (2002), "Understanding viscolastic damping and treatments using typical adhesive materials", *Adhesives Sealants Industry Journal*, Julho

MACNAMARA, R.J., (1977), Tuned Mass Dampers for buildings, *Journal of Structural Division*, American Society of Civil Engineering, Vol 103, pp. 1785-1798.

MAHMOODI, P., (1969), Structural dampers, *ASCE Journal of the Structural Division*, 95(8), pp. 1661-1672.

MAHMOODI, P., ROBERTSON, L.E., YONTAR, M., MOY, C., FELD, I., (1987), Performance of Viscoelastic Dampers in World Trade Center Towers, *Dynamic of Structures*, Structures Congress '87, Orlando, Florida.

MAKRIS, N., BURTON, S., HILL, D., JORDAN, M., (1995), Analysis and Design of an Electrorheological Dampers for Seismic Protection of Structures, *Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, I. Chopra Ed., pp. 184-194.

MALDONADO-MERCADO, J. C., 1995, Passive and Active Control of structures, Degree of Master of Science / Civil and Environmental engineering; MIT. - Massachusetts Institute of Technology.

MARTELLI, A., (2007), State of the Art of the Application of Innovative Anti-Seismic Techniques in the World, *International Seminar on Development of Innovative Anti-Seismic Systems in the Framework of the LESSLOSS and Other Research Project*. - Lisboa, Portugal, s.n, Outubro de 2007.

MASNI, S.F., CUAGHEY, T.K., (1966), On the stability of the Impact Damper, *Transactions of the ASME*, pp. 586-592, Setembro

MAURER SÖHNE GMBH & CO., KG Maurer Söhne GmbH & Co. KG [Online] // Maurer Söhne GmbH & Co. KG. - 3 de Junho de 2008. - [http://www.maurer-soehne.com/en/Bridge/seismic/Files/MAURER\\_Seismic\\_Protection.pdf](http://www.maurer-soehne.com/en/Bridge/seismic/Files/MAURER_Seismic_Protection.pdf).

MAURER SOHNE GMBH & CO, Maurer Adaptative Cable Damper (ACD) – Cable Stayed Bridge, Maurer Sohne Project Information, N.º 2, VBA 02/2005, [www.maurer-soehne.com](http://www.maurer-soehne.com)

MAEBAYASHI, K., TAMURA, K., SHIBA, K, OGAWA, Y., INADA, Y., (1993), Performance of Hybrid Mass Damper System Implemented in Tall Building, *Proceedings of International Workshop on Structural Control*, pp. 318-328.

MB, (2009), Millennium Bridge,

[http://www.earth-photography.com/Countries/England/England\\_London\\_MillenniumBridge.html](http://www.earth-photography.com/Countries/England/England_London_MillenniumBridge.html) , consultado em Março de 2009

MEIROVITCH L., (1990), *Dynamics and Control of Structures*. John Wiley & Sons, Inc.

MICROSOFT VISUAL EARTH, (2008), <http://maps.live.com/> (última visita em Julho de 2008).

MILES, J.W., (1967), Nonlinear surface waves in closed basins, *Journal of Fluids Mechanics*, Vol. 75, pp. 419-448.

M.I.T., (2005), “Dampers Hols Sway”, website: <http://moment.mit.edu/documentLibrary/Paper015/paper015.htm>, M.I.T., Massachusetts Institute of Technology acedido em Fevereiro de 2009

MITA, A, FENG, M.Q., (1994), Response control strategy for tall buildings using interaction between Mega and Sub-structures, *Proceedings of International Workshop on Civil Infrastructures Systems*, Taipei, Taiwan, PRC, 329-341.

MITSUBISHI STEEL MFG. CO., LTD, (2005), <http://www.mitsubishisteel.co.jp/> Consultado em 2005.

MIYAZAKI M., MITSUSAKA, Y., (1992), Design of a building with 20% or greater damping, *Proceedings of the 10th World Conference. on Earthquake Engeneering*, Madrid, pp. 4143-4148.

MIZUNO T KOBORI T, HIRAI J, YOSHINORI M, NIWA N, (1992), Development of adjustable hydraulic damper for seismic response control of large structures, *New Orleans* ,, Vol. 229, pp. 163-709.

