



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica  
de Estruturas

Proc. 305/11/17713

**ACTIVIDADE EXPERIMENTAL NA ÁREA  
DOS SISTEMAS PASSIVOS PARA A PROTECÇÃO  
SÍSMICA DE ESTRUTURAS: EXPERIÊNCIA DO NESDE**  
**Relatório de estágio – Parte II**

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

Lisboa • Novembro de 2011

**I&D ESTRUTURAS**

**RELATÓRIO 372/2011 – 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).



## ACTIVIDADE EXPERIMENTAL NA ÁREA DOS SISTEMAS PASSIVOS PARA A PROTECÇÃO SÍSMICA DE ESTRUTURAS: Experiência do NESDE

Nos últimos anos têm-se vindo a intensificar a investigação na área dos sistemas de protecção sísmica. As investigações efectuadas têm vindo a comprovar o excelente funcionamento de sistemas passivos para a protecção sísmica de estruturas. As características deste tipo de sistemas têm vindo a ser intensamente estudadas tanto a nível nacional como a nível internacional.

Com este relatório pretende-se apresentar uma perspectiva do envolvimento do NESDE em actividades experimentais relacionadas com sistemas passivos para a protecção sísmica de estruturas.

As actividades desenvolvidas tiveram lugar no Laboratório de Ensaios Sísmicos do NESDE no âmbito dos Projectos europeus ECOEST II (1996-1999) e NEFOREEE (2002-2005) e na Universidade de Bristol no âmbito do Projecto europeu ECOLEADER (2002-2005), no qual a equipa experimental do NESDE funcionou como utilizador da instalação. Apresentam-se os principais resultados e conclusões obtidas.

O presente relatório servirá, à semelhança do relatório *Sistemas passivos, activos, híbridos e semi-activos: Estado dos conhecimentos*, 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.



## EXPERIMENTAL ACTIVITIES IN THE AREA OF PASSIVE DEVICES FOR SEISMIC PROTECTION OF STRUCTURES: NESDE experience

In recent years the research in the area of seismic protection devices has been intensified. The investigation has demonstrated the excellent performance of passive systems for seismic protection of structures. The characteristics of such systems have been intensively studied both nationally and internationally.

With this report is aimed to present an overview of the involvement of NESDE on experimental activities related to passive systems for seismic protection of structures.

Activities were held in NESDE laboratory of seismic tests within the European projects ECOEST II (1996-1999) and NEFOREEE (2002-2005) and in the University of Bristol under the European project ECOLEADER (2002-2005), in which the experimental team of NESDE worked as an user of the installation. In this document are also presented the main results and conclusions obtained in the scope of the referred projects.

This document also serves, similarly to report *Passive, active, hybrid and semi-active systems for seismic protection of structures: State of the art*, 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





## ACTIVITÉ EXPERIMENTÉL DANS LES SYSTEMES PASSIFS POUR LA PROTECTION SISMIQUE DES STRUCTURES: Experience du NESDE

Au cours des dernières années a été d'intensifier la recherche dans le domaine des systèmes de protection sismique. L'enquête a démontré le bon fonctionnement des systèmes passifs de protection sismique des structures. Les caractéristiques de ces systèmes ont été étudiées au niveau national et international.

Avec ce rapport vise à présenter une vue de la participation de NESDE sur des activités expérimentales liées à des systèmes passifs de protection sismique des structures.

Les activités ont été organisées dans les laboratoires des tests sismiques du NESDE dans les projets européens ECOEST II (1996-1999) et NEFOREEE (2002-2005) et dans l'Université de Bristol, dans le cadre du projet européen ECOLEADER (2002-2005), dans lequel une équipe expérimentale du NESDE a travaillé comme un utilisateur de l'installation. Sont aussi présentes les principaux résultats et les conclusions obtenus.

Ce rapport sera une des lignes directrices, comme rapport *Systèmes passifs, actifs, hybrides et semi-actifs pour la protection sismique des structures : État des connaissances*, 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. Investigação do NESDE (LNEC) na área da Protecção Sísmica	2
2.1. Projecto Europeu ECOESTII (1996-1999)	2
2.2. Projecto Europeu NEFOREEE – Task2 (2002-2005)	10
2.3. Projecto Europeu ECOLEADER – BRIS (2002-2005)	20
2.3.1. 1ª Fase de ensaios (2005)	22
2.3.2. 2ª Fase de ensaios (2007)	37
3. Considerações Finais	53
4. Agradecimentos	54
BIBLIOGRAFIA	55



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Variedade de sistemas de protecção sísmica de estruturas	1
Figura 2 - Sistemas dissipadores metálicos ensaiados: a) Tipo I e b) Tipo II [Bairrão et. al., 2000]	3
Figura 3 – Sistemas dissipadores Tipo I ensaiados no LNEC: a) Chapas soldadas lateralmente e b) Chapas coladas com cola epoxídica e reforçadas com parafusos M6 [Bairrão et. al., 2000]	3
Figura 4 – Dispositivo de ensaio [Bairrão et. al., 2000]	4
Figura 5 – Deslocamento no topo da estrutura para um nível de aceleração intermédio: a) sem dissipadores, b) com dissipadores com chapas soldadas e c) com dissipadores com chapas coladas e reforçados com parafusos [Bairrão et. al, 2000]	5
Figura 6 – Deslocamento no topo da estrutura para aceleração de pico correspondente a 1g: a) com dissipadores com chapas soldadas e b) com dissipadores com chapas coladas e reforçados com parafusos [Bairrão et. al, 2000]	6
Figura 7 – Representação esquemática dos sistemas de contraventamento com dissipadores incluídos ensaiados e respectivos ciclos histiréticos: a) Amortecedores metálicos e b) ligas com memória de forma [Coelho et. al, 2000]	7
Figura 8 – Estrutura ensaiada: a) Vista global de um dos protótipos ensaiados e b) representação esquemática da colocação dos dissipadores [Coelho et. al, 2000]	7
Figura 9 – Resposta dos amortecedores metálicos ensaiados (PGA=0.9g) para uma colocação simétrica de massas: a) Ciclo histirético e b) energia dissipada [Falcão Silva et al., 2005]	8
Figura 10 – Resposta dos amortecedores metálicos ensaiados (PGA=0.9g) para uma colocação assimétrica de massas: a) Ciclo histirético e b) energia dissipada [Falcão Silva et al., 2005]	8
Figura 11 – Resposta das ligas com memória de forma ensaiadas (PGA=0.8g) para uma colocação simétrica de massas: a) Ciclo histirético e b) energia dissipada [Falcão Silva et al, 2005]	9
Figura 12 – Resposta das ligas com memória de forma ensaiadas (PGA=0.8g) para uma colocação assimétrica de massas: a) Ciclo histirético e b) energia dissipada [Falcão Silva et al, 2005]	9
Figura 13 – Visão global da estrutura ensaiada [Bairrão et al., 2007]	11
Figura 14 – Dispositivos tipo Dorka: a) Representação esquemática e b) Implementação no modelo ensaiado [Bairrão et al., 2009]	12
Figura 15 – Dispositivos tipo Jarrett: a) Representação esquemática e b) implementação no modelo ensaiado [Bairrão et al., 2009]	12
Figura 16 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Dorka: a) Componente NS do acelerograma de El Centro com PGA=0.5g e b) acelerograma artificial do EC8 com PGA=0.5g, adaptado de [Molina et.al., 2006]	13
Figura 17 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Jarret: a) Componente NS do acelerograma de El Centro com PGA=0.5g e b) acelerograma artificial do EC8 com PGA=0.5g, adaptado de [Molina et.al., 2006]	14
Figura 18 – Evolução das frequências fundamentais obtidas experimentalmente	15
Figura 19 – FRF obtidas durante o programa de ensaios experimentais: a) Modelo I – Cat01 (Test3), b) Modelo II – Cat 5 (Test13) e c) Modelo III – Cat 10 (Test25)	15
Figura 20 – Comparação entre acelerações transversais no topo do pilar NW	16
Figura 21 – Comparação entre deslocamentos transversais no topo do pilar NW	17
Figura 22 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Dorka: a) Modelo II (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo II (EC8-PGA=1.0g)	19
Figura 23 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Jarret: a) Modelo III (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo III (EC8-PGA=1.0g)	19
Figura 24 – Energia Dissipada - Dispositivos tipo Dorka: a) Modelo II (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo II (EC8-PGA=1.0g)	19
Figura 25 – Energia Dissipada - Dispositivos tipo Jarret: a) Modelo III (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo III (EC8-PGA=1.0g)	20
Figura 26 – Representação esquemática do tanque ensaiado em 2005, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	22

Figura 27 – Dispositivo de ensaio utilizado no âmbito dos ensaios ao TLD desenvolvidos em Bristol: a) perspectiva de cima [Falcão Silva et al., 2007] e b) perspectiva lateral [Falcão Silva et al., 2007]	26
Figura 28 – Definição da instrumentação [Falcão Silva et. al., 2007]	28
Figura 29 – Detalhe da colocação do acelerómetro triaxial [Symes, 2005]	28
Figura 30 – FRF para o pêndulo simples, adaptado de [Symes, 2005]	30
Figura 31 – FRF para sistema pêndulo + amortecedor de líquido sintonizado (h=54mm, PGA=0.035g RMS), adaptado de [Symes, 2005]	33
Figura 32 – FRF para sistema pêndulo + amortecedor de líquido sintonizado (h=75mm, PGA=0.035g RMS), adaptado de [Symes, 2005]	34
Figura 33 – FRF da resposta do sistema estrutural principal (pêndulo): (a) sem amortecedor de líquido sintonizado, (b)-(f) com amortecedor de líquido sintonizado para intensidades de aceleração crescentes de 0.015g RMS até 0.23g RMS, adaptado de [Falcão Silva et. al, 2007]	35
Figura 34 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio utilizado nos ensaios de início de 2007, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	38
Figura 35 – Amortecedor de líquido sintonizado com a água corada com permanganato de potássio, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	39
Figura 36 – Massa de água equivalente para as diferentes amplitudes de excitação testadas (h=63mm), adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	42
Figura 37 – Ciclo histirético para amortecedor de líquido sintonizado sem partículas em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	42
Figura 38 – Massa de água equivalente para as diferentes amplitudes de excitação testadas (h=63mm), adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	43
Figura 39 – Energia dissipada por ciclo, para massa de partículas correspondente a 10% de volume de massa de água, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	44
Figura 40 – Relação força deslocamento para amortecedor de líquido sintonizado com partículas em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	45
Figura 41 – Coeficiente de amortecimento para amortecedor de líquido sintonizado com partículas macias em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	46
Figura 42 – Coeficiente de amortecimento para amortecedor de líquido sintonizado com partículas rígidas em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]	46
Figura 43 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio utilizado nos ensaios de Setembro de 2007, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]	47
Figura 44 – Elevação da superfície da água relativamente à posição de repouso	49
Figura 45 – FRF para a situação sem grelhas metálicas, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]	50
Figura 46 – FRF para a situação com grelhas metálicas, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]	51
Figura 47 – Comparação entre força normalizadas para a situação sem grelhas metálicas e para uma amplitude de excitação de 3.2mm, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]	52
Figura 48 – Comparação entre força normalizadas para a situação com grelhas metálicas e para uma amplitude de excitação de 3.2mm, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]	52

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dinâmicas obtidas por simulação numérica para cada um dos modelos ensaiados, adaptado de [Molina et. al, 2006] .....	13
Tabela 2 – Valores máximos para os ensaios realizados no Modelo II (Dispositivos Dorka) ....	17
Tabela 3 – Valores máximos para os ensaios realizados no Modelo III (Dispositivos Jarrett)...	18
Tabela 4 - Parâmetros ajustados para o pêndulo .....	31
Tabela 5 - Alturas de águas ensaiadas no âmbito do programa experimental de 2007 .....	40
Tabela 6 - Partículas ensaiada, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007] .....	41
Tabela 7 - Gama de frequências e de amplitudes de excitação ensaiadas, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007] .....	41





# 1. Introdução

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.

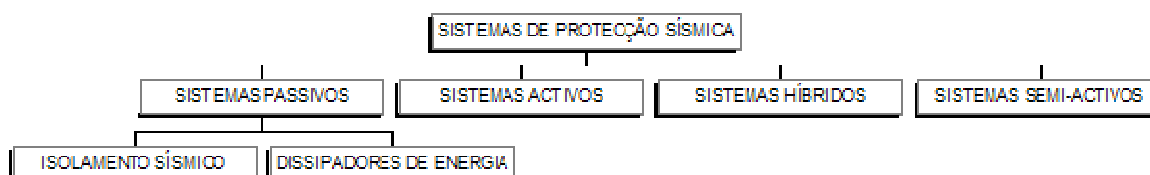


Figura 1 – Variedade de sistemas de protecção sísmica de estruturas

Uma descrição mais exaustiva destes sistemas de protecção bem como exemplos de aplicação prática encontra-se incluída no Relatório LNEC *Sistemas Passivos, Activos, Híbridos e Semi-Activos para a protecção sísmica de estruturas: Estado actual dos conhecimentos* [Falcão Silva e Campos Costa, 2010].

## **2. Investigação do NESDE (LNEC) na área da Protecção Sísmica**

Alguns dos tipos de sistemas dissipadores de energia referenciados no relatório LNEC supra referido [Falcão Silva e Campos Costa, 2010] têm vindo a ser modelados numericamente e testados experimentalmente em Portugal, nomeadamente no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Como exemplo próximo, e tendo como objectivo o estudo da eficácia de algumas das técnicas de controlo passivo referenciadas no presente estado da arte e com potencial aplicação à reabilitação sísmica de estruturas sem dimensionamento sísmico específico, têm vindo a ser desenvolvidos, no âmbito de projectos europeus, programas de ensaios experimentais nas plataformas sísmicas existentes nas instalações experimentais do NESDE (LNEC). Além destes a equipa do NESDE (LNEC) tem vindo também a utilizar outras instalações internacionais, referindo-se como exemplo recente a plataforma sísmica de Universidade de Bristol, para o desenvolvimento de estudos de carácter experimental também na área dos dispositivos de protecção sísmica.

Apresentam-se em seguida alguns dos resultados mais relevantes obtidos e que comprovam o interesse e a tradição do NESDE (LNEC) no estudo e investigação científica deste tipo de sistemas.

### **2.1. Projecto Europeu ECOESTII (1996-1999)**

As primeiras experiências do NESDE na área da protecção passiva de estruturas remontam ao final da década de 90 (1999), tendo sido desenvolvidas no

âmbito do projecto Europeu ECOEST II – European Consortium of Earthquake Shaking Table - por solicitação das Universidades de Bari e de Basilicata.

O primeiro estudo consistiu no ensaio de dois tipos de elementos dissipadores em aço macio (Figura 2) para utilização na protecção sísmica de estruturas.

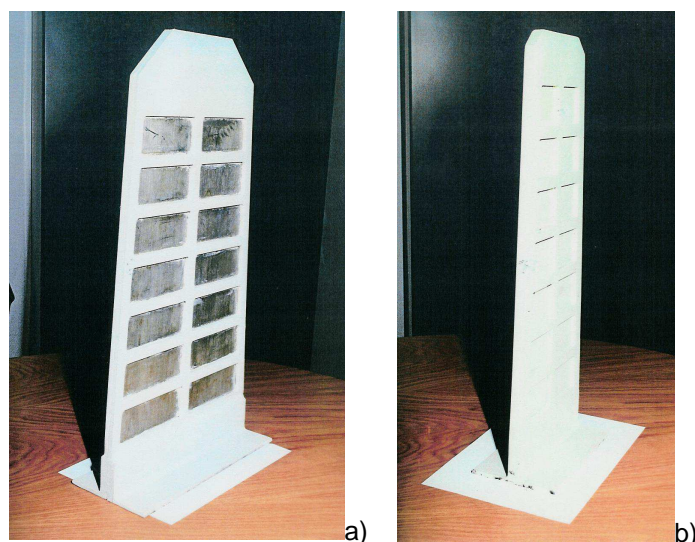


Figura 2 - Sistemas dissipadores metálicos ensaiados: a) Tipo I e b) Tipo II [Bairrão et. al., 2000]

Os dissipadores ensaiados, constituídos por três chapas metálicas, foram desenvolvidos tendo por base um dissipador com funcionamento por corte proposto pela Universidade de Girona [Bairrão et. al, 2000].

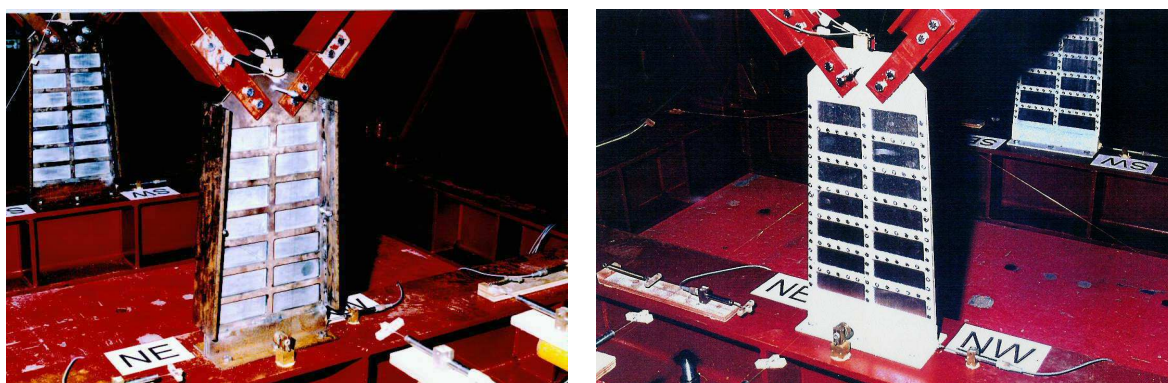


Figura 3 – Sistemas dissipadores Tipo I ensaiados no LNEC: a) Chapas soldadas lateralmente e b) Chapas coladas com cola epoxídica e reforçadas com parafusos M6 [Bairrão et. al., 2000]

No primeiro tipo de dissipadores (Tipo I) as chapas externas apresentavam uma forma alveolar e eram constituídas por aço S355 com 6.5mm de espessura, sendo que a chapa interna era em alumínio com 2mm de espessura (Figura 3a). Na base do dissipador encontrava-se soldado simetricamente um perfil em L por questões de solidarização.

O segundo tipo de dissipadores (Tipo II) compreendia apenas uma chapa em aço S235 com 15mm de espessura, com sulcos em ambas as faces de forma a apresentar a mesma forma alveolar da apresentada no tipo I e com uma espessura de 2mm (Figura 3b). Na base dos dispositivos do tipo II, e por questões de montagem, foi soldada uma chapa de aço com 200x100mm<sup>2</sup>.

Ambos os dissipadores referidos foram construídos em Portugal sob a supervisão do NESDE (LNEC) e ensaiados individualmente nas instalações experimentais da Universidade de Bari.

Com base nos resultados obtidos verificou-se ser melhor o comportamento dos dispositivos do tipo I pelo que se decidiu ensaiar em plataforma sísmica apenas este tipo de dispositivos, mas com diferentes forma de agregação das chapas de aço e alumínio em vez da mera colagem dos elementos uma vez que os resultados de Universidade de Bari permitiram concluir que a simples colagem não era eficiente.

Os dispositivos previamente ensaiados e escolhidos foram colocados numa estrutura porticada em aço para tentar reproduzir de uma forma realista o funcionamento em serviço deste tipo de dissipadores metálicos (Figura 4).

A estrutura foi ensaiada sem dissipadores e posteriormente com dissipadores o que permitiu avaliar o seu comportamento nas duas situações e as melhorias que a introdução deste tipo de dispositivos podem traduzir na ocorrência de uma determinada acção sísmica.



*Figura 4 – Dispositivo de ensaio [Bairrão et. al., 2000]*

O programa experimental incluiu caracterizações da estrutura com recurso a sinais de ruído com um determinado conteúdo em frequência entre 0.1 e 22Hz alternados com ensaios sísmicos de intensidade crescente correspondentes à componente EW medida em Aigio (Grécia) durante o sismo ocorrido na parte oeste do golfo de Corinthiakos em Junho de 1995 [Bairrão et. al, 2000].

