

# Implementação de amortecedores de líquido sintonizado na mitigação de vibrações em estruturas: Orientações práticas

Implementation of tuned liquid dampers for vibration mitigation in structures: Practical guidelines

Maria João Falcão Silva

## Resumo

Neste trabalho é proposta uma metodologia simplificada para o dimensionamento e implementação de ALS em estruturas novas ou existentes. Propõe-se que as diretrizes para o projeto desses dispositivos sejam baseadas em taxas de eficiência obtidas experimentalmente ou através de simulações numéricas em ferramentas desenvolvidas para o efeito [1]. Para finalizar são tecidas algumas considerações sobre as orientações propostas.

## Abstract

In this paper is defined a simplified methodology for the design and implementation of TLDs to new or existing structures. It is proposed that the design guidelines should be based on efficiency rates obtained experimentally or through numerical simulations. By the end of the paper are presented some final remarks about the proposed guidelines.

**Palavras-chave:** Amortecedores de líquido sintonizado / Sistemas Passivos /  
/ Dissipação de energia / Mitigação de vibrações /  
/ Dimensionamento e implementação

**Keywords:** Tuned liquid dampers / Passive devices / Energy dissipation /  
/ Vibration mitigation / Design and implementation guidelines

## 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.*

SILVA, M. J. F. [et al.] – Implementação de amortecedores de líquido sintonizado na mitigação de vibrações em estruturas: Orientações práticas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 3. ISSN 2183-8488. (março 2017) 127-134.

## 1 Introdução

Nos últimos anos, dispositivos passivos de proteção sísmica tais como amortecedores de líquido sintonizado (ALS) têm recebido atenção suplementar como sendo uma forma simples mas eficiente de reduzir a resposta de estruturas para cargas dinâmicas. No entanto, torna-se cada vez mais importante definir algumas regras para melhorar e agilizar o dimensionamento destes dispositivos para a aplicação em estruturas novas ou existentes.

A interação entre ALS e as estruturas em que se encontram incluídos deve ser avaliada para evitar que durante o seu funcionamento os referidos dispositivos potenciem a obtenção de configurações modais de frequências indesejáveis que podem restringir seriamente o desempenho e a eficácia dos dispositivos, bem como exacerbar determinado comportamento dinâmico no sistema primário cuja vibração dinâmica se pretende mitigar.

Na sequência de estudos anteriores [1], complementados com o trabalho desenvolvido no âmbito de uma tese de doutoramento [2], foi possível comprovar a eficiência de dispositivos do tipo ALS na mitigação de vibrações e propor algumas orientações para o seu projeto e implementação prática em estruturas.

As linhas orientadoras para o dimensionamento adequado de dispositivo ALS devem basear-se em medidas ou índices de eficiência obtidos experimentalmente ou por via de simulações numéricas. Podendo os referidos índices ser definidos baseados na redução de valores de pico, de deslocamento ( $Ef_{desl}$ ) ou aceleração ( $Ef_{acel}$ ), na redução de valores RMS, de deslocamento ( $Ef_{RMS_{desl}}$ ) ou aceleração ( $Ef_{RMS_{acel}}$ ) e, ainda, redução de valores de pico da função de resposta em frequência ( $Ef_{FRF}$ ). Muito embora em termos práticos a redução de um valor de pico seja um parâmetro mais fácil de concretizar, a redução dos valores RMS, seja de deslocamentos ou de acelerações, surge, para as ações sísmicas, como uma medida bastante adequada, uma vez que não dá ênfase a valores de pico isolados atingidos muito pontualmente ao longo da série temporal, mas ao conteúdo energético total da série.

Para além do referido, e uma vez que os ALS serão colocados em sistemas estruturais para mitigação de vibrações induzidas, a interação entre eles deve ser estudada preliminarmente para não se correr o risco de se obterem ajustes entre frequências indesejáveis que possam condicionar gravemente o desempenho e eficácia dos dispositivos, bem como agravar determinados comportamentos dinâmicos observados no sistema em que se encontram incluídos e cujas vibrações dinâmicas se pretende mitigar.

## 2 Implementação e manutenção de ALS em estruturas reais

A implementação de ALS na mitigação de ações dinâmicas em estruturas reais necessita de considerações cuidadas e de certas restrições de ordem prática ao nível do seu dimensionamento [2].

