

Simulações numéricas do comportamento de amortecedores de líquido sintonizado sujeitos a ações sísmicas

Numerical simulations of the behaviour of tuned liquid dampers subjected to seismic actions

Maria João Falcão Silva

Alfredo Campos Costa

Luís Guerreiro

Resumo

A utilização de dispositivos de dissipação de energia é vista como forma eficiente para proteger estruturas contra ações sísmicas. Os dispositivos Amortecedores de Líquido Sintonizados (ALS) são uma forma simples mas eficaz para reduzir a resposta de estruturas face a ações dinâmicas.

Este artigo descreve simulações numéricas sobre o comportamento de ALS, isolados e/ou incluídos numa estrutura de transmissão, comparando-as com os resultados obtidos experimentalmente.

Para o efeito foi usado um *software* de acesso livre denominado CLAWPACK com potencialidades para simular os fenómenos que ocorrem no interior de ALSs. O CLAWPACK consiste num conjunto de rotinas em *Fortran* desenvolvidas para obtenção de soluções numéricas de sistemas hiperbólicos de equações parcialmente diferenciais no tempo, como é o caso dos fenómenos não-lineares subjacentes à *shallow water wave theory*. Foram necessárias adaptações e ajustes em algumas das rotinas principais para permitir a simulação das excitações dinâmicas pretendidas.

Nas simulações numéricas são variados alguns parâmetros, em que se incluem a altura de água, a amplitude de excitação e o número de dispositivos. Os principais resultados obtidos são comparados, com os resultados obtidos experimentalmente, tanto para dispositivos isolados como para dispositivos incluídos nas estruturas ensaiadas. As principais conclusões obtidas serão também apresentadas.

Palavras-chave: Proteção sísmica / Sistemas Passivos / Amortecedores de líquido sintonizado / Mitigação de vibrações / Simulações numéricas

Abstract

The use of energy dissipation devices is seen as an efficient way to protect structures against seismic actions. Tuned Liquid Dampers (TLD) are a simple but effective way to reduce the response of structures against dynamic loads.

This paper describes numerical simulations on TLD, isolated and included in simple structures, tested experimentally.

It was used an open access software called CLAWPACK with the potential to simulate phenomena that occur within TLDs. The CLAWPACK corresponds to a set of routines developed in Fortran for obtaining numerical solutions of hyperbolic systems of partial differential equations, as is the case of the phenomena underlying the nonlinear *shallow water wave theory*. Adaptations and adjustments were necessary in some of the main routines to allow the simulation of dynamic excitations required.

In numerical simulations were varied some parameters which included the water height, the excitation amplitude and the number of devices. The main results obtained are compared with the results of an experimental program, both for individual devices as for the set of devices included in the structures tested. The main conclusions are also presented.

Keywords: Seismic protection / Passive devices / Tuned Liquid Dampers / Vibration mitigation / Numerical simulations

Maria João Falcão Silva

Bolseira de Pós-Doutoramento
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa
mjoaofalcao@lnec.pt

Alfredo Campos Costa

Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa
alf@lnec.pt

Luís Guerreiro

Professor Associado
Instituto Superior Técnico
Lisboa
luisg@civil.ist.utl.pt

1 Introdução

Desde que devidamente calibradas e validadas, as simulações de carácter numérico, surgem como boa alternativa para prever o comportamento dinâmico de dispositivos passivos para a protecção sísmica de estruturas e do seu desempenho quando parte integrante de sistemas estruturais principais.

Os ALS não são exceção, no entanto, e derivado ao seu comportamento altamente não linear, quando sujeitos a amplitudes de solitação dinâmica crescentes, as aproximações do seu comportamento por via de simulações numéricas devem ser efectuadas com critério.

Pretende-se com as simulações numéricas de carácter matemático desenvolvidas:

- i) Propor uma ferramenta de cálculo numérico que permita a aproximação do comportamento dinâmico de ALS quando isolados ou incluídos em sistemas estruturais, considerando amplitudes de solitação dinâmica crescente;
- ii) Apresentar simulações dos ensaios experimentais efectuados no âmbito do programa de ensaios experimentais extenso desenvolvido;
- iii) Verificar a adequabilidade dos modelos propostos por meio de comparações directas entre os resultados obtidos, dos ensaios dos ALS quando isolados ou quando incluídos em estruturas simples de um (SDOF) ou mais graus de liberdade (2DOF).

Apresentam-se os resultados obtidos para simulações de alguns dos ensaios de ruído branco efectuados durante um programa experimental. São apresentados os resultados tanto para ALS isolados (de águas rasas ou *shallow* e de águas profundas ou *deep*) sujeitos a solitações unidireccionais como para sistemas estruturais de um e de vários graus de liberdade (SDOF e MDOF) sujeitos a solitações unidireccionais e bidireccionais.

Refere-se ainda que se aproveitará para fazer a comparação entre os resultados das simulações numéricas com resultados experimentais, permitindo assim calibrar os modelos numéricos e generalizar o seu âmbito de aplicação.

2 Amortecedores de líquido sintonizado: Solitação unidireccional

2.1 Força dissipativa

Atendendo à sua influência directa no campo da mitigação de vibrações, a força de corte resultante no dispositivo, também denominada força dissipativa, surge como alternativa à variável elevação da superfície da água, mostrada e descrita anteriormente, e como um excelente elemento de medida, aferição e calibração de resultados.

A inclusão de Amortecedores de Líquido Sintonizados (ALS) em estruturas tem o propósito de contrabalançar o deslocamento e/ou acelerações do sistema estrutural em que são incluídos de forma a amortecer ou mitigar oscilações/vibrações que ocorram na sequência de uma qualquer acção dinâmica que lhe seja imposta.

Este artigo descreve simulações numéricas sobre o comportamento de ALS, isolados e/ou incluídos numa estrutura de transmissão, comparando-as com os resultados obtidos experimentalmente.