MOLINA, F.J., BAIRRAO, R., BLAKEBOROUGH, T., BURSI, O., TIRELLI, D., MAGONETTE, G., MOUZAKIS, H., WILLIAMS, M.S., (2006), Testing performance benchmark for shaking tables and reaction walls within the NEFOREEE Project, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Paper 303, Geneva, Switzerland.

MORAIS, P.G., (1993), Dispositivo para ensaio à fadiga de paredes de alvenaria, *Relatório 13/93 – GEM, LNEC*.

MORESCHI, L. M., (2000), *Seismic Design of Energy Dissipation Systems for Optimal Structural Performance*, PhD, Virginia Polytechnic Institute and State University. - Blacksburg, Virginia, 2000.

MORISHINA, S., MITSUI, J., (1992), Controllable Squeeze Film Dampe: An Application of Electrorheologic Fluid, *Trans ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, 114, pp. 354-357

MORISHINA, S., URA, T., (1993), ER Fluid Applications of Vibration Control Devices and an Adaptive Neural-Net Controller, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 4.

MT, (2007), Millennium Tower in Tokyo, Japan, designed by Foster+Partners

[http://www.propertywisebulgaria.com/article/millenium-tower-in-tokyo-japan-designed-by-fosterpartners/id\\_1360/catid\\_11](http://www.propertywisebulgaria.com/article/millenium-tower-in-tokyo-japan-designed-by-fosterpartners/id_1360/catid_11)

NAGASE, T, HISATOKU, T., (1992), Tuned-Pendulum Mass Damper installed in Crystal Tower, *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 1, 35-56

NAKAMURA, Y., FUJITA, T., TANAKA, K., OHYAMA, H., MURAKOSHI, K., MIYANO, H., HORA, H, SUGANUMA, M, (1996), Development of hybrid mass damper using

linear-induction-servomotor for vibration control of tall buildings, 11WCEE, Acapulco, México, paper ...

NASA, (2009), [http://science.nasa.gov/headlines/y2003/02apr\\_robotblood.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2003/02apr_robotblood.htm)

NASHIMURA, I., KOBORI, T., SAKAMOTO, M., YAMADA, T., KOSHIKA, N., SASAKI, K., OHRUI, S., (1993), Active passive Tuned Mass Damper, Proceedings of the ATC 17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, San Francisco, California, pp. 737-748.

NASHITANI, A., NITTA, Y., ISHIBASHI, Y., (2000), Structural Control Based on Semi-Active Variable Friction Dampers, 12th World Conference on Earthquake Engineering, paper n.º 1909, Auckland, New Zealand.

NASU, T., KOBORI, T., TAKAHASHI, M., KUNISUE, A., (1998), Analytical study on a high-rise building with the active variable stiffness system, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, Vol. 1, pp. 805-814.

NETLEY, J., BARNARD, E., (2008), Analysis of Tuned Liquid Damper for reducing building vibrations, Department of Civil Engineering, University of Bristol, May, 39pp.

NISEE, 2009, <http://nisee.berkeley.edu/lessons/kelly.html>, fotografia de I. Aiken, consultado em Janeiro de 2009

NIIYA, T., ISHIMARU, S., KOIZUMI, T., TAKAI, S., (1994), A hybrid system controlling large amplitude vibrations of high-rise buildings, Proceedings of the First World Conference on Structural Control, Los Angeles, California, pp. FA2:43-52, August.

NISSEN, H.D., SORENSEN, P.H., JANNERUP, O., (2004), Active Aerodynamic Stabilisation of Long Suspension Bridges, Journal of Wind and Industrial Aerodynamics, Volume 92, Issue 10, pp. 829-847, Elsevier, Agosto.

OILES Co, 2008, Seismic isolation and vibration control for bridges and buildings – Friction Pendulum system,

<http://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/isolate/fps.html>, consultada em Novembro de 2008

OKAMOTO, T., KAWAHARA, M., (1992), Two dimensional sloshing analysis by the arbitrary Lagrangian-Eulerian finite method, JSCE, Structural Engineering/Earthquake Engineering, Vol. 8, Nº 4, 207-216

OLIVEIRA, C., (2003), Sistemas semi-activos de protecção sísmica de pontes, Tese para obtenção do grau de mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

OLIVEIRA, C., (2009), Dynamic behaviour analysis of bridges with adaptative protection systems, Tese para obtenção do grau de Doutor, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 374pp.

