

Avaliação do desempenho de amortecedores de líquido sintonizado na mitigação de vibrações sísmicas em estruturas

Assessment of the performance of tuned liquid dampers for vibration mitigation in structures

Maria João Falcão Silva

Resumo

A utilização de dispositivos de dissipação de energia é vista como forma eficiente para proteger estruturas contra ações sísmicas. Recentemente, dispositivos do tipo amortecedores de líquido sintonizado (ALS) têm despertado a atenção da comunidade científica como forma simples mas eficaz para melhorar a resposta de estruturas face a ações dinâmicas.

Este artigo descreve um programa de ensaios experimentais desenvolvido no LNEC no âmbito de uma tese de doutoramento na área dos sistemas passivos para proteção sísmica de estruturas.

São incluídos os resultados de ensaios com dispositivos isolados e com dispositivos acoplados num sistema estrutural de frequência variável entre 0,6 e 1,4 Hz.

Os principais resultados obtidos do programa experimental desenvolvido sobre ALS de geometria variável (retangular e circular) bem como dos testes efetuados ao sistema estrutural + ALS são discutidos e as principais conclusões apresentadas.

Abstract

The inclusion of passive energy dissipation devices is seen as a cost effective way to improve protection against seismic loads. A considerable number of these devices have already been installed in structures throughout the world. In the recent years devices such as Tuned Liquid Dampers (TLD) have been receiving increasing attention as a simple but effective way of reducing building response to dynamic loads.

The paper describes an experimental study performed over TLDs and developed in LNEC in the scope of a PhD thesis. In the paper are included the results obtained from tests performed over TLDs included in a SDF structural system with varying frequencies. The SDF system was designed and constructed in LNEC to work in a range of frequencies between 0,6 and 1,4 Hz achieved by means of a set of air-cushions with different stiffness depending on the initial pressure and on the deformation during the tests. The main results and conclusions obtained from the tests performed over different TLDs geometries (rectangular and circular) as well as the tests performed over SDF system + TLD are presented.

Palavras-chave: Amortecedores de líquido sintonizado / Sistemas passivos / Dissipação de energia / Mitigação de vibrações / Ensaios em mesa sísmica

Keywords: Tuned liquid dampers / Passive devices / Energy dissipation / Vibration mitigation / Shaking table tests

Maria João Falcão Silva

Bolseira de Pós-Doutoramento
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

FALCÃO SILVA, M. J. – Avaliação do desempenho de amortecedores de líquido sintonizado na mitigação de vibrações sísmicas em estruturas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 1. ISSN 2183-8488 (julho 2016) 31-42.

1 Introdução

Amortecedores de líquido sintonizado (ALS) são uma forma simples e eficaz de reduzir a resposta das estruturas (edifícios e pontes) para ações dinâmicas (vento e sismos) [1]. Os ALS são simplesmente constituídos por tanques com um líquido no seu interior (geralmente água), em que sua geometria e altura da água definem a frequência natural de *sloshing*. Introduzindo numa estrutura dispositivos com frequências de *sloshing* próxima da frequência natural da estrutura, sob ações sísmicas, a resposta dessa estrutura para essa frequência é reduzida devido ao efeito dissipativo do *sloshing* do líquido.

Para além disso apresentam uma óptima relação custo-eficácia, são fáceis de instalar e sua frequência de *sloshing* pode ser facilmente alterada através da variação da altura da água. Outras propriedades podem ser também alteradas a fim de melhorar o seu desempenho, tais como: i) utilizando um outro líquido (com diferente densidade e viscosidade), ii) com redes/grelhas verticais; iii) variando a rugosidade das paredes do dispositivo, etc.[2][3][4].

Quando em serviço, os ALS apresentam um bom desempenho em edifícios altos e em estruturas flexíveis de baixa frequência, como pontes e torres [1].

Em Portugal e, principalmente, devido à reduzida altura das construções existentes este tipo de dispositivos não é muito conhecido, nem tão-pouco utilizado. Dado as construções modernas (habitação, escritórios e comércio) estarem a aumentar em altura, o uso de ALS surge como uma boa opção, considerando a redução dos custos associados à construção, colocação e manutenção dos referidos dispositivos.

O dimensionamento e implementação de ALS, bem como de outros dispositivos de dissipação de energia passiva exigem ensaios experimentais (em escala real ou em escala reduzida) para validação das suas principais características.

Assim foi realizado e desenvolvido um conjunto de ensaios tendo como principal objetivo:

- i. Compreender mais detalhadamente o funcionamento dos ALS, para permitir a utilização de modelos matemáticos e mecânicos na simulação dos fenómenos lineares e não-lineares que ocorrem no seu interior. O desempenho dos dispositivos na presença de excitações de grande amplitude é um ponto importante deste trabalho;
- ii. Definir de que forma a alteração de alguns parâmetros associados com cada um dos ALS ensaiados (altura de fluido em repouso, geometria do dispositivo, presença de partículas em suspensão, nível de amortecimento) ou com a própria solicitação (tipo de ação, intensidade, frequência e duração) podem influenciar o seu desempenho;
- iii. Determinar a eficácia associada à introdução de ALS em sistemas estruturais de frequência bem definida.

2 Ensaios experimentais sobre uma estrutura de transmissão

2.1 Dispositivo de ensaio

O dispositivo de ensaio usado para avaliar a interação ALS + estrutura de transmissão compreendeu a utilização da plataforma sísmica uniaxial do LNEC, à qual foram impostas diferentes solicitações horizontais geradas artificialmente [5] [6].

Na Figura 1 apresenta-se uma representação esquemática do dispositivo de ensaio.

Para além de um sensor de deslocamentos e um acelerómetro colocados na plataforma sísmica uniaxial, a estrutura de transmissão foi instrumentada com dois transdutores de pressão, três transdutores de deslocamentos (LVDT) e dois acelerómetros (PCB). O sensor de deslocamentos e o acelerómetro foram colocados na plataforma sísmica com o objetivo de registar os seus movimentos. Os transdutores de pressão permitiram a monitorização contínua da pressão interna nos dois conjuntos de molas. Os LVDT e os PCB permitiram o registo do movimento relativo da estrutura de transmissão e medir a sua aceleração, respetivamente. Na Figura 2 apresenta-se o plano de instrumentação usado nos ensaios de caracterização dinâmica da estrutura de transmissão.

