

## SISTEMA MECÂNICO PARA SIMULAÇÃO FÍSICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS

Morais, P.G.<sup>1</sup>; Oliveira, F.V.<sup>1</sup>; Falcão, M. J.<sup>2</sup>; Campos Costa, A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Núcleo de Sistemas Mecânicos, Centro de Instrumentação Científica,  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

<sup>2</sup> Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas, Departamento de Estruturas,  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil



### RESUMO

*A mitigação de danos em edifícios submetidos a ações sísmicas, tem vindo a ser alvo de importantes contribuições provenientes de diferentes áreas do conhecimento visando uma melhoria de eficiência das construções. Uma das vias em desenvolvimento passa pela utilização de sistemas de absorção de vibrações. O presente artigo descreve um sistema de simulação do comportamento dinâmico de edifícios com frequências naturais entre 0,7 e 2,9 Hz destinado à realização de ensaios experimentais de validação de modelos teóricos e de avaliação do desempenho de sistemas de absorção de vibrações. Apresentam-se os resultados de ensaios experimentais realizados aos elementos elásticos do sistema e à totalidade do sistema com vista à sua caracterização e validação experimental.*

### 1- INTRODUÇÃO

A simulação de fenómenos físicos por via experimental requer, entre outros aspectos, a utilização de modelos físicos fiáveis que representem adequadamente a realidade que se pretende estudar. No contexto da dinâmica de estruturas, esses modelos são estruturas com propriedades mecânicas bem definidas que lhe conferem um dado comportamento dinâmico. Na área da engenharia sísmica são utilizados modelos físicos para ensaio em plataforma sísmica com o intuito de avaliar o desempenho da estrutura subjacente.

Estudos recentes referem soluções construtivas com recurso a mecanismos de dissipação (dispositivos do tipo passivo, semi-activo e activo) para a mitigação de vibrações, que apresentam características

mais adequadas e soluções mais económicas (Soong e Spencer 2002) do que outras antes conhecidas. A validação das suas propriedades requer a observação e a avaliação de vários cenários de comportamento do modelo. Nesse sentido, foi desenvolvido no LNEC um sistema mecânico de um grau de liberdade com características dinâmicas ajustáveis, doravante designado por sistema de simulação, com o qual se pretende representar o comportamento de estruturas com frequências naturais entre 0,7 e 2,9 Hz.

O sistema de simulação é constituído por uma massa móvel com cerca de 4 toneladas e várias molas de ar que constituem o elemento elástico do sistema. Variando a pressão interna das molas consegue-se ajustar a rigidez do sistema de

forma a configurar a frequência natural dentro da banda definida.

O sistema foi concebido para funcionar sobre a plataforma sísmica uniaxial do LNEC com o intuito de simular o comportamento dinâmico de edifícios típicos do parque habitacional português, ao qual serão associados os dispositivos de mitigação de vibrações que serão objecto de estudo. Alguns desses trabalhos de investigação encontram-se actualmente em fase de finalização (Falcão et al. 2007; Falcão Silva e Campos Costa 2008).

No presente artigo apresentam-se os resultados de ensaios realizados às molas de ar e o respectivo modelo de comportamento mecânico. São também descritos os ensaios dinâmicos para caracterização do conjunto que serviram para validar o modelo apresentado. São relatadas algumas aplicações de utilização do equipamento desenvolvido em estudos de I&DT, nomeadamente na validação de modelos teóricos de dispositivos do tipo *Tuned Liquid Damper* (TLD).

## 2- SISTEMA DE SIMULAÇÃO

### 2.1 - Especificações

O sistema de simulação, foi inicialmente concebido de forma a reproduzir experimentalmente os modos de vibração com frequências de vibração fundamentais na banda de 0,6 a 1,5 Hz (Oliveira e Morais 2006).

Na generalidade dos casos, é o primeiro modo de vibração que mais influência o comportamento da estrutura. Foi com base neste facto que se desenvolveu o equipamento de forma a simular os modos de vibração mais significativos. Neste sentido e para efeitos dos estudos que se pretendem efectuar com este equipamento, orientados para a avaliação do desempenho de sistemas para mitigação dos efeitos de acções sísmicas, optou-se por uma solução que reproduza o movimento associado ao ponto com maiores deslocamentos do modo de vibração.

Como as estruturas que se pretendem simular com este sistema são na generalidade edifícios de betão e alvenaria, devem ser tidos em consideração os valores dos factores de amortecimento do tipo viscoso associados a este tipo de material, que se situam, normalmente, entre os 0,05 e 0,1 (Lopes 2008). O factor de amortecimento é muito variável e a sua estimativa a partir de resultados experimentais é muito incerta.

Quanto à amplitude máxima do movimento, foi estipulado o valor de 50 mm, por ter sido considerado adequado ao tipo de ensaios experimentais que se previa vir a realizar com o equipamento, tendo em atenção a instrumentação disponível, as limitações tecnológicas associadas aos órgãos a incorporar no sistema de simulação e as limitações da própria plataforma sísmica.

### 2.2 - Descrição

O sistema de simulação desenvolvido pode ser visto de uma forma simplificada como um oscilador com um grau de liberdade com características dinâmicas ajustáveis (Oliveira e Morais, 2006), que pode ser representado de forma abstracta por uma massa rígida e um elemento elástico ajustável de massa nula.

O resultado do estudo conducente ao desenvolvimento do sistema é apresentado na figura 1. Apresenta-se aí um desenho em perspectiva do sistema de simulação montado na plataforma sísmica uniaxial do LNEC, onde foram efectuados os ensaios dinâmicos que se descrevem adiante.

O sistema de simulação é constituído por um quadro móvel com uma massa de 3750 kg e diversas molas de ar de característica variável, de forma a simular os modos de vibração fundamentais. Este equipamento está montado sobre quatro rodas para apoio e guiamento, que assentam em carris instalados na plataforma sísmica uniaxial. As molas podem ser instaladas em série ou em paralelo entre a massa móvel do oscilador e dois suportes associados à plataforma. Encontra-se igualmente instalado sobre a plataforma sísmica um dispositivo de

segurança mecânica que limita a amplitude máxima de vibração do simulador. Associado às molas de ar existe um circuito pneumático, que não se encontra representado na figura, constituído por um compressor, reservatório de ar e um conjunto de válvulas e outros acessórios adicionais que permitem alimentar e regular a pressão no interior das molas. Adicionalmente, podem ser instalados reservatórios de ar associados a cada ramal para os casos em que se pretenda trabalhar no limite inferior da gama de frequências admissível.