OLSON, D.E., REED, D.A., (2000), “A nonlinear numerical model of the sloped bottom tuned liquid damper”, 8th ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, paper nº30, University of Notre Dame, USA

ORMONDROYD, J., DEN HARTOG, J.P., (1928), The Theory of the Dynamic Vibration Absorber, Trans. ASME, APM-50-7, 9-22

OSPINA, C.S., (2008), *Optimização de Amortecedores de Massa Sintonizados, Múltiplos e Interligados para controle de Vibrações em Edifícios Altos*, Tese de Mestrado em estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 65pp.

OSTERMEYER, G.P., MULLER, M., (2006), "Dynamic Interaction of Friction and Surface Topography in Brake Systems", *Tribology International*, Volume 39, Issue 5, pp. 370-380, Elsevier, Maio.

OU, J., LONG, X., LI, Q., (2007), "Seismic response analysis of structures with velocity-dependent dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 63, Issue 5, pp. 628-638, Elsevier.

OZDEMIR, H., (1976), *Nonlinear Transient Dynamic Analysis of Yielding Structures*, PhD Dissertation, University of California, Berkeley.

PALL, A.S., MARSH, C., (1982), *Response of Friction Damped Braced Frames*, *Journal of Structures Division, ASCE*, 108(ST6), pp. 1313-1323.

PALL, A.S., MARSH, C., FAZIO, P., (1980), *Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures*, *Journal of Prestressed Concrete Institute*, 25(6), pp. 38-61.

PALL, A.S., PALL, R., (1996), *Friction-Dampers for seismic control of buildings: A Canadian experience*, 11WCEE, Acapulco, México.

PATTEN WN KUO CC, HE Q, LIU L, SACK RL, (1994), *Seismic structural control via hydraulic semi-active vibration dampers (SAVD)*, *Proceedings of First World Conference on Structural Control*, Los Angeles : [s.n.], FA2-83–FA2-89.

PATTEN, W.N., MO, J., KUEHN, M.J., LEE, J., (1998), *A primer on design of semi-active vibration absorbers*, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, N<sup>o</sup> 1, pp. 61-68.

PATTEN WN SACK RL, YEN W, MO C, WU HC *Seismic motion control using semiactive hydraulic force actuators*, *Proceedings of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, San Francisco, [s.n.], pp. 727–736.

PAZ, M. (1985). *Structural Dynamics - Theory and Computation*, Second Edition. Van Nostrand Reinhold, New York.

PETERSEN, N.R., (1980), *Design of Large Scale TMD, Structural Control*, Leipholz H.H.E. Ed, pp. 581-596, North Holland

PETTI, L., SOONG, T.T., PALAZZO, B., (1994), *Hybrid mass dampers for structural control against wind and earthquakes*, *Proceedings of the First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, pp. TP1:110-118, August.

PHILIPPON, S., SUTTER, G., MOLINARI, A., (2004), "An experimental study of friction at high sliding velocities", *Wear*, Volume 257, Issues 7-8, pp. 777-784, Elsevier, October.

PI, (2009), *Ponte Pedonal Pedro e Inês*, <http://images.google.com/> , consultado em Março de 2009

PINKAEW, T., FUJINO, Y., (2001), Effectiveness of Semi-Active Tuned Mass Dampers Under Harmonic Excitation, *Engineering Structures*, Vol 23, pp. 850-856

PINTO, O, GONÇALVES, P., (2000), Non-linear Control of Buckled Beams under Step Loading, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 14, Issue 6, pp. 967-985, Elsevier, Novembro

POLAK E MEEKER G, YAMADA K, KURATA N, (1994), Evaluation of an active variable-damping structure, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, Vol. 23, pp. 1259–1274.

PRANESH M., SINHA, R., (2000), Aseismic Design of Tall structures using Variable Ferquency Pendulum Oscillator, 12th World Conference on Earthquake Engineering, paper0284, Auckland, New Zealand.

PREUMONT, A., DUFOUR, J.P., MALEKIAN, C., (1992), Active Damping by a Local Force Feedback with Piezoelectric Actuators, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Volume 15, Issue 2, pp. 390-395.

RAI D.C., WALLACE, B.J., (2000), “Aluminiu Shear-Link for Seismic Energy Dissipation”, proceedings of the 12th World Conference, paper n°0279, Auckland, Nova Zelândia.

RANA, R., SOONG, T.T., (1998), Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers, *Engineering Structures*, Vol. 20, Issue 3, pp. 193-204.