É sabido que, a inclusão de ALS em estruturas tem o propósito de contrabalançar o deslocamento e/ou acelerações do sistema estrutural em que são incluídos de forma a amortecer ou mitigar oscilações/vibrações que ocorram na sequência de uma qualquer acção dinâmica que lhe seja imposta. O movimento de *sloshing* da água, linear ou não-linear, no interior do dispositivo, cria uma força, quando surge uma diferença na elevação da superfície da água em cada parede de topo do reservatório, bem como quando a onda formada atinge a parede. Esta força, se o ALS estiver adequadamente ajustado à frequência cujas vibrações se pretende mitigar, irá contrariar os movimentos da estrutura em que está incluído, amortecendo os seus movimentos e, em alguns casos, chegando mesmo a parar por completo a estrutura em que está incluído.

A determinação das forças de corte actuantes ou forças dissipativas resultantes das simulações numéricas compreende um termo resultante da pressão hidroestática, F_{hidro} , da água em ambas as paredes de topo do ALS na direcção da oscilação, mas com sentidos contrários, e o termo resultante da aceleração vertical F_{acc} da superfície da água junto às paredes de topo do ALS. A variável força, que traduz em termos globais a resposta do dispositivo face à acção de uma determinada acção dinâmica, surge como o melhor dos parâmetros de controlo. Face ao exposto, e atendendo a que as forças resultantes são estimadas com base em registos de elevação da superfície da água em pontos localizados junto a faces de topo do ALS, é muito provável que as perturbações identificadas no interior do fluido em movimento se anulem ou, pelo menos, se reduzam de forma muito considerável, quando se considera uma medida global, como é o caso da força resultante no dispositivo ou força dissipativa. Tendo por base esta formulação, foi possível calcular-se as forças para as diferentes situações simuladas por via numérica (CLAWPACK 2D_LNEC) e comparar os resultados com os valores obtidos durante o programa experimental. Os resultados referidos permitem obter uma perspectiva global do sucedido e tirar conclusões relativamente à utilização das rotinas desenvolvidas no âmbito do trabalho

desenvolvido, para simulação do comportamento dinâmico de dispositivos ALS quando sujeitos a acções sísmicas. Sobre este ponto, é de ressaltar que os resultados numéricos obtidos para ALS *deep* são aproximados, pelo que, também ao nível das forças dissipativas, essa diferença será também evidenciada.

Nas Figura 1 a Figura 6 apresenta-se uma seleção representativa das forças dissipativas obtidas por via das simulações numéricas e experimentais para ALS *shallow* e *deep* e considerando amplitudes de excitação variáveis.

Em termos médios, as forças dissipativas obtidas para ALS *shallow*, por via das simulações numéricas efectuadas, conseguem aproximar-se com adequabilidade aos valores experimentais correspondentes. No entanto, à semelhança do observado para a elevação da superfície da água [1], os valores de pico das forças dissipativas numéricas são mais baixos que os valores de pico das forças obtidas experimentalmente, para amplitudes de solitação baixas a moderadas. Quando se trata de amplitudes de solitação elevadas, em algumas situações específicas, os picos das forças obtidos por via numérica ultrapassam os máximos das forças correspondentes obtidos por via experimental.

De facto, as alterações e as razões referidas para a variável elevação da superfície da água continuam a manter-se ao nível das forças, muito de embora de uma forma consideravelmente mais ligeira.

Os perfis de forças obtidos para ALS *deep* permitem confirmar que, de facto, existe um ligeiro desfasamento entre o número de ciclos para o mesmo intervalo de tempo, o que será comprovado mais adiante, aquando da determinação das funções de resposta em frequência (FRF).

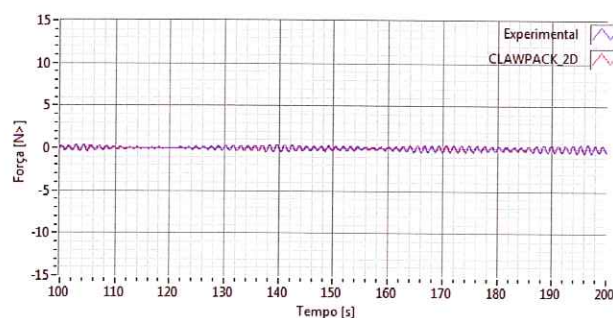


Figura 1 Força dissipativa, amplitude baixa, ALS *shallow* (Detalhe)

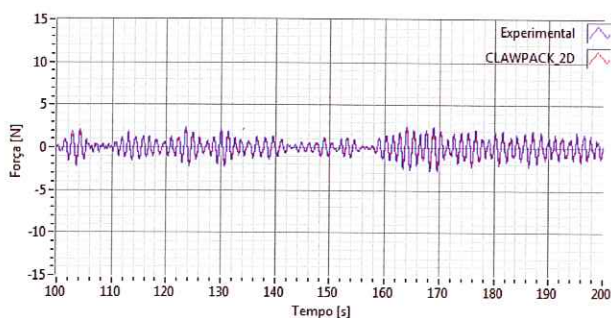


Figura 2 Força dissipativa, amplitude moderada, ALS *shallow* (Detalhe)

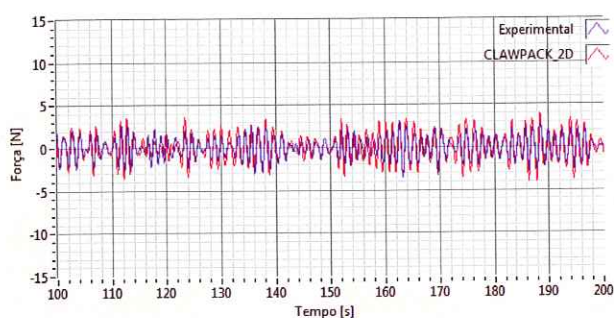


Figura 3 Força dissipativa, amplitude elevada, ALS *shallow* (Detalhe)

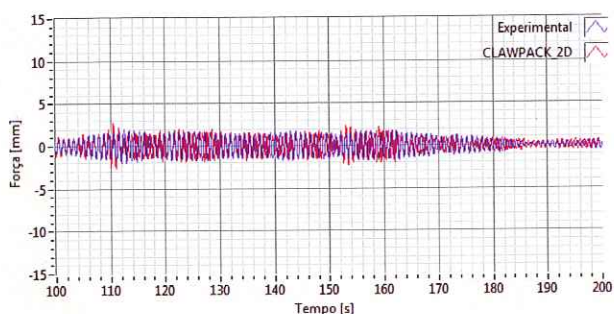


Figura 4 Força dissipativa, amplitude baixa, ALS *deep* (Detalhe)