Mais se adianta que os vários intervenientes no processo (donos das estruturas, os projetistas, os arquitetos e os engenheiros de obra) necessitam de estar sensibilizados e conhecer os riscos

associados e os custos envolvidos no processo de escolha e decisão de determinada alternativa disponível para o efeito pretendido, seja ele a proteção contra ventos fortes ou qualquer outra solicitação dinâmica (por exemplo ações sísmicas).

Apesar da necessidade de um dimensionamento, análise, montagem e manutenção cuidados, qualquer que seja o dispositivo escolhido, as vantagens obtidas com a sua implementação são, na grande maioria das vezes, inegáveis, sendo, portanto, uma boa escolha para fazer face às solicitações dinâmicas impostas às estruturas.

Na realidade são vários os fatores que influenciam a seleção de dispositivos dissipadores de energia, e conseqüentemente ALS, para mitigação de vibrações dinâmicas em estruturas, nomeadamente:

- i. Eficiência dos dispositivos com o mesmo tipo de características ou conjuntos de dispositivos;
- ii. Tamanho dos dispositivos a nível e correspondente grau de compactação, isto é, o número de dispositivos e a sua colocação no local pretendido;
- iii. Capital envolvido, isto é, custo de dimensionamento, construção e montagem;
- iv. Custos operacionais ou de funcionamento, isto é, custos decorrentes da sua operacionalidade durante a vida útil da estrutura em que se encontram implementados;
- v. Custos de manutenção, que incluem inevitavelmente todo o trabalho relacionado com as reparações a efetuar ao longo dos anos sobre os dispositivos individuais ou sobre conjuntos de dispositivos;
- vi. Condições de segurança estrutural e não-estrutural;
- vii. Grau de fiabilidade do tipo de dispositivos implementados.

Na implementação e manutenção de ALS, deverão ser observados os aspetos que se passam a enumerar.

## 2.1 Localização

Os dispositivos de mitigação de vibrações do tipo ALS devem ser colocados em zonas de fácil acesso, devendo necessariamente ser deixados caminhos de circulação de dimensões razoáveis que permitam fácil acessibilidade em qualquer circunstância.

Independentemente de a localização definida pela análise de dimensionamento ser nos pisos inferiores, intermédios ou mais elevados da estrutura, os dispositivos devem ser colocados em compartimentos fechados e vedados de forma a garantir a sua estanquidade, manutenção do nível do fluido no interior do dispositivo ou evitar a infiltração de águas pluviais.

A fixação dos dispositivos poderá ser feita diretamente não só a lajes, e elementos horizontais, mas também, em determinadas situações particulares, a elementos verticais.

Na proximidade das zonas destinadas à colocação de dispositivos de mitigação de vibrações do tipo ALS, deverá ser garantida a existência de pontos de abastecimento de água e escoamento de esgoto, para permitir assegurar, em qualquer altura e com a rapidez necessária, o ajuste do nível do líquido de amortecimento.

## 2.2 Solução construtiva

Em termos de solução construtiva, deve ser adotada uma construção do tipo modular, isto é, pequenos elementos individuais de frequências de funcionamento facilmente ajustáveis à frequências dos sistemas estruturais cujas vibrações dinâmicas se pretende mitigar.

O agrupamento dos módulos indicados permite a obtenção das relações de massa pretendidas e definidas como ideais para cada caso específico.

Os dispositivos ALS modulares deverão ser arrumados e acoplados em estruturas de suporte do tipo estantes ou bastidores metálicos, devendo ser garantida a correta fixação entre a estrutura de suporte e o sistema estrutural principal. No caso das estruturas de suporte, as zonas de ligação deverão ser dimensionadas e verificadas para os esforços que surgem em presença de ações dinâmicas intensas.

O recurso a uma solução do tipo modular para os dispositivos ALS permite um fácil ajuste da massa de atenuação, retirando ou colocando módulos, conforme pretendido, se se verificar, ao longo da vida útil da estrutura, alguma alteração ao nível das suas características dinâmicas, nomeadamente pelo desgaste de alguns elementos estruturais ou fruto de alguma ação acidental não prevista.

O volume de líquido total a instalar deverá ser dividido em módulos transportáveis, no caso de ser água com um máximo entre 20 e 25 litros, pelo facto de estas quantidades corresponderem a um valor perfeitamente razoável para transporte manual, se necessário. A solução proposta adapta-se sem quaisquer reservas a edifícios preexistentes e novos.