RANIERI, N., (2007), Shaking Table testing on anti-seismic devices, International Seminar Development of innovative anti-seismic systems in the framework of the LESSLOSS and other research projects, Lisboa, Portugal, Outubro.

REINHORN, A., SOONG, T.T., HELGESON, R.J., RILEY, M.A., CAO, H., (1998), Analysis, Design and Implementation of an Active Mass Damper for a Communication Tower, *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, pp. 1727-1736.

RILEY, M.A., REINHORN, A.M., NAGARAJAIAH, S., (1998), Implementation issues and testing of hybrid sliding isolation system, *Engineering Structures*, Volume 20, Issue 3, pp. 144-154, Elsevier, Março.

ROBINSON, J.K, KALA, S., (2007), Presentation for Dubai Municipality, RWDI Consulting Engineers and Scientist, Motioneering, 35pp.

ROBINSON, J.K., GAMBLE, S.L., MYSLIMA, B.L., (2007), Supplemental Damping and Using Tuned Sloshing Dampers, *Structure –A joint publication of NCSEA*, <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=389>

ROBINSON SEISMIC LDA, (2008), Lead extrusion dampers, <http://www.rslnz.com/?pageRequired=showDoc&item=4&PHPSESSID=53533a7380f9a42c7b6d127263ef778d>, consultada a 1 de Outubro de 2008.

ROFOOEI F.R., TADJBAKSH, I.G., (1993), Optimal Control of Structures with Acceleration, Velocity and Displacement Feedback, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 119, No. 10, pp. 1993-2010.

ROSS, D., UNGAR, E.E., KERWIN, E.W., (1959), Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Laminar, Structural Damping, ed. Ruzicka E.J., ASME, New York.

SACK RL KUO CC, WU HC, LIU L, PATTEN WN, (1994), Seismic motion control via semiactive hydraulic actuators, Proceedings of Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, [s.n.], Vol. II, pp. 311-320.

SADEK, F. et. al., (1996), Passive Energy Dissipation Devices for Seismic Applications, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

SAKAMOTO, M., (1993), Practical Applications of Active Structural Response Control and Earthquake & Strong Wind Observation Systems, Planning Workshop for the Hong Kong International Full-Scale Control Test Facility, University of Science & Technology, Hong Kong, December.

SAMALI, B., KWOK, K., (1995), "Use of viscoelastic dampers in reducing wind and earthquake-induced motion of building structures", Engineering Structures, Volume , Issue 9, pp. 639-654, Elsevier, November

SAMARAS; S., CARSTAIRS, N., POWELL, D., (2005), Gatwick air bridge, The Structural Engineer, Vol 83 Issue 18.

SATO T SATO M, TANAKA S, TOKI K., (1996), Modeling of a variable damper and its application, Proceedings of Second International Workshop on Structural Control, Hong Kong, pp. 482-489.

SCHMIDT, K., DORKA, U., (2004), Experimental Verification of Hyde-System, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 3163, Vancouver, Canada.

SEAOC, (2005), Performance based seismic engineering of buildings, Part 2: Conceptual framework – Vision 2000 Committee, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, U.S..

SERINO G., SPIZZUOCO, M., (2002), About The Design of Passive and Semi-Active MR Dampers for Seismic Protection of Buildings, 12th European Conference on Earthquake Engineering, London paper#709.

SETO, K., 1998, Modelling and active vibration control of flexible structures, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, Vol. 1, pp. 15-24.

SHIBATA, S., MORINO, Y., SHIBAYAMA, Y., SEKINE, K., (1992), Adaptive Control of Space Truss Structures by Piezoelectric Actuator , Journal of Intelligent Materials and Structures, Volume 3, Issue 4, pp. 697-718.

SHING, P.B., DIXON, M., KERMICHE, N., SU, R., FRANGOPOL, D.M., (1994), Hybrid control techniques for building structures, Proceedings of the First World Conference on Structural Control, Los Angeles, California, pp. WP2: 100-109, August.

SHINOZUKA M CONSTANTINOUC MC, GHANEM R, (1992), Passive and active fluid dampers in structural application, Proceedings of U.S./China/Japan Workshop on Structural Control, Shanghai, [s.n.]

SILVA, R., (2007), Página Google earth, <http://www.panoramio.com/photos/original/1377096.jpg>, consultada a 29 de Julho de 2008.