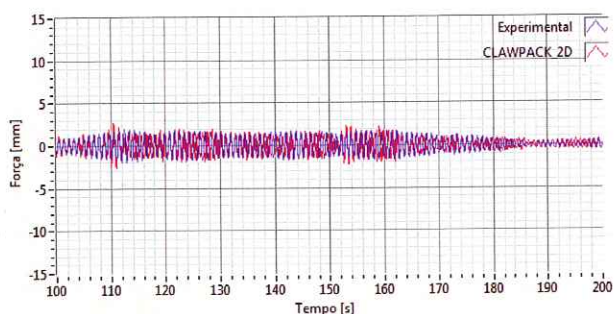


Figura 5 Força dissipativa, amplitude moderada, ALS *deep* (Detalhe)

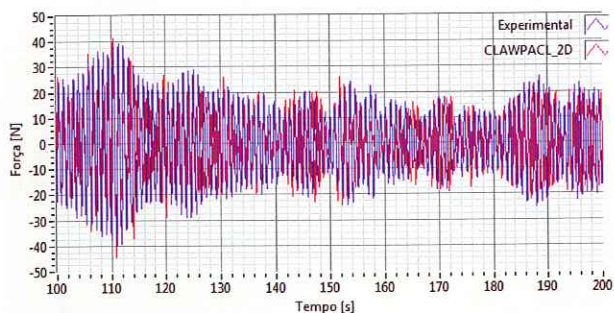


Figura 6 Força dissipativa, amplitude elevada, ALS *deep* (Detalhe)

Foi verificada uma diferença entre forças resultantes das simulações numérica e experimental, o que está intimamente ligado com o facto de as teorias de onda usadas nas simulações numéricas traduzirem resultados exactos e aproximados, quando se referem a ALS *shallow* e ALS *deep*, respectivamente.

A melhor aproximação dos resultados numéricos para ALS *deep* pode ser obtida por um ligeiro ajuste da altura de água em repouso, conforme indicado na secção seguinte.

2.2 Estimativa de FRF

Uma outra forma de identificar a adequabilidade das simulações numéricas é a comparação entre funções de resposta em frequência (FRF) obtidas por via experimental e por via numéricas. Estas podem ser determinadas através da relação entre um sinal de entrada (*input*) e um sinal de saída (*output*); por exemplo, da relação entre deslocamentos impostos (*input*) e elevação da superfície da água (*output*) ou ainda por relação entre deslocamentos/acelerações impostas (*input*) e as forças dissipativas que surgem (*output*). Como verificado em trabalhos anteriores [1] esta segunda hipótese parece dar origem a resultados com menos perturbações e com um melhor nível de coerência. A utilização da força minimiza erros associados ao registo das alturas de água junto às paredes de topo do ALS. Na determinação das FRF, optou-se por trabalhar em termos médios, juntando os vários ensaios efectuados para cada altura de água em repouso e amplitude de solicitação dinâmica, e determinar um valor médio dos resultados, para desta forma se poderem minimizar eventuais desvios.

Apresentam-se nas Figura 7 a Figura 12 as FRF obtidas para a média das várias séries simuladas por via numérica, considerando diferentes alturas de água em repouso e amplitudes de excitação, e efectuam-se as respectivas comparações com as obtidas por via experimental. É de referir que nos resultados preliminares obtidos por meio das simulações numéricas para ALS *deep* são identificadas as diferenças em termos de frequência fundamental de vibração já comentadas durante a análise dos registos da elevação da superfície da água e confirmadas pelas forças de corte resultantes ou forças dissipativas. Esta observação comprova o facto de, como esperado, as teorias de onda subjacentes à formulação usada no CLAWPACK 2D_LNEC traduzirem resultados aproximados em dispositivos do tipo ALS *deep*. O ajuste entre FRF para simulações experimentais e numéricas pode, no entanto, ser efectuado por meio de novas simulações numéricas, considerando para o efeito e para cada caso alturas de água ligeiramente inferiores e dependentes, de forma muito directa, da relação entre frequências observadas inicialmente para o mesmo nível de água em repouso. Estas alturas passam a ser denominadas alturas efetivas em termos numéricos em ALS *deep*, uma vez que, para estes casos, se observou que, a nível experimental, devido à turbulência associada aos fenómenos não-lineares, de difícil simulação, que ocorrem no interior do dispositivo, a altura de água que contribui eficazmente é mais reduzida, sendo aconselhável que, para reproduzir por via numérica cada situação, se considere, de facto, uma altura efetiva mais baixa. Como já mencionado, o sucedido deriva de não serem exactos os modelos matemáticos integrados nas rotinas desenvolvidas propostas para todos os tipos de ALS.