## 2.3 Material dos dispositivos modulares e estruturas de suporte

O material usado nos dispositivos deverá ser: i) leve e ii) transparente. Leve, por motivos de redução da massa e facilidade do manuseamento para montagem e manutenção. Transparente, por motivos de controlo do nível do líquido de amortecimento e inspeção visual do seu estado de salubridade. Como exemplo de materiais com estas características apontam-se o Acrílico, Perspex e PVC.

As estruturas de suporte deverão ser metálicas com uma esbelteza adequada aos esforços de fixação e pesos globais do conjunto.

Para além do referido, e por uma questão de proteção face às radiações solares que podem danificar o material, dever-se-á acondicionar a estrutura de suporte de proteção. Como exemplo referem-se redes de sombra, amplamente utilizadas em zonas ajardinadas e terraços acessíveis.

## 2.4 Controlo químico do fluido

Atendendo a que, numa implementação em edifícios, os dispositivos ALS ficarão colocados junto dos utilizadores finais das estruturas em que estarão incluídos, devem ser tidos alguns cuidados com a sua manutenção, nomeadamente ao nível do controlo das propriedades químicas dos fluidos usados no seu interior.

O adequado controlo químico do fluido existente no interior dos amortecedores de líquido sintonizado poder-se-á traduzir numa boa relação custo-eficácia dos dispositivos. Tal permitirá que o fluido se mantenha com a qualidade requerida e não acarrete mais um condicionalismo à implementação dos dispositivos convenientemente dimensionados para cada situação específica.

Em termos financeiros, interessa uma solução sustentável desenvolvida, dimensionada e instalada para cada situação, em particular. De facto, esta especificidade pode ser um condicionalismo à implementação deste tipo de medidas de dissipação/mitigação de vibrações.

Tentando alargar o espectro das intervenções ao nível do controlo de qualidade do fluido, pode-se mencionar o desenvolvimento de tecnologias que permitam a desinfestação, oxidação e/ou reciclagem e reutilização do fluido.

Na linha do que foi enunciado, pode-se pensar, por exemplo, na colocação de pastilhas ou outro tipo de elemento que permita a eliminação de partículas em suspensão, pequenos insetos, ou até mesmo pequenos líquenes, algas ou musgos, formados com o passar do tempo.

Porém, atendendo a exigências que possam ser identificadas, nomeadamente ao nível da implementação de ALS a estruturas que apresentem importância comprovada, como instalações industriais ou centrais termoelétricas ou nucleares, deverá efetuar-se um controlo de qualidade ainda mais rigoroso. Nestes casos, soluções que passem por filtração fina, biofiltração e até mesmo tratamento de odores podem ser a alternativa.

### 3 Regras de dimensionamento de ALS para implementação em estruturas reais

Passa-se a indicar em seguida, de uma forma sumária, algumas disposições que devem ser observadas aquando do dimensionamento, construção e manutenção de dispositivos do tipo ALS para implementação em estruturas reais.

#### 3.1 Tipo de fluido

Desde a sua primeira implementação em estruturas reais, tem sido usual a utilização de água como líquido preferencial em ALS [1]. Foi também observado, na sequência de alguns trabalhos de investigação anteriores, que a utilização de líquidos de viscosidade elevada não oferece vantagens adicionais, quando comparados com a água [3]. De facto, isto acontece porque, para cada uma das diferentes geometrias de dispositivos ALS existe um nível de amortecimento associado, denominado de "amortecimento ótimo". Este "amortecimento ótimo" será responsável por fornecer o nível máximo de redução da resposta estrutural, seja em termos de valores de pico de deslocamentos, acelerações ou RMS. No entanto, em algumas circunstâncias, ultrapassado esse valor de "amortecimento ótimo", nem sempre a elevada viscosidade dos líquidos se revela como efetiva para a mitigação de vibrações [4].

A utilização de fluidos diferentes da água pode acarretar condicionalismos de carácter económico, uma vez que nem sempre

os referidos líquidos apresentam custos tão apelativos como a água corrente, e de carácter ambiental, por serem soluções que envolvem cuidados adicionais em questões relacionadas com o próprio dimensionamento, implementação e manutenção, pelo que a opção pela utilização da água em ALS tem vindo a ser tomada de uma forma continuada em detrimento de outras.

Deve-se tanto quanto possível escolher uma água isenta de impurezas, para que a sua utilização em situações de emergência possa ser efetuada sem qualquer reserva. Para além disso, deve-se garantir a manutenção das suas características pelo maior tempo possível. Esta situação será referida e apresentada mais adiante na presente secção aquando da descrição do controlo químico a efetuar ao fluido no interior dos dispositivos.