SINGH M.P., MATHEU, E.E., (1997), Active and Semi-Active Control of Structures under Seismic Actions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26. - pp. 193-213.

SKINNER, R.I., KELLY, J.M., HEINE, A., J., (1975), Hysteresis Dampers for Earthquake-Resistant Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3, pp. 287-296.

SKINNER, R.I., ROBINSON, W.H., MCVERRY, G.H., (1993), An Introduction to Seismic Isolation, Wiley, Chichester and New York.

Sofia, R., (2008), Página Olhares Fotografia online [http://olhares.aeiou.pt/ponta\\_delgada\\_e\\_os\\_edificios\\_sol\\_mar\\_/foto2080854.html](http://olhares.aeiou.pt/ponta_delgada_e_os_edificios_sol_mar_/foto2080854.html), consultada a 29 de Julho de 2008.

SOONG, T.T., (1994), Research and Development of Active Control Systems", Research Accomplishments, 1986-1994, The National Center for Earthquake Engineering Research, pp. 63-73, Buffalo, EUA, Setembro

SOONG T. T., CONSTANTINOU, M. C., (1994), Passive and Active Structural vibration control in civil engineering, Springer-Verlag, Wien and New York.

SOONG, T.T., DARGUSH, G.F., (1997), Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons, New York.

SOONG, T.T., MASRI, S.F., HOUSNER, G.W., (1991), An overview of Active Structural Control under Seismic Loads, Earthquake Spectra, Volume 7, N.º 3, pp. 483-505.

SOONG, T.T., REINHORN, A.M., (1993), An overview of active and hybrid structural control research in the U.S., The Structural Dynamic Design of Tall Buildings, Vol. 2, pp. 192-209.

SOONG T.T., SPENCER JR., B.F., (2002), Supplemental Energy Dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, Engineering Structures. - 2002. - Vol. 24. - pp. 243-259.

SOUZA. R. A., (2003), Controle passivo/ativo das oscilações de estruturas esbeltas por meio de dispositivos fluido-dinâmicos, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 147pp.

SOUZA, S.L.T., CALDAS, I.L., VIANA, R.L., BALTHAZAR, J.M., BRASIL, R.M., (2006), "Dynamics of vibrating systems with tuned liquid column dampers and limited power supply" Journal of Sound and Vibration, Volume 289, Issue 4/5, pp. 987-998, Elsevier, Fevereiro

SPENCER JR., B., CARLSON, J., SAIN, M.K., YANG, G., (1997b), On the current status of magnetorheological dampers: Seismic protection of full-scale structures, Proceedings of the American Control Conference, pp. 458-462.

SPENCER JR., B., DYKE, S., (1996), Semi-active structural control: System identification for synthesis and analysis, Proceedings of the 1st European Conference on Structural Control, Barcelona, Spain.

SPENCER JR., B., DYKE, S., CARLSON, J., (1997a), Phenomenological model for magnetorheological dampers, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, N° 3, pp 230-238.

SPENCER JR., B., DYKE, S., DEOSKAR, H., (1998), Benchmark Problems in Structural Control: Part II – Active Tendon System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1141-1147.

SPENCER JR., B., DYKE, S., SAIN, M.K., (1996), Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures, Proceedings of the Conference on Decision and Control, pp. 676-681.

SPENCER JR., B., SAIN, M.K., (1997), Controlling buildings: a new frontier in feedback, Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology, Vol. 17, N° 6, pp. 19-35, December.

SPENCER JR., B., SOONG, T.T., (1999), New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in U.S.A., Proceedings of International Post-SMIRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Cheju, Korea, August.

SPENCER JR., B.F., SUHARDJO, J., SAIN, M.K., (1994), Frequency domain optimal control strategies for aseismic protection, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 120, n.º 1, pp. 135-159, 1994.

SPT, (2009), Shinjuku Park Tower, [http://en.wikipedia.org/wiki/Shinjuku\\_Park\\_Tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Shinjuku_Park_Tower), consultado em Março de 2009

STANTON, J., ROEDER, C., (1991), Advantages and limitations of seismic isolation, Earthquake Spectra, Vol. 7, nº2, pp. 301-324.

SUHARDJO, J., SPENCER JR., B.F., KAREEM, A., (1992), Frequency domain optimal control of wind excited buildings, Journal of Engineering. Mechanics, ASCE, Vol. 118, nº 12, pp. 2463-2481.