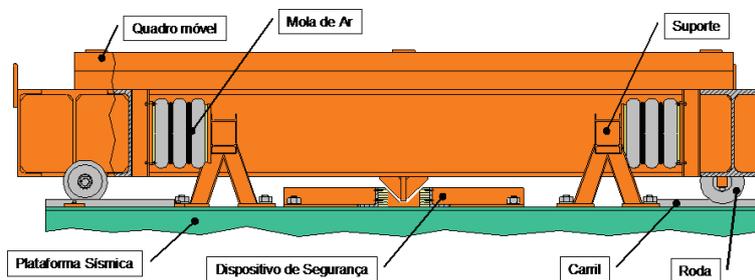


Figura 1 Dispositivo de ensaio para a interação ALS + estrutura, adaptado de [5]

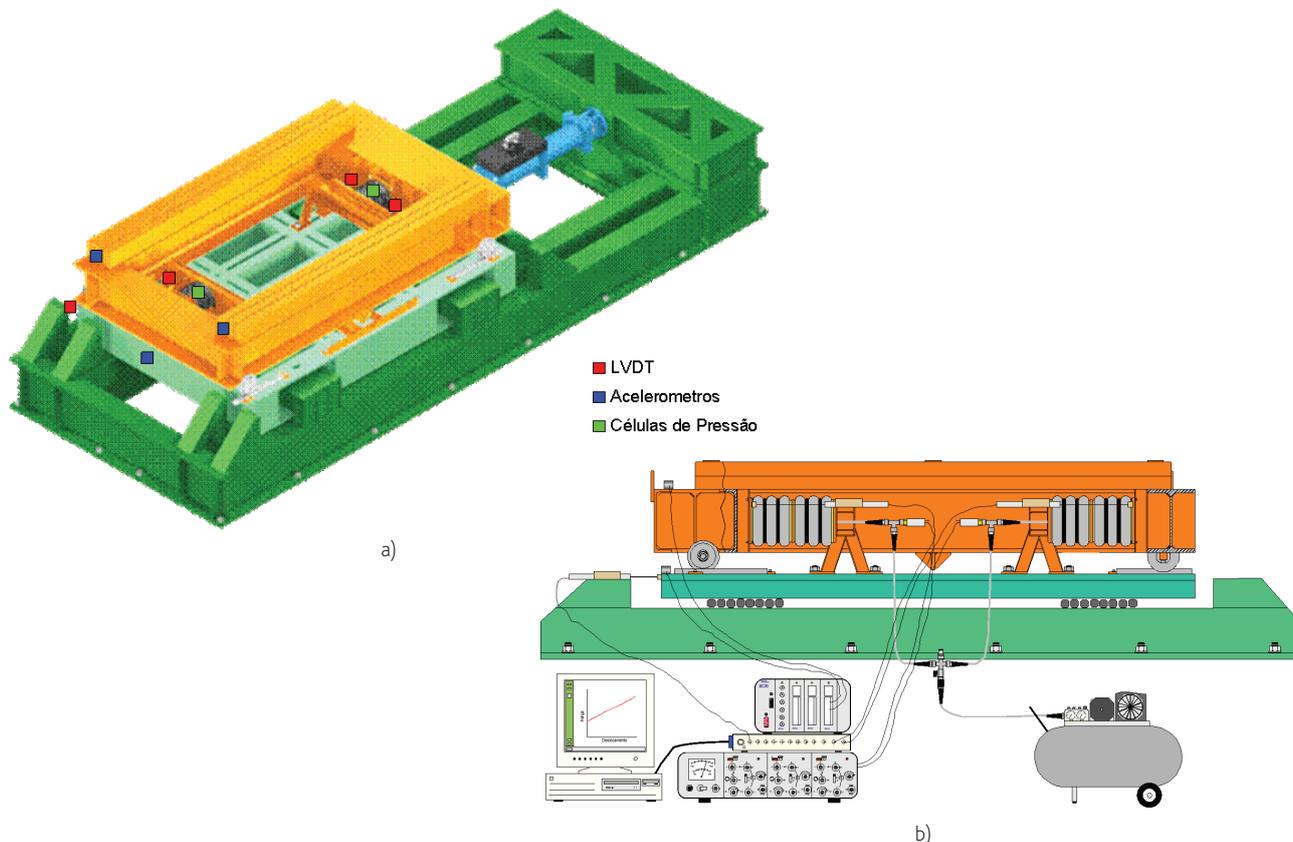


Figura 2 Instrumentação colocada na estrutura de transmissão: a) perspetiva do dispositivo de ensaio e b) detalhe com ligação a sistema de aquisição e circuito pneumático, adaptado de [6]

2.2 Ensaios preliminares

Cada uma das molas de ar utilizadas como elemento elástico na estrutura de transmissão foi sujeita a ensaios quase-estáticos, a fim de validar os modelos teóricos propostos pelo fabricante e de definir modelos matemáticos que permitissem relacionar a força em função da pressão nas molas e da deformação.

Tendo por base os resultados obtidos foi ajustado um modelo matemático para o funcionamento das molas de ar, com base em pressões iniciais bem definidas e impostas às molas, e foram obtidas relações empíricas entre a força na mola (F) e a deformação na mola (d).

A obtenção da rigidez, k , associada a cada mola, e, conseqüentemente, à estrutura de transmissão, é efetuada por derivação da expressão definida para o modelo empírico da força, sendo possível obter o valor esperado da frequência da estrutura de transmissão a partir da rigidez do conjunto de molas para a massa em causa, tendo em conta a configuração das molas adotada.

Considerou-se que a pressão inicial nas molas podia variar entre 1,5 e 7 bar e que, no sistema de transmissão testado sem e com ALS, podiam ser consideradas três configurações, que se apresentam nas Figura 3 a Figura 5:

- i. Dois conjuntos paralelos de duas molas em série (CASO 1);
- ii. Duas molas em paralelo (CASO 2);
- iii. Dois conjuntos em paralelo de duas molas em paralelo (CASO 3).

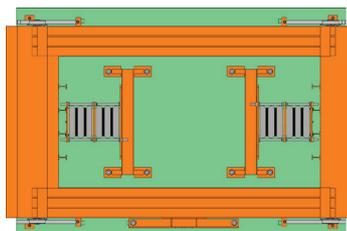


Figura 3 CASO 1

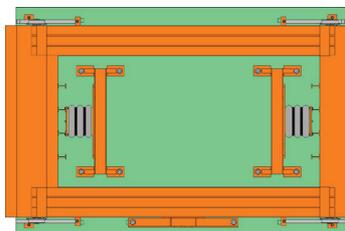


Figura 4 CASO 2

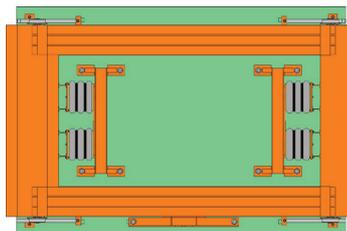


Figura 5 CASO 3

O CASO 1 surgiu como a forma mais simples e económica de atingir os requisitos em rigidez e frequência. As configurações apresentadas nos CASOS 2 e 3 resultaram na obtenção de valores de rigidez e, conseqüentemente, frequências superiores aos pretendidos para o programa experimental, como representativos de sistemas estruturais existentes no parque habitacional português (Figura 3).

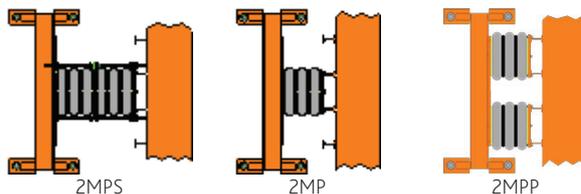
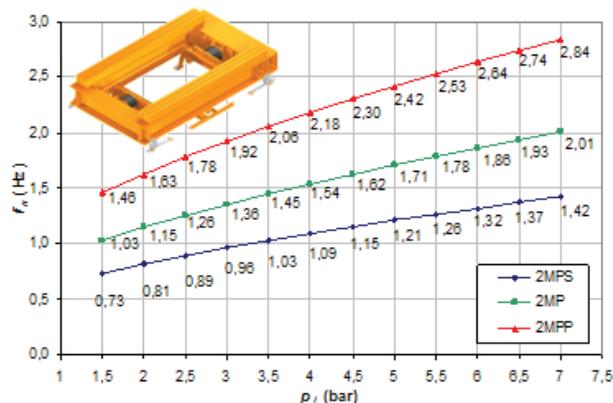


Figura 6 Frequências para diferentes configurações das molas de ar, adaptado de [7]

Tendo em conta os valores estimados, delineou-se um programa extenso de ensaios experimentais, com o objetivo de identificar realmente as características dinâmicas da estrutura de transmissão considerada, para posterior utilização em ensaios com ALS incluídos.