Apresentam-se em seguida alguns resultados obtidos para a estrutura sem dissipadores (Figura 5a), com dissipadores com chapas soldadas (Figura 5b) e com dissipadores com chapas coladas e reforçados com parafusos (Figura 5c), para um nível intermédio de solicitação sísmica. A totalidade dos resultados obtidos e respectiva análise é parte integrante de uma publicação técnica [Bairrão et. al, 2000].

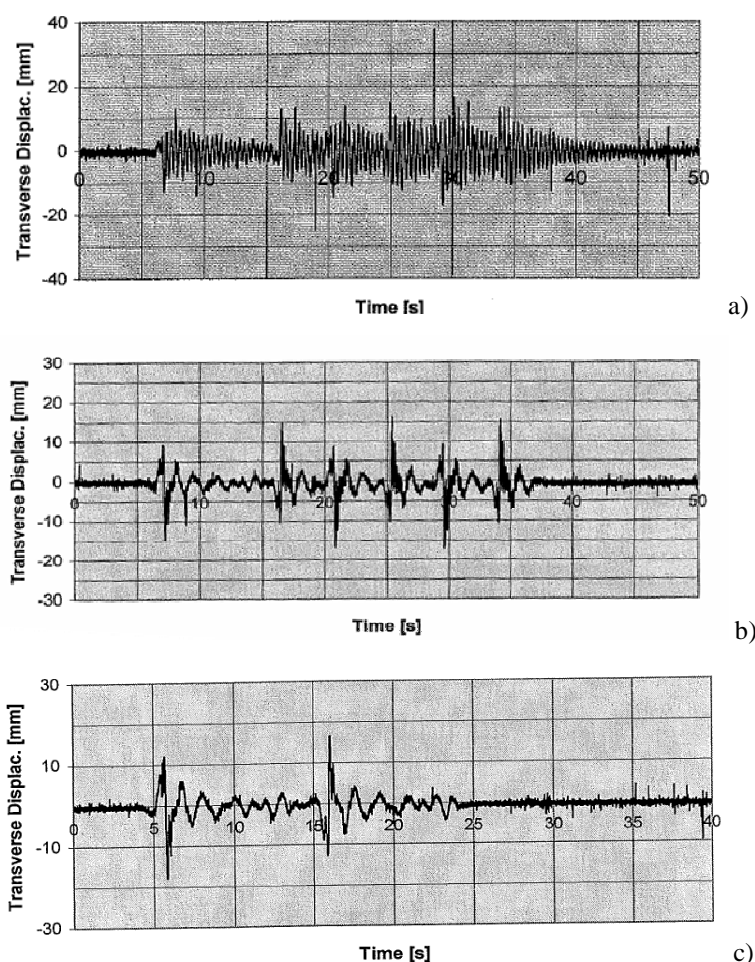


Figura 5 – Deslocamento no topo da estrutura para um nível de aceleração intermédio: a) sem dissipadores, b) com dissipadores com chapas soldadas e c) com dissipadores com chapas coladas e reforçados com parafusos [Bairrão et. al, 2000]

Por comparação da amostra de resultados apresentados, para níveis de solicitação médios, são claramente identificáveis as reduções observadas em termos de deslocamentos máximos no topo da estrutura.

Mostram-se também os resultados, em termos do deslocamento de topo da estrutura, obtidos num dos ensaios finais para os dissipadores ensaiados e considerando uma solicitação correspondente a 1g de aceleração máxima (Figura 6 a e Figura 6b).

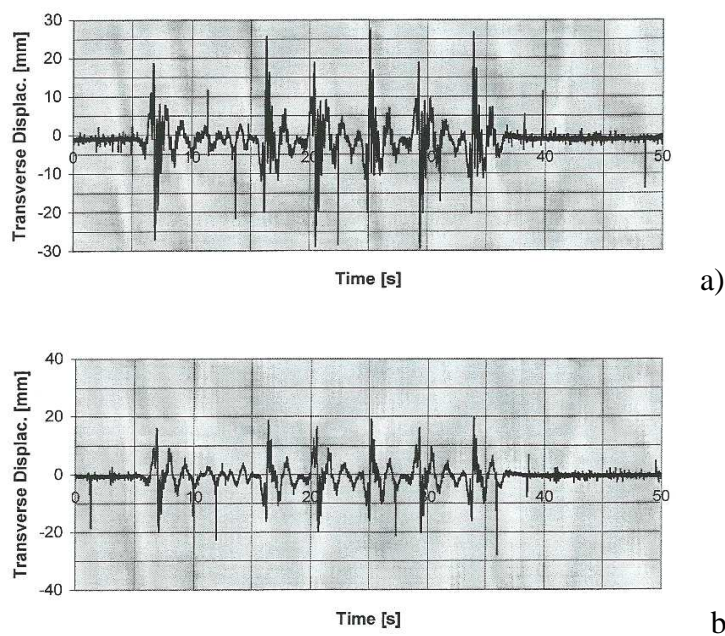


Figura 6 – Deslocamento no topo da estrutura para aceleração de pico correspondente a 1g: a) com dissipadores com chapas soldadas e b) com dissipadores com chapas coladas e reforçadas com parafusos [Bairrão et. al, 2000]

Como se verifica, por comparação da Figura 5 e da Figura 6, pode-se concluir que a estrutura com dissipadores incluídos pode suportar níveis de aceleração bastante mais elevados (cerca de três vezes) mantendo os mesmos níveis máximos de deslocamento no topo.

A resposta da global da estrutura reduz-se significativamente permitindo concluir que de facto o recurso a este tipo de sistemas de protecção é bastante eficaz na mitigação de acções sísmicas.

Outra experiência recente da envolvimento do NESDE (LNEC) na investigação científica na área dos sistemas passivos para a protecção sísmica de estruturas corresponde ao programa experimental solicitado pela Universidade de Basilicata.

Este programa experimental consistiu no ensaio sísmico de estruturas em pórtico de betão armado, reforçadas com sistemas de contraventamento metálico com dispositivos dissipadores de energia [Coelho et. al., 2000] do tipo amortecedores metálicos (Figura 7a) e materiais inteligentes do tipo ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys*) (Figura 7b).

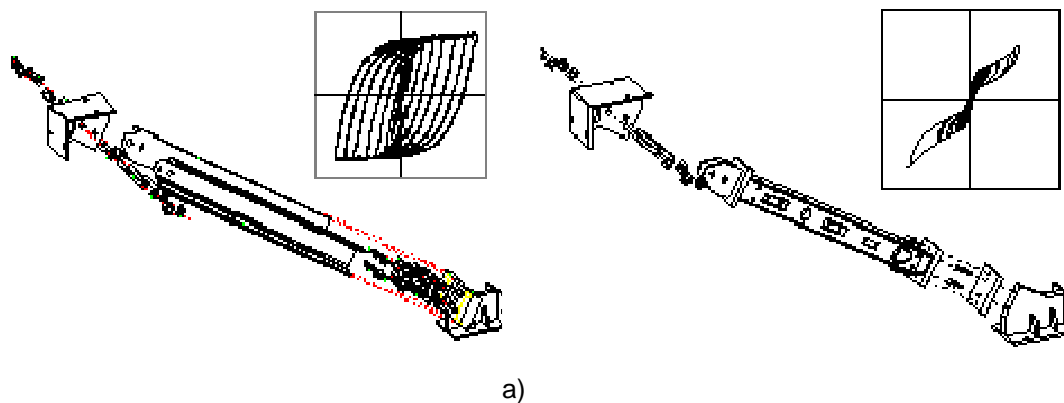


Figura 7 – Representação esquemática dos sistemas de contraventamento com dissipadores incluídos ensaiados e respectivos ciclos histiréticos: a) Amortecedores metálicos e b) ligas com memória de forma [Coelho et. al, 2000]

O programa experimental desenvolvido incidiu sobre dois modelos de uma estrutura porticada com 4 pisos (Figura 8a) construídos à escala (1:4) e dimensionados sem resistência sísmica específica, resistentes apenas a cargas gravíticas, de acordo com os regulamentos italianos anteriores a 1970.

Os elementos de contraventamento com os dispositivos de dissipação incluídos foram colocados na estrutura em betão armado a diferentes níveis e direcções de acordo com a maior dimensão (direcção x) de uma forma alternada (Figura 8b).

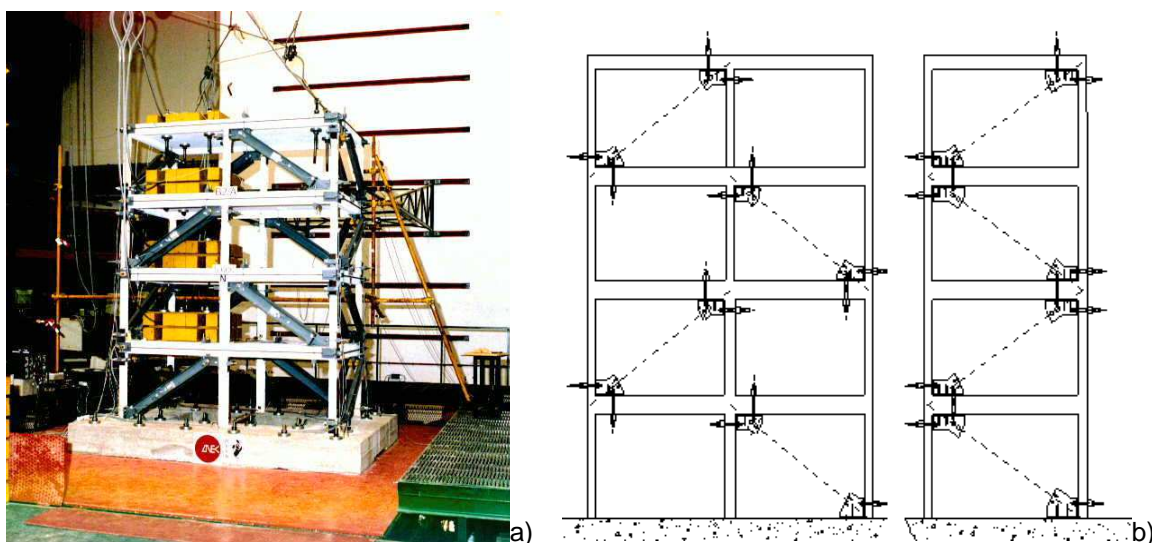


Figura 8 – Estrutura ensaiada: a) Vista global de um dos protótipos ensaiados e b) representação esquemática da colocação dos dissipadores [Coelho et. al, 2000]

As excitações sísmicas consideradas para o programa de ensaios experimentais foram as correspondentes às obtidas dos registos das componentes horizontais Colfiorito e Nocera do sismo de Umbria de 1997 [Braga et. al., 1999].

Foram obtidos registos de acelerações e deslocamentos em vários pontos da estrutura [Coelho et. al, 2000]. Da análise cuidada dos registos foram obtidos, para

cada situação ensaiada, os correspondentes ciclos histiréticos e evolução da energia dissipada [Falcão Silva e tal., 2005].

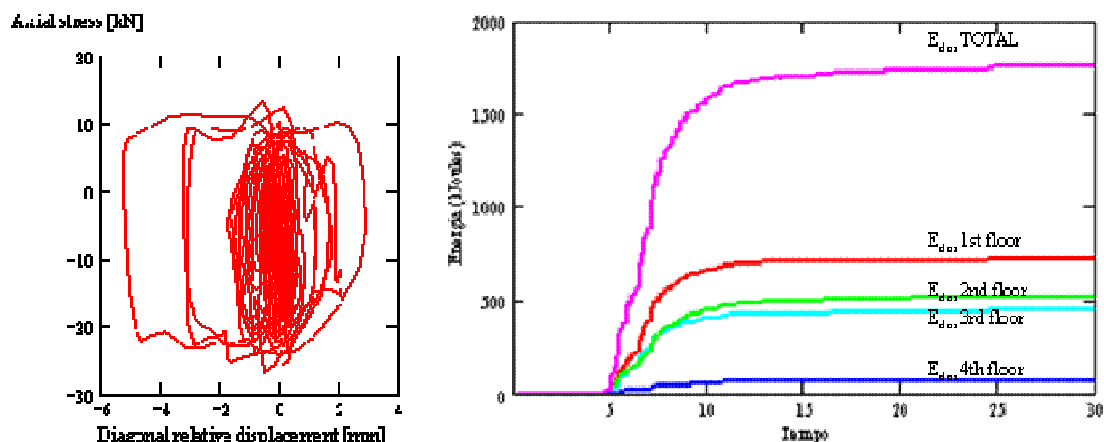


Figura 9 – Resposta dos amortecedores metálicos ensaiados (PGA=0.9g) para uma colocação simétrica de massas: a) Ciclo histirético e b) energia dissipada [Falcão Silva et al., 2005]

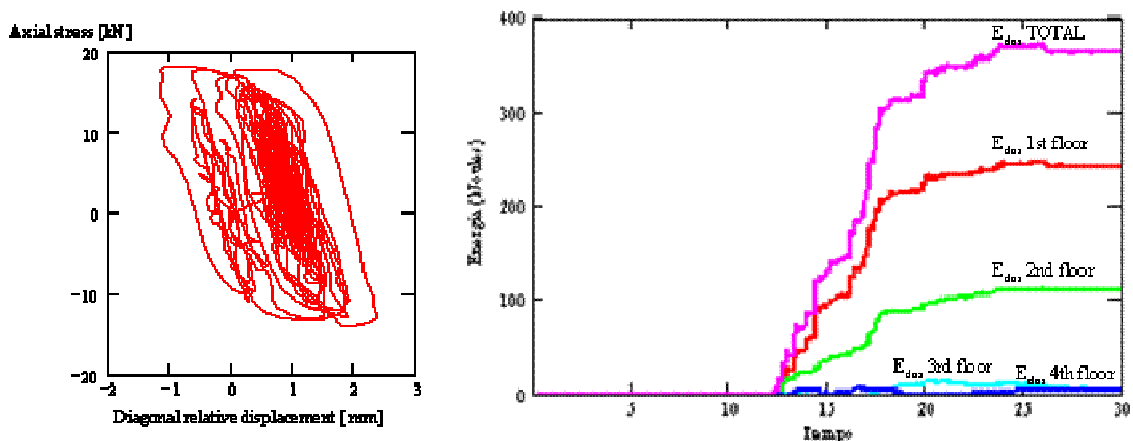


Figura 10 – Resposta dos amortecedores metálicos ensaiados (PGA=0.9g) para uma colocação assimétrica de massas: a) Ciclo histirético e b) energia dissipada [Falcão Silva et al., 2005]

Identificou-se que os amortecedores metálicos apresentam uma elevada capacidade de dissipação de energia pela deformação plástica do aço que entra na sua constituição sem perda de rigidez ou de capacidade resistente dos elementos de contraventamento em que se encontram incluídos (Figura 9a e Figura 9a).

O mecanismo de dissipação resulta da deformação inelástica do metal (Figura 10b e Figura 10b).



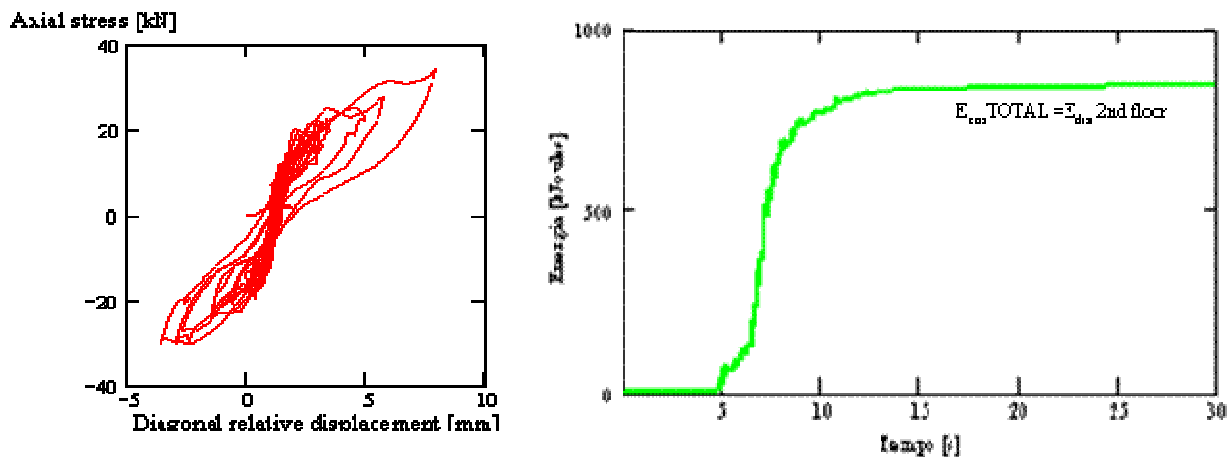


Figura 11 – Resposta das ligas com memória de forma ensaiadas (PGA=0.8g) para uma colocação simétrica de massas: a) Ciclo histérico e b) energia dissipada [Falcão Silva et al, 2005]

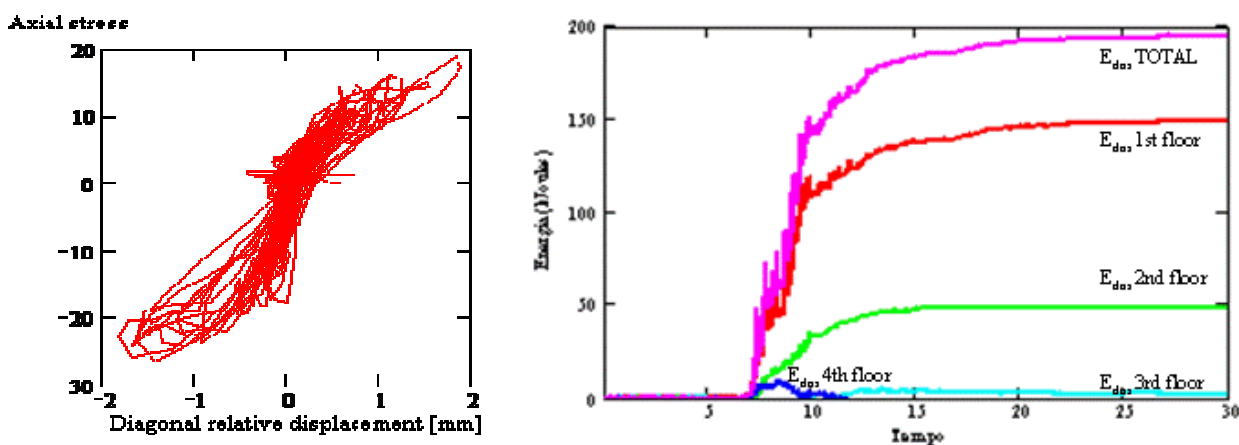


Figura 12 – Resposta das ligas com memória de forma ensaiadas (PGA=0.8g) para uma colocação assimétrica de massas: a) Ciclo histérico e b) energia dissipada [Falcão Silva et al, 2005]

Relativamente às ligas com memória de forma ensaiadas (*Shape memory alloys*) verificou-se que estas apresentavam uma capacidade dissipativa considerável, sendo notável a recuperação das características elásticas nos materiais usados (Figura 11a e Figura 12a).

Além disso, após um elevado número de ciclos com elevada dissipação de energia (Figura 11b e Figura 12b), os elementos de contraventamento praticamente não apresentam deslocamentos permanentes recuperando no início de cada ciclo as características de rigidez elástica inicial.

Como principais conclusões dos ensaios efectuados durante o extenso programa experimental refere-se a redução considerável observada ao nível dos danos estruturais decorrentes da ocorrência de acções sísmicas de severidade considerável [Coelho et al, 2000] [Falcão Silva et al, 2005].

Para além disso salienta-se o controlo das forças impostas pelos elementos de contraventamento e a redução considerável dos níveis de deslocamento entre pisos [Coelho et al, 2000] [Falcão Silva et al, 2005].

Em termos de energia dissipada pode-se concluir que os amortecedores metálicos permitiram a dissipação de cerca do dobro da energia dissipada pelas ligas com memória de forma (*Shape memory alloys*), sendo que a dissipação de energia ocorre maioritariamente ao nível do 1º e 2º pisos [Coelho et al, 2000] [Falcão Silva et al, 2005].

## **2.2. Projecto Europeu NEFOREEE – Task2 (2002-2005)**

Mais recentemente (2005) no âmbito da Task 2 do projecto europeu NEFOREEE – New Fields of Research in Earthquake Engineering Experimentation – foram ensaiados dois tipos de dispositivos dissipadores de energia: uma solução inovadora de amortecedor viscoelástico com funcionamento ao corte e comportamento hysterético [Schmidt, K. e Dorka, U, 2004.] [Bairrão, R et. al., 2004], e um amortecedor de fluído viscoso correspondente a uma solução comercial.