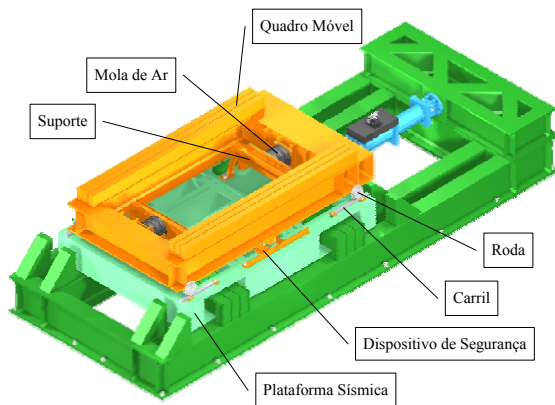


Fig. 1 – Montagem do sistema de simulação na plataforma sísmica uniaxial do LNEC.

Os sistemas de absorção de vibrações objecto de estudo experimental podem ser colocados directamente sobre os montantes do quadro móvel, no espaço vazio entre montantes ou sobre uma plataforma em madeira.

O sistema de simulação será excitado pelo movimento da plataforma sísmica, sendo a sua resposta essencialmente condicionada pela frequência natural para a qual foi ajustado, pela força dinâmica aplicada na plataforma e pela interacção com os dispositivos absorvedores de vibrações sobre ele instalados.

### 3- MODELAÇÃO ANALÍTICA

Como já foi referido, na sua forma mais abstracta, o sistema de simulação pode ser modelado por uma massa rígida ligada ao exterior por intermédio de uma associação de molas com rigidez ajustável. A escolha de molas de ar para constituírem o elemento elástico do sistema foi ditado pelo desejo de poder ajustar de forma fina

e contínua a rigidez destes elementos, dando preferência a soluções que dispensassem operações complexas e morosas de montagem e alinhamento de elementos mecânicos entre ensaios. A rigidez das molas de ar é facilmente modificada pelo ajuste das condições iniciais de pressão do ar no seu interior.

Na modelação do comportamento mecânico das molas admitiu-se que os processos termodinâmicos de compressão do ar prevalecem relativamente à elasticidade dos materiais que constituem as molas para a definição da característica da mola. Os resultados dos ensaios quase-estáticos mostraram que nas zonas limite de utilização, estes modelos não são inteiramente válidos visto que os efeitos associados à rigidez dos materiais deixam de ser completamente desprezáveis.

#### 3.1 - Descrição do Modelo

Nos processos de compressão e expansão das molas, a variação de pressão de ar no seu interior pode ser modelada a partir da expressão da transformação politrópica:

$$P \cdot V^m = Cte \quad (1)$$

sendo ‘ $P$ ’ a pressão absoluta; ‘ $V$ ’ o volume; ‘ $Cte$ ’ uma constante; e ‘ $m$ ’ o expoente da transformação politrópica. No caso da transformação ser isotérmica, ou seja, quando não existe variação de temperatura durante o processo, o expoente ‘ $m$ ’ toma o valor unitário. Por outro lado, o expoente ‘ $m$ ’ toma valores diferentes da unidade e iguais a ‘ $n$ ’ sempre que hajam trocas de calor com o exterior. No caso dessas trocas de calor serem proporcionais à temperatura, a grandeza ‘ $n$ ’ é definida da seguinte forma:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}, \text{ com } c = \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (2)$$

onde ‘ $c_p$ ’ e ‘ $c_v$ ’ são os calores específicos a pressão constante e a volume constante respectivamente; ‘ $c$ ’ é o calor específico da transformação politrópica definido como a relação entre a variação de calor e a variação de temperatura. Quando as trocas de calor com o exterior são nulas, o calor específico da transformação é nulo e,

consequentemente, o expoente ‘n’ passa a ser igual à relação entre calores específicos e, esta transformação denomina-se adiabática. Nestas condições e no caso do ar a temperaturas próximas da temperatura ambiente ( $T = 20^\circ\text{C}$ ), o expoente toma o valor 1,4.

A partir de (1) e tendo em conta as condições iniciais de pressão (pressão relativa à atmosférica,  $p_i$ ) e volume ( $V_i$ ), chega-se a uma expressão que relaciona a pressão com o volume da mola:

$$p = (p_i + p_{atm}) \left( \frac{V_i}{V} \right)^m - p_{atm} \quad (3)$$

Sabendo o volume da mola em qualquer instante e as condições de pressão e volume iniciais, pode determinar-se a pressão interna em qualquer instante. No entanto, a determinação do volume para uma geometria complexa e deformável como a deste tipo de molas não é simples. Deste modo, para uma primeira estimativa e dimensionamento do sistema utilizaram-se os dados disponibilizados pelo fabricante que para a gama de deslocamentos considerada segue uma evolução linear – Firestone (1997):

$$V = a \cdot d + b \quad (4)$$

sendo

$$a = -57,5 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{mm},$$

$$b = 17,17 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

duas constantes e ‘d’ a deformação que varia entre 0 e 100 mm, que corresponde a uma altura de mola ( $h$ ) de 300 e 200 mm respectivamente.

Com base nas expressões anteriores pode determinar-se a força exercida pela mola, multiplicando a pressão por uma área efectiva, através da expressão:

$$F = p \cdot A_{efec} \quad (5)$$

A área efectiva, ‘ $A_{efec}$ ’, tem uma evolução aproximadamente linear com a deformação tal como se pode verificar a partir dos resultados dos ensaios de compressão quase-estática. Denomina-se área efectiva pelo facto de ser uma grandeza que relaciona a força com a pressão mas, no presente caso não é fisicamente mensurável, uma vez que está

dependente de vários factores, tais como as condições iniciais de geometria da mola, da carga aplicada e das propriedades mecânicas do material da mola. Como se pode ver na figura 2, a área efectiva compreende a área da placa de encosto mais uma contribuição da superfície interior do fole.