2.3 Análise de resultados experimentais obtidos

A estrutura de transmissão, ainda sem ALS, foi montada com as molas colocadas de acordo com o disposto no CASO 1 (Figura 3), com pressões variáveis entre 1,5 bar e 4,5 bar, e sujeita a ensaios aleatórios correspondentes a 20 séries de ruído branco, geradas com recurso a um *software* específico [8], para identificação das suas características dinâmicas.

Foram obtidos registos de deslocamentos, de acelerações e de pressão nas molas para cada tipo de ensaio efetuado. Os resultados obtidos foram analisados e ajustados com base em conceitos de análise sinal. A partir dessa informação obtiveram-se as funções de resposta em frequência (FRF), o amortecimento na estrutura e a coerência entre sinais de entrada e sinais de saída, para todas as pressões iniciais nas molas ensaiadas [7]. Refira-se que os resultados

obtidos correspondem a uma média das 20 séries ensaiadas e que as FRF se referem a relações entre sinais de entrada em acelerações (aceleração da mesa) e sinais de saída também em acelerações (aceleração na estrutura de transmissão).

As representações esquemáticas das tendências de variação da frequência e do amortecimento com a pressão inicial nas molas de ar para os ensaios de ruído branco são apresentadas na Figura 7 e na Figura 8, respetivamente.

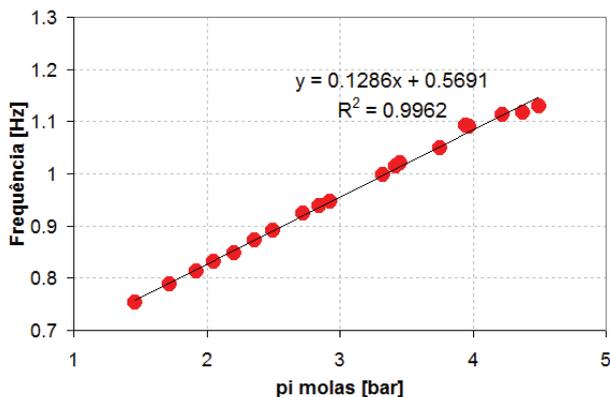


Figura 7 Variação da frequência

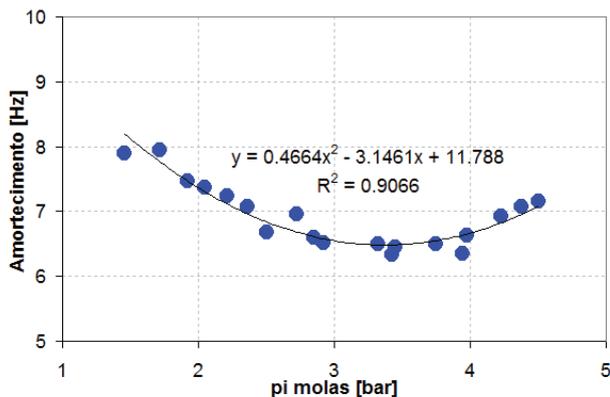


Figura 8 Variação do amortecimento

A estrutura de transmissão ensaiada apresenta uma evolução da frequência claramente linear e uma evolução do amortecimento claramente não linear (2º grau) com a variação da pressão inicial. A não-linearidade do amortecimento pode ser justificada por eventuais fenómenos que ocorram nas molas e que não estejam adequadamente identificados nas especificações dos elementos. A evolução da frequência, em termos de FRF, para as diferentes pressões iniciais nas molas ensaiadas e amplitudes de excitação, é apresentada na Figura 9.

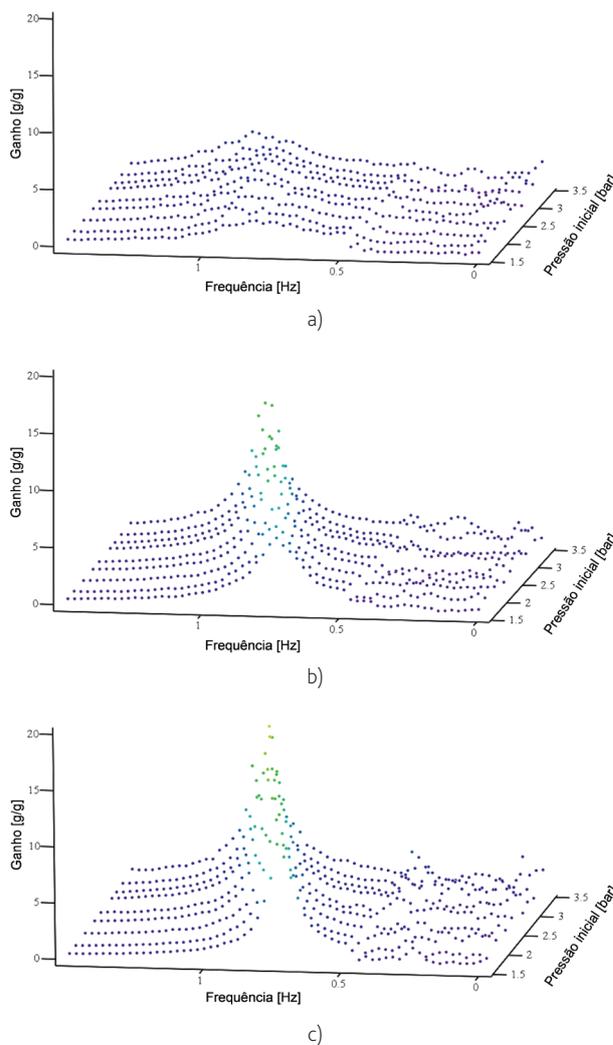


Figura 9 Variação das FRF para estrutura de transmissão, função da pressão interna nas molas de ar e da amplitude de pico da solicitação: a) baixa, b) moderada e c) elevada

3 Ensaios experimentais sobre amortecedores de líquido sintonizado

Para caracterização do comportamento dinâmico de reservatórios de água com características específicas de ALS foi realizado um programa experimental [7]. Esses ALS individuais, com geometria idêntica à dos que compõem os conjuntos de ALS que seriam posteriormente ensaiados acoplados a estruturas de transmissão de um grau de liberdade, foram dimensionados tendo por base os seguintes requisitos:

- i. Ajuste com a frequência fundamental de vibração e com a massa da estrutura de transmissão, dado que os ALS são tanto mais eficazes quanto mais a sua frequência de vibração se aproxima da frequência fundamental da estrutura em que se encontram

- incluídos, e quando a relação entre a massa de água existente no interior do conjunto de dispositivos ALS e a massa da estrutura de transmissão se situe entre 1 e 5 % [9] [10];
- ii. Limitações geométricas do sistema estrutural construído para instalação do conjunto de vários ALS;
 - iii. Facilidade de realização do ensaio dos ALS em ambas as direções principais de funcionamento, permitindo, pois, abranger uma gama de frequências mais alargada;
 - iv. Escolha de um material não opaco, para permitir a visualização da(s) onda(s) formada(s) no interior do dispositivo durante programa de ensaios experimentais.

3.1 Dispositivo de ensaio

Para a realização dos ensaios de caracterização do comportamento dinâmico de ALS retangulares, foi utilizada a plataforma sísmica uniaxial.