SUHARDJO, J., SPENCER JR., B.F., SAIN, M.K., (1990), Feedback-feedforward control of seismic structures, Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, Vol. 3, pp.437-446.

SUN, L.M., (1991), Semi-analytical modelling of Tuned Liquid Damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing, Tese de Doutorado, Universidade de Tokyo.

SWFC WIKIPEDIA, (2009), Shanghai World Financial Center, [http://pt.wikipedia.org/wiki/Shanghai\\_World\\_Financial\\_Center](http://pt.wikipedia.org/wiki/Shanghai_World_Financial_Center), acedido em Março de 2009

Symans MD Constantinou MC, (1995), Development and experimental study of semi-active fluid damping devices for seismic protection of structures, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, [s.n.]

Symans MD Constantinou MC, (1996a), Experimental study of seismic response of structures with semi-active damping control systems, Proceedings of Twelfth Conference on Analysis and Computation held in conjunction with Structures Congress XIV, ASCE, Chicago, pp. 350-360.

Symans MD Constantinou MC, (1996b), Semi-active control of earthquake induced vibration, Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. – Acapulco, [s.n.].

Symans MD Constantinou MC, Taylor DP, Garnjost KD, (1994), Semiactive fluid viscous dampers for seismic response control, Pasadena, FA4-3–FA4-12.

SYMANS, M.D., CONSTANTINOU, M.C., (1999), Semi-Active Control Systems for Seismic Protection of Structures: A State-of-the art review, Engineering Structures, Volume 21, Issue 6, pp. 469-487, Elsevier, Junho.

TAIPEI 101, (s/d), Taipei 101 [http://www.motioneering.ca/User/Doc/pp\\_taipei101.pdf](http://www.motioneering.ca/User/Doc/pp_taipei101.pdf), consultado em Março de 2009

TAKENAKA Co, (1999), “Protecting Rodin’s sculpture the Gates of Hell at the National Museum of Western Art withstanding Earthquakes with Base isolation retrofit”, news release from March 31, 1999, recolhido em Janeiro de 2009, [http://www.takenaka.co.jp/takenaka\\_e/news\\_e/pr9903/m9903\\_04.htm](http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/news_e/pr9903/m9903_04.htm)

TAKENAKA Co, (1999), Hybrid Base Isolation System Used in Superhigh-Rise Office Building for the First Time in the World - Successful testing of base isolation system in "DT Project" revealed, news release from June 21, 2001, recolhido em Março de 2009,

[http://www.takenaka.co.jp/takenaka\\_e/news\\_e/pr0106/m0106\\_06.htm](http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/news_e/pr0106/m0106_06.htm)

TAMBOLI, A., (s/d), Tall Buildings : Sustainable Design Opportunities, [http://www.ctbuh.org/Portals/0/Repository/T2\\_Tamboli.23276e4f-d440-446e-be75-1d5c8104c530.pdf](http://www.ctbuh.org/Portals/0/Repository/T2_Tamboli.23276e4f-d440-446e-be75-1d5c8104c530.pdf), consultado em Março de 2009

TAMURA, Y., (s/d), Mitigation of wind induced building vibrations, The 21st Century Center of Excellence Program, COE Program TPU – Wind Effects on Buildings and Urban Environment, Lecture 11, 63pp.

TAMURA, Y., FUJII, K., OHTSUKI, T., WAKAHARA, T., KOHSAKA, R., (1995), Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation, Engineering Structures, Vol 17 Nº 9 pp 609-621.

TAMURA, Y., KOHSAKA, R., NAKAMURA, O., MIYASHITA, K., MODI, V., (1996), Wind-Induced Responses of an Airport Tower- Efficiency of Tuned Liquid Damper, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 65, pp. 121-131.

TAMURA, K., SHIBA, K., INADA, Y., WADA, A., (1994), Control gain scheduling of a hybrid mass damper system against wind response of tall buildings, Proceedings of the First World Conference on Structural Control, Los Angeles, California, pp. FA2:13-22, August.

TANAKA, K., FUJITA, T., OHYAMA, H., NAKAMURA, Y., ISHII, M., MURAKOSHI, K., KURABAYASHI, H., (1995), Development and practical application of hybrid mass damper using AC-servomotor for vibration control of tall/slender buildings, International Association for shell and spatial structures, International Symposium 1995 (IASS), Milan, Italy.