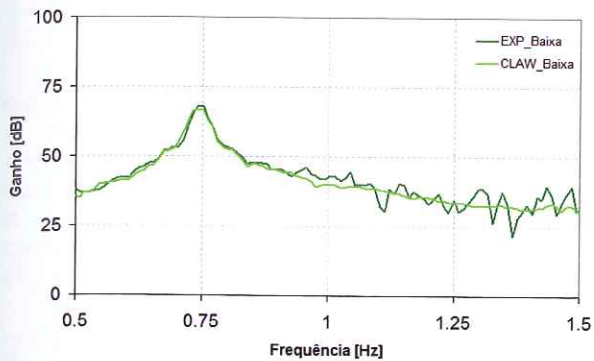


Figura 7 FRFs, amplitude baixa, ALS *shallow*

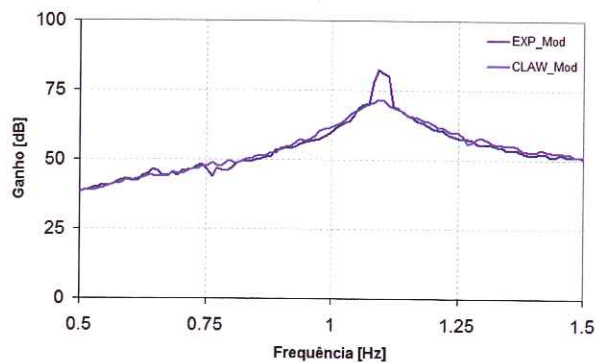


Figura 10 FRFs, amplitude moderada, ALS *deep*

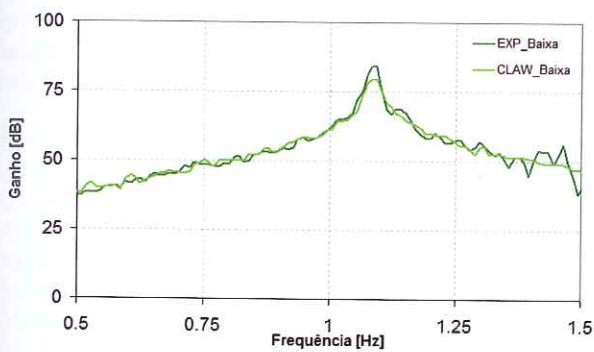


Figura 8 FRFs, amplitude baixa, ALS *deep*

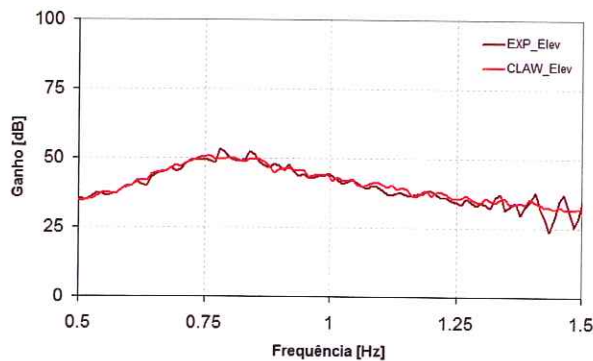


Figura 11 FRFs, amplitude elevada, ALS *shallow*

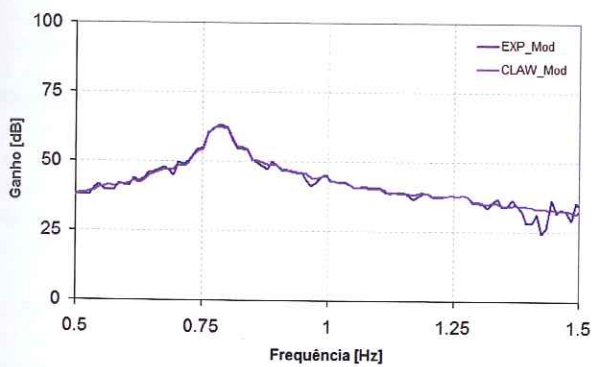


Figura 9 FRFs, amplitude moderada, ALS *shallow*

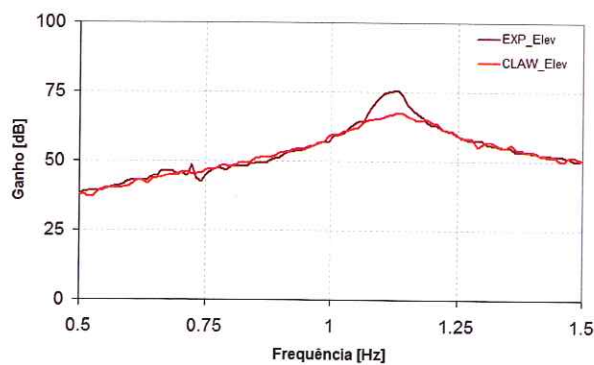


Figura 12 FRFs, amplitude elevada, ALS *deep*

Em termos globais, é possível verificar-se que as simulações numéricas traduzem resultados com menor nível de perturbação, nomeadamente na zona da frequência fundamental de vibração, sendo as FRFs obtidas mais suaves. As irregularidades observadas ao nível das FRFs experimentais podem ser claramente justificadas pelas já referidas perturbações locais, correspondentes a salpicos ou turbulências não-lineares da superfície da água durante a ocorrência dos ensaios, que muito dificilmente podem ser simuladas, nomeadamente quando são seguidas as teorias de onda que se encontram subjacentes às rotinas CLAWPACK 2D_LNEC propostas. As FRF apresentadas para ALS *deep* correspondem aos resultados obtidos das simulações numéricas corrigidas para a altura de água efectiva, de acordo com o indicado.

Por observação das representações gráficas verifica-se que, de facto, existe uma concordância muito boa em termos de frequência para amplitudes de solitação dinâmica baixa a elevada, evidenciada pelas análises das FRFs médias apresentadas. Esta observação comprova o previsto inicialmente para as rotinas propostas para simulação, uma vez que teorias de onda subjacentes à formulação usada traduzem resultados exactos para ALS *shallow* e aproximados para ALS *deep*. Apesar do indicado, não parece que a situação evidenciada para ALS *deep* levante problemas que condicionem a aplicabilidade da formulação proposta nas rotinas CLAWPACK 2D_LNEC e, mais tarde, estendida às rotinas SDF+ALS_LNEC para verificação dos ensaios experimentais unidireccionais e MDF+ALS_LNEC para verificação de ensaios experimentais bidireccionais, visto que as forças dissipativas analíticas obtidas por estas vias são ligeiramente inferiores às que se verificam na realidade. Por esta razão se se verificar mitigação de vibrações, por via de simulações numéricas, no sistema estrutural em que os ALS se encontram incluídos, certamente que, na situação real correspondente à simulação numérica, a mitigação efectiva será mais significativa. De facto, as rotinas propostas permitem identificar os níveis de mitigação em sistemas estruturais, de uma forma exacta, para ALS *shallow*, e, de uma forma aproximada, subestimando os valores das forças dissipativas, para ALS *deep*. Na ausência de outras formulações mais sofisticadas, sem dúvida que as rotinas propostas traduzem soluções que aproximam com um bom grau de adequabilidade o desempenho de ALS quando incluídos em sistemas estruturais.

3 SDF + Amortecedores de líquido sintonizado – Solitação unidireccional

Foi desenvolvido e proposto um conjunto de rotinas que permitiu a simulação do comportamento dinâmico de um sistema estrutural com um grau de liberdade (SDOF) com um conjunto de ALS incluídos, quando sujeito a uma determinada ação dinâmica. Foram simuladas estruturas SDOF com frequências variáveis sujeitas a solicitações dinâmicas de carácter aleatório geradas com recurso ao software LNEC-SPA [5], tendo sido obtidas as suas componentes de deslocamento, velocidade e aceleração.