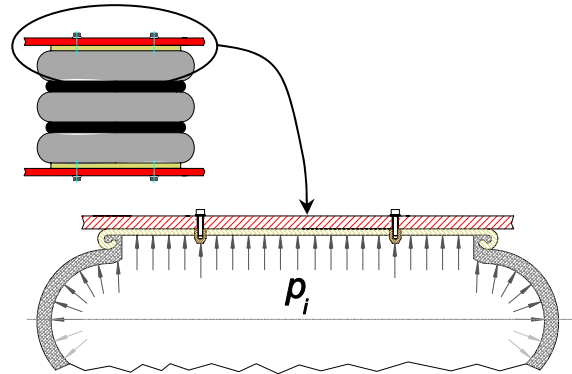


Fig. 2 – Distribuição de pressão no interior da mola de ar. Contribuições para a área efectiva.

A partir da expressão da força pode calcular-se a rigidez da mola como a relação entre a diferença de força e deslocamento entre dois pontos equidistantes da condição inicial (ou de equilíbrio):

$$k = \frac{F_{d+\Delta d} - F_{d-\Delta d}}{2 \cdot \Delta d} \quad (6)$$

sendo ‘d’ a deformação correspondente ao ponto equilíbrio, ‘ $\Delta d$ ’ a distância ao ponto onde se calcula a rigidez. Esta expressão expandida é dada por:

$$k = \frac{(p + p_{atm})}{2 \cdot \Delta d} \left[ \left( \frac{F}{p} \right)_{d+\Delta d} \left( \frac{V_d}{V_{d+\Delta d}} \right)^m - \left( \frac{F}{p} \right)_{d-\Delta d} \left( \frac{V_d}{V_{d-\Delta d}} \right)^m \right] - \frac{p_{atm}}{2 \cdot \Delta d} \left[ \left( \frac{F}{p} \right)_{d+\Delta d} - \left( \frac{F}{p} \right)_{d-\Delta d} \right] \quad (7)$$

em que a relação ‘ $F/p$ ’ é a área efectiva.

Deve ter-se em consideração que tendo a pressão um comportamento não linear com o deslocamento, a rigidez também terá esse comportamento. Assim, tanto a escolha do ponto de equilíbrio, definido pelas condições de montagem da

mola, como da amplitude terão influência na determinação da rigidez.

Por fim, a frequência natural pode ser determinada a partir da relação:

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m}} \quad (8)$$

sendo ' $k_{eq}$ ' a rigidez equivalente resultante do número de molas utilizadas, da configuração escolhida e, eventualmente, da utilização de reservatórios de ar adicionais; e ' $m$ ' a massa da estrutura.

#### 4- CARACTERIZAÇÃO DAS MOLAS

Nesta secção começa-se por descrever o ensaio quase-estático realizado às molas de ar, apresenta-se depois os resultados da análise efectuada e o modelo que descreve o seu comportamento. É apresentada também uma estimativa das características do sistema mecânico com base nos modelos obtidos para as molas de ar.

##### 4.1 - Ensaio de Compressão

Cada uma das molas, no total de 4, foi submetida a um ensaio quase-estático de forma a avaliar as suas características mecânicas.

Apesar do fabricante disponibilizar alguns dados que permitem estimar as características da mola em determinadas condições, tem-se observado que essa informação nem sempre é completa, ou que não são bem referidas as condições de ensaio e, em certos casos, que nem mesmo os valores mencionados estão correctos (Palma et al. 2007). Além disso, é bastante conveniente caracterizar experimentalmente as molas de ar uma vez que nas futuras aplicações de ensaios em plataforma sísmica, pretende-se determinar a força de reacção das molas por via indirecta a partir da pressão medida. Daí que, com base no modelo proposto ao qual se associam os resultados experimentais, é possível estabelecer o modelo força-deformação associado ao comportamento mecânico das molas.

O ensaio de compressão efectuada às quatro molas (Firestone W01-M58-6128)

consistiu num ciclo de carga/descarga entre os 300 e 200 mm de altura da mola, com diferentes condições iniciais de pressão, tendo sido realizado a uma velocidade de deformação constante (1 a 2 mm/s). As condições iniciais foram estabelecidas para 2, 3, 4, 5, 6 e 7 bar. No ensaio de cada mola e para cada uma das condições referidas foram monitorizadas as seguintes grandezas: deformação ( $d$ ), força ( $F$ ) e pressão ( $p$ ). O ensaio foi efectuado na prensa Baldwin/Schenck (LPM/EQ44) do Laboratório de Ensaio de Produtos Metálicos (LPM) do LNEC, tendo sido utilizado o sistema de aquisição de dados (NI DAQ) e um computador para leitura dos sinais da célula de carga e do transdutor de deslocamento instalados na prensa. A figura 3 representa esquematicamente o equipamento utilizado.

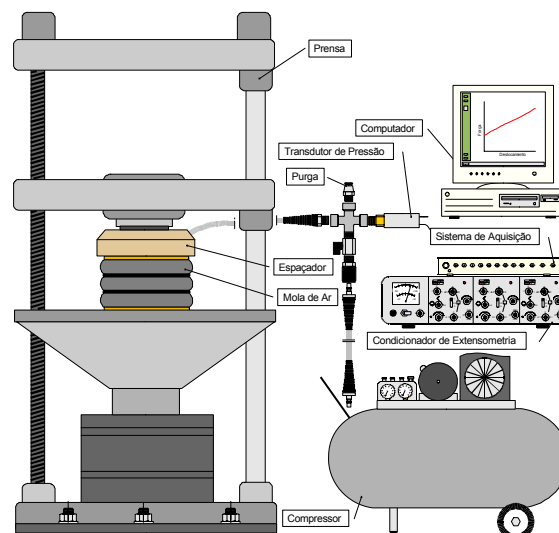


Fig. 3 – Representação esquemática do ensaio de caracterização realizado às molas de ar.