TANIDA, K., KOIKE, Y., MUTAGUCHI, K., UNO, N., (1991), Development of hybrid active-passive damper, Active and Passive Damping, ASME, PVP – vol 211, pp. 21-26.

TAYLOR, D., (2009), History, Design and Applications of Fluid Dampers in Structural Engineering, Taylor Devices Inc., <http://www.taylordevices.com/papers/history/design/htm>

TAYLOR DEVICES Inc, (2009), <http://www.taylordevices.com>

TIMOSHENKO, S. P., (1928). Vibration Problems in Engineering, First Edition. Van Nostrand Publishing Company, New York.

TMF, (2009), Teatro Municipal de Faro, <http://images.google.com/>, consultado em Março de 2009

TSAI et. al. (1993),

TZOU, H.S., GADRE, M., (1989), Theoretical Analysis of a Multi-layered Thin Shell Coupled with Piezoelectric Shell Actuators for Distributed Vibration Controls, Journal and Vibration, Volume 132, Issue 3, pp. 433-450.

TZOU, H.S., TSENG, C.I., (1990), Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator Design for Dynamic Measurement/Control of Distributed Parameter Systems: A Piezoelectric Finite Element Approach, Journal of Sound and Vibration, Volume 138, Issue 1, pp. 17-34.

TZOU, H.S., (1992), A New Distributed Sensor and Actuator Theory for 'Intelligent' Shells, Journal of Sound and Vibration, Volume 153(2), pp. 335-349.

VANDIVER, J. K. AND MITONE, S., (1978). "Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms." Applications, Ocean Research., 1, 67-74 .

VANDORN, W.G., (1966), Boundary dissipation of oscillatory waves, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 24, part 4, pp. 769-779.

VENÂNCIO, J. P.; VILLAR, M.; MÁRTIRES, S., (2004), Edifícios com Isolamento Acústico nas Fundações – Hotel Mundial e Teatro Municipal de Faro, Proceedings of National Meeting of Betão Estrutural, paper T5-10, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, Novembro.

VG, (2009), Ponte Vasco da Gama, [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_Vasco\\_da\\_Gama](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Vasco_da_Gama), consultado em Março de 2009

VIBEST, (2006), ViBest – Design and Tuning of TMDs of Pedro e Inês Footbridge, [http://paginas.fe.up.pt/vibest/html/casestudies/casestudy\\_9.html](http://paginas.fe.up.pt/vibest/html/casestudies/casestudy_9.html), consultado em Março de 2009

WAKAHARA T., OHYAMA, T., FUJII, K., (1992), Suppression of Wind-induced vibration of a tall building using tuned liquid damper, Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, Vol. 41-44, pp. 1895-1906.

WAKAHARA, T., SHIMADA, K., TAMURA, Y., (1994), Practical Application of Tuned Liquid Damper for Tall Buildings, ASCE Structures Congress & IASS International Symposium, Atlanta.

WARBURTON, G.B., (1980), Optimal absorber parameters for simple systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, 197-217.

WARBURTON, G.B., (1981), Optimal absorber parameters for minimizing vibration response, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, 251-262.

WARBURTON, G.B., (1982), Optimal absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 381-401.

WELT, F., MODI, V.J., (1989a), Vibration Damping through liquid sloshing: Part I – A nonlinear analysis, *Proc. Diagnostics, Vehicle Dynamics and Special Topics*, ASME, Design Engineering Division (DE), 18-5, pp. 149-156.

WELT, F., MODI, V.J., (1989b), Vibration Damping through liquid sloshing: Part II – Experimental Results, *Proc. Diagnostics, Vehicle Dynamics and Special Topics*, ASME, Design Engineering Division (DE), 18-5, pp. 149-156.

WILLIAM CLAYTON, (2009),

[http://www.sciencelearn.org.nz/contexts/earthquakes/sci\\_media/images/william\\_clayton\\_building](http://www.sciencelearn.org.nz/contexts/earthquakes/sci_media/images/william_clayton_building), consultado em Janeiro de 2009

WIESNER, K., (1979), Tuned Mass Dampers to Reduced Building Wind Motion, ASCE Convention and Exposition, Boston, EUA, Abril

WITTAKER, A.S., BERTERO, V.V., THOMPSON, C.L., CHRISTOPHER, L., ALONSO, L.J., (1991), "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices, earthquake Spectra, Volume 7, Issue 4, pp. 563-604, *Earthquake Engineering and Research Institute – EERI*.