A avaliação da qualidade das simulações numéricas para os sistemas de dois graus de liberdade SDOF+ALS é efectuada, não só por comparação entre os registos de elevação da superfície da água nos pontos correspondentes aos vários transdutores de

pressão colocados no programa experimental e os resultados do CLAWPACK2D_LNEC para os mesmos pontos, conforme apresentado na secção anterior, mas principalmente por via da comparação entre registos de deslocamentos, velocidades, acelerações e forças dissipativas ao nível do sistema estrutural. São, sem dúvida, estas variáveis, que permitirão a avaliação da influência da inclusão de ALS no comportamento dinâmico de sistemas SDOF e da eficiência na mitigação de vibrações dinâmicas impostas.

Os resultados obtidos para um sistema estrutural com frequência estimada de cerca de 0.8Hz, ensaiado durante o programa de ensaios experimentais, e sujeito à série que mais se aproxima, em termos médios, do valor médio do conjunto das séries ensaiadas, considerando amplitudes de solitação variáveis e as correspondentes comparações com os resultados experimentais, para as mesmas amplitudes de solitação dinâmica são apresentados.

Por uma questão de facilidade da análise e observação apresentam-se apenas detalhes representativos dos registos de deslocamentos e de forças dissipativas (Figura 13 a Figura 18).

Como pode ser observado, por consulta das figuras, verifica-se uma concordância muito boa entre os resultados das simulações numéricas obtidas por via do conjunto de rotinas propostas, SDF+ALS_LNEC, e os resultados obtidos por via experimental para amplitudes baixas a elevadas.

Na determinação das FRFs, à semelhança do efectuado e apresentado na secção 2.2, juntaram-se as simulações numéricas desenvolvidas para todos os ensaios experimentais efectuados para cada altura de água em repouso e amplitude de excitação, tendo sido determinado um valor médio, para que desta forma fossem reduzidos eventuais desvios. Apresentam-se na Figura 19 um gráfico resumo com alguns exemplos representativos do tipo de FRFs obtidas para as simulações numéricas efectuadas sobre um dos sistemas estruturais SDOF com ALS incluídos (SDF+ALS_LNEC) e comparadas com as funções de resposta em frequência experimentais correspondentes.

Por observação das representações gráficas apresentadas, verifica-se que, de facto, existe uma concordância muito boa em termos de frequências dos dois modos que surgem: i) um associado à estrutura propriamente dita e ii) outro associado ao dispositivo ALS. Vislumbra-se que as simulações numéricas propostas são meios muito adequados de aproximar o comportamento de sistemas estruturais com ALS incluídos, não sendo necessário efectuar ensaios experimentais, que em muitas circunstâncias podem atrasar os estudos, dificultando a obtenção de conclusões rápidas e expeditas para implementação em estruturas reais.

No entanto, à semelhança do observado para as simulações efectuadas sobre os dispositivos ALS quando isolados, identifica-se que, de facto, as simulações numéricas traduzem resultados menos perturbados, sendo, sem dúvida, a função de resposta em frequência mais suave, e ligeiramente inferiores ao nível da zona do pico, da ordem de 10 a 15%.

As diferenças observadas ao nível das funções de resposta em frequência experimentais e analíticas, podem ser claramente justificadas, por eventuais perturbações locais ao nível da instrumentação utilizada durante o programa de ensaios

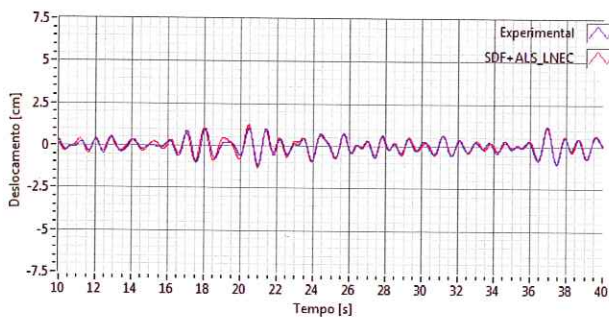


Figura 13 Deslocamentos para SDOF+ALS, amplitude baixa (Detalhe)

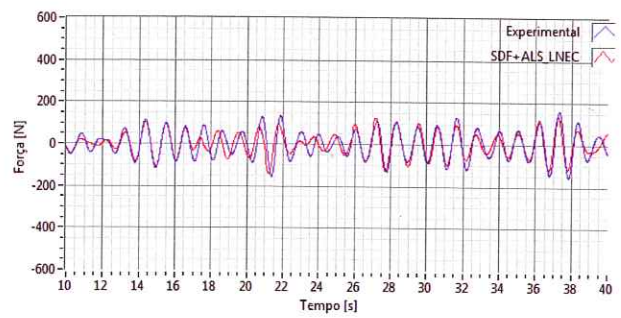


Figura 16 Forças dissipativas para SDOF+ALS, amplitude moderada (Detalhe)

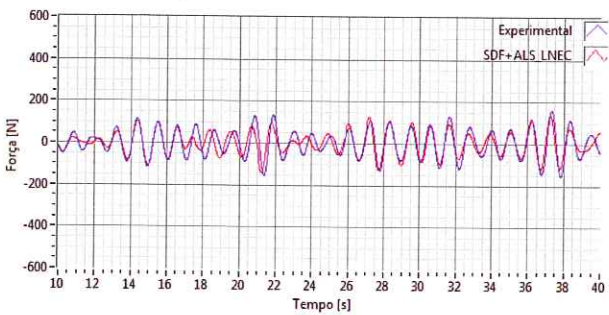


Figura 14 Forças dissipativas para SDOF+ALS, amplitude baixa (Detalhe)