Para melhor compreender o comportamento e características dinâmicas dos ALS quando isolados, isto é quando não incluídos em estruturas, foram efetuados ensaios com os referidos dispositivos a funcionarem *per se*, pelo que a montagem dos dispositivos e acessórios foi efetuada de acordo com o que se mostra de uma forma simplificada nas Figura 10 e Figura 11.

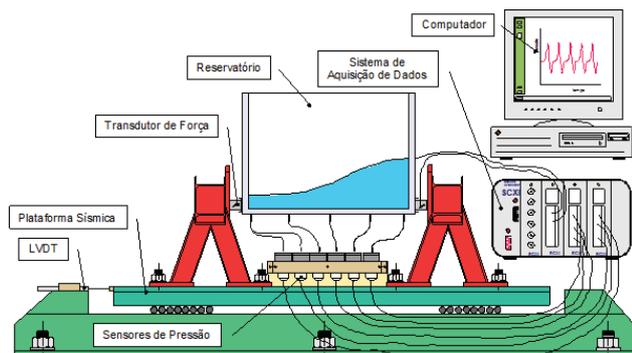


Figura 10 Dispositivo de ensaio

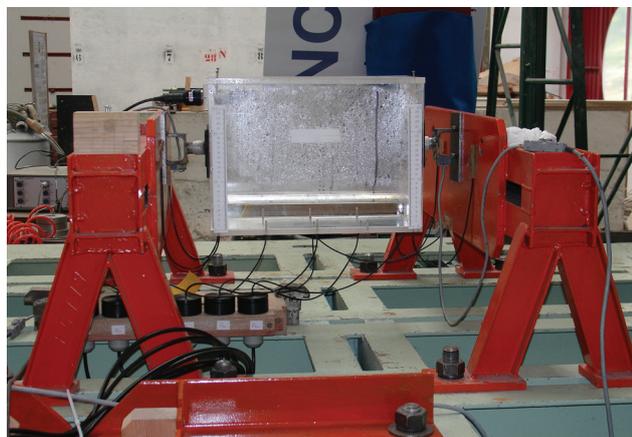


Figura 11 Montagem *in situ* de dispositivo de ensaio

A este dispositivo de ensaio foram impostas solicitações sísmicas, tendo sido registados os movimentos transmitidos aos dispositivos e as forças associadas aos fenómenos lineares e não-lineares que surgem devido ao movimento do fluido e a elevação da superfície do fluido observadas.

Assim, para medir o deslocamento relativo na plataforma sísmica, a altura de coluna de água em diferentes pontos e a força transmitida às paredes laterais do reservatório, foram utilizados os seguintes equipamentos [7]:

- i. 1 sensor de deslocamento LVDT (Linear Variable Differential Transformer);
- ii. 6 sensores de pressão Keller 46R
- iii. 2 transdutores de força, com tecnologia desenvolvida no CIC-NSM.

3.2 Ensaio realizados

No sentido de colmatar as lacunas observadas na totalidade dos trabalhos previamente desenvolvidos optou-se por ensaiar os ALS, quando isolados, sujeitos a excitações de carácter aleatório do tipo ruído branco. Como tal, para o efeito, foram usadas as 20 séries de ruído branco com conteúdo em frequência entre 0,5 Hz e 1,5 Hz geradas artificialmente, com recurso ao software LNEC-SPA e previamente utilizadas na caracterização dinâmica da estrutura de transmissão de um grau de liberdade. A razão da escolha da gama de frequências indicada prende-se com o facto de serem as frequências indicadas muito representativas e compatíveis com as estruturas reais existentes, por exemplo, no parque habitacional português cujas vibrações se pretende poder mitigar. Assim, as referidas séries foram impostas aos ALS como excitação horizontal de translação com diferentes valores de amplitude de pico, variando de valores baixos a elevados.

Estes ensaios permitiram, entre outras coisas, a obtenção das frequências experimentais de vibração, bem como dos valores de amortecimento para cada uma das situações ensaiadas para comparação tanto com os correspondentes valores teóricos [10][11] como com os valores obtidos das simulações numéricas desenvolvidas e propostas no âmbito de uma tese de doutoramento [7].

3.3 Análise de resultados experimentais obtidos

O programa experimental desenvolvido incidiu sobre ALS retangulares com uma determinada altura de água em repouso bem definida e compatível com as frequências a ajustar. A obtenção das FRF para cada uma das situações ensaiadas durante o programa experimental permitiu a identificação objetiva das frequências modais correspondentes a cada um dos ensaios efetuados; isto é, para diferentes alturas de água em repouso, bem como para amplitudes de excitação crescentes.

Apresentam-se em seguida, a título de exemplo, as tendências de variação médias da frequência experimental com a amplitude de excitação para ALS *shallow* e *deep* (Figura 12). Os pontos a azul traduzem os resultados obtidos para todas as séries ensaiadas e permitem ter uma perceção mais clara da variabilidade da resposta para as diferentes séries ensaiadas. A vermelho surgem os valores médios.

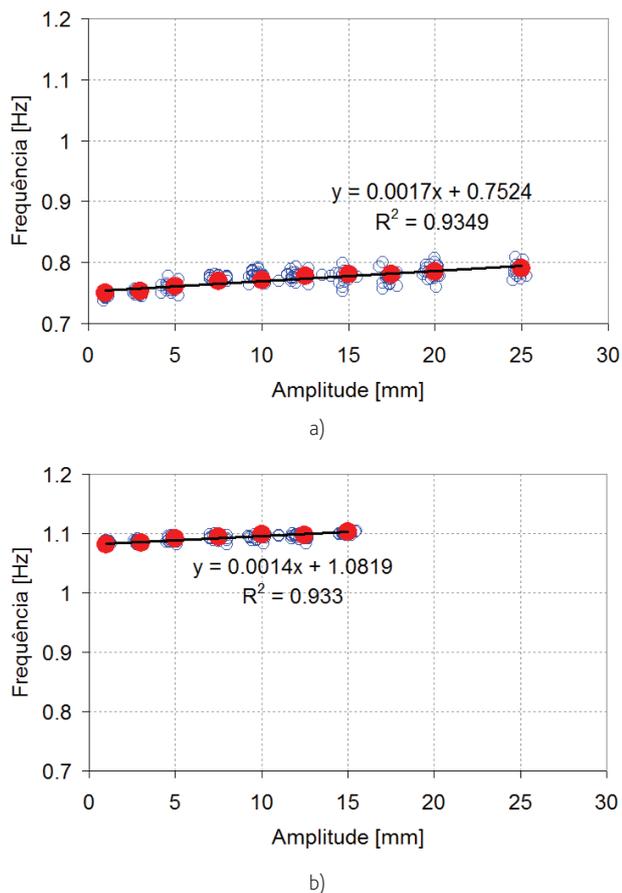


Figura 12 Variação da frequência com a amplitude de excitação: a) *shallow* e b) *deep*

A tendência de variação da frequência fundamental de vibração dos ALS é claramente linear com o valor de pico da amplitude excitação. O comportamento identificado por meio de observação visual das ondas formadas no interior do dispositivo também evidencia o aparecimento de outros fenómenos, denominados fenómenos não-lineares, responsáveis pelo afastamento entre os valores de frequências teóricas e experimentais.