Como se pode ver na figura 3, a mola foi montada entre o prato inferior e o cabeçote da prensa com recurso a um espaçador de madeira para facilitar a ligação da tomada de ar à mola e assegurar a centragem na prensa. O circuito pneumático é constituído por diversos acessórios e válvulas que permitem efectuar a carga, descarga e isolamento da mola de forma controlada. Para a medição da pressão no circuito foi utilizado um transdutor de pressão (Druck PDCR 920). O condicionamento do sinal do transdutor foi efectuado com recurso ao condicionador para extensometria (HBM KWS3082A), sendo o sinal lido e adquirido pelo mesmo



sistema de aquisição de dados referido anteriormente.

## 4.2 - Resultados e Análise

A representação gráfica dos resultados permite verificar que a evolução da pressão e da força com o deslocamento e a relação entre a força e a pressão apresentam um padrão semelhante independentemente da mola e da pressão inicial a que se realizou o ensaio. Pode observar-se nas figuras 4, 5 e 6 que a pressão e a força apresentam uma evolução não linear com o deslocamento, ao passo que a relação entre ambas, que traduz a área efectiva, apresenta uma evolução quase linear com a deformação.

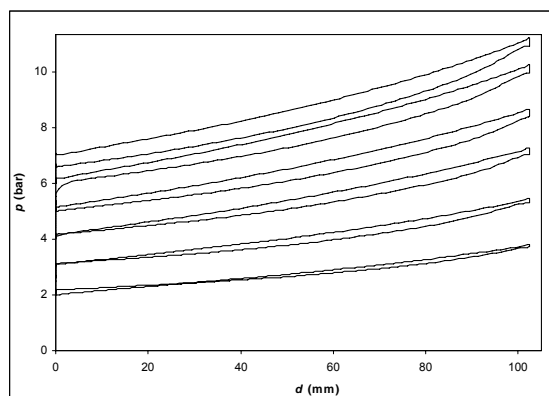


Fig. 4 – Resultados experimentais do ensaio de compressão a uma mola de ar. Evolução da pressão com a deformação para diferentes pressões iniciais.

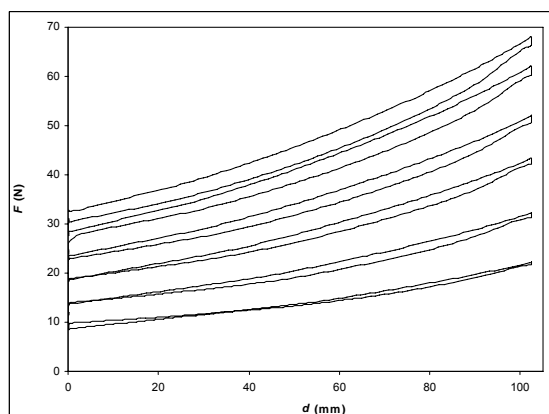


Fig. 5 – Resultados experimentais do ensaio de compressão a uma mola de ar. Evolução da força com a deformação para diferentes pressões iniciais.

Na curva pressão-deformação verifica-se que o troço de compressão segue o andamento característico de uma transformação politrópica, seguindo-se um troço correspondente à paragem da máquina na

inversão, que claramente é descrita por uma transformação isocórica (a volume constante), a qual ocorre devido à diminuição da temperatura do ar por troca de calor com o exterior, seguindo-se um troço de expansão que segue também o comportamento de uma transformação politrópica. Na figura 7 pode observar-se o resultado do ajustamento do modelo proposto – transformação politrópica (3) – de cada curva de compressão e expansão, onde foi optimizado o valor do erro quadrático entre os resultados experimentais e a curva regenerada pelo modelo, em que as variáveis de ajuste são a pressão inicial e o expoente da politrópica.

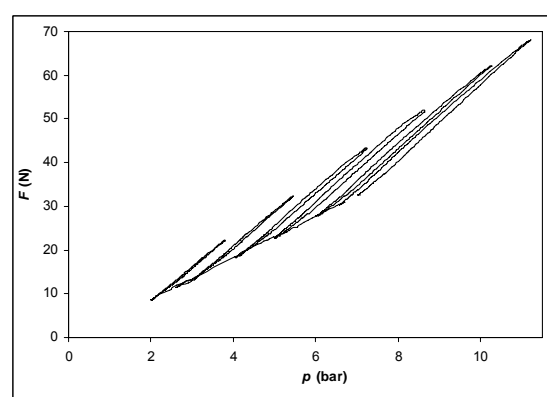


Fig. 6 – Resultados experimentais do ensaio de compressão a uma mola de ar. Evolução da força com a pressão para diferentes pressões iniciais.

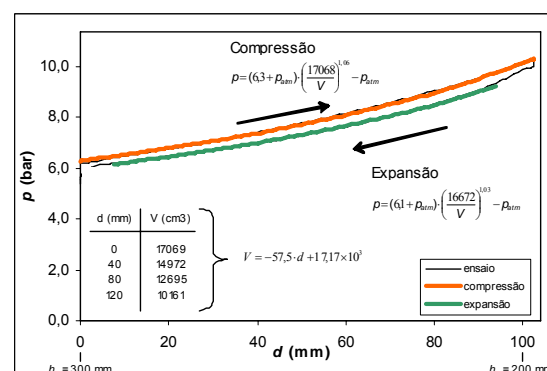


Fig. 7 – Evolução da pressão com a deformação e curvas regeneradas para uma pressão inicial de ensaio.

Note-se que a estrutura do modelo proposto apenas permite adaptar bem a evolução de uma transformação politrópica. Desta forma, na generalidade dos casos, foram ignorados os valores extremos das curvas inevitavelmente afectados pelo regime de transição entre tipos de transformação. Tendo em conta

estas condições, verificou-se que para todos os casos considerados (todas as regenerações para as várias condições iniciais e para as 4 molas ensaiadas) o erro máximo não ultrapassou os 2 %. No gráfico da figura 7 mostra-se uma curva regenerada sobreposta aos resultados de ensaio, bem como o campo de aplicação e a respectiva equação de comportamento. Foi verificado que em todos os ensaios efectuados o expoente da politrópica variou entre 1 e 1,11, o que de certa forma se explica pelo facto das velocidades de deformação serem bastante baixas.