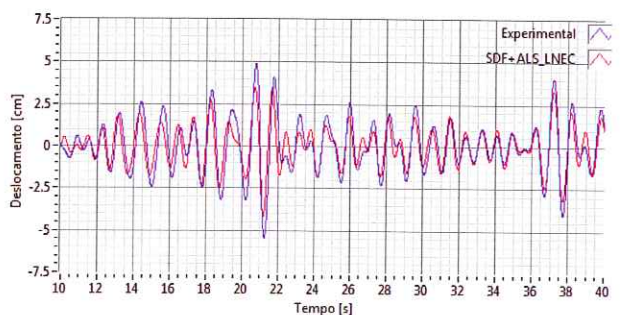


Figura 17 Deslocamentos para SDOF+ALS, amplitude elevada (Detalhe)

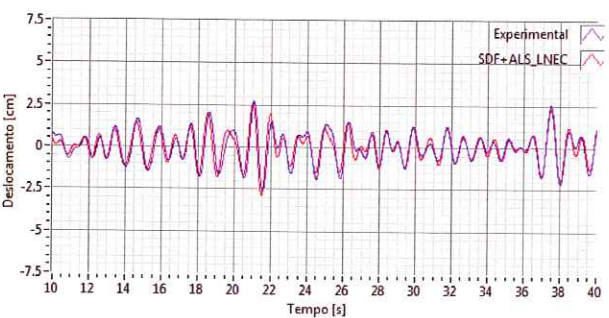


Figura 15 Deslocamentos para SDOF+ALS, amplitude moderada (Detalhe)

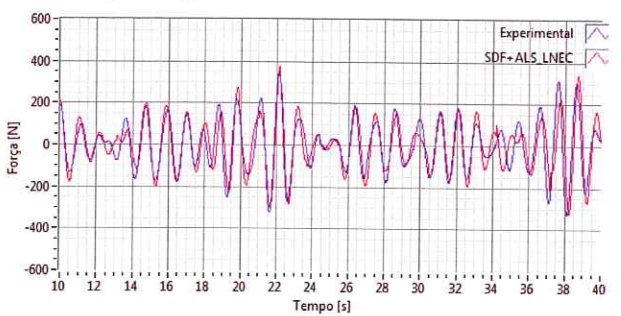


Figura 18 Forças dissipativas para SDOF+ALS, amplitude elevada (Detalhe)

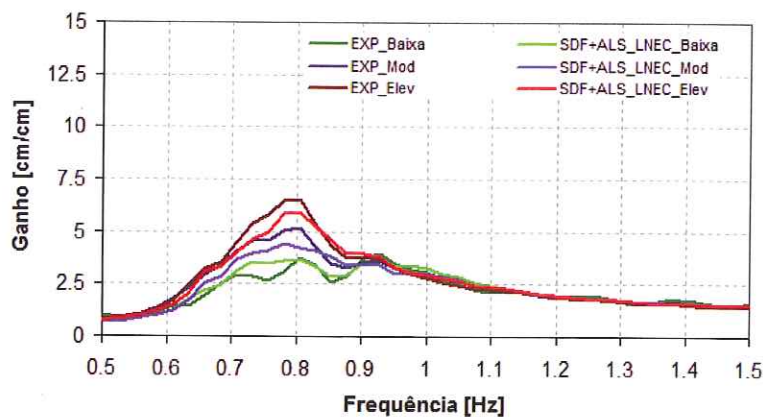


Figura 19 RFs para sistema SDOF + ALS (frequência SDOF aproximada de 0.81Hz)

experimentais e/ou por fenómenos não-lineares, que, como já foi amplamente mencionado em secções anteriores, apresentam, por vezes, difícil contabilização, mesmo pelos modelos matemáticos baseados nas teorias de onda implementados nas rotinas de cálculo desenvolvidas e propostas. As simulações numéricas propostas para solicitações unidireccionais, permitem uma excelente aproximação do comportamento das referidas estruturas. A comparação directa entre deslocamentos, velocidades e acelerações registados para um mesmo sistema estrutural e para cada tipo de simulação permite obter conclusões muito interessantes acerca dos níveis de mitigação de vibrações, conforme apresentado em trabalhos anteriores [1].

4 MDF + Amortecedores de líquido sintonizado – Solicitação bidireccional

Foi também desenvolvido e proposto um conjunto de rotinas que permitiu a simulação do comportamento dinâmico de sistemas estruturais MDOF com um conjunto de ALS incluídos quando sujeitos a solicitações bidireccionais [1]. As estruturas ensaiadas, foram sujeitas a solicitações dinâmicas bidireccionais de carácter aleatório e com conteúdo em frequências entre 0,1 e 3,0 Hz, tendo sido obtidos os registos das suas componentes de deslocamento, velocidade e aceleração que, posteriormente, foram comparadas com os resultados obtidos por via experimental para o mesmo tipo de solicitações.

As conclusões efectuadas na presente secção restringem-se a simulações numéricas numa gama de amplitudes de solicitação dinâmica moderadas. No entanto, atendendo ao observado para os sistemas estruturais SDOF+ALS, para amplitudes de excitação baixas a elevadas, é de crer que as aproximações obtidas por via de simulações numéricas a sistemas estruturais MDOF+ALS, sujeitos a solicitações de amplitudes moderada possam ser extensíveis aos mesmos sistemas, sujeitos a excitações baixas e elevadas. Tratando-se de ensaios com duas componentes de solicitação dinâmica foi estudada a correlação entre sinais de entrada para ambas as direcções de solicitação. Apresentam-se, nas Figura 20 a Figura 23, os resultados de algumas simulações numéricas efectuadas, com uma correlação entre sinais de entrada de 1% e de 100%, respectivamente.

Conforme pode ser observado, o andamento dos deslocamentos, obtidos por via das simulações numéricas efectuadas, nos sistemas estruturais conjuntos MDOF+ALS, tanto para a direcção x, ou direcção transversal da plataforma sísmica, como para a direcção y, ou direcção longitudinal da plataforma sísmica, apresenta uma excelente concordância com o obtido por via dos ensaios experimentais efectuados à mesma estrutura. No entanto, identificam-se diferenças muito ligeiras ao nível dos valores de pico, muito provavelmente resultantes de ajustes ao nível do amortecimento. Dado que o encastramento na base do sistema estrutural foi conseguido com recurso a uma ligação aparafusada com chapas de aço, da qual se desconhecem com exactidão as propriedades, julga-se que durante as solicitações podem surgir alterações pontuais de amortecimento que não conseguem ser completamente reproduzidas nas simulações numéricas.