À semelhança do indicado na secção 2.1 para os amortecedores metálicos e dispositivos constituídos por ligas com memória de forma (*Shape memory alloys*) apresentam-se em seguida alguns dos resultados mais relevantes obtidos e que volta a reforçar o interesse que tem existido no LNEC, nomeadamente ao nível do NESDE, em estar envolvido em projectos de investigação na área dos sistemas passivos para a protecção sísmica de estruturas

Foram desenvolvidos testes de *benchmark* em três grandes instalações europeias de investigação experimental em engenharia sísmica (na NTUA, Grécia, no Joint Research Center de ISPRA, Itália e no LNEC, Portugal).

Uma estrutura metálica em pórtico (Figura 13), à escala real e com um grau de liberdade, foi construída e posteriormente testada em cada uma das instalações em causa. Esta estrutura foi projectada de forma a permitir uma fácil montagem dos dois tipos de dispositivos dissipadores de energia referidos anteriormente [Bairrão et al, 2007].



Figura 13 – Visão global da estrutura ensaiada [Bairrão et al., 2007]

O modelo sem qualquer dispositivo dissipador de energia, designado por *bare frame*, apresentou um comportamento linear com amortecimento muito baixo.

Nesta caso deveria ser posta em evidência a alteração introduzida pelas diferentes metodologias de ensaio (sísmico e pseudodinâmico), tais como atrasos de controlo nos ensaios pseudodinâmicos ou o aparecimento de movimentos espúrios da mesa sísmica. Com os dispositivos dissipadores não-lineares, essas deficiências podem ser ocultadas pelo elevado amortecimento desenvolvido ao nível do modelo.

De forma análoga, as não linearidades referidas podem impor limitações também nas técnicas de compensação baseadas na filtragem linear do sinal de referência tradicionalmente usadas em mesas sísmicas [Molina et. al, 2006].

Após uma análise dinâmica da estrutura, sem quaisquer dispositivos de dissipação de energia, foram desenvolvidas séries de testes, com um par de cada tipo de dispositivo colocados na direcção longitudinal.

Ambos os dispositivos (Figura 14 e Figura 15) foram aplicados ao modelo com o objectivo de dissipar grande parte da energia cinética gerada durante a ocorrência de um dado acontecimento sísmico

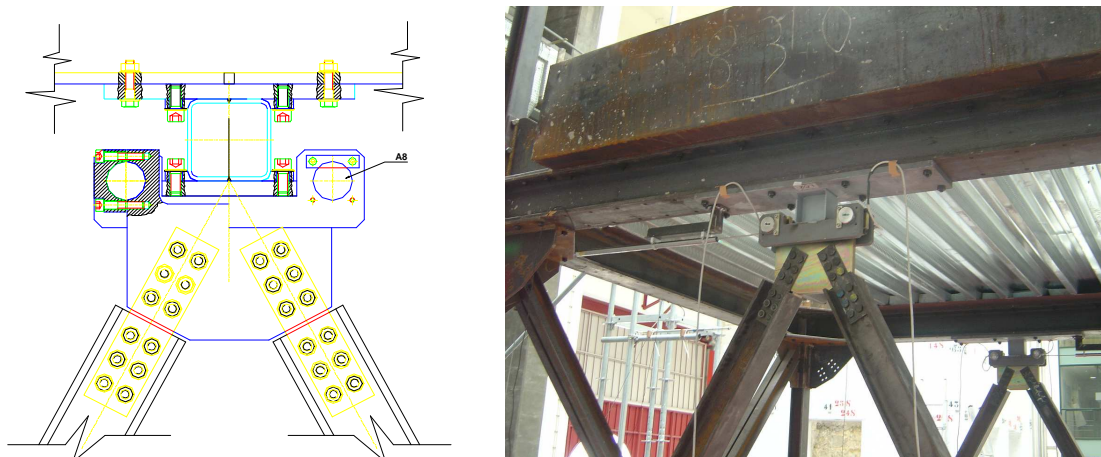


Figura 14 – Dispositivos tipo Dorka: a) Representação esquemática e b) Implementação no modelo ensaiado [Bairrão et al., 2009]

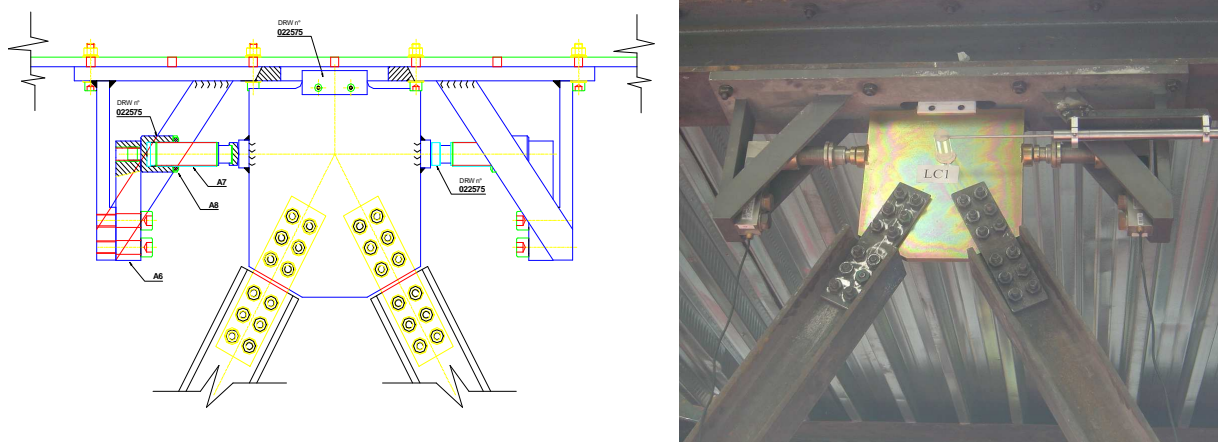


Figura 15 – Dispositivos tipo Jarrett: a) Representação esquemática e b) Implementação no modelo ensaiado [Bairrão et al., 2009]

O modelo e os dispositivos (Dorka e Jarrett) foram também modelados analiticamente e analisados por meio de um programa de análise não-linear [SAP2000NL, 2000].

Foram desenvolvidas simulações numéricas preliminares que permitiram a determinação das frequências naturais correspondentes para cada uma das três situações ensaiadas:

- i) Estrutura sem dispositivos de dissipação de energia ou *bare frame* (Modelo I);
- ii) Estrutura com dispositivos de dissipação de energia tipo Dorka (Modelo II);
- iii) Estrutura com dispositivos de dissipação de energia tipo Jarrett (Modelo III).

As simulações dos Modelos II e III foram desenvolvidas tendo como acções *sine sweeps* e registos de sismos de diferentes amplitudes de forma a evidenciar o comportamento de estruturas quando equipadas com diferentes tipos de dispositivos de protecção sísmica [Molina et. al, 2006].

Tabela 1 – Propriedades dinâmicas obtidas por simulação numérica para cada um dos modelos ensaiados, adaptado de [Molina et. al, 2006]

Modelo	Massa [kg]	Tipo de Dispositivo	1º Modo [Hz]	2º Modo [Hz]	3º Modo [Hz]	4º Modo [Hz]
I	9030	Nenhum	2.3	17.7	29.9	48.5
II	9943	Dorka	7.8	18.4	25.6	39.7
III	9943	Jarret	8.4	37.2	70.0	79.9

Nas figuras seguintes evidencia-se o comportamento dos dispositivos Dorka e Jarrett, respectivamente. Os resultados apresentados são os obtidos por via de simulações numéricas quando sujeitos a registos do sismo de El Centro de 1940 (Figura 16a e Figura 17a) e a registos de acelerogramas artificiais gerados de acordo com o proposto no Eurocódigo 8 [prEN 1998-1, 2002] (Figura 16b e Figura 17b).

Como expectável, estas simulações mostram de uma forma clara que, para um mesmo nível de PGA, os sismos gerados artificialmente com base no EC8 são mais severos em termos de ciclos histiréticos do que os acelerogramas do sismo de El Centro.

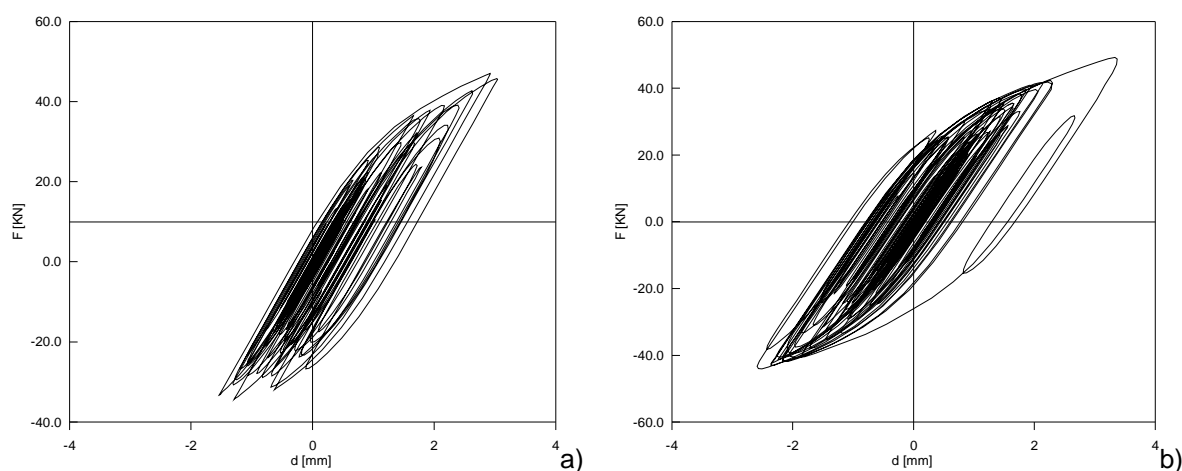


Figura 16 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Dorka: a) Componente NS do acelerograma de El Centro com PGA=0.5g e b) acelerograma artificial do EC8 com PGA=0.5g, adaptado de [Molina et.al., 2006]

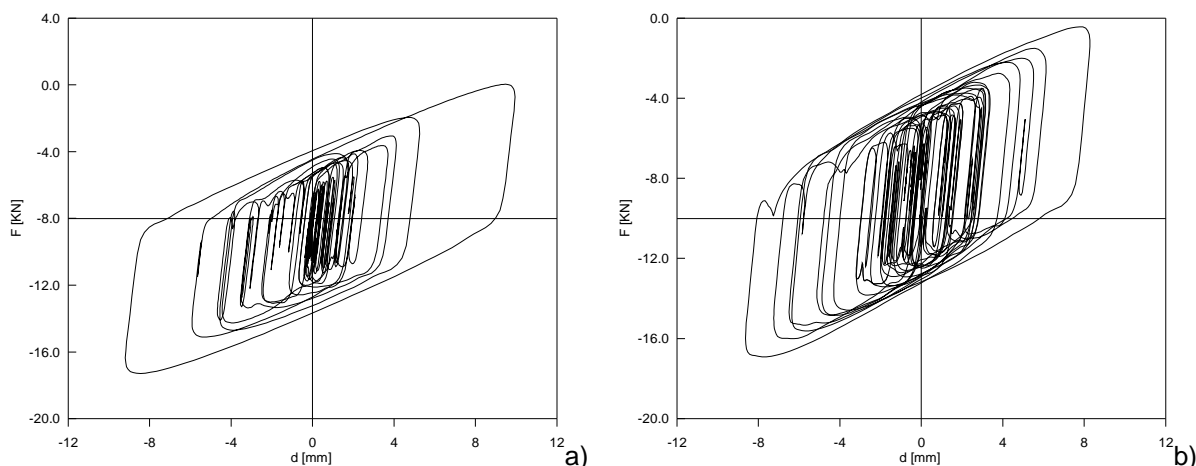


Figura 17 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Jarret: a) Componente NS do acelerograma de El Centro com  $PGA=0.5g$  e b) acelerograma artificial do EC8 com  $PGA=0.5g$ , adaptado de [Molina et.al., 2006]

A sequência de ensaio usada no NESDE (LNEC) foi muito semelhante à usada na NTUA, tendo sido pré-definida para os parceiros envolvidos no projecto [Molina et.al., 2006].

Os testes incluídos no programa experimental do NESDE (LNEC) compreenderam ensaios propriamente ditos e ensaios de caracterização. Os ensaios propriamente ditos corresponderam a registos artificiais com intensidades crescentes de 0,2 a 1,0g.

As séries usadas corresponderam a duas séries temporais diferentes: componente NS modificada do sismo de ElCentro (1940) e uma série artificial gerada para estar em conformidade com o espectro de resposta elástico para o sismo tipo 1 do Eurocódigo 8 [prEN 1998-1, 2002], com correspondente PGA de 0,5g, amortecimento a 5% e solo A.

As frequências modais (Figura 18) foram identificadas, com recurso ao software de análise e tratamento de resultados LNEC-SPA desenvolvido no NESDE (LNEC) [Mendes e Costa, 2007], usando estimativas de funções de resposta em frequência (FRF) e o método de *peak picking*.

Por se tratar de um sistema com um grau de liberdade, e devido à acção dinâmica imposta em cada uma das séries de caracterização (Catxx), foi identificado apenas um único modo de translação.

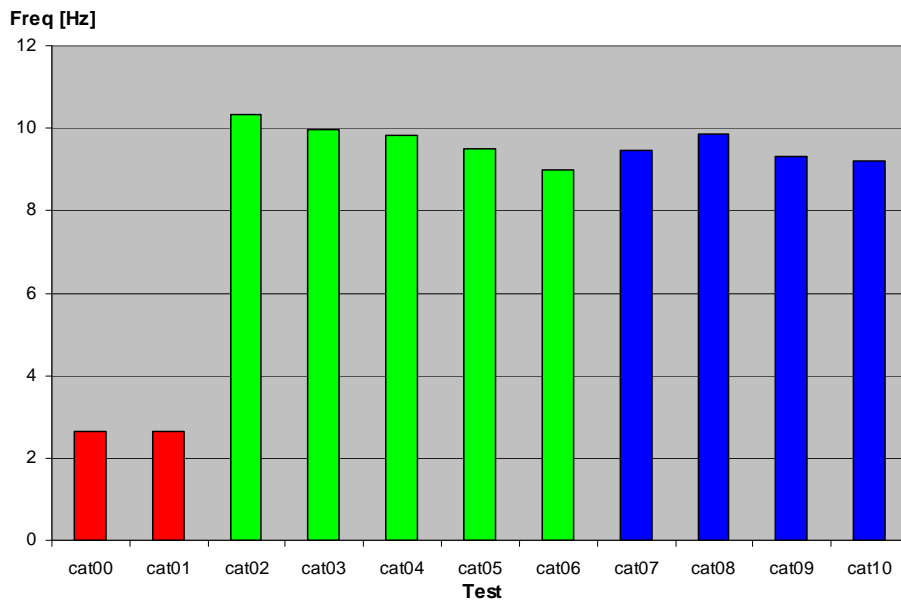


Figura 18 – Evolução das frequências fundamentais obtidas experimentalmente

Apresentam-se na Figura 19 alguns exemplos das FRFs obtidas para ensaios efectuados a cada Modelo anteriormente definido.

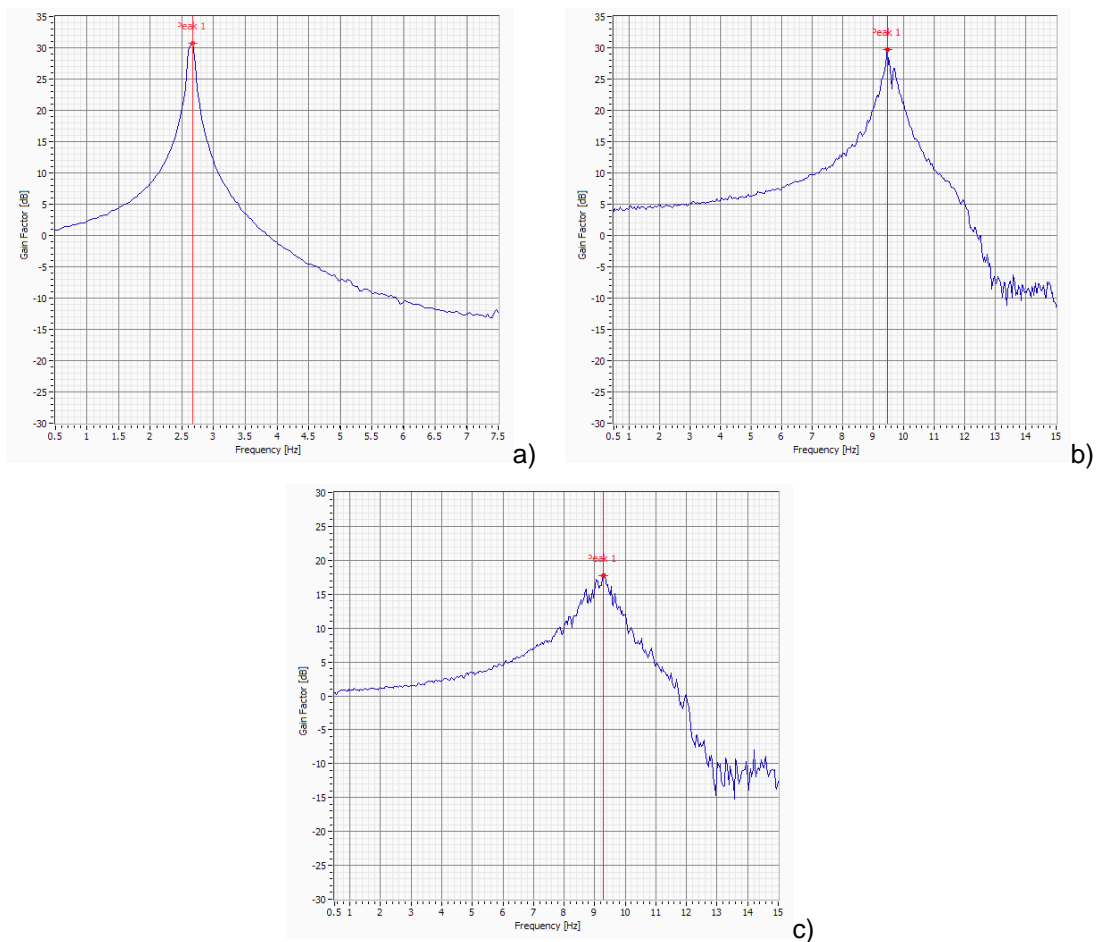


Figura 19 – FRF obtidas durante o programa de ensaios experimentais: a) Modelo I – Cat01 (Test3), b) Modelo II – Cat 5 (Test13) e c) Modelo III – Cat 10 (Test25)

A Figura 19a corresponde à frequência obtida para o Modelo I, a Figura 19b ao caso em que a estrutura incluía os dissipadores do tipo Dorka (Modelo II) após uma solicitação correspondente ao registo gerado artificialmente e de acordo com o EC8 com uma aceleração máxima de mesa sísmica de 0,8g e a Figura 19c ao caso em que a estrutura incluía os dissipadores do tipo Jarrett (Modelo III) para a mesma solicitação indicada para a Figura 19b.

Conforme se pode observar, para o Modelo I, obtêm-se valores de frequência muito próximos dos obtidos por via das simulações numéricas, sendo o erro obtido próximo de 10%. Relativamente aos Modelos II e III obtiveram-se em média frequências da ordem de 9Hz, o que corresponde a um erro de cerca de 15%, para o primeiro caso, e de cerca de 9%, para o segundo caso.

Foi também estimado o amortecimento para cada uma destas situações supramencionadas, tendo sido obtidos, valores de 1,5%, 3% e 7,5% para os Modelos I, II e III, respectivamente.