#### 3.2 Relação entre massas ( $\mu$ )

A relação entre massas é definida como a razão entre a massa do(s) dispositivo(s) ALS e a massa do sistema estrutural em que este(s) se encontra(m) incluído(s), revelando-se muito diretamente relacionada com a eficiência pretendida nos dispositivos para um determinado nível de mitigação de vibrações dinâmicas.

Tendo por base estudos anteriores [1] [5], se se pretender que o dispositivo de mitigação de vibrações dinâmicas do tipo ALS apresente uma eficiência de aproximadamente 50%, quando solicitado por ações de período de retorno elevado então é necessário considerar uma relação entre massas entre 1% e 5%. Essa relação é denominada de relação de "massa ótima", por permitir que se obtenha um excelente compromisso entre mitigação de vibrações e a verificação da segurança ao nível dos elementos estruturais. Para este intervalo de relação entre massas, considerando os coeficientes de segurança usados no dimensionamento das estruturas em que se pretende incluir os dispositivos ALS, assume-se que a segurança estrutural se continuará a verificar, mesmo em estruturas que não tenham sido dimensionadas para a componente de carga adicional correspondente aos ALS.

Para além disso, e também justificativos dos valores referidos, consideram-se os resultados obtidos do programa de ensaios experimentais desenvolvido no âmbito de uma tese de doutoramento [2]. Assim, e tendo por base o trabalho referido, verificou-se que, tanto para os ALS com geometria retangular como para os ALS circulares estudados, se assiste a uma melhoria do desempenho com o aumento da relação entre massas.

A título de exemplo referem-se índices de eficiência, em termos de redução da função de resposta em frequência ( $E_{f\_FRF}$ ), variáveis entre 50% e 90% para ALS retangulares, perfeitamente ajustados, considerando relações entre massas variáveis entre cerca de 3% e 7,5%, e variáveis entre 50% e 75% para ALS circulares, perfeitamente ajustados, considerando relações entre massas variáveis entre 1,25% e 3%. No estudo efetuado [2], e que serviu de base para a definição das regras apresentadas no presente artigo, as relações de massa ensaiadas estiveram intimamente relacionadas com o dispositivo de ensaio adotado para cada caso, razão pela qual apresentam as diferenças verificadas.

Outra questão que se coloca, quando em programas experimentais para determinação da eficiência de ALS, é a verificação da segurança

estrutural, em virtude de o excesso de massa adicional poder condicionar o desempenho da estrutura principal em que os dispositivos se encontram incluídos.

Na maioria dos casos, e por questões de segurança estrutural, não é possível colocar sobre estruturas preexistentes muito mais do que 1-3% da massa total da estrutura, uma vez que, como já referido, as estruturas não foram dimensionadas para contemplar sobrecargas adicionais ao nível dos pisos superiores ou de cobertura, nem tão-pouco nos restantes pisos. Muitas vezes, nos casos referidos, para a adequada utilização de sistemas de proteção do tipo ALS, pode ter de ser necessário associar outras medidas de proteção passiva para garantia da completa segurança estrutural.

É de referir que, no programa experimental realizado [2], como a estrutura de transmissão sobre a qual foram colocados os dispositivos ALS apresentava grande capacidade resistente, a verificação da segurança estrutural foi uma questão que não se colocou, tendo sido possível ensaiar razões entre massas superiores aos valores definidos em estudos anteriores [1] como ótimos e tirar as respetivas conclusões.

Contudo, tem vindo a ser verificado que, em algumas situações, mesmo apenas 1% da massa pode ser suficiente para garantir um nível de mitigação de vibrações, de deslocamentos e de acelerações desejável, traduzindo níveis de eficiência muito aceitáveis.

### 3.3 Relação entre comprimentos

Define-se como relação entre comprimentos a relação entre duas dimensões nos ALS, sejam elas:

- i. Desenvolvimento longitudinal ou na direção do movimento preferencial,  $L$ , e a largura ou desenvolvimento transversal ou desenvolvimento na direção do menor movimento,  $b$ ;
- ii. Desenvolvimento longitudinal e altura do fluido em repouso,  $h$ ;
- iii. Diâmetro da secção circular do dispositivo,  $2R$ , e altura de fluido em repouso.