Tendo por base os resultados obtidos foi possível estabelecer relações empíricas entre a frequência fundamental de vibração do ALS e a amplitude de pico da solicitação imposta. Constatou-se que a frequência fundamental do fluido no interior dos ALS depende da altura de água em repouso, h , e do comprimento do próprio dispositivo, L , bem como da amplitude de solicitação imposta, A . Assim, quando surgem solicitações mais elevadas, por exemplo, na ocorrência de uma determinada ação sísmica, os fenómenos que ocorrem no interior dos ALS deixam de ser fundamentalmente lineares, pelo que a formulação existente passa a ter um campo de aplicação mais restrito. No entanto, em posse de resultados experimentais, como os que têm vindo a ser apresentados no presente estudo, é possível propor alguns ajustes, pelo que se torna indispensável propor modelos mais atuais com base nos modelos existentes, mas com um cunho fortemente experimental [7].

Outro parâmetro, que apresentou uma clara variação ao longo dos ensaios, foi o amortecimento. O efeito do amortecimento do fluido é significativo junto da frequência de ressonância e deve ser considerado com cuidado na modelação do comportamento de ALS de qualquer geometria.

O amortecimento modal associado ao movimento de *slushing* para ondas de pequena profundidade, também denominadas de ondas de águas rasas (*shallow water waves*), é de difícil determinação por via teórica, especialmente no caso da ocorrência de fenómenos não-lineares de quebra de onda (*breaking waves*).

Apresentam-se em seguida, em jeito de resumo dos resultados obtidos, as representações gráficas das tendências de variação médias do amortecimento modal com a amplitude de solicitação. Os pontos, a azul, traduzem os resultados obtidos para as diferentes séries ensaiadas e permitem ter uma perceção clara e objetiva da variância, ao nível da resposta, para os diferentes ensaios incluídos no programa experimental. A vermelho, apresentam-se, à semelhança do efectuado para a frequência fundamental de vibração, os valores médios obtidos.

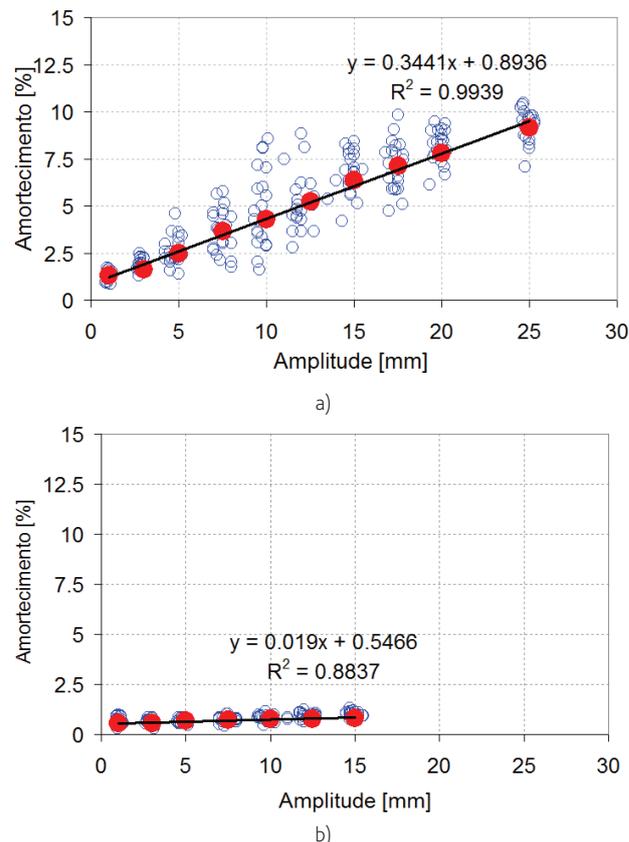


Figura 13 Variação do amortecimento com a amplitude de excitação: a) *shallow* e b) *deep*

Como se pode observar, os valores dos coeficientes de amortecimento estimados com base nos resultados experimentais obtidos para as diferentes alturas de água em repouso apresentam uma grande variabilidade.

Os resultados experimentais obtidos permitem também concluir que a tendência de variação do amortecimento é claramente linear, crescente com o valor de pico da amplitude excitação.

O comportamento identificado por meio de observação visual da onda formada no interior do ALS, durante os ensaios, também evidenciou o aparecimento de outros fenómenos, principalmente não-lineares.

Para além do apresentado para frequência e amortecimento foi desenvolvida uma análise exaustiva sobre os ALS quando isolados [7], que contemplou:

- i. Os fenómenos lineares e não-lineares que decorrem no interior de ALS quando sujeitos a excitações sinusoidais de amplitude crescente;
- ii. Determinação da massa dinâmica de água mobilizada;
- iii. Determinação da rigidez equivalente da massa dinâmica de água mobilizada;
- iv. Determinação do ângulo de fase;
- v. Determinação da altura de onda e altura de onda normalizada;
- vi. Determinação de forças de corte e de forças de corte normalizadas;
- vii. Determinação do balanço energético;
- viii. Identificação de fenómenos não-lineares de quebra de onda;
- ix. Identificação de ondas transversais e ondas estacionárias.

4 Ensaios experimentais sobre estrutura de transmissão com amortecedores de líquido sintonizado incluídos

Após conclusão da primeira fase do programa de ensaios experimentais, que incidiu sobre os dispositivos ALS retangulares isolados, isto é, diretamente montados sobre a plataforma sísmica, passou-se à segunda fase, em que um conjunto dos mesmos dispositivos foi ensaiado, quando incluído nas estruturas de transmissão apresentadas na secção 2.

A razão de ensaiar um conjunto de ALS e não apenas de uma unidade de ALS prendeu-se com o facto de, para além da verificação da relação entre frequências, ser necessária a verificação de uma relação de massas para que a mitigação de vibrações numa dada estrutura seja otimizada, sem que surjam efeitos adversos para os quais a estrutura em causa possa não estar dimensionada.

No entanto, pelas suas características físicas, a estrutura de transmissão ensaiada permitiu a inclusão de relações superiores de massa sem que ocorresse instabilidade.

Durante o estudo efetuado foram ensaiadas percentagens de massa variáveis entre 2% e 7%, valores ligeiramente superiores aos referidos anteriormente.

Os resultados dos ensaios descritos e apresentados na presente secção permitem a obtenção de conclusões muito valiosas acerca do desempenho deste tipo de dispositivos, em estruturas representativas de estruturas existentes, em termos de redução das ações dinâmicas impostas.

4.1 Dispositivo de ensaio

A estrutura de transmissão de frequência variável foi ensaiada sob a ação das 20 séries geradas, mas já com as estruturas de 33 ALS retangulares colocados (Figura 14).



a)



b)

Figura 14 ALS retangulares sobre estrutura de referência: a) perspectiva e b) vista de cima

Para facilitar a fixação dos conjuntos de ALS à estrutura de transmissão, foi dimensionada uma base em madeira, munida de quatro suportes de aço, um em cada canto, que permitiu a fixação do conjunto com duas orientações, isto é, com os dispositivos alinhados longitudinalmente ou transversalmente. A instrumentação utilizada nestes ensaios foi idêntica à dos ensaios da estrutura de transmissão (Figura 2). Adicionalmente um dos reservatórios foi instrumentado de acordo com o descrito na secção 3 para os ensaios experimentais dos ALS individuais (Figura 10).