Durante o programa experimental foram obtidos registos de acelerações, deslocamentos e forças nos dissipadores [Bairrão et. al, 2009]. Como exemplo dos registos obtidos são apresentados, na Figura 20 e Figura 21 alguns resultados em termos de acelerações e deslocamentos no topo da estrutura. Assim refira-se que os valores apresentados correspondem aos resultados obtidos para a aceleração transversal de topo (NW) da estrutura e ao deslocamento transversal no topo da coluna NW durante os Testes 2, 5 e 17 [Bairrão et. al., 2009], correspondentes a uma solicitação do tipo EICentro com uma aceleração de pico de 0,2g. Nas Figuras mencionadas Plot 0 corresponde aos resultados obtidos para o Modelo I, Plot 1 para o Modelo II (Dispositivos Dorka) e Plot 2 para o Modelo III (Dispositivos Jarrett).

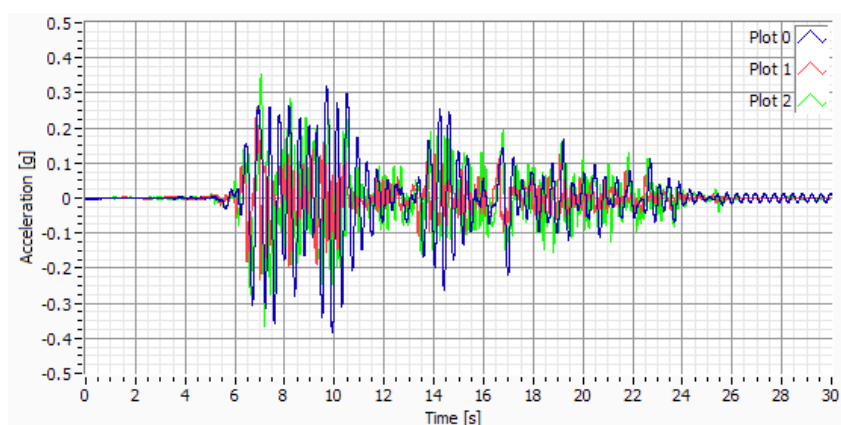


Figura 20 – Comparação entre acelerações transversais no topo do pilar NW



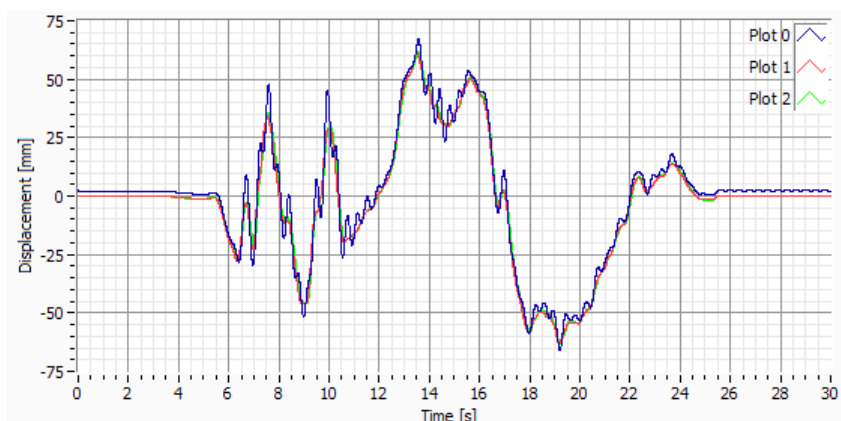


Figura 21 – Comparação entre deslocamentos transversais no topo do pilar NW

A partir da observação destes resultados foi possível concluir-se que, no referente às acelerações, o Modelo II foi o que apresentou os valores mais baixos ao nível do topo.

Quanto a deslocamentos, também no topo do pilar NW, todos os modelos apresentaram um comportamento semelhante.

Na Tabela 2 e Tabela 3 apresentam-se de uma forma resumida os principais resultados obtidos para os Modelos II e III, nos canais de instrumentação mais representativos.

Tabela 2 – Valores máximos para os ensaios realizados no Modelo II (Dispositivos Dorka)

	EICentro 0.2g	EC8 0.2g	EC8 0.6g	EC8 0.8g	EC8 1g
Acel. Trans topo (NW) [g]	0.26	0.32	1.02	1.16	1.39
Acel. Trans topo (SW) [g]	0.27	0.37	1.11	1.25	1.51
Acel. Vert. CM [g]	0.014	0.020	0.47	1.18	1.26
Desl. Topo Pilar (NW) [mm]	63.34	26.23	78.92	104.40	110.20
Desl. Topo Pilar (SW) [mm]	63.45	26.49	80.57	106.69	133.85
FNorte [kN]	10.49	14.47	42.87	49.43	56.98
FSul [kN]	12.59	17.47	47.41	58.22	60.12
Desl. Norte [mm]	0.27	0.40	1.03	1.75	4.02
Desl. Sul [mm]	0.38	0.36	1.26	2.51	5.49

*Tabela 3 – Valores máximos para os ensaios realizados no Modelo III (Dispositivos Jarrett)*

	ElCentro 0.2g	EC8 0.2g	EC8 0.6g	EC8 0.8g	EC8 1g
Acel. Trans topo (NW) [g]	0.37	0.27	0.89	1.50	1.70
Acel. Trans topo (SW) [g]	0.33	0.30	0.87	1.58	1.74
Acel. Vert. CM [g]	0.007	0.009	0.05	0.09	0.13
Desl. Topo Pilar (NW) [mm]	63.04	28.27	85.57	107.12	102.23
Desl. Topo Pilar (SW) [mm]	63.35	28.65	86.30	114.06	133.63
FNorte [kN]	6.30	8.21	20.89	35.63	50.54
FSul [kN]	6.76	8.63	21.63	39.48	54.81
Desl. Norte [mm]	1.96	1.99	10.61	11.71	12.55
Desl. Sul [mm]	1.95	1.89	10.33	12.00	12.48

A partir da observação destes registos, é possível concluir-se que, no referente a acelerações de topo (NW e SW) os valores obtidos foram análogos tanto para intensidades baixas a médias, enquanto que nos dois níveis mais altos foram obtidos valores consideravelmente mais elevados ao nível do dispositivo Jarrett. A razão para a ocorrência desta situação está associada às características específicas dos materiais utilizados neste dispositivo (fluido viscoso).

Os valores mais elevados da aceleração vertical da massa obtidos no dispositivo Dorka resultam do comportamento plástico dos cubos de aço que permitem deformações verticais quaisquer que sejam os níveis de intensidade de aceleração.

Apesar de ser clara a diferença de comportamento observada nos dispositivos, os valores dos deslocamentos máximos de topo registados nas duas colunas foram muito semelhantes atendendo à elevada rigidez do sistema de contraventamento adoptado em ambos os modelos ensaiados.

Na Figura 22 apresentam-se os ciclos histiréticos obtidos experimentalmente para os dispositivos do tipo Dorka colocado no lado Norte da estrutura para solicitações moderadas (0,6g) a elevadas (1,0g). A Figura 23 apresenta os correspondentes ciclos histeréticos para os dispositivos do tipo Jarrett, também quando colocados no lado Norte da estrutura.

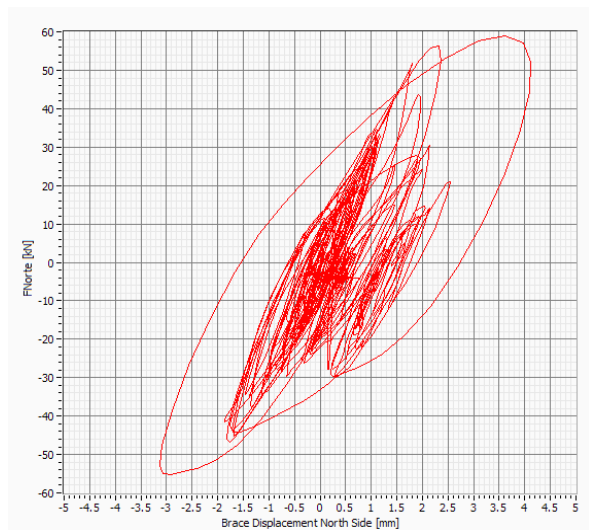
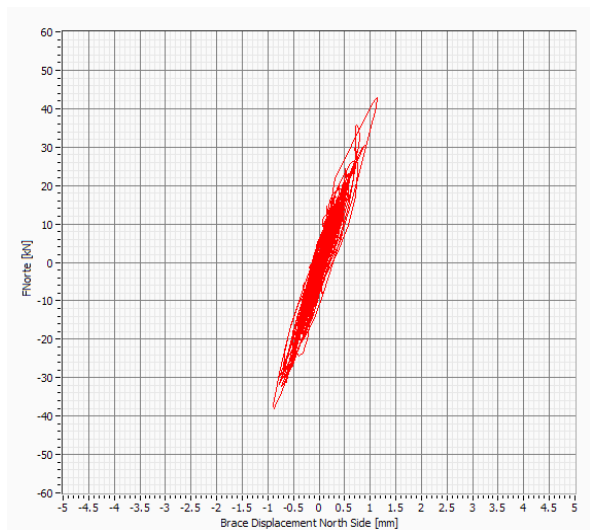


Figura 22 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Dorka: a) Modelo II (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo II (EC8-PGA=1.0g)

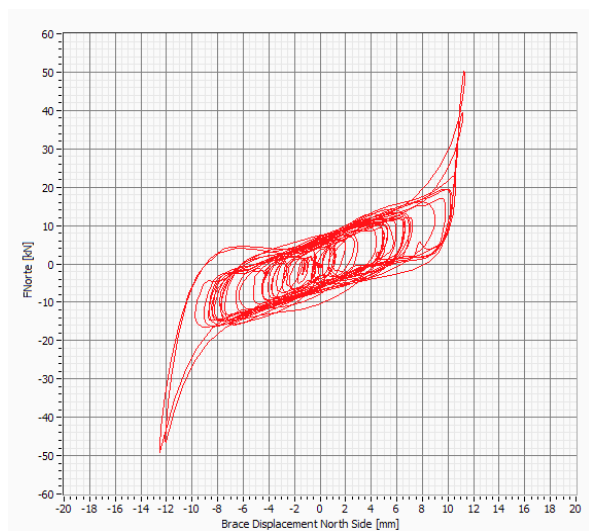
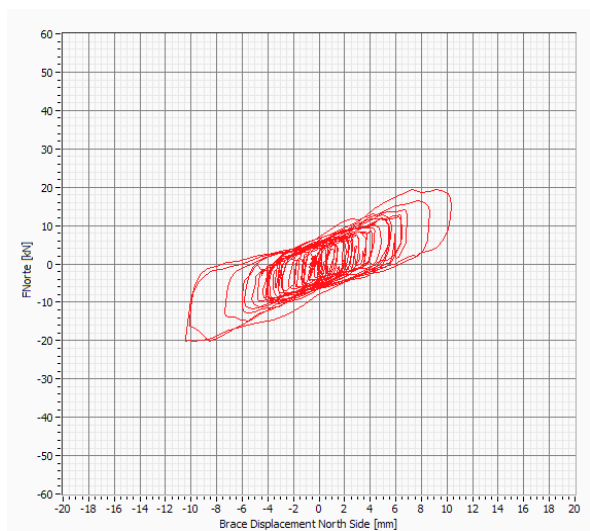


Figura 23 – Ciclos histiréticos - Dispositivos tipo Jarret: a) Modelo III (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo III (EC8-PGA=1.0g)

Com base no comportamento observado foi possível determinar a energia dissipada em cada um dos dispositivos mencionados e para cada uma das situações identificadas anteriormente (Figura 24 e Figura 25).

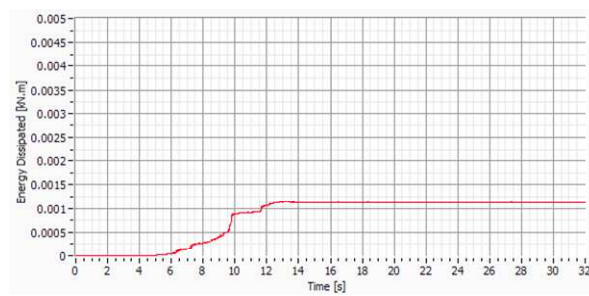
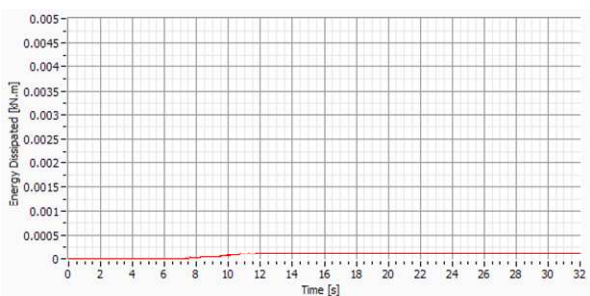


Figura 24 – Energia Dissipada - Dispositivos tipo Dorka: a) Modelo II (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo II (EC8-PGA=1.0g)

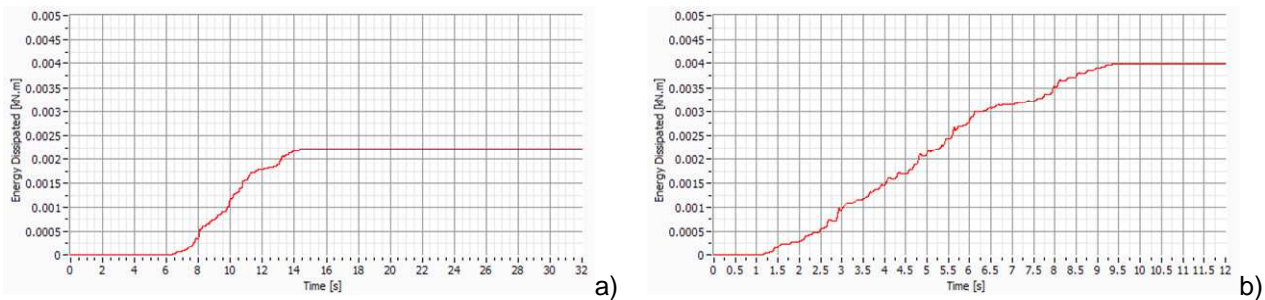


Figura 25 – Energia Dissipada - Dispositivos tipo Jarret: a) Modelo III (EC8-PGA=0.6g) e b) Modelo III (EC8-PGA=1.0g)

A partir da observação das figuras anteriores pode-se afirmar que os dispositivos Jarrett apresentam um melhor desempenho em termos de dissipação de energia com deslocamentos muito maiores para os mesmos níveis de força, comparativamente com os dispositivos do tipo Dorka.

Também está evidente que as características do dispositivo Jarrett se mantêm até aos níveis mais elevados de acelerações em que está presente a alteração da forma global do ciclo apenas nos picos finais e para os dois sentidos.

Quanto aos deslocamentos registados, no dispositivo Dorka os valores aumentaram substancialmente de valores de PGA médias (0,6g) para valores altos (1,0g), enquanto que nos dispositivos Jarrett esses valores permaneceram semelhantes em ambas as condições.

Por outro lado quando se compararam os ciclos histeréticos dos dispositivos Dorka desde as intensidades médias até às intensidades mais elevadas verificou-se uma melhoria significativa devido ao comportando ao corte da membrana de aço usada na sua constituição.

Apesar deste facto, as deformações observadas ao nível dos dispositivos do tipo Jarrett foram sempre mais elevadas provando assim a sua elevada capacidade dissipativa.

### 2.3. Projecto Europeu ECOLEADER – BRIS (2002-2005)

Os ensaios desenvolvidos na Universidade de Bristol, no âmbito do projecto europeu ECOLEADER no qual a equipa de investigação experimental do NESDE (LNEC) funcionou como utilizador da instalação, em 2005 e posteriormente concluídos em 2007 permitiram comprovar algumas das características de sistemas dissipadores

de energia do tipo amortecedores de líquido sintonizado bem como a confirmação do seu bom comportamento e desempenho/eficácia [Macdonald et. al, 2005] [Falcão Silva et. al, 2007].

Na segunda fase de ensaios que decorreu durante o ano de 2007 e já fora do âmbito do projecto ECOLEADER foram testadas soluções alternativas em que aos dispositivos de base foram adicionadas partículas em suspensão e grelhas metálicas, permitindo avaliar eventuais alterações em termos de amortecimento. Estes últimos ensaios tiveram por base outros trabalhos de investigação científica desenvolvidos anteriormente [Tait et. al, 2004] [Tait et. al, 2005a] [Tait et al., 2005b]

Uma breve referência ao facto de, tanto na primeira fase como na segunda fase dos ensaios experimentais, terem sido estudados duas geometrias de reservatórios rectangulares (422mmx150mm em 2005 e 422mmx168mm em 2007) o que permitiu para uma mesma frequência o estudo mais detalhado da verificação das relações de massas.

Verificou-se, no entanto, que os resultados obtidos em Bristol durante a primeira fase de ensaios em 2005 foram, de uma forma geral, pouco expressivos do comportamento dos amortecedores de líquido sintonizado uma vez que apenas se testaram duas alturas de água (uma que permitiu ajustar a frequência à da estrutura a mitigar e outra que traduziu uma frequência ligeiramente inferior à da estrutura a mitigar).

Os resultados obtidos, tanto na primeira fase decorrida em 2005 como na segunda fase decorrida em 2007, serviram como ponto de partida para um extenso programa de ensaios desenvolvidos nas instalações experimentais do NESDE (LNEC) no âmbito de uma tese de doutoramento submetida ao Instituto Superior Técnico (IST) no último trimestre de 2010 [Falcão Silva, 2010].

A descrição exaustiva do programa de ensaios experimentais referido será objecto de uma publicação técnica mais detalhada.

### 2.3.1. 1ª Fase de ensaios (2005)

Os primeiros ensaios efectuados permitiram compreender e analisar alguns detalhes do comportamento dos dispositivos amortecedores de líquido sintonizado para os diferentes sinais de input e alturas de água.

Posteriormente foram efectuados ensaios sobre estruturas simples com os amortecedores de líquido sintonizado incluídos para mitigação das acções impostas. De uma forma resumida nestes ensaios para modelar a interacção entre os dispositivos amortecedores de líquido sintonizado e um sistema estrutural genérico foi usado um sistema simples de um grau de liberdade.

O tanque usado durante o programa experimental tinha 422mmx150mm, sendo representado de uma forma esquemática de acordo com o apresentado na Figura 26. O comprimento do tanque corresponde a  $2a$  ( $2a=422\text{mm}$ ), a altura de água em repouso no tanque é  $h$ , a largura do tanque  $b$  e elevação da superfície da água relativamente à posição de repouso corresponde a  $\eta$ .