Destas relações é possível obterem-se diferentes classes que correspondem a diferentes tipos de funcionamento no interior dos dispositivos. Assim, admitindo  $h/L$  ou  $h/2R$  inferior a valores de 0,15 o funcionamento do fluido no interior dos ALS é semelhante às ondas de águas rasas (*shallow water waves*) da engenharia costeira, enquanto para valores de  $h/L$  superiores a 0,20 o fluido no interior do ALS comporta-se como as ondas de águas profundas (*deep water waves*) da engenharia costeira [6] [7]. Em alguns casos, na literatura, determinadas teorias de onda preconizam que para  $h/L$  ou  $h/R$  entre 0,15 e 0,20, se trata de ondas de águas profundas. Outras teorias, pelo contrário, defendem que entre esses valores ainda se está em presença de ondas de águas rasas. Para as diferentes classes obtêm-se diferentes comportamentos característicos e diferentes níveis de mitigação de vibrações. Assim, para as ondas de águas rasas a mitigação de vibrações encontra-se mais associada ao movimento da parcela de água convectiva, enquanto para as ondas de águas profundas a mitigação de vibrações encontra-se mais associada à parcela de água impulsiva [2].

Tendo em conta o trabalho desenvolvido e os resultados experimentais obtidos [2] foi possível definir uma classe de

dispositivos adicional (*shallow-deep*), que congrega características de ambos os casos definidos previamente na literatura. Esta designação permitiu explicar situações anteriormente não definidas que se apresentavam como dúbias e para as quais não existiam resultados experimentais que comprovassem o seu funcionamento.

Dos resultados obtidos [2] ficou claro que a relação entre comprimentos característicos é, sem dúvida, um parâmetro a considerar no dimensionamento deste tipo de dispositivos para posterior implementação na mitigação de vibrações dinâmicas em estruturas.

A verificação da relação entre comprimentos característicos traduz uma regra de grande importância, por se encontrar diretamente relacionada com o ajuste de frequências.

Desta forma, deve-se procurar estabelecer uma relação entre comprimentos característicos que permita alcançar um ajuste de frequências ótimo, conforme será indicado na secção seguinte, para que o funcionamento deste tipo de dispositivo na mitigação de vibrações dinâmicas seja o mais adequado e melhor possível.

### 3.4 Ajuste de frequências ( $\gamma_{opt}$ )

Tipicamente, ajusta-se a frequência fundamental de vibração dos ALS à frequência do modo de vibração da estrutura cujo movimento se pretende controlar. De facto, na maioria dos casos este modo corresponde ao 1º modo de vibração da estrutura ou modo fundamental de vibração da estrutura. O ajuste é feito muito diretamente com base nas dimensões geométricas do dispositivo e na altura de fluido em repouso no interior do recipiente. Considera-se um dimensionamento adequado aquele em que se garanta que o ajuste de frequências é próximo da unidade ( $0,9 < \gamma_{opt} < 1,1$ ), para uma razão de massas entre 1% e 5% [1].

Verifica-se, de facto [2], que, de uma maneira geral, os índices de eficiência mais elevados correspondem à ocorrência de uma relação entre frequências em torno do valor unitário.

Observou-se também que o intervalo definido como ótimo nem sempre é o mesmo [2], apresentando dependência direta com o tipo de dispositivo, isto é, se é *shallow*, *shallow-deep* ou *deep*. Também foram verificados ajustes de frequências fora do limite definido ( $0,9 < \gamma_{opt} < 1,1$ ) [2], o que permitiu comprovar que, em determinadas circunstâncias, e desde que não muito afastados do limite atrás definido, é possível reduzir muito consideravelmente as vibrações de sistemas estruturais sujeitos a ações dinâmicas.

Em virtude do tipo de solicitação imposta, unidirecional ou bidirecional, e das suas características geométricas, os ALS podem funcionar em mais do que uma direção em simultâneo, razão pela qual se deve tentar sempre ajustar as suas frequências fundamentais de vibração às frequências de vibração das estruturas em que se encontram incluídos. O ajuste, à semelhança do referido para uma direção apenas, deve ser efetuado para valores próximos da unidade, o que permite ser atingido um nível de eficiência mais elevado na mitigação de vibrações dinâmicas de intensidade variável.

A sintonização da frequência dos ALS à frequência da estrutura principal pode ser efetuada preliminarmente de uma forma aproximada, e ajustar-se *in situ*, aquando da colocação final dos dispositivos na estrutura cuja vibração se pretende mitigar.