Conforme apresentado anteriormente, a caracterização do comportamento mecânico das molas passa pela determinação da área efectiva para que se possa determinar a força de reacção da mola. Nesse sentido, analisando as curvas de evolução da força com a pressão verifica-se que existe uma relação quase linear independente da pressão inicial ou da mola ensaiada. Daí que a relação entre estas duas grandezas, que representa a área efectiva, seja também linear. Na figura 8 apresenta-se, a título de exemplo, as curvas de regressão linear obtidas para a área efectiva associada a três ensaios realizados à mesma mola a pressões diferentes.

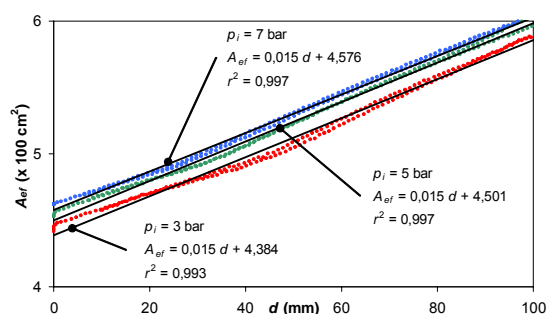


Fig. 8 – Evolução da área efectiva para diferentes pressões iniciais e respectivas curvas de regressão linear.

Da figura 8 verifica-se que o declive das curvas de regressão linear é idêntico para os três casos e que a intercepção do eixo das ordenadas aumenta com o valor da pressão inicial. Aquela ordenada pode denominar-se como a área efectiva inicial. A sua representação em função da pressão inicial resulta também numa evolução aproximadamente linear tal como se pode ver na figura 9.

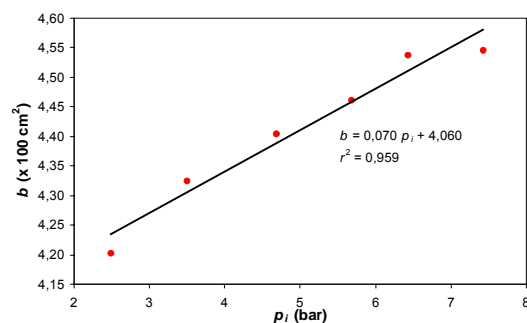


Fig. 9 – Evolução da área efectiva inicial para diferentes pressões iniciais e a respectiva curva de regressão linear.

Estas tendências foram também observadas para os restantes resultados respeitantes às outras molas ensaiadas. Com base nesta análise estabelece-se o modelo que permite estimar a área efectiva da mola:

$$\frac{F}{p} = m \cdot d + A_{efeci} = m \cdot d + m_2 \cdot p_i + b_2 \quad (9)$$

sendo ‘ $m$ ’ o declive médio das curvas para a mesma mola a pressões diferentes; ‘ $A_{efeci}$ ’ a área efectiva inicial, que pode ser representada como a soma de duas parcelas, uma dependente da pressão, à qual está associada o declive ‘ $m_2$ ’, e outra constante, parâmetro ‘ $b_2$ ’.

As constantes obtidas para cada uma das molas são as apresentadas na tabela 1. Na utilização desta expressão devem-se usar unidades coerentes com as das constantes, sendo: ‘ $F$ ’ (kN), ‘ $p$ ’ (bar), ‘ $d$ ’ (mm) e ‘ $p_i$ ’ (bar).

Tabela 1 – Constantes do modelo da área efectiva para cada uma das molas.

mola	$m$ (kN mm/bar)	$m_2$ (kN/bar²)	$m_2$ (kN/bar)
1	0,015	0,084	3,919
2		0,067	4,026
3		0,070	4,062
4		0,080	4,041

Deste modo, com base em (3) e (9), considerando as constantes da tabela 1, é possível estimar a força de reacção da mola a partir das condições iniciais. Salienta-se que a regeneração da força com base neste modelo adapta-se bem aos resultados, pois o erro máximo entre a

curva regenerada e os resultados experimentais é de 2 % na gama de deformações entre 20 a 80 mm. Como já foi referido esta gama não inclui as zonas extremas dominadas pela transição entre processos termodinâmicos para os quais o modelo não foi concebido.

#### 4.3 - Estimativa das Características do Sistema de Simulação

Estabelecido assim o modelo de comportamento mecânico das molas, pode agora estimar-se o comportamento global do sistema de simulação. A partir de (7) e (8), é possível determinar a rigidez e a frequência natural para as diversas configurações de montagem das molas e diferentes condições iniciais. Na estimativa que se apresenta, foram tidos em consideração os seguintes pontos: i) que as condições iniciais correspondem a uma altura média da mola igual a 250 mm e as pressões iniciais de 1,5 até 7 bar com um incremento de 0,5 bar; ii) amplitude do movimento de 50 mm; iii) massa da estrutura igual a 3750 kg, que compreende só o quadro móvel; iv) expoente da politrópica ' $m = 1,14$ '. Durante os ensaios quase-estáticos das molas verificou-se que o valor do expoente podia atingir 1,11 para as condições de ensaio utilizadas. No entanto, durante os ensaios dinâmicos com o sistema de simulação, verificou-se que para as condições finais de utilização o valor que melhor ajusta os valores das frequências naturais estimadas com os experimentais é 1,14, sendo com este último valor que se estimaram as frequências naturais.

Apresentam-se na figura 10 os resultados da estimativa para as seguintes configurações: i) dois conjuntos em paralelo de duas molas em série, designado por '2MPS'; ii) duas molas em paralelo, designado por '2MP'; iii) dois conjuntos em paralelo de duas molas em paralelo, designado por '2MPP'.