XU, K., IGUSA, T., (1992), "Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp. 1059-1070.

XU Y. L., SAMALI, B., KWOK, C. S., (1992), Control of along-wind response of structures by mass and liquid dampers, *J. Eng. Mech., ASCE*, Vol.118, Issue 1, pp. 20-39.

YAMAGUCHI, H., HARPORNCHAR, N., (1993), "Fundamental characteristics of Multiple Tuned Mass Dampers for suppressing harmonically forced oscillations." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 51-62.

YAMAMOTO, M, AIZAWA, S., HIGASHINO, M., TOYAMA, K., (2001), Practical applications of active mass dampers with hydraulic actuator, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 30, Issue 11, pp. 1697-1717, Wiley, Novembro.

YAMAZAKI, S., NAGATA, N., ABIRU, H., (1992), Tuned active dampers installed in the Minato Mirai (MM) 21 Landmark Tower in Yokohama, *Journal of Wind Engineering and Industrial. Aerodynamics*, vol 43, pp 1937-1948.

YANG, G., (2001), Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation; Modeling, testing and control, PhD Thesis, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, Notre Dame, Indiana, December, pp. 243.

YANG, J.N., (1975), Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 101, No. EM6, pp. 818-838.

YANG J.N., AKBARPOUR, A., GHAEMMAGHAMI, P., (1987), New Optimal Control Algorithms for Structural Control, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE., Vol. 113, No. 9, pp. 818-838.

YANG J.N., WU, J.C., AGRAWAL, A.K., LI, Z., (1994), Sliding Mode Control for Seismic-Excited Linear and Non-Linear Civil Engineering Structures, Technical Report NCEER-94-0017.

YANG J.N, WU, J.C., LI, Z., (1996), Control of Seismic Excited Buildings Using Active Variable Stiffness Systems, Engineering Structures, Vol. 18, Nº 8, pp. 589-596.

YEUNG, N., AUSTIN, D., (1998), The effectiveness of viscous-damping walls for controlling wind vibrations in multi-storey buildings” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 77-78, pp. 337-348, Elsevier, Setembro.

YI, F., DYKE, S., FRECH, S., CARLSON, J., (1998), Investigation of magnetorheological dampers for earthquake hazard mitigation, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Kioto, Japan, Vol. 1, pp. 349-358.

YING, Z., SEMERCIGIL, S.E., (1991), Response of a New Tuned Vibration Absorber to an Earthquake-Like Random Excitation, Journal of Sound & Vibration, 150(3), pp. 520-530.

YT WIKIPEDIA, (2009), Yokoama Landmark Tower ,[http://en.wikipedia.org/wiki/Yokohama\\_Landmark\\_Tower](http://en.wikipedia.org/wiki/Yokohama_Landmark_Tower), consultado em Março de 2009

ZASSO A., CIGADA, A., NEGRI, S., (1996), Flutter derivative identification through full bridge aeroelastic model transfer function analysis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 60, pp. 17–33.

ZHANG, J., ROSCHKE, P.N., (1999), “Active control of tall structure excited by wind”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 83, Issues 1-3, pp. 209-223, Elsevier, Novembro.

ZIVANOVIC, S., PAVIC, A., REYNOLDS, P., (2005), “Vibration serviceability of footbridges under human induced excitation: a literature review” Journal of Sound and Vibration, Volume 279, Issue 1/2, pp. 1-74, Elsevier, Janeiro.

ZUO, L., NAYFEH, S., (2003), The Multi-degree-of-freedom Tuned Mass for suppression of Single-mode vibration under random and harmonic excitation. Department of Mechanical Engineering, ASME Design Engineering Technical Conferences, USA.

ZUO, L., NAYFEH, S., (2004), Minimax Optimization of Multi-degree-of-freedom Tuned Mass Dampers, Journal of Sound and Vibration, 272, pp. 893-908.

VISTOS

AUTORIA

P/ O Chefe do Núcleo de Engenharia Sísmica e  
Dinâmica de Estruturas

Ena Coelho

  
**A. Campos Costa**  
Investigador Principal

  
Maria João Falcão Silva

Bolseira de Pós-Doutoramento

O Director  
do Departamento de Estruturas

  
João Almeida Fernandes

  
Alfredo Campos Costa  
Investigador Principal