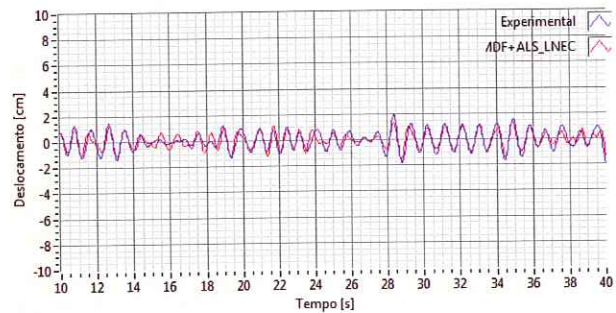


Figura 20 Deslocamento em x, MDF+ALS, correlação entre sinais 1% (Detalhe)

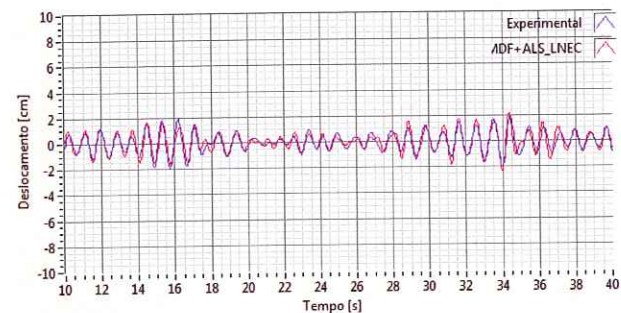


Figura 21 Deslocamento em x, MDF+ALS, correlação entre sinais 100% (Detalhe)

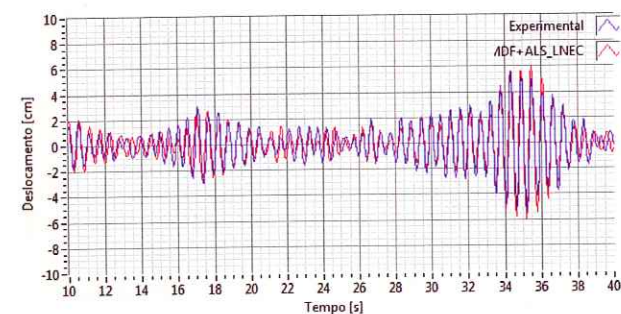


Figura 22 Deslocamento em y, MDF+ALS, correlação entre sinais 1% (Detalhe)

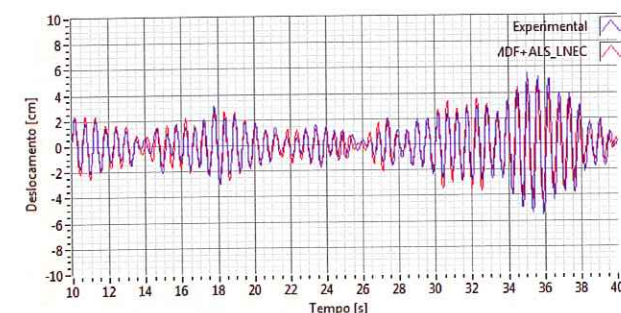


Figura 23 Deslocamento em y, MDF+ALS, correlação entre sinais 100% (Detalhe)

As alterações observadas ao nível do amortecimento, vão influenciar não só os deslocamentos na estrutura em ambas as direcções mas também velocidades e acelerações. De facto, as rotinas MDF+ALS_LNEC, que correspondem a uma extensão das rotinas SDF+ALS_LNEC a sistemas com mais do que um grau de liberdade, permitem a simulação com grande adequabilidade de sistemas estruturais com mais do que um modo de vibração.

Analogamente ao efectuado para sistemas de um grau de liberdade, foram também determinadas as FRF numéricas para cada caso simulado e direcção de solicitação, sendo os resultados numéricos comparados com os resultados experimentais (Figura 24 e Figura 25).

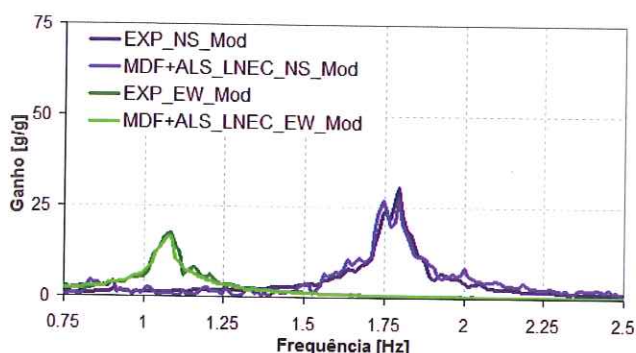


Figura 24 FRFs para MDOF+ALS, correlação entre sinais 1%

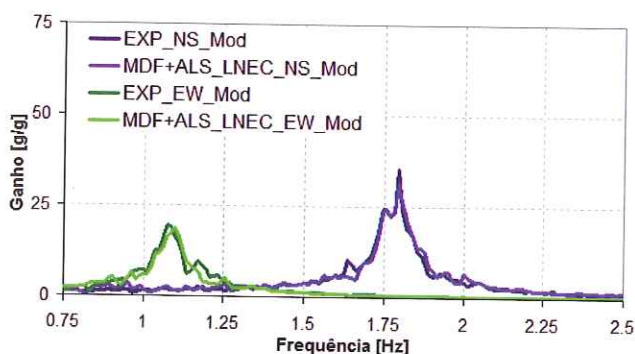


Figura 25 FRFs para MDOF+ALS, correlação entre sinais 100%

Por observação das representações patentes em cada uma das figuras anteriores verifica-se que, à semelhança do identificado para as séries de deslocamentos, de facto, existe uma concordância muito boa em termos de frequências dos dois modos que surgem para cada uma das direcções ensaiadas, um associado à estrutura propriamente dita e outro associado aos próprios dispositivos ALS ensaiados.