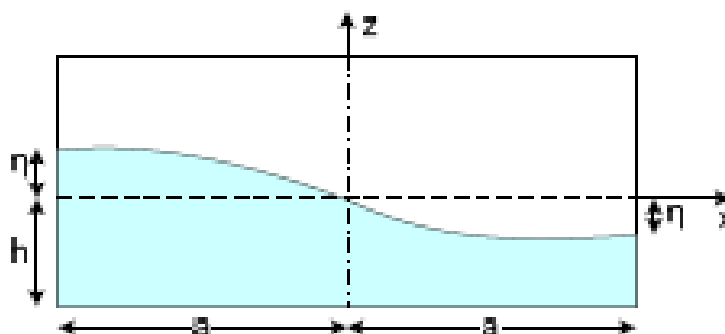


Figura 26 – Representação esquemática do tanque ensaiado em 2005, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

Os investigadores que tem vindo a debruçar as suas actividades na área dos sistemas de protecção sísmica dissipadores de energia do tipo amortecedores de líquido sintonizado têm vindo a obter algumas conclusões relativamente às suas propriedades, que se passam a enunciar com o objectivo de melhor orientar também o que foi desenvolvido no âmbito do Projecto ECOLEADER-BRIS. Assim:

- i) As propriedades dos sistemas de protecção passiva do tipo amortecedores de líquido sintonizado dependem da amplitude e da frequência de excitação imposta [Sun et. al, 1995];
- ii) A energia num sistema de protecção passiva do tipo amortecedor de líquido sintonizado é dissipada por meio de efeitos de fricção do

movimento da água nas paredes laterais e de fundo do tanque, bem como na base do tanque e, ainda, ao nível do movimento da superfície livre do líquido;

- iii) A frequência natural de *sloshing* (Equação 1.),  $f_w$ , pode ser aproximada por meio da teoria linear de onda [Sun et. al. 1992] [Gardarsson, 1997] [Yalla, 2001] [Ju et al, 2004] [Tait et. al., 2005]. A frequência fundamental do amortecedor de líquido sintonizado:

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (1)$$

deve ser ajustada de forma a estar próxima ou coincidir com a frequência fundamental da estrutura em que se encontra incluído;

- iv) O amortecedor de líquido sintonizado funciona com base nos mesmos princípios do que os amortecedores de massa sintonizados, podendo como tal ser idealizado usando uma analogia com um amortecedor de massa sintonizado equivalente. O sistema amortecedor de massa sintonizado pode ser simplificado a um conjunto massa, mola, amortecedor equivalentes. No caso de um amortecedor de líquido sintonizado o amortecimento é introduzido pelo movimento de *sloshing* da água no interior do tanque, sendo a força de restituição a força gravítica. Os parâmetros desta analogia com o amortecedor de massa Sintonizado equivalente são dependentes de amplitude e frequência de excitação [Sun et. al, 1995], sendo este modelo descrito numa publicação técnica mais detalhada [Falcão Silva e Campos Costa, 2010];
- v) O movimento do sistema encontra-se confinado ao tanque, contrariamente ao que sucede nos amortecedores de líquido sintonizado onde o movimento pode ocorrer para além do confinamento da massa;
- vi) À medida que a amplitude de excitação aumenta, maior quantidade de massa se torna efectiva no sistema [Sun et al. 1995]. As massas teóricas efectiva ( $M_1$ ) e não-efectiva ( $M_0$ ), também denominadas de massas convectiva e impulsiva, respectivamente, foram determinadas por meio do modelo simplificado proposto por Housner [Housner 1957],

sendo este modelo descrito numa publicação técnica mais detalhada [Falcão Silva e Campos Costa, 2010]:

$$M_0 = M_w \frac{\tanh\left(1.7 \frac{a}{h_f}\right)}{1.7 \frac{a}{h_f}} \quad (2)$$

$$M_1 = M_w \frac{0.83 \tanh\left(1.6 \frac{h_f}{a}\right)}{1.6 \frac{h_f}{a}} \quad (3)$$

com  $M_w$  correspondente à massa total de água no interior do amortecedor de líquido sintonizado,  $M_1$  a massa efectiva que contribui para o modo fundamental de vibração e  $M_0$  a massa não-effectiva. O remanescente da massa total ( $M_w - M_1 - M_0$ ) contribui para os modos de vibração superiores;

- vii) O coeficiente de amortecimento efectivo aumenta com o aumento da amplitude de excitação [Reed et. al, 1998]. Analogamente para os amortecedores de massa sintonizados existe um valor óptimo para o amortecimento, que é dependente da relação entre massas do dispositivo e da estrutura e do tipo de solitação estrutural. O amortecimento pode ser determinado com base na teoria linear dos amortecedores de massa sintonizados [Soong e Dargush, 1997]. O amortecimento introduzido por um amortecedor de líquido sintonizado é normalmente significativamente inferior ao valor óptimo determinado, pelo que se torna necessário encontrar uma forma de introduzir amortecimento nos referidos dispositivos para que assim seja possível garantir o seu funcionamento como um dissipador de vibrações eficiente. Para os valores típicos de relações de massa óptima (entre 1-5%) os valores óptimos para o amortecimento variam numa gama de valores entre 5 e 15% [Tait et. al, 2005b];
- viii) O coeficiente de amortecimento equivalente,  $\zeta$ , do amortecedor de líquido sintonizado pode ser aproximado por meio da Equação (4).

$$\zeta = \frac{E}{2M_w \omega_w A^2 \pi \omega} \quad (4)$$



em que  $E$  corresponde à energia dissipada por ciclo pelo movimento de sloshing da água no interior do tanque, que é obtida pela relação força na base-deslocamento,  $M_w$  é a massa total de água,  $\omega_n$  a frequência angular do sloshing da água,  $A$  a amplitude de excitação e  $\omega$  a frequência angular da excitação imposta. O modelo simplificado correspondente para o amortecimento é descrito de uma forma mais aprofundada numa publicação técnica [Falcão Silva e campos Costa, 2010]:

- ix) Os efeitos dos amortecedores de líquido sintonizados são de uma forma geral favoráveis mesmo que o ajuste entre a sua frequência e a da estrutura em que se encontram incluídos não seja o mais adequado [Reed et al., 1998b];
- x) A resposta do sloshing da água pode ser analisada em cada direcção de excitação de uma forma independente, sendo como tal possível dimensionar os amortecedores de líquido sintonizados para que sejam eficientes nas duas direcções [Tait et al 2005a];
- xi) Para amplitudes de excitação elevadas a máxima elevação da superfície da água ocorre para uma frequência de excitação superior à calculada pelas fórmulas teóricas. Esta situação traduz uma mudança da frequência natural do sistema a amplitudes mais elevadas, sendo este comportamento típico de sistemas com características de endurecimento [Sun et al. 1995];
- xii) Os amortecedores de líquido sintonizado funcionam numa gama de frequências cada vez mais alargada à medida que aumenta a amplitude de excitação, sendo este comportamento indicativo de que a resposta não-linear do sistema melhora o seu desempenho e robustez [Reed et al. 1998a] [Reed et al., 1998b].

Relativamente à questão da interacção entre o dispositivo de protecção passiva do tipo amortecedor de líquido sintonizado e um sistema estrutural qualquer é possível descreve-la usando os seguintes parâmetros:

- i) Razão ou relação entre massas,  $\mu$ , que corresponde à massa efectiva do líquido dividida pela massa da estrutura principal em que o dispositivo amortecedor de líquido sintonizado se encontra incluído;

- ii) Frequência natural de *sloshing* do líquido,  $f_w$ , ou relação entre frequências do dispositivo amortecedor de líquido sintonizado e da estrutura principal,  $\gamma$ , em que este se encontra incluído;
- iii) Amortecimento,  $\zeta$ . Tipicamente, os valores de  $\mu$  situam-se entre 1 e 5% e a frequência fundamental de *sloshing* deverá ser ajustada o mais próximo possível da frequência da estrutura que se pretende mitigar [Tait et al. 2005b].

O sistema estrutural (Figura 27a e Figura 27b), proposto pelo LNEC nas reuniões preliminares do projecto, consistiu num pêndulo suspenso por duas barras cruzadas sobre o qual se encontrava colocado um tanque rectangular com as dimensões compatíveis com as dos tanques ensaiados sobre a pequena plataforma sísmica. As barras cruzadas, responsáveis pela suspensão do pêndulo, encontravam-se fixas a duas armações rígidas paralelas aparafusadas a uma plataforma sísmica de 6 eixos.

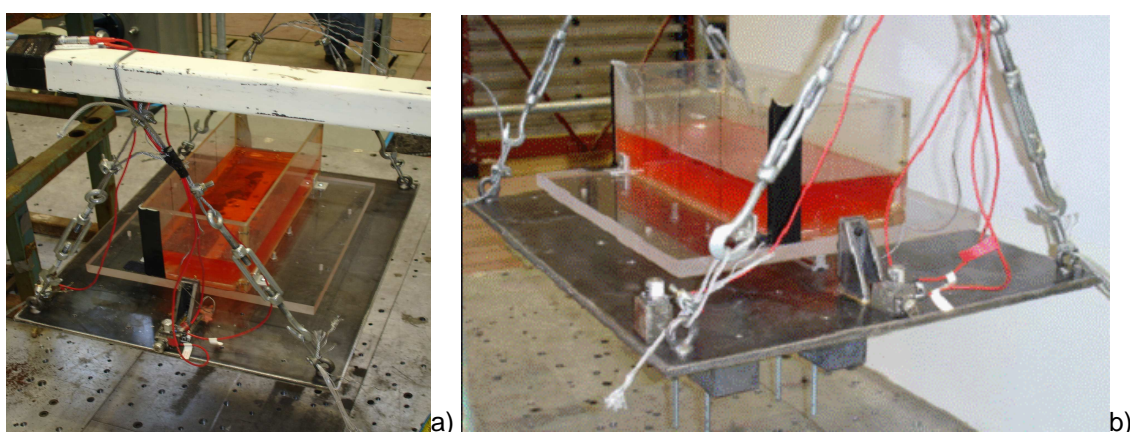


Figura 27 – Dispositivo de ensaio utilizado no âmbito dos ensaios ao TLD desenvolvidos em Bristol: a) perspectiva de cima [Falcão Silva et al., 2007] e b) perspectiva lateral [Falcão Silva et al., 2007]

O pêndulo encontrava-se suspenso por meio de dois conjuntos de cabos inclinados em cada extremo. A razão da inclinação prendia-se com o facto de tentar evitar movimentos transversais e de torção do tanque. Este pêndulo pode ser modelados como um pêndulo ideal com frequência natural:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (5)$$

com L correspondente ao comprimento do pêndulo. O comprimento vertical dos cabos que suportam o tanque foi fixado nos ensaios que tiveram lugar em 2005 em 0,46m correspondendo a uma frequência natural de 0,735 Hz.

Durante a primeira fase de ensaios o tanque foi montado sobre uma placa de Perspex que, por sua vez se encontrava colocada numa placa de aço. A zona de interface entre as duas placas foi efectuada com recurso a um apoio linear de fricção reduzida (*low friction linear bearing*).

Montou-se uma célula de força num elemento soldado à placa de aço e ligado a uma das extremidades da plataforma de Perspex. Esta célula de força foi usada para medir a força de amortecimento gerada pelo TLD. O apoio linear garantiu que a força do tanque fosse aplicada por meio da célula de força, não sendo directamente transmitida à placa de aço.

Foram igualmente incorporados na parte inferior da plataforma de aço por meio de varetas enroscadas dois pesos, cada um apresentando um peso nominal de cerca de 25Kg o que correspondia a um peso global de 50Kg.

A instrumentação contemplou a colocação de transdutores que permitiram a medição da aceleração da placa de aço e das armações (frames). Estas acelerações foram medidas com recurso a seis acelerómetros SETRA [Symes, 2005]:

- i) Dois montados longitudinalmente nas armações (frames) para medir o input da mesa sísmica no sistema;
- ii) Montou-se um dispositivo tri-axial no centro da placa de aço para medir a sua aceleração transversal, longitudinal e vertical;
- iii) Um dispositivo uniaxial montado a cerca de 250mm da zona central na qual tinha sido montado o dispositivo referido em b). A razão da colocação deste último dispositivo prendeu-se com o facto de se pretender medir a rotação da placa de aço em torno do seu eixo longitudinal.

Outro aspecto importante da resposta do sistema foi a obtenção da força de amortecimento aplicada à placa de aço pelo tanque. Esta força de amortecimento foi medida por um transdutor de força RDP de 10lb ligado a um amplificador RDP excitado a 4,946 V.

Nas Figura 28 e Figura 29 apresenta-se, respectivamente, um aspecto geral da instrumentação adoptada durante o programa experimental e um detalhe da colocação do acelerómetro triaxial.

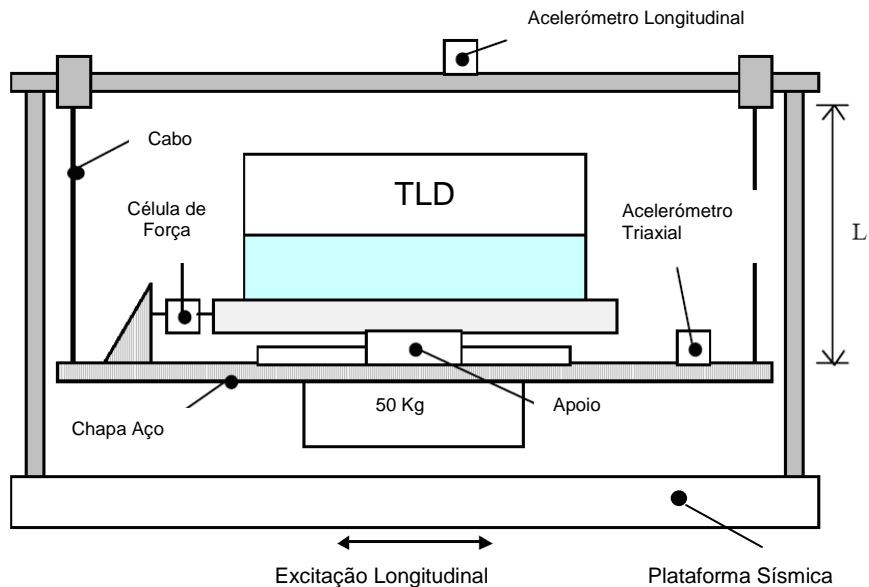


Figura 28 – Definição da instrumentação [Falcão Silva et. al., 2007]

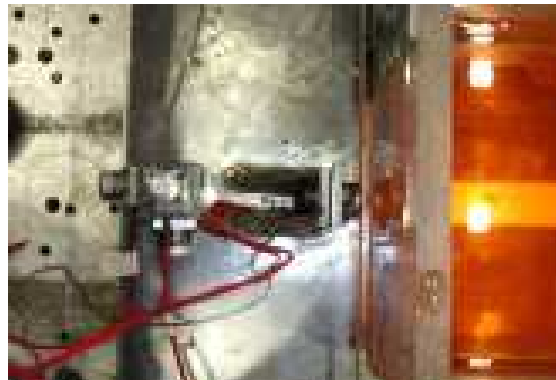


Figura 29 – Detalhe da colocação do acelerômetro triaxial [Symes, 2005]

Para além do referido no parágrafo anterior, a instrumentação incluiu ainda a medição da altura de água em pontos-chave do tanque bem como do deslocamento do tanque em relação à plataforma sísmica.

A medição, tanto da elevação da superfície da água como do deslocamento do tanque em relação à plataforma sísmica, foi efectuada com recurso a um sistema de captação de imagens constituído por uma simples camera a preto e branco de 60Hz. Este sistema segue os movimentos de alvos seleccionados pelo utilizador retirando o vídeo da câmara e comparando o contraste entre os pixels na área à volta do alvo. Em seguida converte estes movimentos em deslocamentos medidos e guarda os dados sob a forma de um pequeno arquivo de texto. A fim de garantir que o sistema era capaz de registar a superfície da água, foi adicionada uma pequena porção de corante ao sistema de forma a aumentar o contraste entre a água e o fundo branco colocada atrás do tanque para o efeito. Tal como os dados do vídeo este sistema também foi

usado para registrar sinais análogos dos acelerómetros SETRA e do transdutor de força.

O programa experimental desenvolvido incluiu ensaios num dispositivo amortecedor de líquido sintonizado sem água (FASE 1) e com água (FASE 2). Desta forma, foi desenvolvida uma série de testes iniciais (FASE 1) sem água para determinar as características dinâmicas do pêndulo sem o amortecimento adicional por parte do TLD. Estes testes permitiram igualmente a medição das forças no caso de um TLD sem água para contabilizar o efeito da fricção no apoio (linear bearing). A força adequada seria então subtraída do valor total medido na situação do amortecedor de líquido sintonizado com água para identificar a força devida à própria água.

O sistema conjunto foi sujeito a vibrações de ruído branco geradas artificialmente fornecidos ao sistema controlador da plataforma sísmica, que converteu o referido sinal numa aceleração da plataforma sísmica de 0,015g RMS. Tal foi considerado como traduzindo uma amplitude suficientemente pequena para que o comportamento do amortecedor de líquido sintonizado possa ser efectivamente linear.

De forma a reduzir o ruído nos dados registados e evitar a mistura (*aliasing*) de frequências, os sinais dos acelerómetros e da célula de força foram filtrados com um filtro passo abaixo para remover todas as frequências acima dos 24Hz. Porém, esta filtragem pode originar uma alteração no sinal, o que colocou um problema uma vez que os dados do vídeo não foram filtrados. Para contrariar este problema, o sinal obtido do acelerómetro longitudinal foi dividido tendo sido gravada uma versão não filtrada para permitir que os tempos entre os dois conjuntos de dados fossem coincidentes [Falcão Silva et. al, 2007].

A água foi então adicionada ao amortecedor de líquido sintonizado (FASE 2) com altura tal (54mm e 75mm) que a frequência do movimento da água (*sloshing*) no seu interior se aproxime da frequência natural do pêndulo. Estas alturas de água foram escolhidas para sintonizar o dispositivo com o pêndulo. Os valores de altura de água tinham que ser tais e estar suficientemente distanciados para que as variações da resposta do sistema devidas às diferentes frequências naturais pudessem ser facilmente identificadas.

Contudo, as alturas de água não podiam ser muito reduzidas, uma vez que as ondas geradas podiam começar a fragmentar-se, dando origem a um comportamento altamente não linear. Também teve que haver um limite máximo da altura da água

para evitar o seu deslocamento na direcção do movimento. Por isso teve que haver um compromisso entre estes requisitos discordantes e os valores acima escolhidos. Para cada uma das alturas de água, o sistema foi sujeito a vibrações de ruído branco da plataforma sísmica baseadas num sinal gerado pelo hardware de análise de espectros *Advantest* [Symes, 2005].

O sistema foi excitado a várias amplitudes diferentes variando de 0,015g RMS a 0,23g RMS. Para cada amplitude, apenas foram usadas frequências do sinal de ruído branco situadas entre 0 e 10 Hz, o que permitiu determinar a resposta de frequência do sistema [Falcão Silva et al., 2007]

Os ensaios efectuados sobre o pêndulo sem água no amortecedor de líquido sintonizado (Fase 1) são extremamente importantes para a avaliação numa fase subsequente do desempenho do próprio dispositivo. As características desse sistema base, directamente dependentes da altura de água, e que correspondem à massa modal, à frequência natural de vibração e ao amortecimento crítico, foram obtidas a partir da Função de Resposta em Frequência - FRF [Symes, 2005]. Em seguida apresenta-se a FRF para os testes conduzidos para uma excitação de ruído branco sobre o sistema de 1gdl (pêndulo) sem água no interior do amortecedor de líquido sintonizado [Falcão Silva et al, 2007].

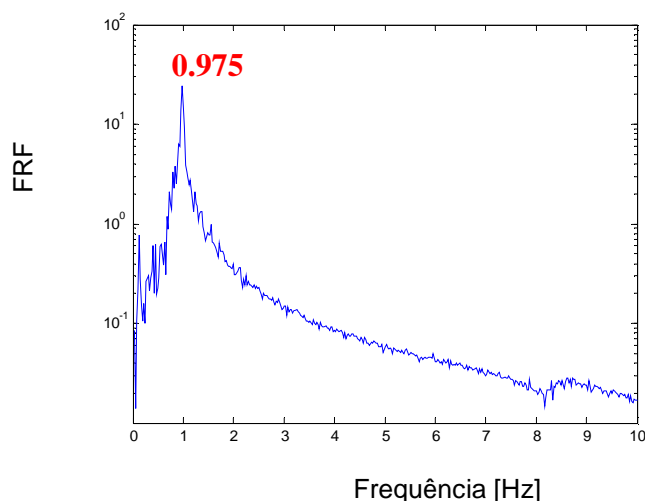


Figura 30 – FRF para o pêndulo simples, adaptado de [Symes, 2005]

Como pode ser observado a partir da Figura 30, o sistema apresenta uma única resposta de frequência máxima concentrada perto da frequência natural do pêndulo. Isto é compatível com a teoria de um sistema com um único grau de liberdade.

O valor da frequência natural obtido, pelo método do *peak picking* [Bendat e Piersol, 2000], a partir do máximo da FRF foi de 0,975 Hz que é superior ao valor obtido pela equação (3.5). A diferença observada entre os dois valores deve-se muito provavelmente ao facto do sistema real não se ter comportado como o pêndulo idealizado e assumido pela equação pela referida equação.

Na verdade, há muitos factores que podem influenciar o sistema, tal como a rotação do prato no plano vertical quando oscila, dando origem a uma frequência natural ligeiramente superior ao esperado.

Foi também ajustada uma curva à FRF mostrada anteriormente [Symes, 2005]. Os resultados deste ajuste apresentam-se na Tabela 1. Os resultados foram ajustados apenas para um intervalo reduzido em torno do valor da frequência esperada uma vez que os métodos de ajuste da FRF são muito sensíveis.

*Tabela 4 - Parâmetros ajustados para o pêndulo*

$f_n$ [Hz]	$\zeta$ [%]
0.965	1.23

Como se pode verificar valor da frequência natural obtido da curva ajustada é ligeiramente diferente do valor obtido a partir da FRF medida. Isto pode dever-se ao facto da equação (3.5) apenas dar uma aproximação de melhor ajuste à FRF e serem esperadas diferenças ligeiras na frequência natural e nos valores máximos.

Contudo, a razão do amortecimento crítico dada ser superior ao valor esperado num pêndulo ideal [Symes, 2005] pode ser causado pelos mais diversos factores, sendo provavelmente o mais importante deles a fricção nas ligações entre o prato e os cabos [Falcão Silva et. al, 2007].

Uma vez estabelecidas as propriedades do pêndulo foi possível seleccionar os parâmetros do dispositivo amortecedor de líquido sintonizado usados na condução dos principais testes em mesa sísmica.

Assim, e para avaliar o efeito do ajuste das frequências entre amortecedor de líquido sintonizado e estrutura principal (pêndulo), foram definidos e conduzidos ensaios com dois níveis diferentes de água no tanque: 54mm e 75 mm.

O primeiro valor permitiu que se obtivesse uma frequência fundamental de vibração do amortecedor de líquido sintonizado de 0.84Hz, o que correspondeu a um

valor ligeiramente inferior ao valor obtido para o pêndulo o que traduziu uma situação de amortecedor de líquido não perfeitamente sintonizado.

A segunda altura de água permitiu a obtenção de uma frequência de vibração de 0.975, o que corresponde a uma frequência perfeitamente sintonizada com a frequência de vibração do pêndulo. Nesta última situação foi obtida uma relação entre massas de aproximadamente 8.2%, sendo um valor ligeiramente superior ao proposto pela grande maioria dos autores uma vez que neste caso se está a falar da razão entre a massa total e a massa do pêndulo.

Em ambos os casos a razão da altura de água relativamente ao comprimento do TLD (*depth ratio*) foi inferior a 0.2, valor tomado como referência para a utilização da teoria linear de ondas rasas (*shallow water wave theory*).

É importante ainda referir que se teve o cuidado para que as alturas de água no interior do amortecedor de líquido sintonizado não tomassem valores muito reduzidos uma vez que as ondas assim geradas (*very shallow water waves*) poderiam começar a quebrar (*breaking waves*) muito precocemente dando origem a um fenómeno altamente não-linear.

Para cada altura de água o sistema foi sujeito a vibrações de ruído branco impostas pela mesa sísmica e baseadas num sinal gerado pelo *Advantest*. O sistema foi excitado por amplitudes variáveis entre 0.015g RMS e 0.23g RMS sendo usadas as frequências de ruído branco compreendidas entre 0 e 10 Hz [Symes, 2005].

Para um sistema de dois graus de liberdade constituído por um pêndulo e um amortecedor de líquido sintonizado ajustado à sua frequência natural, a resposta teórica do sistema para amplitudes de excitação baixas deverá ser bastante reduzida comparando com a situação da estrutura (pêndulo) sem amortecedor de líquido sintonizado.

O amortecimento do sistema introduzido pelo dispositivo amortecedor de líquido sintonizado deverá continuar a ser baixo, sendo que na representação da FRF é previsto o aparecimento de dois picos bastante próximos localizados de cada um dos lados de uma depressão na zona correspondente à frequência natural de vibração do pêndulo.



Na Figura 31 e Figura 32 apresentam-se detalhes das FRF do sistema pêndulo+amortecedores de líquido sintonizado os para patamares intermédios de amplitudes de excitação (0.035g em valores RMS) ensaiados e as alturas de água correspondentes de 54mm e 75mm.

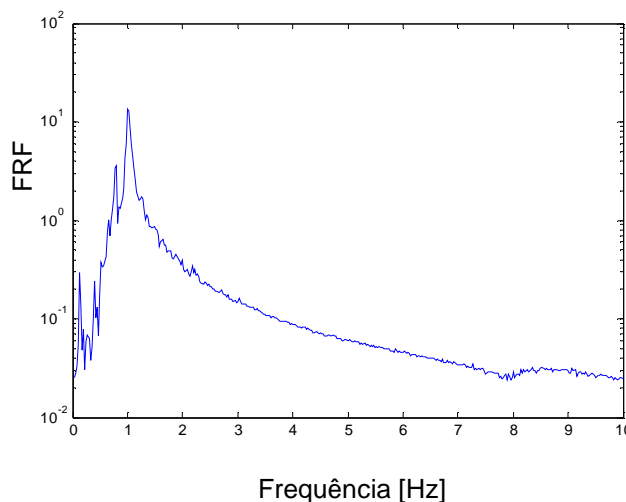


Figura 31 – FRF para sistema pêndulo + amortecedor de líquido sintonizado ( $h=54\text{mm}$ ,  $PGA=0.035\text{g RMS}$ ), adaptado de [Symes, 2005]

Como pode ser observado pelos resultados apresentados na Figura 31 de facto aparecem dois picos próximos ao valor da frequência fundamental de vibração do pêndulo (um à direita e outro à esquerda). Esta observação é consistente com o facto de se tratar de um sistema de 2 graus de liberdade.

Aparentemente a atenuação diminui rapidamente para valores muito próximos de zero nas zonas de frequências maiores ou menores que a frequência natural do amortecedor de líquido sintonizado, não tendo como tal o efeito que seria desejável na resposta do sistema à frequência natural do pêndulo como seria de esperar para um dispositivo não sintonizado.

Relativamente a valores de pico das FRF pode-se observar uma redução de quase 50% relativamente à situação do pêndulo sem dispositivo. Assim, e como pode ser comprovado por análise comparativa directa entre a Figura 30 e Figura 31, os valores de pico foram de cerca de 24,4 e 13.3, respectivamente.

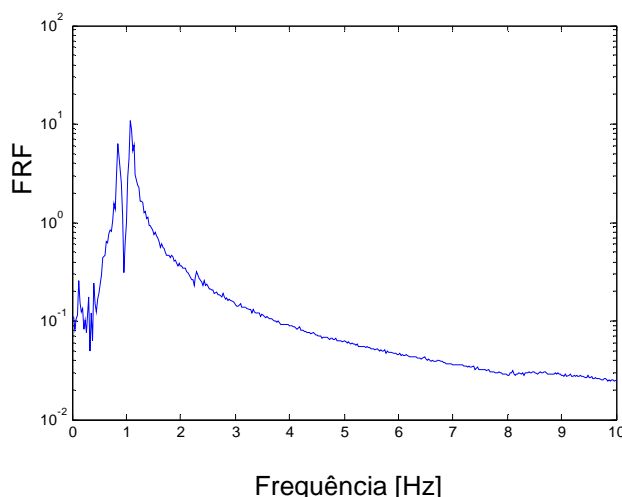


Figura 32 – FRF para sistema pêndulo + amortecedor de líquido sintonizado ( $h=75\text{mm}$ ,  $\text{PGA}=0.035\text{g RMS}$ ), adaptado de [Symes, 2005]

Analisando os resultados referentes a uma altura de água de 75mm (Figura 32) pode-se concluir o mesmo acerca do aparecimento dos dois picos, um de cada lado da frequência fundamental de vibração do pêndulo.

O ajuste da frequência de vibração do amortecedor de líquido sintonizado à frequência de vibração do pêndulo parece ter um efeito significativo ao nível do valor de pico da resposta (redução de 24.4 para 10.7), traduzindo um aumento de cerca de 10% quando comparado com a situação do amortecedor de líquido não perfeitamente sintonizado (Figura 31).

Pode-se concluir que a resposta do amortecedor de líquido sintonizado na frequência natural de vibração do pêndulo é francamente reduzida.

Pode-se ainda observar um aumento do amortecimento dentro de uma gama um pouco mais alargada de frequências, sendo este resultado compatível com as não-linearidades expectáveis ao nível do comportamento dos dispositivos amortecedores de líquido sintonizado

Apresenta-se na Figura 33 a evolução dos resultados obtidos para os testes efectuados sobre o pêndulo com uma altura de água no TLD de 75mm para valores de intensidade de aceleração progressivamente mais elevados.

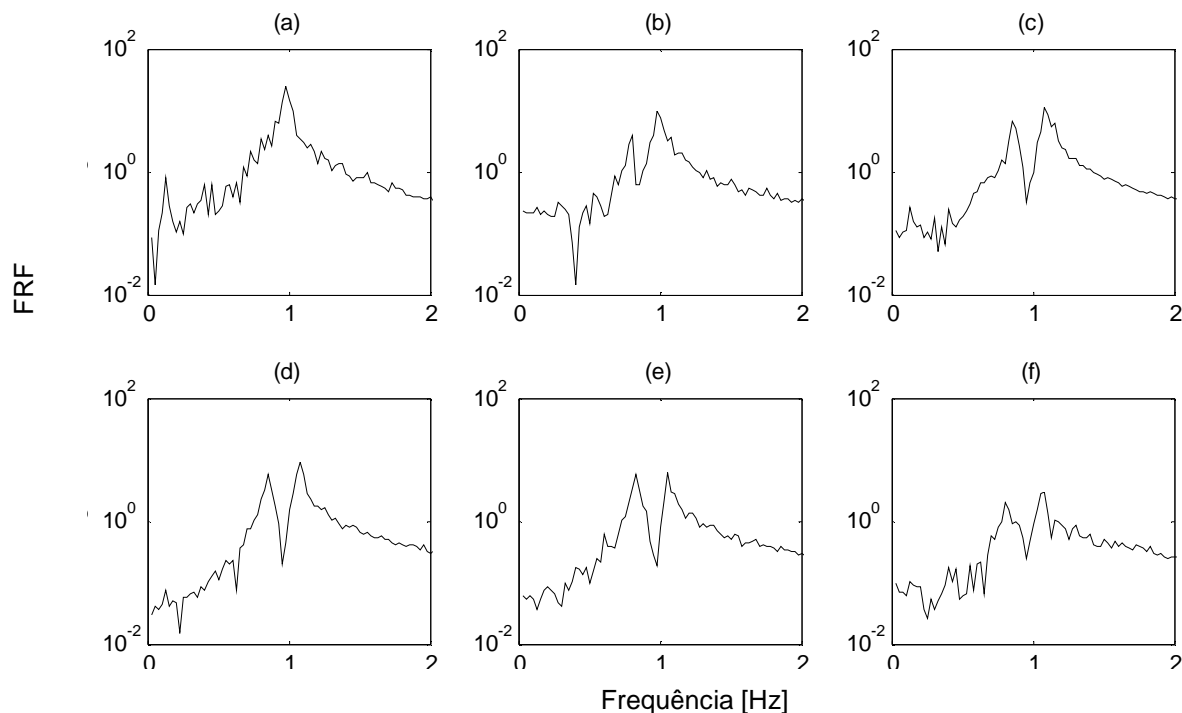


Figura 33 – FRF da resposta do sistema estrutural principal (pêndulo): (a) sem amortecedor de líquido sintonizado, (b)-(f) com amortecedor de líquido sintonizado para intensidades de aceleração crescentes de 0.015g RMS até 0.23g RMS, adaptado de [Falcão Silva et. al, 2007]

Por uma questão de facilidade de comparação directa introduziu-se como Figura 33a) uma representação correspondente ao gráfico apresentado na Figura 30.

A depressão observada nos gráficos anteriores, Figura 33b) a Figura 33f), situa-se ligeiramente para a esquerda do pico correspondente à frequência natural original do pêndulo, indicando que apesar de estudos preliminares a frequência natural do amortecedor de líquido sintonizado foi ajustada ligeiramente abaixo da frequência natural do pêndulo.

Com o aumento da amplitude de excitação, no sentido de b) para f), a depressão parece mover-se progressivamente para valores de frequências mais elevados, no sentido da frequência natural original do pêndulo. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de à medida que a amplitude de excitação aumenta o comportamento do amortecedor de líquido sintonizado evidencia características cada vez mais não-lineares. Um exemplo disto é precisamente o facto de frequência natural do dispositivo aumentar em concordância com o aumento da amplitude de excitação [Sun et. al, 1992].

Como resultado deste comportamento não-linear considera-se um aumento da rigidez equivalente que poderá ser responsável pela melhoria do desempenho do

dispositivo amortecedor de líquido sintonizado ao longo do programa experimental [Reed et. al, 1998].

Outra evidência dos testes é que a depressão observada se torna mais larga à medida que se aumenta a amplitude de excitação, sendo este facto indicativo do aumento do amortecimento.

Os resultados obtidos parecem sugerir que para pequenas amplitudes de excitação o aumento ao nível do amortecimento resultante do ajuste do amortecedor de líquido sintonizado à frequência do pêndulo é reduzido.

À medida que a amplitude de excitação aumenta observa-se também um aumento do amortecimento equivalente, aproximando-se cada vez mais do valor óptimo. Esta observação pode ser explicada pelo facto de quando um amortecedor de líquido sintonizado é excitado apenas parte da massa é mobilizada e contribui para o amortecimento [Housner, 1957].

Assim com o aumento dos níveis de excitação aumenta também a turbulência na água, o que traduz um aumento proporcional da massa de água mobilizada no interior do amortecedor de líquido sintonizado e conseqüentemente um aumento proporcional da energia dissipada. Esta turbulência acrescida da água é directamente responsável pelo aumento do amortecimento e por conseqüência do desempenho do amortecedor de líquido sintonizado.

Embora inicialmente, e para amplitudes de excitação reduzidas, o dispositivo amortecedor de líquido sintonizado ensaiado não estivesse perfeitamente sintonizado com a estrutura (pêndulo) ele foi-se tornando mais eficiente à medida que se aumentaram as amplitudes da solitação, sendo o seu comportamento e desempenho sido explicados e justificados pelo tipo de fenómenos lineares e não lineares que ocorrem no seio da água durante a solitação.

Com base nos resultados obtidos do programa experimental desenvolvido em 2005 foi possível retirarem-se as seguintes conclusões [Symes, 2005] [Falcão e Silva et al., 2007]:

- i) A incorporação de um amortecedor de líquido sintonizado numa estrutura pode reduzir as suas vibrações devido às excitações aleatórias do tipo ruído branco, mesmo que o referido dispositivo não esteja perfeitamente sintonizado à frequência fundamental da estrutura;

- ii) Sintonizar a frequência do dispositivo amortecedor de líquido sintonizado com a frequência fundamental da estrutura principal em ele se inclui pode melhorar fortemente o seu desempenho;
- iii) Para amplitudes de solitação dinâmica muito reduzidas a reduzidas o comportamento dinâmico dos amortecedores de líquido sintonizado apresenta características lineares;
- iv) Aparentemente o comportamento dinâmico dos amortecedores de líquido sintonizado apresenta características não-lineares a fortemente não-lineares para amplitudes de excitação moderadas a elevadas;
- v) Para amplitudes de excitação elevadas é mobilizada uma maior quantidade de água do amortecedor de líquido sintonizado (massa de água efectiva) traduzindo um aumento ao nível do amortecimento;
- vi) A melhoria do desempenho dos dispositivos amortecedores de líquido sintonizado com a amplitude de excitação fica a dever-se principalmente ao aumento de água mobilizada, referido em v), com possível contribuição dos efeitos não-lineares.

### **2.3.2. 2ª Fase de ensaios (2007)**

Mantendo a estreita cooperação entre o NESDE (LNEC) e a Universidade de Bristol, e na expectativa de melhor compreender os fenómenos que ocorrem no seu interior, dispositivos amortecedores de líquido sintonizado foram posteriormente ensaiados em duas fases distintas durante o ano de 2007, permitindo dar continuidade ao programa experimental iniciado em 2005.

Os dispositivos foram colocados sobre uma pequena plataforma sísmica unidireccional e sujeitos a excitações de intensidade crescente com o objectivo de avaliar os efeitos das não linearidades associadas ao movimento de *sloshing* da água, com partículas em suspensão [Chalmers e Bayley, 2007] e com grelhas metálicas [Netley e Barnard, 2008].

Os resultados obtidos permitiram uma melhor quantificação dos efeitos que a eventual alteração do comportamento do líquido nestas circunstâncias poderá ter ao nível da variação do amortecimento.

Enquanto que no programa experimental, que teve lugar em 2005, os ensaios de caracterização foram efectuados com recurso a séries aleatórias do tipo ruído branco (*white noise*) com um determinado conteúdo em frequências, nestas duas fases que decorreram em 2007 foram impostas por meio de um gerador manual outras formas de excitação. Assim foram impostos sinais do tipo *sinesweeps* com variação muito lenta e com diferentes amplitudes máximas.

Os primeiros ensaios efectuados em 2007 contemplaram várias simulações experimentais sobre um amortecedor de líquido sintonizado com diferentes partículas em suspensão. Esta situação permitiu o aprofundamento do estudo anteriormente desenvolvido, principalmente em termos de amortecimento. Para tal definiu-se um dispositivo de ensaio análogo ao apresentado na Figura 34.

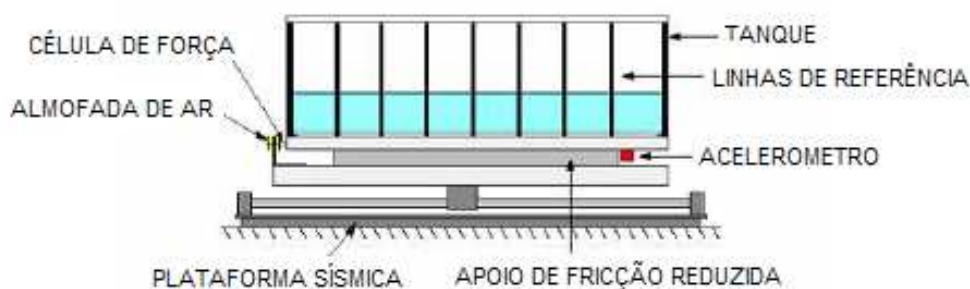


Figura 34 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio utilizado nos ensaios de início de 2007, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

O tanque ensaiado apresentava como características geométricas 422mm de comprimento por 150mm de largura e 150mm de altura. Como se pode observar da figura, o tanque com a água foi colocado sobre um apoio de fricção reduzida. Foram ensaiadas diferentes alturas de água em repouso que se apresentam numa secção mais adiante.

Analogamente ao efectuado durante o programa experimental desenvolvido em 2005, o movimento da superfície da água foi registado por meio de uma camera a preto e branco de 60Hz.

Os movimentos da água ao longo do tanque foram registados a uma certa distância e com base num sistema de referência composto por 7 linhas pretas verticais igualmente espaçadas no comprimento do tanque.

Para além de registar estes dados, o *software* permitiu a interpretação das imagens obtidas da camera de vídeo, tendo debitado a posição dos alvos que foram definidos. Os referidos alvos foram escolhidos para que pudessem ser registados tanto os movimentos verticais da água como os deslocamentos horizontais do tanque.

Todos estes registos foram gravados num ficheiro de texto a uma taxa de 60 leituras por segundo, compatível com a frequência de funcionamento da camera de vídeo a preto e branco [Chalmers e Bayley, 2007].

A água foi corada com permanganato de potássio (Figura 35) para obter um maior contraste entre o líquido, o fundo e as linhas pretas verticais colocadas na estrutura do próprio dispositivo amortecedor de líquido sintonizado para servirem de referência para o sistema de captação de imagens.



*Figura 35 – Amortecedor de líquido sintonizado com a água corada com permanganato de potássio, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]*

Para além do referido foi ainda colocada uma célula de força amarrada a uma das extremidades do tanque, o que permitiu medir a força de corte na base do dispositivo e correspondente ao conjunto tanque + água. A célula de força foi rigidamente ligada à plataforma sísmica no sentido de permitir o movimento livre entre ela e o dispositivo de protecção sísmica em estudo.

Da instrumentação fez ainda parte um acelerómetro que se ligou ao tanque para monitorização da aceleração.

Os registos obtidos da instrumentação foram processados através de um amplificador e de um filtro analógico antes de serem tratados pelo sistema de aquisição de dados existente no computador.

O filtro analógico foi responsável pela remoção de qualquer ruído acima de uma frequência pré-definida. Neste caso essa frequência correspondeu a 24Hz, uma

vez que o programa experimental pretendia incidir sobre frequências baixas, abaixo de 2-3Hz, e era necessário que o valor definido fosse inferior a metade da frequência da camera de vídeo utilizada (60Hz) [Chalmers e Bayley, 2007].

Durante esta fase do programa experimental foram usadas quatro alturas de água (Tabela 5), determinadas tendo por base trabalho de outros investigadores [Tait et. al, 2004] [Tait et. al, 2005]. A razão da escolha de valores semelhantes ou muito próximos prendeu-se com o facto de as mesmas relações entre altura de água e comprimento do tanque na direcção da solicitação permitirem uma comparação entre os resultados mais directa. As frequências naturais de *sloshing* da água no interior dos dispositivos foram determinadas de acordo com a equação 3.1

*Tabela 5 - Alturas de águas ensaiadas no âmbito do programa experimental de 2007*

h [mm]	h/L [-]	$f_w$ [Hz]	$M_w$ [kg]
21	0.050	0.53	1.34
42	0.099	0.75	2.68
63	0.149	0.90	4.02
85	0.201	1.01	5.43

Durante os ensaios preliminares observou-se que a altura de água correspondente a 85mm era demasiado grande uma vez que nestas circunstâncias a água atingiu a tampa do reservatório e saiu por fora com grande frequência, mesmo para reduzidas amplitudes de excitação. Desta forma os ensaios sobre esta altura de água foram abandonados.

Como o tanque não ficou completamente estanque, foi necessário colocar uma tira de borracha em toda a zona de contacto entre a tampa e as paredes do tanque para evitar que nos ensaios efectuados sobre as alturas de água mais reduzidas a água pudesse eventualmente escapar para o exterior se as amplitudes de excitação fossem elevadas.

Relativamente ao tipo de partículas que podem ser colocadas num amortecedor de líquido sintonizado, pode-se afirmar que estas são de três tipos [Chalmers e Bayley, 2007]:



- i) Com densidade inferior à da água;
- ii) Com a mesma densidade que a água;
- iii) Com densidade superior à da água.

Nos dois primeiros casos as partículas permanecem em suspensão ficando associadas, aquando da ocorrência de uma dada solicitação dinâmica, à massa efectiva ou convectiva, enquanto que na última situação se depositam no fundo ficando associadas com a massa não-efectiva ou impulsiva.

Uma vez que a maioria do movimento da água nos dispositivos amortecedores de líquido sintonizado ocorre principalmente na camada (película) superior da água, então para se conseguir uma maior eficiência é necessário que as partículas se encontrem a flutuar. Por esta mesma razão escolheram-se dois tipos de partículas com uma densidade inferior à da água, cujos detalhes se indicam na Tabela 6.

*Tabela 6 - Partículas ensaiadas, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]*

Partícula	Material	Forma e tamanho	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [l]			Massa [g]		
				0.04	0.2	0.4	0.2	1.6	3.5
Mole	esferovite	$\phi$ 3-5mm	8	0.04	0.2	0.4	0.2	1.6	3.5
Rígido	plástico	$\phi$ 2mm	615				23.8	125.5	241.9

Na tabela seguinte apresentam-se os ensaios efectuados no âmbito do programa experimental

*Tabela 7 - Gama de frequências e de amplitudes de excitação ensaiadas, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]*

Altura de água [mm]	Gama de frequências [Hz]	Amplitudes de excitação ensaiadas [mm]		
		5.71	11.42	13.79
21	0-1	5.71	11.42	13.79
42	0-1.5	1.45	3.47	5.65
63	0-2	0.87	2.5	3.9
63 (esferovite)	0-2	0.87	2.5	3.9
63 (plástico)	0-2	0.87	2.5	3.9

Em primeira instância foi analisado o comportamento do amortecedor de Líquido Sintonizado sem qualquer tipo de partículas em suspensão por meio da FRF da massa equivalente. [Chalmers e Bayley, 2007]

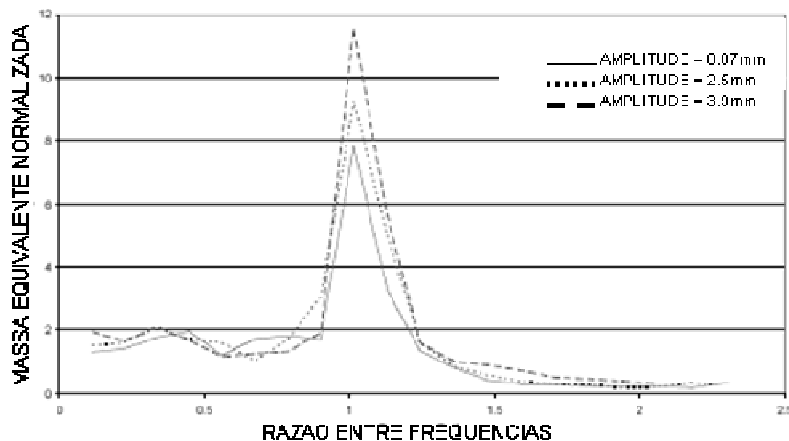


Figura 36 – Massa de água equivalente para as diferentes amplitudes de excitação testadas ( $h=63\text{mm}$ ), adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

A energia dissipada por ciclo pelo movimento de *sloshing* da água no interior do amortecedor de líquido sintonizado pode ser determinada através do cálculo da área do gráfico força-deslocamento (Figura 37). O valor da energia dissipada foi determinado por meio do integral definido na equação 3.6.

$$E = \int F \frac{dx}{dt} dt \tag{6}$$

em que  $F$  corresponde à força medida,  $dx/dt$  a velocidade do tanque. Muito embora a velocidade não tenha sido registada de uma forma directa, foi obtida por diferenciação dos sinais de deslocamentos para cada frequência e amplitude de excitação imposta.

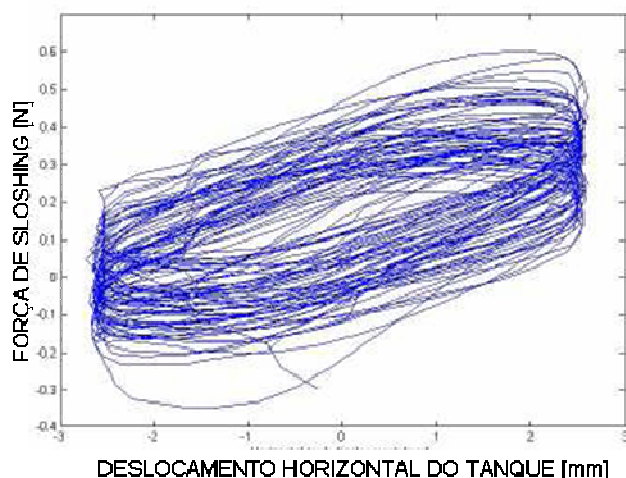


Figura 37 – Ciclo histerético para amortecedor de líquido sintonizado sem partículas em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

A energia dissipada pode então ser usada no cálculo do valor do amortecimento equivalente do *sloshing* da água. Por exemplo foi determinado para uma amplitude de 0.87mm um amortecimento equivalente de cerca de 10.3%, valor que se encontra dentro do intervalo referido atrás como óptimo (5 a 15%).

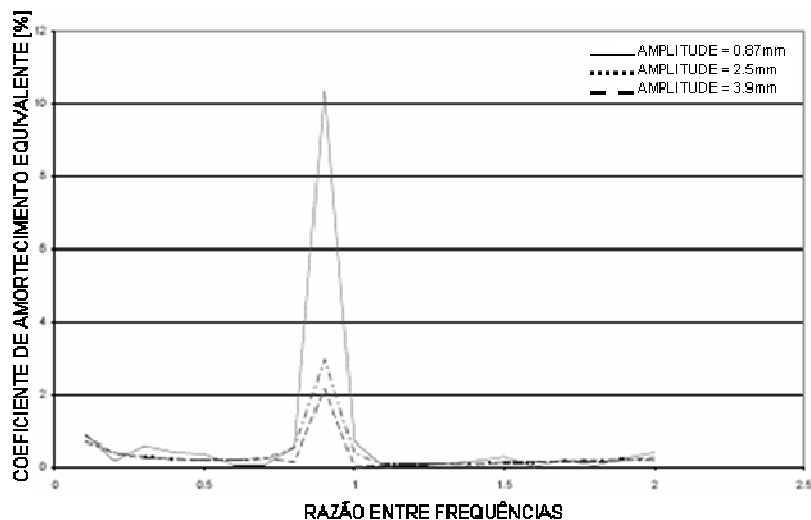


Figura 38 – Massa de água equivalente para as diferentes amplitudes de excitação testadas ( $h=63\text{mm}$ ), adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

Como se pode constatar, por observação da Figura 38, o amortecimento não é constante para todas as relações entre frequências, o que indicia que no comportamento dos amortecedores de líquido sintonizado intervêm fenómenos não-lineares. Se o sistema pelo contrário fosse linear observar-se-ia uma constância do valor do amortecimento para toda e qualquer relação de frequências.

Durante o programa experimental, e no que refere aos efeitos das partículas em suspensão, verificou-se que estas se movimentam de uma forma natural e em concordância com o fluxo de circulação da água, embora algumas das mais macias (esferovite) tenham ficado presas às paredes do reservatório. Este comportamento ocorreu principalmente quando as ondas em cada extremidade do tanque se tornaram bastante elevadas.

Para além disso as referidas partículas macias de esferovite permaneceram em aglomerados sobre a superfície da água movendo-se em certas circunstâncias como se de um único corpo se tratasse.

Acredita-se que o comportamento acima indicado resultou maioritariamente da electricidade estática que as partículas continham desde antes do ensaio, por se encontrarem armazenadas em sacos de plástico [Chalmers e Bayley, 2007]

As partículas colocadas no amortecedor de líquido sintonizado permitiram aumentar a massa de água móvel, ainda que derivado da quantidade de partículas e das suas densidades o efeito sobre a massa efectiva ou convectiva ( $M_1$ ) previsto fosse muito reduzido.

Os resultados obtidos (Figura 39) permitiram concluir que, contrariamente ao que seria esperado, as partículas macias dissiparam mais energia do que as partículas rígidas.

As partículas rígidas formando um género de “tapete” criaram uma força adicional descendente sobre a água o que reduziu o efeito de *sloshing* da água e, assim, a dissipação de energia.

As partículas macias, não sendo tão densas como as partículas rígidas, acabam por não suprimir o fenómeno de *sloshing* (ou pelo menos se o suprimirem é em menor nível) o que permite que a água possa dissipar mais energia. [Chalmers e Bayley, 2007].

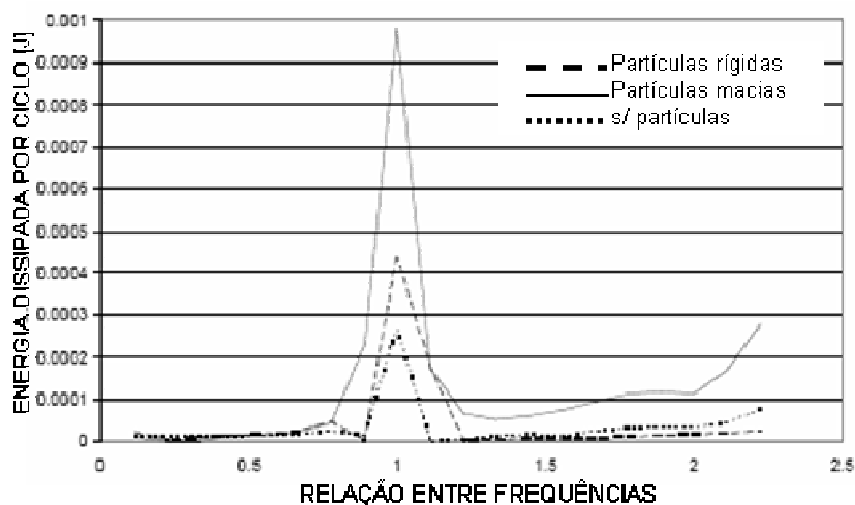


Figura 39 – Energia dissipada por ciclo, para massa de partículas correspondente a 10% de volume de massa de água, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

Com 1% em volume de partículas, as partículas foram capazes de deslocar-se mais sobre a superfície da água, muito embora o movimento das partículas fosse limitado e tenham ocorrido colisões mínimas.

Para 5% e 10% em volume de partículas os resultados não seguiram o mesmo padrão do observado para 1% [Chalmers e Bayley, 2007].

Para 1% de volume de partículas, as partículas rígidas dissipam, em torno da frequência fundamental de *sloshing*, mais energia por ciclo do que as partículas macias.

Este fenómeno deve-se fundamentalmente à diferença de massa entre os dois tipos de partículas. Assim a massa adicional que as partículas rígidas acrescentam traduz-se num aumento da força de *sloshing* que a água produz junto da frequência fundamental do amortecedor de líquido sintonizado.

A energia dissipada por ciclo pelo movimento de *sloshing* da água + partículas no interior do amortecedor de líquido sintonizado pode ser determinada através da integração da área do gráfico força-deslocamento (Figura 40) para cada caso (partículas macias ou partículas rígidas).

O amortecimento equivalente pode então ser determinado (Equação 3.4).

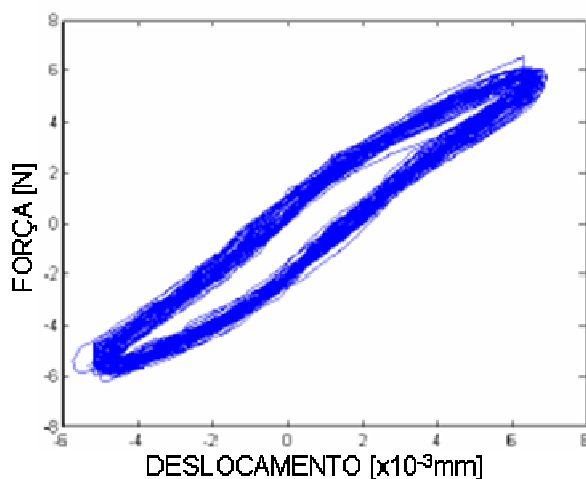


Figura 40 – Relação força deslocamento para amortecedor de líquido sintonizado com partículas em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

Os resultados obtidos permitiram concluir que o amortecimento introduzido pelas partículas macias foi mais elevado do que o correspondente valor para a situação em que foram ensaiadas partículas rígidas.

Junto da frequência natural, o amortecimento crítico atinge 8%, enquanto que para as restantes frequências não ultrapassa 0.3%. No entanto não foi possível identificar uma tendência global com o aumento do volume de partículas [Chalmers e Bayley, 2007]

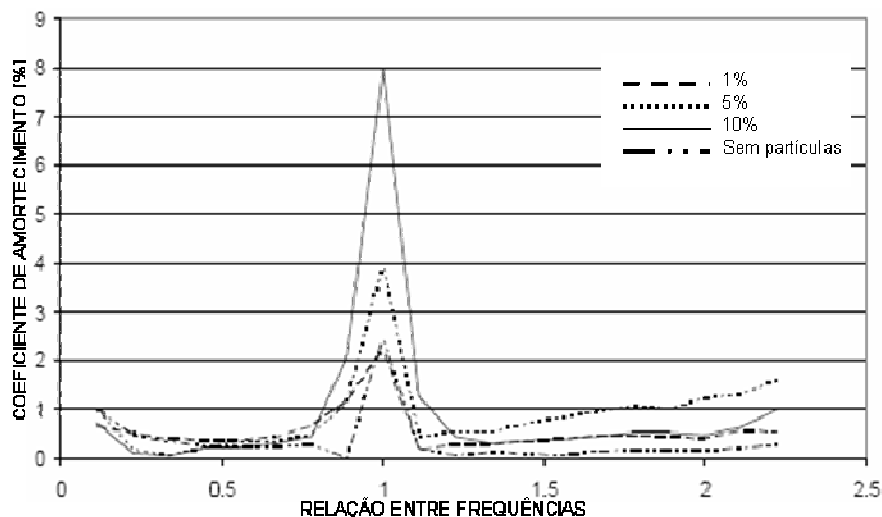


Figura 41 – Coeficiente de amortecimento para amortecedor de líquido sintonizado com partículas macias em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

Observou-se que, com o aumento do volume das partículas rígidas, houve um aumento muito ligeiro ao nível da resposta. Esta tendência não se mantém após a frequência natural, uma vez que, tal como para as partículas macias os valores, para os diferentes volumes de partículas, tendem a divergir.

À semelhança do observado para os ensaios sobre as partículas macias, os resultados aumentam após ser atingida a frequência natural, o que indica que certamente haverá outro pico para um segundo modo da água do amortecedor de líquido sintonizado

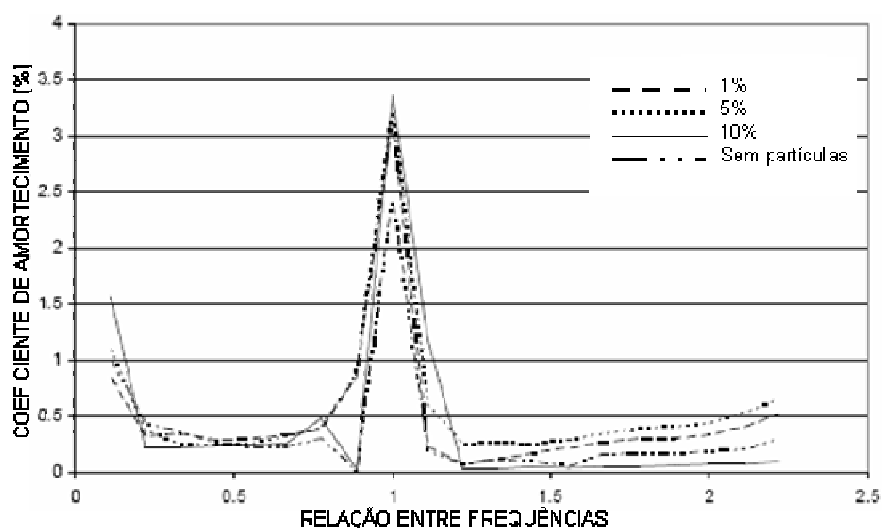


Figura 42 – Coeficiente de amortecimento para amortecedor de líquido sintonizado com partículas rígidas em suspensão, adaptado de [Chalmers e Bayley, 2007]

Como conclusão principal é possível afirmar que, tanto as partículas macias como as partículas rígidas permitem melhorar o amortecimento dos dispositivos de proteção sísmica do tipo amortecedores de líquido sintonizado.

A introdução de partículas rígidas traduz um melhor coeficiente de amortecimento em torno da frequência fundamental pela massa extra adicionada à massa efectiva de água durante o fenómeno de *sloshing*, o que produz uma força de restituição mais elevada. No entanto as partículas macias traduzem um melhor comportamento global uma vez que melhoram o coeficiente de amortecimento para uma gama mais alargada de frequências, muito para além da frequência fundamental.

Os ensaios que decorreram no final de 2007 foram igualmente efectuados na mini plataforma sísmica do Laboratório BLADE da Universidade de Bristol e incidiram em amortecedores de líquido sintonizado com grelhas metálicas incluídas. Esta situação permitiu o aprofundar do estudo desenvolvido em termos de amortecimento efectivo da água. O dispositivo de ensaio apresenta-se de uma forma esquemática na Figura 43.

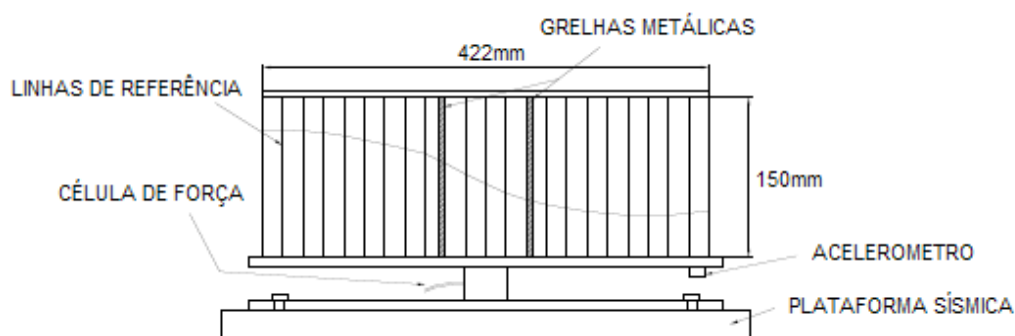


Figura 43 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio utilizado nos ensaios de Setembro de 2007, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]

Durante a fase de ensaios que teve lugar entre Agosto e Outubro de 2007, o amortecedor de líquido sintonizado estudado apresentou como características geométricas 422m de comprimento por 168mm de largura e 150mm de altura, sendo como tal análogo em termos de frequência ao estudado anteriormente.

As diferenças observadas residiram nas relações de massa, uma vez que uma maior largura corresponde necessariamente a uma maior quantidade de água que se reflecte numa maior massa. Contrariamente ao efectuado anteriormente foi testada somente uma altura de água correspondente a 52mm.

O tanque foi ligado à plataforma sísmica por meio de uma célula de força (6 graus de liberdade) que serviu para medir a força transmitida ao TLD. A aceleração do tanque foi registada por meio de um acelerómetro.

A evolução do perfil da água foi monitorizada em tempo real por meio de um sistema de imagem. Todos os registos da elevação da superfície da água, da aceleração e da força foram compilados num ficheiro em formato \*.txt.

A água foi também, à semelhança do efectuado para os primeiros ensaios experimentais que decorreram em 2007, corada com permanganato de potássio para melhorar o contraste para o sistema de aquisição, sendo assim assegurada a adequada monitorização do perfil da água.

Nesta fase do programa experimental tiveram lugar uma série de ensaios usando tanto solicitações sinusoidais de frequência bem definida como solicitações aleatórias do tipo ruído branco (*white noise*). Todas as excitações impostas foram horizontais e unidireccionais, embora se tenha tido o cuidado de medir e registar todos os 6 graus de liberdade na célula de força.

Relativamente à excitação sinusoidal, foram colocadas frequências simples até o sistema atingir um estado estacionário após o qual o sistema era deixado com o movimento atingido por um período de 1 minuto. Seguidamente era imposta uma frequência ligeiramente mais elevada até ser atingido um estado estacionário. Este procedimento foi repetido no sentido ascendente e descendente até ser atingido o limite de frequência pretendido e de forma a comparar o comportamento entre as duas situações.

Comparativamente com simples ondas sinusoidais estes ensaios revelaram-se muito mais representativos do comportamento de uma estrutura face a uma dada acção sísmica, uma vez que apresentam maior aleatoriedade.

Os ensaios do tipo ruído branco efectuados apresentaram um conteúdo em frequência definido para ser compatível com o tipo de estruturas e o tipo de amortecedores de líquido sintonizado estudados. Os sinais utilizados foram gerados no LNEC com recurso ao programa LNEC-SPA [Mendes e Costa, 2007] e escalados para as diferentes amplitudes de excitação pretendidas.

O movimento da água ao longo do tanque foi registado com base num sistema de referência mais refinado composto por 21 linhas pretas verticais igualmente espaçadas no comprimento do tanque para que o sistema de aquisição conseguisse registar a evolução da superfície da água durante os ensaios e em cada um dos pontos identificados ( $Y_1$ - $Y_{21}$ ). Com o software utilizado foi possível obter uma interpretação mais refinada das imagens obtidas da camera de vídeo.



O tanque ensaiado foi dimensionado para ser um modelo à escala (1:2.3) do tanque usado nas investigações anteriores de Tait [Tait e tal., 2004], permitindo comparações mais directas tendo em conta o factor de escala correspondente.

As séries temporais para cada um dos parâmetros (tempo, aceleração na base – acc, força de corte basal -  $F_y$ , deslocamento na base – x, elevação da superfície da água) foram registadas ao longo de um período variável entre 102 e 104 minutos, dependente do tipo de teste, e contendo 500000 registos.

Durante o programa experimental, estes parâmetros foram gravados de uma forma contínua, enquanto que a frequência de excitação da plataforma sísmica foi sendo aumentada, em passos discretos de 0.01Hz, a partir de 0.535 Hz até um máximo de 1.155 Hz, mantendo sempre a amplitude de excitação constante [Netley e Barnard, 2008].

A pressão hidroestática, baseada na altura da onda em cada uma das paredes de fundo do tanque – posições  $Y_1$  e  $Y_{21}$ , foi usada com o objectivo de aproximar a força introduzida pelo movimento da água. O cálculo foi efectuado com recurso à equação (7):

$$F = \frac{1}{2} \rho g b [h_R^2 - h_L^2] \quad (7)$$

em que F corresponde à força de corte na base resultante do movimento de *sloshing* do líquido,  $\rho$  é a densidade do líquido, g a aceleração devida à gravidade,  $h_R$  a altura de água na parede direita do tanque, dada por  $h + \eta_R$ , e  $h_L$  a altura de água na parede esquerda do tanque, dada por  $h + \eta_L$  (Figura 44).

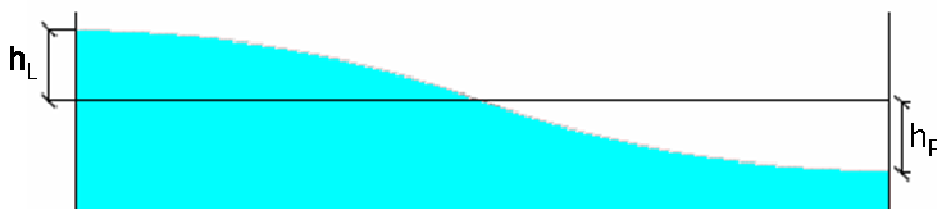


Figura 44 – Elevação da superfície da água relativamente à posição de repouso

Com o objectivo de facilitar a comparação com os resultados de investigações anteriores [Tait et. al, 2004] [Tait et. al., 2005a] [Tait et. al, 2005b] [Chalmers e Bayley, 2007] a altura de água foi normalizada relativamente a altura de água em repouso ( $h_0=52\text{mm}$ ).

Foi possível obter a representação gráfica da relação entre frequências ( $\beta$ ) e a altura de água normalizada ( $\eta'$ ).  $\beta$  é determinado pela divisão entre cada frequência ensaiada pelo valor teórico (Equação 1) da frequência fundamental de sloshing do líquido no interior do amortecedor de líquido sintonizado. Neste caso em particular, em que foi testada uma altura de água de cerca de 52mm, o valor teórico de  $f_w$  corresponde a 0.83.

Apresentam-se na Figura 45 e Figura 46 os gráficos correspondentes para os ensaios sem grelhas metálicas e com grelhas metálicas, respectivamente.

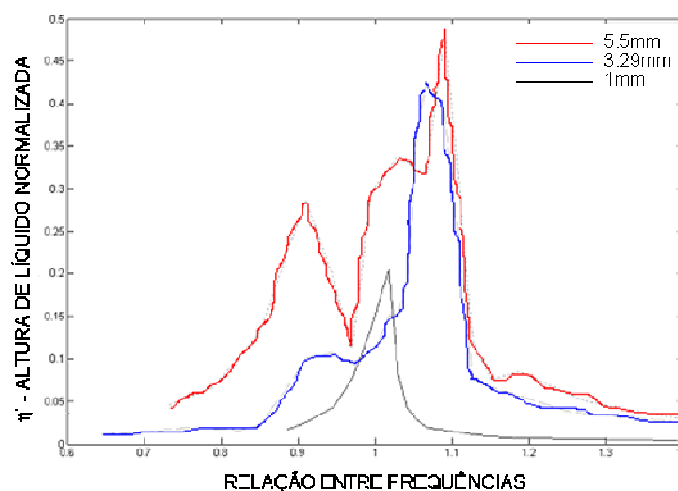


Figura 45 – FRF para a situação sem grelhas metálicas, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]

Por observação dos gráficos apresentados na Figura 45 é possível concluir que para a situação sem grelhas metálicas à medida que a amplitude de excitação aumentava de 1mm para 5.5mm o pico da FRF tinha tendência para se deslocar no sentido de maiores valores de relação entre frequências ( $\beta$ ).

Os picos obtidos para as amplitudes de excitação ensaiadas mostram que a máxima amplificação do sistema sofre alterações com a amplitude de excitação variando entre 1.01 e 1.10 para amplitudes entre 1mm e 5.5mm, respectivamente.

Este efeito, característico do comportamento não-linear dos amortecedores de líquido sintonizado, é conhecido como “efeito de endurecimento” ou “efeito de rigidificação”, sendo causado pelos fenómenos que ocorrem ao nível do líquido e do seu movimento quando são impostas forças de grande magnitude.

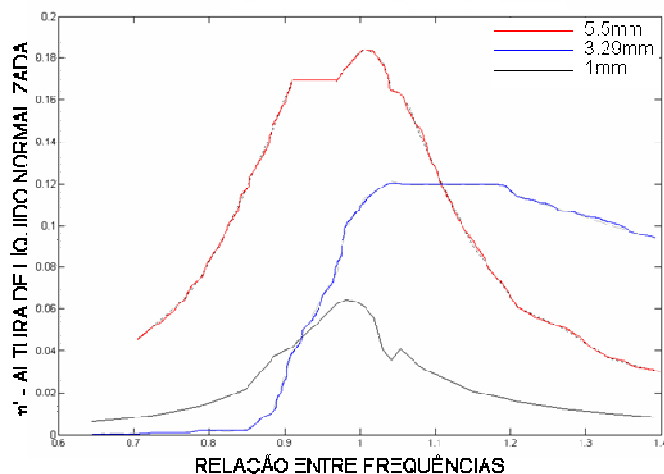


Figura 46 – FRF para a situação com grelhas metálicas, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]

A Figura 46 mostra resultados correspondentes aos apresentados na Figura 45, mas considerando a introdução de grelhas metálicas com o objectivo de aumentar o amortecimento.

Esta situação traduz um comportamento também não-linear mas ligeiramente diferente do observado para a situação sem grelhas metálicas, o que pode ser demonstrado pelo ocorrência de picos da FRF junto de  $\beta = 1,0$ , qualquer que seja a amplitude de excitação ensaiada.

As Figura 45 e Figura 46 mostram que as alturas de onda normalizadas são significativamente inferiores quando se introduzem grelhas metálicas. Esta diminuição observada na altura de onda traduz-se por uma redução ao nível do fenómeno não-linear de quebra de onda, sendo uma observação consistente com trabalhos anteriores [Tait et. al, 2004] [Tait et. al, 2005a] [Tait et. al, 2005b] .

De facto, para uma amplitude de excitação de cerca de 3.29mm observa-se um aumento de quase quatro vezes na altura de água normalizada para a situação sem grelhas metálicas. Esta alteração é idêntica ao verificado em [Tait et. al, 2004], para amplitudes de excitação da ordem de 2.5mm.

A relação entre as observações efectuadas pode ser demonstrada com base na teoria hidráulica clássica, em que é definido que, assumindo escoamento laminar, as perdas através das grelhas podem ser directamente escaladas desde que a relação entre a área aberta para as duas situações (com e sem grelhas) se mantenha constante [Netley e Barnard, 2008].

Após ter sido calculada a força de *sloshing* da água ( $F_{SW}$ ) foi possível compará-la com a força total da massa de água ( $F_W$ ) e representá-las em função da, já referida, relação entre frequências ( $\beta$ ). Os valores das forças foram normalizados por divisão pela força de inércia, identificada em [Tait et. al, 2004],  $F_i = M_w(2\pi f)^2 A$ , com  $A$ =amplitude de excitação forçada.

As figuras que se apresentam em seguida (Figura 47 e Figura 48) mostram a representações gráficas correspondentes para as situações sem grelhas metálicas e com grelhas metálicas. Pode ser observado que os gráficos são muito semelhantes com uma diferença entre eles justificada pela constante de inércia da água ( $M_w$ xaceleração na base).

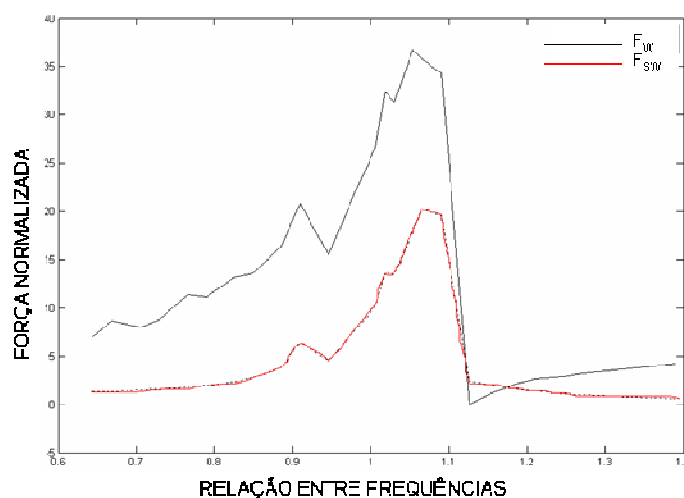


Figura 47 – Comparação entre força normalizadas para a situação sem grelhas metálicas e para uma amplitude de excitação de 3.2mm, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]

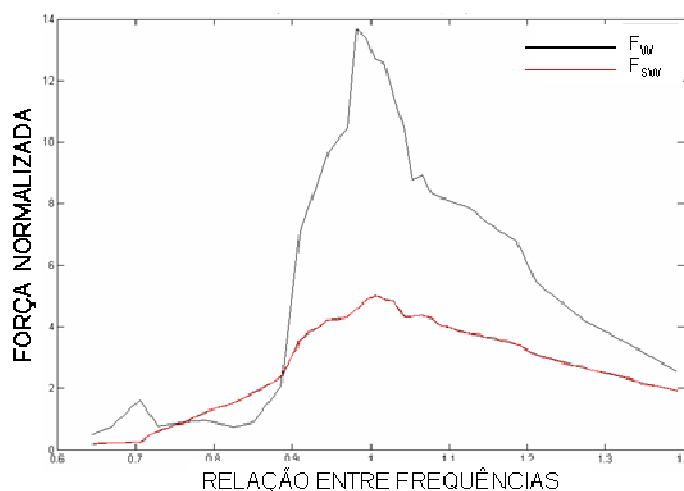


Figura 48 – Comparação entre força normalizadas para a situação com grelhas metálicas e para uma amplitude de excitação de 3.2mm, adaptado de [Netley e Barnard, 2008]

De uma forma geral os resultados obtidos para a situação sem grelhas metálicas traduzem uma correlação entre a amplitude e os efeitos de não-linearidades, podendo ser identificado de uma forma clara o efeito de endurecimento.

Este endurecimento pode ser explicado pelos fenómenos não-lineares inerentes às propriedades da água que surgem quando esta se encontra sujeita a amplitudes de excitação mais elevadas, como:

- i) Quebra de onda (*breaking waves*);
- ii) Água atingir o topo das paredes e ficando em contacto com a tampa do reservatório;
- iii) Movimentação de ar fora do comum em fenómenos como os descritos em (a) e (b);
- iv) Formação de ondas laterais;
- v) Fenómenos de turbulência resultantes de a), b), c) e d).

No entanto observou-se que os amortecedores de líquido sintonizado com grelhas metálicas apresentaram um efeito de endurecimento consideravelmente inferior devido ao aumento do amortecimento.

As grelhas metálicas introduziram uma impedância ao escoamento da água originando uma perda de energia por fricção e ao desprendimento de vórtices. Quando as grelhas foram usadas, os efeitos não-lineares supra mencionados ocorreram numa extensão muito inferior.

As grelhas metálicas surgiram como uma alternativa muito útil para manter constante a frequência de sloshing pretendida [Netley e Barnard, 2008].

### **3. Considerações Finais**

Foram apresentados no presente relatório estudos de investigação experimental na área da protecção passiva de estruturas, nos quais a equipa do NESDE tem vindo a estar envolvida nos anos mais recentes.

De uma forma geral os resultados obtidos [Coelho et. al., 2000] [Bairrão et. al, 2000] [Falcão Silva et. al, 2005] [Macdonald et. al, 2005] [Falcão Silva et. al, 2007] [Chalmers e Bayley, 2007] [Netley e Barnard, 2008] [Bairrão et. al, 2009] permitiram obter informação muito significativa e resultados muito importantes para a melhoria do conhecimento ao nível da resposta sísmica e desempenho de vários tipos de sistemas passivos para a protecção sísmica de estruturas.

A descrição dos trabalhos apresentados permite concluir que se torna necessário aprofundar ainda mais o estudo e investigação em alguns dos dispositivos apresentados, nomeadamente ao nível dos amortecedores de líquido sintonizado, para melhor compreensão das suas características e das melhorias introduzidas ao nível de eventuais implementações no património edificado português.

Os resultados do referido estudo foram objecto de uma tese de doutoramento submetida ao IST [Falcão Silva, 2010] e serão objecto de futuras publicações técnicas.

#### **4. 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).

Os autores agradecem reconhecidamente o apoio da Universidade de Bristol na pessoa do Prof. Dr. John Macdonald. Para além disso a contribuição, partilha de experiências e resultados por parte do Dr. Joe Symes e da Eng<sup>a</sup> Tarryn Chalmers é também francamente reconhecida.

## BIBLIOGRAFIA

BAIRRAO, R., BURSI, O., CARYDIS, P., MAGONETTE, G., MOUZAKIS, H., TIRELLI, D., WILLIAMS, M., (2004), Benchmark Testing and Performance Comparison of Shaking Tables and Reaction Walls, 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper N<sup>o</sup>. 441, Vancouver, Canada.

BAIRRÃO, R., DUQUE, J., FOTI, D., (2000), Shaking table tests on shear panels for the seismic protection of buildings, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Report 304/00, 321pp.

BAIRRÃO, R., FALCÃO SILVA, M.J., CAMPOS COSTA, A., (2009), Complementary nature of shaking tables and reaction walls: LNEC experimental program over Dorka and Jarrett dissipation devices, Relatório 27/2009 – NESDE/DE, LNEC, Fevereiro

BRAGA et. al., (1999), Comportamento sperimentale di strutture in calcestruzzo armato rafforzate con controventi dissipativi", Convegno Nazionale L'ingegneria sismica in Italia, Turim.

CHALMERS, T., BAYLEY, B., (2007), Performance of Tuned Liquid Dampers for reducing building vibrations, 3<sup>rd</sup> year Research Project, Department of Civil Engineering, University of Bristol, April, 44p.

COELHO, E., CAMPOS-COSTA, A., CARVALHO, E.C., PONZO, F.C., DOLCE, M., (2000), Comportamento sísmico experimental de estruturas de betão armado reforçadas com dispositivos dissipadores de energia, REPAR 2000, LNEC, Lisboa.

FALCÃO SILVA, M.J., COSTA, A.C., SYMES, J., MACDONALD, J., (2007), Tuned Liquid Dampers para redução de vibrações em edifícios", 7<sup>o</sup> Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica - SISMICA 2007, Porto, Portugal, Full paper in CD-ROM, book of abstracts pp. 331/332;

FALCÃO SILVA, M.J., COELHO, E., CAMPOS COSTA, A., (2005), "Overall assessment of reinforced concrete structures with energy dissipation devices", EURO DYN 2005, Paris, França;

MACDONALD, J., SYMES, J., CAMPOS COSTA, A., FALCÃO SILVA, M. J., GUERREIRO, L., (2005), Effect of a Tuned Liquid Damper on Structural Dynamic response to random loading, ECOLEADER-BRIS Report.

MENDES, L., CAMPOS COSTA, A., (2007), LNEC-SPA, Signal Processing and Analysis Tools for Civil Engineers – Version 1.0 - Build 12". Relatório 29/2007–NESDE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

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, 1<sup>st</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Paper 303, Geneva, Switzerland.

NETLEY, J., BARNARD, E., (2008), Analysis of Tuned Liquid Damper for reducing building vibrations, Department of Civil Engineering, University of Bristol, May, 39pp.

prEN 1998-1, (2002), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

SAP2000NL, (2003), SAP2000NL Release 8.3.3., Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.

SCHMIDT, K., DORKA, U., (2004), Experimental Verification of Hyde-System, 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper 3163, Vancouver, Canada.

SYMES J., 2005, Performance of Tuned Liquid Dampers for Reducing Building Vibrations MEng Project Report, University of Bristol, April.

TAIT M.J., EL DAMATTY A.A., ISYUMOV N, (2004), Testing of tuned liquid damper with screens and development of equivalent TMD model – Wind and Structures Vol. 7, January.

TAIT M.J., EL DAMATTY A.A., ISYUMOV N., (2005), Numerical Flow Models to Simulate Tuned Liquid Dampers (TLD) with slat screens – Wind and Structures Vol. 7, July.

TAIT, M.J., EL DAMATTY, A.A., ISYUMOV, N, SIDDIQUE, M.R.: (2005), Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens, Journal of fluids and structures, Vol 20 pp 1007-1023.



VISTOS


AUTORIA


1/0 Chefe do Núcleo de Engenharia Sísmica e  
Dinâmica de Estruturas

  
Ema Coelho  
**A. Campos Costa**  
Investigador Principal  
O Director

do Departamento de Estruturas

  
João Almeida Fernandes

  
Maria João Falcão Silva  
Bolseiro de Pós-Doutoramento

  
Alfredo Campos Costa  
Investigador Principal