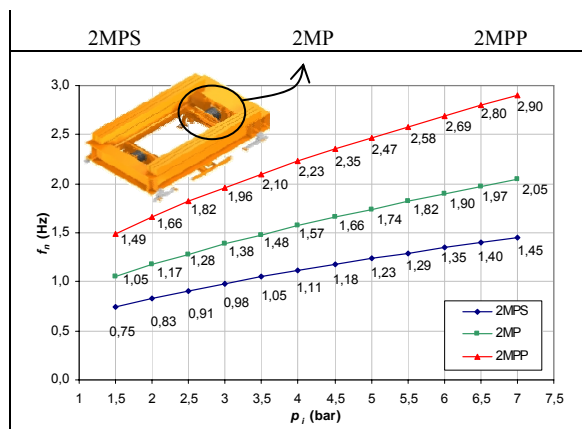
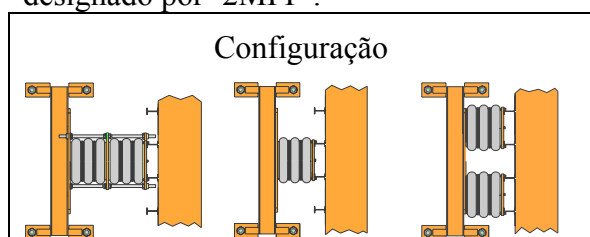


Fig. 10 – Estimativa da frequência natural do sistema de simulação para as três configurações e diferentes pressões iniciais.

Como se pode observar, o sistema de simulação permite modelar experimentalmente estruturas com frequências naturais compreendidas na gama de 0,75 Hz a 2,9 Hz. Para frequências mais baixas, tal como foi especificado originalmente, está em estudo uma solução modificada que adiciona a cada ramo do circuito pneumático um reservatório de ar de forma a aumentar o volume inicial.

## 5- CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Com o objectivo de proceder à validação experimental do comportamento do sistema de simulação, procedeu-se a um conjunto alargado de ensaios. Numa primeira fase efectuaram-se ensaios em vibração livre e posteriormente em regime forçado na plataforma sísmica.

### 5.1 - Descrição dos ensaios

O sistema de simulação foi instalado na plataforma sísmica com as molas de ar na disposição '2MPS'. Até ao momento, esta foi a única configuração ensaiada visto ser aquela que melhor reproduz as condições necessárias para a realização dos estudos de investigação em curso. Contudo, em momento oportuno, serão ensaiadas as restantes configurações.

Como se pode ver na figura 11, o sistema de simulação foi instrumentado com: i) três transdutores de deslocamento (LVDT - Linear Variable Differential Transformer) para medir o movimento



relativo entre a plataforma e o sistema de simulação; ii) dois acelerómetros (PCB) que medem as acelerações do sistema; iii) dois transdutores de pressão (Druck PDCR 920) que medem a pressão em cada ramo do circuito pneumático; o condicionamento de sinal dos transdutores foi efectuado por um condicionador para extensometria (HBM KWS3082A). Por seu lado, a plataforma sísmica foi instrumentada com um transdutor de deslocamentos (LVDT) e um acelerómetro (PCB) para medição do deslocamento e aceleração da plataforma relativamente ao fixe. Toda a instrumentação atrás referida foi ligada a um sistema de aquisição de dados (National Instruments SCXI), sendo a interface com o utilizador e a gravação de dados assegurada por um computador. Estava igualmente alojado neste computador a fonte do sinal de excitação da plataforma sísmica.

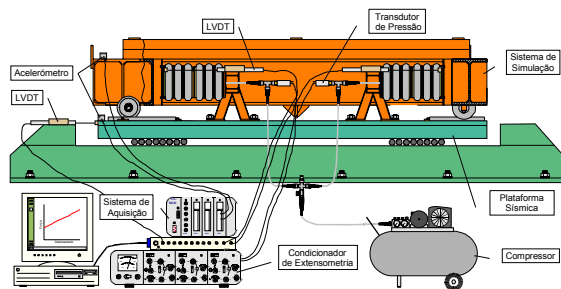


Fig. 11 – Representação esquemática da montagem utilizada para a caracterização do Sistema de Simulação.

O sistema de simulação foi ensaiado para várias condições iniciais, que correspondem a uma altura de mola inicial de 250 mm e diferentes pressões iniciais: de 1,5 até 4,5 bar com um incremento de 0,5 bar. Foram realizados dois tipos de ensaios: i) em vibração livre; ii) em vibração forçada.

No primeiro, a plataforma foi imobilizada e o quadro móvel do sistema foi levado próximo da amplitude máxima, sendo depois libertado para vibrar livremente.

No segundo, foi imposta ao nível da plataforma sísmica uma acção do tipo ruído branco gerada com recurso ao software LNEC-SPA (Mendes e Costa 2007), com conteúdo em frequência entre 0.5 Hz e 1.5 Hz, uma duração de 300 s e

uma amplitude máxima de 10 mm. Cada caso de ensaio foi submetido a 20 séries independentes de ruído branco.

## 5.2 - Ensaio em vibração livre

Os resultados deste ensaio visam obter uma primeira estimativa da frequência natural e amortecimento do sistema de simulação.

Apresentam-se nas figuras 12 e 13, um exemplo dos históricos de pressão nas molas e deslocamento registados durante um ensaio de vibração livre com uma pressão inicial de 2,7 bar.

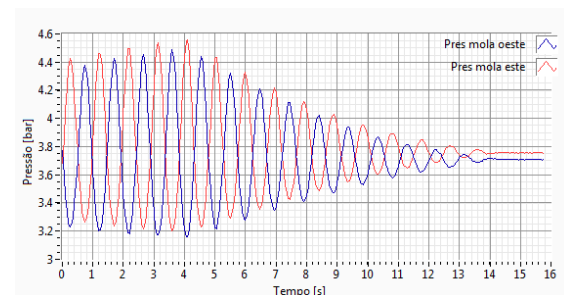


Fig. 12 – Histórico da pressão nas molas para um ensaio de vibração livre com uma pressão inicial de 2,7 bar.