### 3.5 Razão de amortecimento ( $\zeta_{opt}$ )

Para um dispositivo do tipo amortecedor de massa sintonizado (AMS) corrente a razão de amortecimento apresenta-se como linear. No entanto, em ALS simples ou múltiplos o amortecimento varia de uma forma claramente não-linear com a amplitude de excitação [2] [8].

Com base nos resultados das análises propostas e desenvolvidas verificou-se que a otimização do amortecimento apresenta alguma dependência da relação entre massas definida para cada situação, estando, portanto, intimamente relacionada com o descrito em 3.2.

De facto, tendo por base os resultados obtidos, a definição do amortecimento ótimo para implementação em sistemas estruturais reais carece de verificações experimentais preliminares em protótipos análogos aos que se pretenda colocar. Os resultados obtidos permitem a calibração do amortecimento para cada situação específica, tendo em conta a geometria considerada para cada caso particular.

### 3.6 Número de dispositivos (N)

O número de dispositivos a colocar numa estrutura para mitigação de vibrações dinâmicas tem vindo a ser investigado, tendo sido conduzidos estudos numéricos em conjuntos de ALS simples ou múltiplos e amortecedores de coluna de líquido sintonizado (ACLS) caracterizados por distribuições de massas não uniformes e espaçamento de frequências também não uniforme, obtidos por diferenças consideráveis ao nível das alturas de fluido em recipientes também de geometria diferente [9]. Esses estudos levaram a concluir que tais sistemas passivos não ofereciam grandes vantagens quando comparados com sistemas com distribuição de massas e espaçamentos de frequências uniformes, obtidos pela mesma altura de fluido em recipientes apresentando as mesmas características geométricas.

O número de dispositivos usados em cada estrutura está diretamente relacionado com a relação entre massas e depende de vários fatores, tais como:

- i. Espaço disponível para colocação do conjunto de dispositivos no sistema estrutural principal;
- ii. Forma geométrica dos dispositivos a implementar;
- iii. Tamanho de cada dispositivo;
- iv. Espaço disponível para circulação e acessibilidade a todos os dispositivos por questões de manutenção.

Em casos em que se opte pela implementação de vários ALS foi mostrado em [1] e comprovado em [2] que o aumento indiscriminado do número de dispositivos nem sempre é garantia de melhoria de desempenho.

O número de dispositivos deverá ser definido em concordância com a relação entre massas especificada e com o ajuste entre frequências pretendido, já que ele próprio também se relaciona indiretamente com a relação entre massas uma vez que esta relação depende da altura de fluido.

### 3.7 Orientação dos dispositivos

Em estruturas que apresentem diferentes frequências fundamentais nas direções principais, é bastante útil a consideração de alternativas com recurso a ALS de geometria retangular [2]. Nestas situações, a colocação dos dispositivos com uma orientação preferencial, bem como o desenvolvimento de um processo de dimensionamento adequado para as duas dimensões do dispositivo, permite que as frequências fundamentais em ambas as direções possam ser convenientemente ajustadas ou pelo menos aproximadas com um certo rigor. Isto é bastante importante na medida em que a teoria subjacente ao dimensionamento de tanques, estendida aos amortecedores de líquido sintonizado são exatas apenas para tanques sujeitos somente a excitações de carácter unidirecional.

Em estruturas que apresentem a mesma frequência ou valores de frequências fundamentais muito próximos em duas ou mais direções, o recurso a dispositivos com geometria radial, por exemplo ALS circulares, surge como mais adequado, como pode ser verificado e comprovado por estudos numéricos em desenvolvimento em [10].

## 4 Metodologia simplificada para o dimensionamento de ALS

Tendo em conta estudos desenvolvidos anteriormente [1] [5] e as ferramentas de cálculo desenvolvidas [2] para simulação numérica do comportamento de: i) ALS quando isolados; ii) ALS inseridos em sistemas estruturais existentes de um grau de liberdade e iii) ALS inseridos em sistemas estruturais existentes de mais graus de liberdade, torna-se possível definir as linhas gerais de uma metodologia simplificada para suporte ao dimensionamento e implementação de ALS para mitigação de vibrações em sistemas estruturais.

Complementarmente foram também desenvolvidas rotinas para estimar a resposta de sistemas de um ou mais graus de liberdade sem qualquer dispositivo de mitigação de vibrações a eles acoplado, para efeitos de comparação com as situações com ALS acoplados.