Adicionalmente ao referido verifica-se também, à semelhança do observado para os sistemas estruturais conjuntos SDOF+ALS, que as simulações numéricas correspondem a valores de pico ligeiramente inferiores aos correspondentes valores experimentais, podendo observar-se, no limite, uma diferença variável entre 5 a 10%. Identifica-se que, é tanto mais evidente o aparecimento de dois picos, associados aos modos do sistema estrutural principal e

do amortecedor de líquido sintonizado, respectivamente, quanto melhor é o ajuste entre frequências da estrutura principal e do dispositivo ALS.

Analogamente ao observado para as simulações efectuadas sobre os dispositivos ALS quando isolados e para SDOF + ALS, continua-se a verificar que, de facto, as simulações numéricas traduzem FRF menos perturbadas. As irregularidades presentes nos resultados experimentais são, conforme já mencionado, fruto de eventuais falhas pontuais ao nível da instrumentação utilizada.

5 Conclusões

O programa de simulações numéricas desenvolvidas sobre ALS isolados e sobre estruturas de transmissão (SDOF e MDOF) com os referidos dispositivos acoplados, permitiu que se obtivessem diversas conclusões relativamente à sua adequabilidade para prever o comportamento dos sistemas estruturais supramencionados quando sujeitos a solicitações dinâmicas unidireccionais e bidireccionais.

Assim para os ALS isolados, isto é, quando não incluídos em qualquer tipo de sistema estrutural:

- Boa concordância entre os registos da elevação da superfície da água obtidos por via experimental e por via numérica. A concordância é tanto melhor na gama de amplitudes baixas a moderadas e para ALS *shallow*. Conforme foi possível concluir por observação das representações gráficas das séries temporais e dos perfis da onda apresentados, as adaptações propostas nas rotinas originais do programa CLAWPACK permitem uma simulação adequada do comportamento dinâmico do fluido no interior do dispositivo quando sujeito a solicitações dinâmicas de carácter aleatório;
- Boa concordância entre os registos das forças nas paredes do dispositivo obtidos por via experimental e por via numérica. De facto, para os casos estudados a força de corte no reservatório não é afectada por componente hidrodinâmica significativa, sendo bastante fiável uma aproximação tendo por base a força hidroestática, resultante como é obvio da pressão hidroestática nas paredes do recipiente;
- As frequências experimentais, foram aproximadas pelas simulações numéricas com um erro considerado baixo. As diferenças evidenciadas resultam, principalmente, de perturbações locais identificadas nos sensores de medida (para resultados experimentais), do aparecimento de fenómenos não-lineares (*breaking waves*) não contemplados na modelação matemática subjacente às simulações numéricas, que com o aumento da amplitude de excitação começam a ser evidenciados e, ainda, em algumas circunstâncias, em que sejam impostas solicitações bidireccionais, da influência do movimento em direcções não colineares.
- No que refere aos sistemas estruturais de transmissão com frequência variável com ALS, para mitigação de vibrações dinâmicas, acoplados:
- Boa concordância entre os registos de deslocamentos, qualquer que seja a gama de amplitudes de excitação imposta.

Conforme foi possível verificar, as rotinas propostas, SDF+ALS_LNEC e MDF+ALS_LNEC, possibilitam a simulação numérica adequada do comportamento dinâmico de sistemas estruturais conjuntos, ensaiados durante um programa experimental, e sujeitos a excitações aleatórias. Esta conclusão é extensível a velocidades e acelerações, conforme apresentado em trabalhos anteriores [1];

- As frequências e modos de vibração obtidos por via das simulações numéricas, aproximaram os resultados experimentais com um erro pouco significativo. As reduzidas diferenças evidenciadas resultam, fundamentalmente, de perturbações locais nas molas de ar responsáveis pela introdução de rigidez à estrutura de transmissão SDOF (solicitações unidireccionais) e na zona de fixação à plataforma sísmica triaxial, para as estruturas de transmissão MDOF (solicitações bidireccionais). No entanto, e não tendo sido conceptualizada uma forma de estimar com certeza as referidas perturbações locais, para incluir nas simulações numéricas para amplitudes de solicitação dinâmica crescente, é certo que, surgirão diferenças relativamente aos resultados obtidos experimentalmente.

Os resultados obtidos por via numérica foram analisados, o que permitiu complementar informação já disponível em trabalhos desenvolvidos anteriormente [6] [4] [7] [8]. Desta forma, tornou-se possível a obtenção de uma boa aproximação do comportamento dinâmico de ALS quando sujeitos a solicitações dinâmicas.

É de referir também que, uma análise de resultados obtidos por via numérica, à semelhança do enunciado para os resultados experimentais, não se esgota, sendo possível determinar novos parâmetros e as relações óptimas entre eles.

Os resultados apresentados em secções anteriores permitem ilustrar com um grau de aproximação bastante elevado o comportamento dinâmico de ALS observado durante ensaios dinâmicos efectuados nas plataformas sísmicas uniaxial e triaxial do LNEC. Os resultados obtidos permitem concluir que as simulações de carácter numérico propostas podem ser estendidas a sistemas estruturais mais complexos representativos de estruturas reais existentes no parque habitacional Português [1].

6 Agradecimentos

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

7 Referências

- [1] Sistemas passivos para protecção sísmica de estruturas: Uma abordagem baseada no desempenho de amortecedores de líquido sintonizado PhD Thesis, M.J. Falcão Silva (2010) Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2010
- [2] Le Méauté. (1976) An introduction to hydrodynamics and water waves, Springer – Verlag, ISBN 0-387-07232-2, 315pp.
- [3] LeVeque, R. (2002) Finite volume methods for hyperbolic problems Cambridge, University Press.
- [4] Shallow-water sloshing PhD Thesis S. Gardarsson, (1996) Universidade de Washington, Washington, USA.
- [5] 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.
- [6] Semi-analytical modelling of tuned liquid damper with emphasis on damping of liquid sloshing PhD Thesis, L.M. Sun, (1991) Universidade de Tóquio, Tóquio, Japão
- [7] Non-linear characteristics of tuned liquid dampers PhD Thesis J.K. Yu, (1991) Universidade de Washington, Washington, USA.
- [8] Liquid dampers for mitigation of structural response: Theoretical development and experimental validation, PhD Thesis S.K. Yalla, (2001) Universidade de Notre Dame, Notre Dame, Indiana