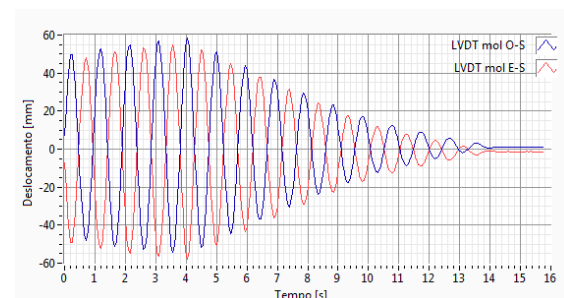


Fig. 13 – Histórico dos deslocamentos relativos entre a plataforma sísmica e o quadro móvel para um ensaio de vibração livre com uma pressão inicial de 2,7 bar.

Como se pode ver a partir das figuras 12 e 13, tanto a pressão no interior das molas como o deslocamento entre as suas extremidades apresentam curvas em oposição de fase, resultado do modo de instalação dos LVDT cujo sentido positivo encontra-se em fase com a mola do lado correspondente e pela deformação simétrica a que cada mola é sujeita. Mais importante é notar que a não linearidade do comportamento das molas com a deformação não é muito significativa para os níveis de deformação aplicados.

A partir das curvas pode-se também observar um decaimento em amplitude, devido à presença de forças dissipativas ao nível das molas de ar e dos pares de rolamento e guiamento do quadro móvel. Com recurso ao software LNEC-SPA foram determinadas as frequências naturais e amortecimentos com base no método do decremento logarítmico. Em relação ao presente exemplo obtiveram-se os seguintes valores de frequência natural e amortecimento:  $f_n = 0,92$  Hz e  $\xi = 7,0$  %.

Na tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos da identificação das curvas de aceleração nas condições iniciais referidas. São também mencionados os valores obtidos com o modelo analítico bem como os respectivos erros. O modelo analítico que melhor se ajusta aos resultados experimentais compreende um expoente da transformação politrópica igual a 1,06. Como se poderá ver adiante, este valor é ligeiramente inferior ao obtido com os resultados dos ensaios em vibração forçada. Este facto deve-se essencialmente à menor duração do ensaio e consequente menor geração de calor no interior da mola, traduzindo-se numa transformação mais próxima da transformação isotérmica.

Tabela 2 – Resultados da identificação das curvas em termos de frequência natural e amortecimento – comparação com os resultados do modelo analítico para as várias situações testadas.

$P_i$ (bar)	$f_{\text{analit.}}$ (Hz)	$f_{\text{exp.,v.livre}}$ (Hz)	$e_{\text{v.livre}}$ (%)	$\xi_{\text{exp.,v.livre}}$ (%)
1,5	0,72	0,75	3,7	7,9
2,1	0,82	0,83	1,1	7,4
2,5	0,89	0,89	0,0	6,7
2,9	0,95	0,95	0,2	6,5
3,5	1,02	1,02	0,2	6,4
4,0	1,09	1,09	0,1	6,6
4,5	1,15	1,13	1,9	7,2

A partir da tabela 2 verifica-se que o modelo se adapta adequadamente aos resultados obtidos, pois o erro relativo à frequência natural situa-se abaixo dos 4 %. Note-se igualmente, que o amortecimento obtido se situa dentro da gama inicialmente especificada. No entanto, para efeitos de utilização do sistema de simulação, é razoável que o modelo analítico seja ajustado a resultados próximos da utilização real. Esse cenário é

o de vibração forçada tal como se apresenta na secção seguinte.

### 5.3 - Ensaio em vibração forçada

Em relação aos ensaios em vibração forçada, foram registadas as mesmas grandezas referidas no ensaio de vibração livre e também o deslocamento e aceleração na plataforma sísmica. Na figura 14 mostra-se um exemplo da acção de ruído branco imposta na plataforma no período de tempo considerado, a qual servirá de referência para determinação da função de resposta em frequência. Nas figuras 15 e 16 mostram-se, igualmente a título de exemplo, a evolução da pressão nas molas e deslocamento para uma pressão inicial de 2,7 bar. Note-se que estes últimos reportam uma pequena amostra do intervalo de tempo considerado de modo a observar-se detalhadamente as evoluções das curvas.

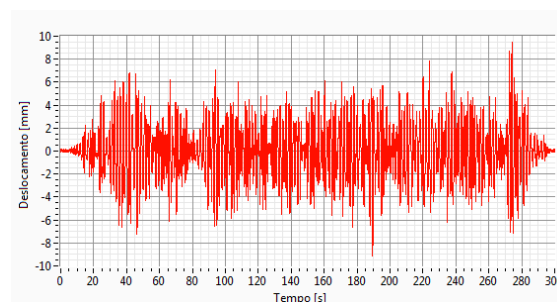


Fig. 14 – Exemplo do histórico dos deslocamentos impostos na plataforma sísmica no ensaio de vibração forçada.

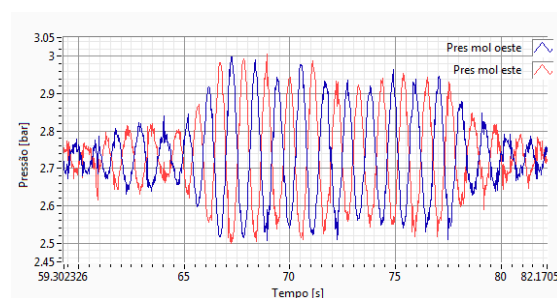


Fig. 15 – Histórico da pressão nas molas no ensaio de vibração forçada para uma pressão inicial nas molas de 2,7 bar.

Tal como nos ensaios de vibração livre, também neste caso as curvas de deslocamento e pressão associados a cada mola estão em oposição de fase.

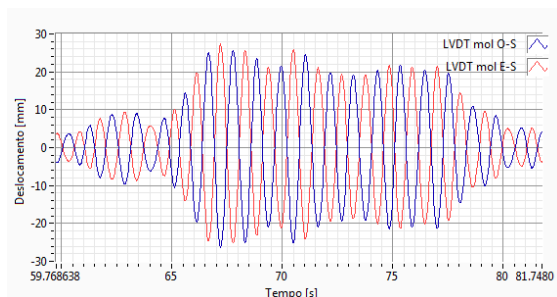


Fig. 16 – Histórico dos deslocamentos relativos entre a plataforma sísmica e o quadro móvel no ensaio de vibração forçada para uma pressão inicial nas molas de 2,7 bar.