4.2 Análise dos resultados experimentais obtidos

Em todos os casos ensaiados foram obtidos registos de:

- i. Deslocamentos e acelerações na plataforma sísmica;
- ii. Deslocamentos e acelerações na estrutura de transmissão;
- iii. Pressão nas duas molas de ar responsáveis pela rigidez do sistema estrutural, e consequentemente pela variação da frequência fundamental respetiva;

iv. Elevação da superfície da água no interior dos dispositivos.

A análise de resultados obtidos no programa de ensaios experimentais sobre as diferentes estruturas de transmissão (diferentes pressões internas nas molas) foi efetuada à semelhança das análises de resultados apresentadas em secções anteriores [8].

Nos ensaios efetuados, obtiveram-se novas funções de resposta em frequência para o conjunto estrutura de referência + ALS, considerando diferentes amplitudes de excitação e alturas de água em repouso no interior dos dispositivos. Para além disso, para cada estrutura de transmissão foram ensaiadas várias alturas de água em repouso, correspondentes a diferentes frequências em torno da frequência fundamental de vibração da estrutura cujos movimentos se pretende mitigar, para avaliar qual a melhor relação entre frequências da estrutura e do dispositivo e otimizar o seu desempenho. Na Figura 15 apresentam-se algumas das FRF obtidas durante os ensaios.

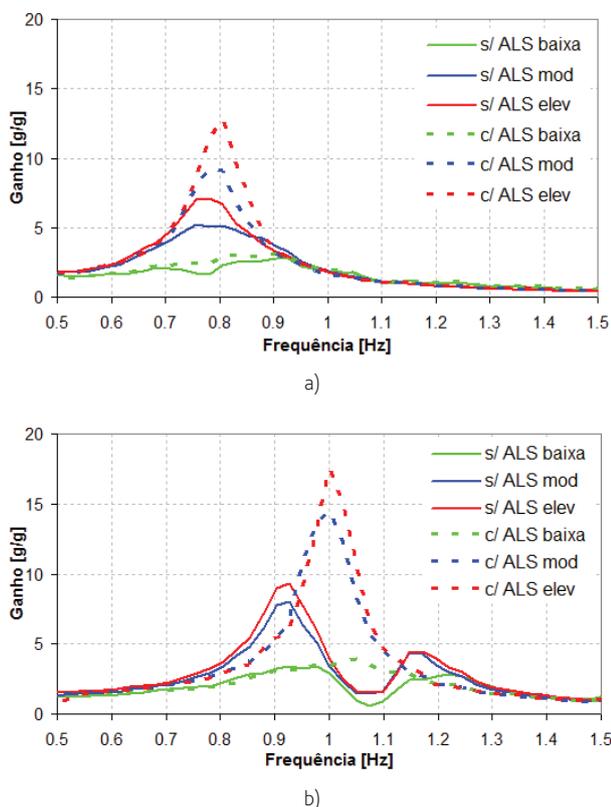


Figura 15 FRF para estruturas de transmissão com ALS retangulares: a) *shallow* e b) *deep*

Como é possível observar, com a introdução de ALS numa determinada estrutura e para qualquer das situações apresentadas, identificam-se dois modos fundamentais de vibração:

- i. Um associado à estrutura principal;
- ii. Outro correspondente aos dispositivos que nela foram incluídos com o objetivo de mitigar as vibrações resultantes das solicitações dinâmicas impostas.

A separação dos dois modos é tanto mais evidente quanto mais elevadas forem as amplitudes da solicitação dinâmica imposta. Observa-se uma redução ao nível da resposta do sistema na frequência fundamental e um afastamento dos picos da nova FRF deste valor.

É de referir, a título de exemplo, que as reduções observadas ao nível do valor de pico da FRF para sistemas principais com ALS retangulares variam entre 50% e 80%, para amplitudes de excitação dinâmica baixas a elevadas, o que corresponde a uma redução muito considerável.

Foram introduzidas também partículas de esfervite e de LECA em suspensão no fluido no interior de ALS com o objetivo de melhorar o seu desempenho, conforme proposto em trabalhos anteriores [3] [4]. Para as situações referidas foram obtidas novas séries de acelerações e deslocamentos na estrutura de referência assim como as correspondentes funções de resposta em frequência [7].

Na Figura 16 apresentam-se, apenas a título exemplificativo das melhorias observadas ao nível da resposta da estrutura de referência, algumas séries temporais de deslocamentos obtidas durante o programa de ensaios experimentais para amplitudes de excitação moderadas e para dispositivos ALS *shallow* a *deep*, com e sem introdução de partículas de esfervite e de LECA

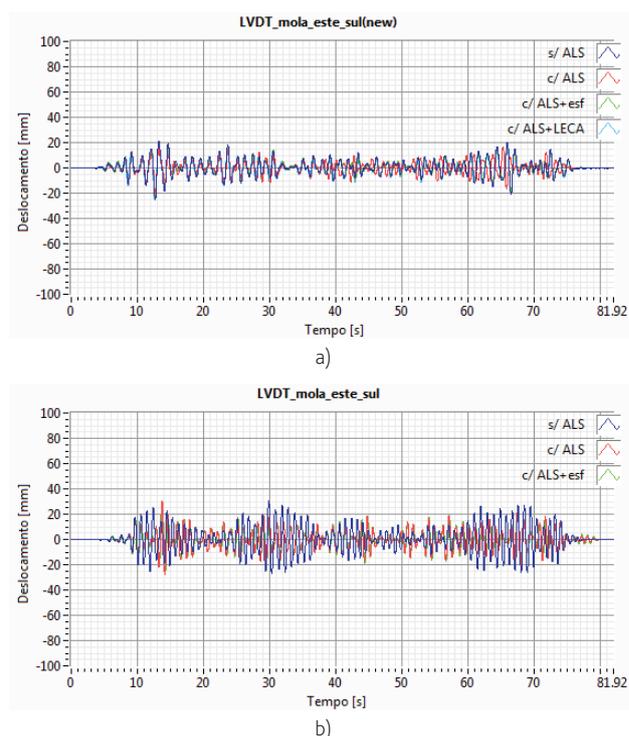


Figura 16 Variação de deslocamentos na estrutura de referência para amplitudes moderadas com a introdução de ALS retangulares: a) *shallow* e b) *deep*

As representações gráficas referidas evidenciam os benefícios expectáveis ao nível do comportamento da estrutura de referência, quando da inclusão de ALS com ou sem partículas em suspensão.

Os resultados foram analisados em termos de valores de pico observados ao nível da estrutura de referência para cada tipo de ALS e para cada classe de amplitude de solicitação dinâmica imposta. É importante referir que estes valores de pico correspondem precisamente à situação identificada como mais gravosa de entre todas as séries de ruído branco ensaiadas durante o programa experimental.

Foram também incluídos nas análises resultados em valores RMS de deslocamentos e acelerações que, em termos globais, parecem surgir com maior adequabilidade para comparação e até mesmo para determinação da eficiência dos dispositivos. Os valores RMS entram em linha de conta não só com os valores de pico atingidos pontualmente durante uma determinada ocorrência mas também com toda a história das séries registada no domínio do tempo.

Na Figura 17 apresentam-se de uma forma simplificada os resultados obtidos durante os ensaios experimentais em termos do valor RMS de deslocamento na estrutura de referência para amplitudes de solicitação moderadas.

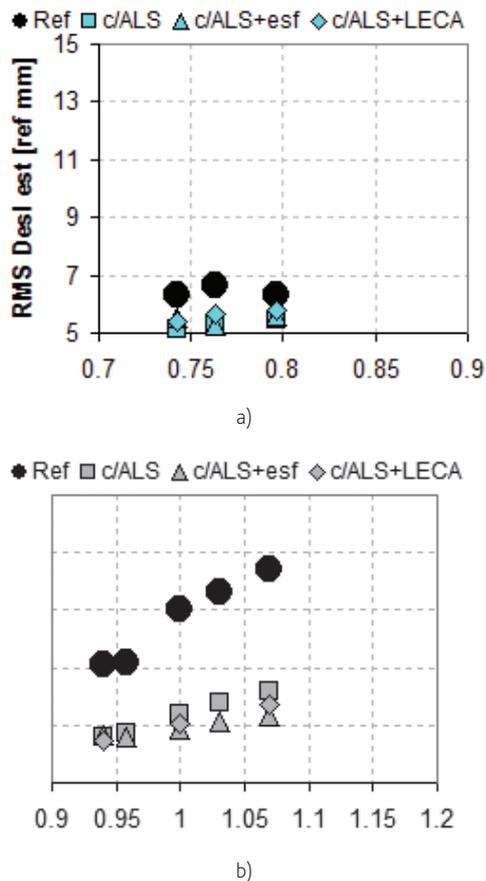


Figura 17 Valores RMS do deslocamento na estrutura considerando amplitudes de solicitação moderadas e implementação de ALS retangulares: a) *shallow* e b) *deep*

Os resultados patentes na Figura 17 são compatíveis com o apresentado nas Figuras 15 e 16.

Em presença de solicitações dinâmicas identificadas como apresentando amplitude moderada, observou-se uma resposta muito semelhante, tanto em presença de ALS *shallow* como em presença de ALS *deep*. Assim, os valores RMS dos deslocamentos são claramente reduzidos, sendo esta redução evidenciada com o aumento da altura de água em repouso.

É ainda possível concluir que, para estes níveis de amplitudes de solicitação dinâmicas, se verifica que a resposta não apresenta grandes diferenças se se considerar ALS simples ou com partículas em suspensão.

No entanto, verifica-se que com o aumento da altura de fluido em repouso, isto é, com a passagem de ALS *shallow* para *deep*, passam a evidenciar melhor comportamento as situações em que foram introduzidos dispositivos com partículas de esferovite em suspensão.

5 Desempenho de amortecedores de líquido sintonizado

Para finalizar torna-se possível definir critérios de eficiência e desempenho que podem ser aplicados e generalizados a este tipo de dispositivos.

Os critérios propostos permitem proceder à avaliação do desempenho de dispositivos ALS, quando incluídos em diferentes sistemas estruturais, para diferentes níveis de ajuste de frequências de funcionamento e relações de massa.

5.1 Critérios de eficiência experimental

Um ponto de extrema importância e a ter em conta para as análises de desempenho de ALS, de qualquer geometria, quando incluídos em sistemas estruturais, corresponde à relação entre frequências do dispositivo e da estrutura [9][10][12][13]. Desta forma, e de acordo com trabalhos anteriores, é possível definir um coeficiente γ correspondente ao denominado coeficiente de ajuste de frequências, dado pela expressão:

$$\gamma = \frac{f_{TLD}}{f_{est}} \quad (1)$$

As situações em que este coeficiente surge igual à unidade correspondem, em teoria, a situações idealmente sintonizadas. No entanto, com base em resultados experimentais anteriores [9][10][12][13], tem vindo a verificar-se que, de facto, a maior eficiência não corresponde exactamente ao valor 1 mas sim a um intervalo mais alargado entre 0,9 e 1,1 e claramente dependente da amplitude da solicitação.

Para além do referido, e para a análise de desempenho a seguir apresentada, deve ser considerado outro parâmetro de extrema importância que corresponde à relação entre massas de fluido no interior do dispositivo e da estrutura cujas vibrações se pretende mitigar.

$$\mu = \frac{m_{TLD}}{m_{est}} \quad (2)$$

Este coeficiente apresenta valores definidos como ótimos entre 1% e 5%. Podem, no entanto, ser usados dispositivos que traduzam

valores superiores deste coeficiente, desde que seja verificada a segurança estrutural da estrutura, uma vez que a massa adicional correspondente pode condicionar fortemente o equilíbrio da estrutura.

No entanto, e atendendo aos coeficientes de segurança utilizados no dimensionamento de estruturas, valores até cerca de 10% da massa da estrutura principal são passíveis de ser implementados, permitindo alcançar com sucesso valores consideráveis de mitigação de vibrações dinâmicas.

Com base nos ensaios experimentais efetuados, definiram-se critérios de eficiência, tendo em conta para cada caso os índices γ e μ previamente indicados:

$$Ef_{-X} = \frac{X_{est_ref} - X_{est_ref_TLD}}{X_{est_ref}} \quad (3)$$

em que a variável X pode ser assumida como valor de pico do deslocamento, como valor de pico da aceleração, como valor RMS do deslocamento e como valor RMS da aceleração.

Para além destes critérios obtidos diretamente por comparação dos registos obtidos da instrumentação utilizada pode-se ainda definir um critério de eficiência relacionado com a análise das funções de resposta em frequência obtidas.

Os índices obtidos por concretização da equação (3) para as variáveis consideradas são expressos em percentagem.

5.2 Análise de desempenho com base em critérios de eficiência experimental

Após concretização da equação (3) para cada uma das variáveis identificadas, obtiveram-se diversos índices de eficiência [7]. A título de exemplo apresentam-se na presente secção os índices RMS de deslocamento obtidos para ALS *shallow* e *deep*.

Para ALS do tipo *shallow* verifica-se que, de uma maneira geral, há um aumento de eficiência com o aumento da amplitude da solitação imposta. Identificaram-se ainda as relações entre frequências otimizadas para cada situação.

Assim, para amplitudes de solitação reduzidas, salvo raras exceções, a relação entre frequências ótima ronda 0,86-0,91, tendo-se obtido valores máximos para o índice RMS_desl de cerca de 14%.

Para amplitudes moderadas o índice de eficiência máximo atinge 20% para uma relação entre frequências de 1,01. Considerando amplitudes de solitação dinâmica elevadas atinge-se um índice de eficiência em RMS_desl de 35%.

Globalmente observa-se um aumento da eficiência com a amplitude de excitação para ALS *deep*. Para amplitudes baixas, chega-se a alcançar índices de eficiência de cerca de 25% para valores RMS de deslocamentos. Com o aumento da amplitude da solitação dinâmica imposta obtêm-se índices de eficácia variáveis entre 10% e 41%. No domínio das amplitudes de solitação mais elevadas o comportamento dos ALS *deep* é sem dúvida bastante bom com índices de eficiência variáveis que chegam a atingir 50%.

O desempenho das partículas em suspensão seja esfervite ou LECA, qualquer que seja o tipo de ALS (*shallow* ou *deep*), apresenta-

se como bastante variável e dependente de cada situação. Apesar de tudo, verifica-se que, em termos globais, as partículas de esfervite traduzem um efeito mais positivo que as correspondentes em LECA, conforme pode ser comprovado por consulta das representações gráficas apresentadas.

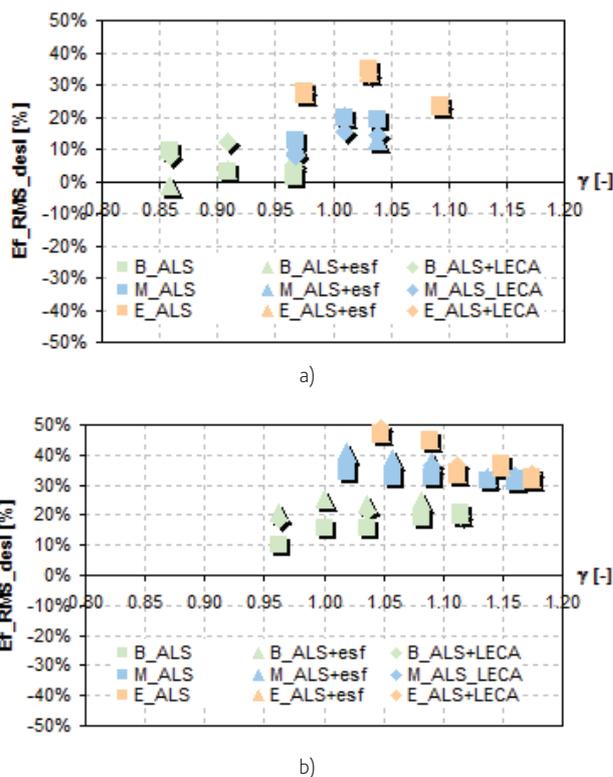


Figura 18 Índice de eficiência Ef_{RMS_desl} para ALS retangulares: a) *shallow* e b) *deep*

6 Conclusões

O extenso programa de ensaios experimentais desenvolvidos sobre uma estrutura de transmissão de frequência variável, sobre dispositivos ALS retangulares e, ainda, sobre estruturas de transmissão com os referidos dispositivos acoplados permitiu que se obtivessem diversas conclusões que se passam a enumerar:

- As frequências e amortecimentos experimentais foram aproximados com erros muito reduzidos pelas expressões teóricas, apenas para amplitudes de excitação baixas, e como tal quando estavam envolvidos somente fenómenos lineares (*sloshing* linear). A diferença observada para uma variação de amplitude baixa a elevada atinge quase 10%. A diferença observada corresponde ao aparecimento de fenómenos não-lineares (*breaking waves*), que com o aumento da amplitude de excitação começam a ser mais evidentes e frequentes;
- Foi possível definir-se, para implementação, modelos teórico-experimentais e modelos teóricos para aproximação da frequência e amortecimento [7];

- iii. Para as relações entre massas das estruturas de transmissão e dispositivos amortecedores de líquido sintonizado ensaiadas foram determinadas as relações entre frequências ótimas. Os valores obtidos permitiram confirmar o proposto por trabalhos anteriores apresentados na literatura [9][10][12][13];
- iv. Os ALS são dispositivos passivos bastante eficientes para a mitigação de ações dinâmicas (sísmicas). Em certos casos de amplitude de excitação e ajuste de frequências, chega-se a observar, na frequência de ressonância da estrutura cuja ação se pretende mitigar, reduções em valores de pico das funções de resposta em frequência, que atingem 80%;
- v. Obtiveram-se reduções muito significativas dos valores RMS de deslocamentos das diferentes estruturas de transmissão ensaiadas e que, em alguns casos, chegaram a atingir 50%. Este valor comprova que, de facto, com recurso apenas a água, uma substância barata e facilmente obtida, nos dias de hoje, é possível reduzir-se, significativamente, o efeito das ações sísmicas em estruturas. Uma análise de desempenho e eficiência dos dispositivos baseada em valores de pico surge como mais conservativa quando comparada com uma análise baseada em valores RMS;
- vi. A introdução de partículas em suspensão de densidade variável (esferovite e LECA) constitui uma melhoria significativa no desempenho dos dispositivos ALS estudados. De facto, conforme identificado em secções anteriores, para amplitudes baixas e elevadas, a introdução de partículas em suspensão, quaisquer que elas sejam, constitui reduções em termos dos vários índices de eficiência referidos que chega a atingir 40%, relativamente a dispositivos ALS simples com as mesmas características.

Os resultados obtidos permitiram ainda desenvolver e propor uma metodologia simplificada para a implementação de ALS em estruturas novas ou existentes, baseada em taxas de eficiência obtidas experimentalmente ou através de simulações numéricas em ferramentas desenvolvidas para o efeito [14].

Agradecimentos

O trabalho apresentado foi desenvolvido no âmbito de uma tese de doutoramento financiada pela FCT (SFRH/BD/14340/2003).

A autora agradece ainda a contribuição dos Eng.^{os} Paulo Morais e Fernando Oliveira do NSM/CIC/LNEC e do Técnico Superior Artur Santos e do Bolseiro de Experimentação Gonçalo Vítor do NESDE/DE/LNEC.

Referências

- [1] M. J. Falcão Silva; A. Campos Costa; L. Guerreiro – "Estado dos conhecimentos na área dos sistemas de protecção sísmica passiva. Amortecedores de líquido sintonizado (ALSs)", *Revista Portuguesa da Engenharia de Estruturas*, Série II, N.º 12, Edições LNEC, ISSN 0870-984X, dezembro 2012.
- [2] Warnitchai, P.; Pinkaew, T. (1998) – "Modeling of Liquid Sloshing in rectangular tanks with flow dampening devices", *Engineering Structures* Volume 20, No.7.

- [3] Tait, M. J.; El Damatty, A. A.; Isyumov, N. (2004a) – "The efficiency and robustness of a uni-directional tuned liquid damper and modelling with an equivalent TMD model", *Wind and Structures*, Volume 7, Janeiro.
- [4] Tait, M. J. El Damatty, A. A.; Isyumov, N. (2004b) – "Testing of tuned liquid damper with screens and development of equivalent TMD model", *Wind and Structures*, Volume 7, Janeiro.
- [5] Oliveira, F. V.; Morais, P. G. (2006) – "Oscilador com um grau de liberdade com características dinâmicas ajustáveis – Estudo e Projecto", Relatório 403/06 – CIC/NSM, LNEC, 26 pp.
- [6] Morais, P. G.; Oliveira, F. V.; Falcão Silva, M.J.; Campos Costa, A. (2010) – "Sistema mecânico para a simulação física do comportamento dinâmico de estruturas", 8.º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Guimarães, Portugal, Abril.
- [7] M. J. Falcão Silva – *Sistemas passivos para protecção sísmica de estruturas: Uma abordagem baseada no desempenho de amortecedores de líquido sintonizado*, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal
- [8] 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.
- [9] S. Gardarsson – *Shallow-water sloshing*, PhD Thesis. Universidade de Washington, Washington, USA.
- [10] J. K. Yu – *Non-linear characteristics of tuned liquid dampers*, PhD Thesis, Universidade de Washington, Washington, USA.
- [11] Lamb, H. (1932) – *Hydrodynamics*, Cambridge University Press, 6th Edition, 619-621.
- [12] L. M. Sun – *Semi-analytical modeling of tuned liquid damper with emphasis on damping of liquid sloshing*, PhD Thesis, Universidade de Tóquio, Tóquio, Japão.
- [13] S. K. Yalla – *Liquid dampers for mitigation of structural response: Theoretical development and experimental validation*, PhD Thesis, Universidade de Notre Dame, Notre Dame, Indiana.
- [14] M. J. Falcão Silva; A. Campos Costa; L. Guerreiro – "Simulações numéricas do comportamento de amortecedores de líquido sintonizado sujeitos a acções sísmicas", *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Série II, N.º 13, Edições LNEC, ISSN 0870-984X, maio 2013.