A metodologia simplificada proposta assenta nos seguintes princípios:

- i. Estimativa da frequência natural do sistema estrutural a proteger, por via de simulações numéricas para estruturas novas ou por meio de medições *in situ* para estruturas existentes;
- ii. Predefinição das dimensões do(s) dispositivo(s) com base em modelos teóricos para que o ajuste entre frequências (da estrutura principal e do dispositivo de mitigação) seja tão próximo quanto possível do valor unitário;
- iii. Verificar a relação entre a altura de fluido em repouso e o comprimento do dispositivo na direção da solicitação dinâmica imposta. Se não se encontrarem dentro de limites aceitáveis para que o seu funcionamento seja o pretendido (*shallow water waves*, *shallow-deep* ou *deep water waves*), dependendo da funcionalidade exigida para cada caso, é necessário proceder-se a um ajuste da altura de fluido em repouso ou das dimensões do dispositivo;

- iv. Definir o número de dispositivos a instalar na estrutura principal, tendo em conta condicionalismos geométricos da estrutura em que vão ser incluídos (principalmente o espaço disponível) e relações entre massas adequadas e compatíveis com os valores definidos como ideais para ser alcançado um desempenho ótimo (1% a 5%). Se se verificar ser necessário, e a segurança estrutural do sistema em que se encontram incluídos o permitir, estes valores de relação entre massas poderão eventualmente ser aumentados até 10%, conforme proposto em alguns trabalhos desenvolvidos [11];
- v. Introduzir as características dinâmicas estimadas em i) nas rotinas adequadas, o que permite a obtenção da simulação da resposta do sistema estrutural principal, em termos de valores de pico e RMS de deslocamentos, velocidades e acelerações;
- vi. Com base em ii), iii) e iv) introduzir as características dinâmicas dos ALS para serem consideradas na rotina proposta:
  - a) Obter a nova resposta do sistema estrutural principal em termos de valores de pico e RMS de deslocamentos, velocidades e acelerações;
  - b) Obter as forças resultantes no ALS (forças dissipativas) com vista a contabilizar e considerar a ação que os dispositivos exercem diretamente sobre o sistema estrutural;
  - c) Verificar se os elementos estruturais (lajes, vigas, pilares) e se os elementos de suporte e fixação dos dispositivos ALS se encontram dimensionados para suportar as forças adicionais obtidas em b);
- vii. Determinação de eficiências por comparação entre os resultados obtidos de v) e vi). Se por qualquer razão (ajuste de frequência, relação entre massas, amortecimento, número de dispositivos, orientação dos dispositivos) não forem alcançados índices de eficiência dentro de determinados limites deve-se repetir o procedimento a partir de ii) fazendo as devidas alterações nos parâmetros que se verifique serem adequadas para a obtenção da mitigação pretendida.

Caso não se verifique a segurança de elementos estruturais ou de estruturas de suporte dos ALS, deve-se proceder a alterações em ii) e iii) e repetir o procedimento de modo a encontrar a solução mais equilibrada em termos dos benefícios que a introdução de ALS possa trazer face aos efeitos adversos que por eles possam também ser potencialmente introduzidos.

O procedimento atrás descrito, embora pressuponha a utilização das ferramentas de cálculo desenvolvidas e propostas no âmbito do presente trabalho, pode ser facilmente efetuado através da utilização de outras ferramentas de cálculo de estruturas que permitam conceptualizar macroelementos mecânicos representativos dos dispositivos em concordância com os modelos propostos na literatura [10] [12]. Convém, no entanto, referir que estes macroelementos mecânicos não traduzem o comportamento exato dos ALS, em termos dos fenómenos não-lineares que possam ocorrer no interior do fluido em movimento, contrariamente ao que acontece nos modelos matemáticos que se encontram subjacentes às rotinas desenvolvidas e propostas [2].

Convém que no dimensionamento destes dispositivos se utilizem as bases da modelação matemática previamente definidas e apresentadas em [2], pois só assim é que se torna possível obter com maior exatidão a variação do seu comportamento e dos fenómenos que ocorrem no seu interior.

Para verificação da segurança estrutural (pilares, vigas e lajes) e não estrutural (estruturas de suporte) podem ser sempre introduzidas medidas de proteção passiva adicionais, como por exemplo sistemas de contraventamento simples junto de zonas onde o colapso se possa encontrar mais potenciado. No entanto, não é seguramente este o objetivo da introdução de ALS em sistemas estruturais para mitigação de vibrações resultantes de ações dinâmicas, uma vez que se pretende, pelo baixo custo associado à sua implementação, que sejam utilizados sem qualquer reserva e sem medidas adicionais de proteção.