A frequência natural e amortecimento foram obtidos a partir da função de resposta em frequência que relaciona a aceleração do quadro móvel e a aceleração da plataforma sísmica. Essas propriedades foram também determinadas com recurso ao software LNEC-SPA utilizando um método de selecção de picos (peak-picking) referido por Bendat e Piersol (2000). Mostra-se na figura 17 a função de resposta em frequência relativa à pressão inicial de 2,7 bar da qual foram determinadas as propriedades modais. A frequência natural e amortecimento obtidos foram:  $f_n = 0,93$  Hz e  $\xi = 6,7$  %.

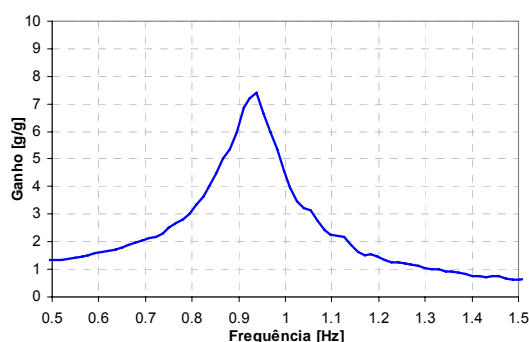


Fig. 17 – Função de resposta em frequência da aceleração do quadro móvel em relação à aceleração da plataforma sísmica para uma pressão inicial nas molas de 2,7 bar.

Na tabela 3 apresentam-se os resultados obtidos da identificação das funções de resposta em frequência nas condições iniciais referidas. São também mencionados os valores obtidos com o modelo analítico bem como os respectivos erros. O modelo analítico que melhor se ajusta aos resultados experimentais compreende, neste caso, um expoente da transformação politrópica igual a 1,14.

Tabela 2 – Resultados da identificação das FRF em termos de frequência natural e amortecimento – comparação com os resultados do modelo analítico para as várias situações testadas.

$P_i$ (bar)	$f_{analit.}$ (Hz)	$f_{exp.,v. forc.}$ (Hz)	$e_{v. forc.}$ (%)	$\xi_{exp.,v. forc.}$ (%)
1,5	0,76	0,76	0,3	8,5
2,1	0,85	0,83	1,9	8,1
2,5	0,92	0,91	1,2	7,2
3,0	0,99	0,98	0,9	6,8
3,5	1,06	1,06	0,0	6,4
4,1	1,13	1,15	1,9	6,4
4,6	1,19	1,23	3,2	6,1

Conforme se pode ver na tabela 3, também neste caso o modelo reproduz razoavelmente os resultados experimentais, pois o erro relativo à frequência natural situa-se abaixo dos 3,5 %. Note-se, igualmente, que o amortecimento obtido situa-se dentro da gama inicialmente especificada. No entanto, não é por enquanto um parâmetro que possa ser ajustado no sistema de simulação.

## 6- APLICAÇÕES

O presente sistema de simulação tem vindo a ser utilizado em ensaios para a avaliação do efeito dissipativo de dispositivos passivos para mitigação de vibrações do tipo TLD (tuned liquid dampers). Esta actividade tem sido realizada no âmbito de uma tese de doutoramento na área dos sistemas de absorção de vibrações na protecção sísmica de estruturas, em que a componente experimental comportou a realização de estudos paramétricos na plataforma sísmica equipada com o sistema de simulação sobre o qual foram montados os dispositivos do tipo TLD em estudo. Foram já realizados ensaios com TLD constituídos por reservatórios rectangulares e circulares. Na figura 18 mostra-se uma fotografia da montagem do sistema de simulação com um conjunto de TLDs do tipo rectangular.



Fig. 18 – Aspecto geral da montagem para ensaio com vista à realização de estudos paramétricos: plataforma sísmica, sistema de simulação e conjunto de TLDs rectangulares.

## 7- CONCLUSÕES

Procedeu-se à descrição de um sistema mecânico do tipo oscilador com um grau de liberdade com características dinâmicas ajustáveis que foi concebido para simular o comportamento dinâmico de estruturas com frequências naturais compreendidas entre 0,7 e 2,9 Hz.

Efectuou-se um conjunto alargado de ensaios experimentais visando a validação do modelo analítico de comportamento mecânico das molas de ar utilizadas como elemento elástico do simulador. Os resultados obtidos permitiram concluir que o modelo estabelecido representa adequadamente o seu comportamento em regime de funcionamento quase-estático.

Os ensaios realizados sobre o sistema de simulação permitiram verificar a validade do modelo em condições de regime dinâmico dentro da gama de funcionamento inicialmente especificada para o equipamento, nomeadamente a gama de frequências fundamentais e amortecimento das estruturas que se pretendem simular.

## 8- REFERÊNCIAS

- Bendat, J.S., Piersol, A.G., Random Data – Analysis and Measurement Procedures, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2000, USA.
- Falcão, M. J., Oliveira, F., Campos Costa, A. E Morais, P, Ensaios Experimentais de Um Sistema de Redução de Vibrações para Protecção Sísmica de Estruturas, ICM 2007 - A Instrumentação Científica e a

Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, 5 de Novembro de 2007, LNEC, Lisboa.

Falcão Silva, M. J. e Campos Costa, A., Experimental Studies on the Characteristics of Tuned Liquid Dampers for Reducing Vibration in Structures, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.

Firestone, Airstroke Actuators & Airmount Isolators – Metric Engineering Manual and Design Guide, Firestone Industrial Products Company, 1997.

Lopes, M., Sismos e Edifícios, 1ª edição, Edições Orion, Amadora, 2008.

Oliveira, F., Morais P., Oscilador com Um Grau de Liberdade com Características Dinâmicas Ajustáveis – Estudo e Projecto – Relatório 403/06 – CIC/NSM, LNEC, 2006.

Palma, P., Cruz, H., Oliveira, F. e Morais, P., Sistema para Ensaio de Ligações Estruturais em Madeira, ICM 2007 - A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, 5 de Novembro de 2007, LNEC, Lisboa.

Soong, T.T., Spencer Jr., B.F., Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the practice, Engineering Structures 24, pág. 243–259, 2002.