## 5 Considerações finais

A aplicação de sistemas passivos ALS é muito flexível, tanto para integrar em estruturas novas como em estruturas preexistentes, beneficiando de uma instalação simples e de inúmeras vantagens [2]. As construções existentes têm normalmente amortecimento muito reduzido, pois aquando do seu dimensionamento não existia ainda regulamentação sismorresistente. Por essa razão, a introdução de unidades de amortecimento adicionais é sem dúvida uma escolha muito adequada.

No que respeita a construções novas, observam-se as mesmas vantagens que para as estruturas existentes, com o benefício de os projetistas poderem usar tanques de armazenamento ou piscinas existentes em algumas estruturas altas e esbeltas como sistema secundário, isto é, como amortecedor de líquido sintonizado.

Após a instalação, os amortecedores de líquido sintonizado podem exigir medidas de manutenção periódica no sentido de assegurar níveis adequados de altura do líquido. No entanto, na grande maioria das vezes, correspondem a medidas muito simples e pouco dispendiosas.

A capacidade de alterar a localização e número de dispositivos dentro da estrutura, a massa de água nos dispositivos e o ajuste da frequência são opções viáveis. Mesmo a inclusão de dispositivos de controlo surge como uma opção possível em determinadas circunstâncias [2]. A remoção dos dispositivos em caso de necessidade é igualmente simples, não deixando o espaço com marcas permanentes.

A escolha de dissipadores de vibrações dinâmicas com funcionamento assente no movimento de uma determinada altura de fluido, como é o caso de ALS, será tanto mais proveitosa quanto se optar pela inclusão de esquemas que permitam a sua integração em bombas, tanques de armazenamento de água ou dispositivos de incêndio previamente escolhidos e dimensionados para o efeito.

As razões apresentadas justificam a adequabilidade e facilidade de implementação deste tipo de medida de proteção passiva na mitigação de vibrações dinâmicas em estruturas novas, existentes ou durante a fase de construção. Trata-se, sem dúvida, de uma medida que apresenta um âmbito de aplicação bastante alargado e com grande potencial.

## Agradecimentos

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

## Referências

- [1] Yalla, S. K. – *Liquid dampers for mitigation of structural response: Theoretical development and experimental validation*, PhD Thesis, University of Notre Dame, Indiana, USA.
- [2] Falcão Silva, M. J. – *Sistemas passivos para protecção sísmica de estruturas: Uma abordagem baseada no desempenho de amortecedores de líquido sintonizado*, PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal
- [3] Ibrahim, R. – *Liquid sloshing dynamics: Theory and Application*, Cambridge University Press, 2005
- [4] Fujino, Y.; Soong, T. T.; Spencer Jr, B. F. – "Structural control: Basic concepts and applications", Proceedings of the 1996 ASCE Structures Congress, Chicago, Illinois, <http://cee.uiuc.edu/sstl/papers/Tutorial.pdf>, 1998
- [5] Sun, L. M. – *Semi-analytical modeling of tuned liquid damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing*, PhD Thesis, Universidade de Tokyo
- [6] Le Méauté – *An introduction to hydrodynamics and water waves*, Springer – Verlag, ISBN 0-387-07232-2, pp. 315, 1976
- [7] Dean, R.; Dalrymple, R. – "Water wave mechanics for engineers and scientists", *Advanced Series on Ocean Engineering*, World Scientific, Volume 2, ISBN 981-02-0421-3, pp. 345, 1991
- [8] Fujino, Y.; Sun, L. M.; Pacheco, B. M.; Chaiseri, P. – "Tuned liquid damper (TLD) for Suppressing horizontal motion of structures", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 118 (10), pp. 2017-2030, 1992
- [9] Kareem, A.; Kline, S. – "Performance of multiple mass dampers under random loading", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Volume 121, Issue 2, pp. 348-361, 1995
- [10] Coelho, Pedro – *Avaliação sísmica do Edifício Solmar com recurso a TLD's*, MSc Thesis, Faculdade de Engenharia, Universidade Católica Portuguesa, Lisboa, Portugal
- [11] Reed, D.; Yeh, H.; Yu, J.; Gardarsson, S. – "Tuned liquid dampers under large amplitude excitation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, pp. 923-930, 1998
- [12] Novo, Tiago – *Melhoramento da resposta sísmica de edifícios com recurso a TLDs*, MSc Thesis, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal