



SISTEMAS SEMI-ATIVOS NA PROTEÇÃO SÍSMICA DE ESTRUTURAS

Fernando Oliveira¹, Paulo Morais² e Afzal Suleman³

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, fvoliveira@lnec.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, pmorais@lnec.pt

³ Instituto de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico (IDMEC/IST), Lisboa, suleman@ist.utl.pt

Palavras-chave: Mitigação de vibrações; Controlo semi-activo; Proteção Sísmica.

Sumário: Nesta comunicação apresentam-se algumas soluções para a proteção sísmica de estruturas sendo dado especial ênfase às soluções que recorrem a sistemas semi-ativos. O isolamento de base com recurso a sistemas semi-ativos do tipo viscoso é analisado e discutido. O controlo do dispositivo é efetuado com um controlador sky-hook e com um algoritmo de controlo para variação contínua do amortecimento. A síntese do controlador, baseada no critério de adição de amortecimento, é proposta, apresentada e analisada. Dois modelos matemáticos simplificados do comportamento do sistema de isolamento e superestrutura são considerados nas simulações numéricas efetuadas. Os resultados das simulações são apresentados em termos de espectro de resposta, demonstrando que o sistema de isolamento com dispositivos semi-ativos é eficaz para frequências naturais abaixo dos 2 Hz e no isolamento de superestruturas com frequências acima dos 0,8 Hz. Esta solução revela-se em geral melhor que a do sistema passivo clássico e pelo facto de se basear no controlo colocado apresenta vantagens no desenvolvimento tecnológico dum dispositivo semi-ativo autónomo.

1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional nas cidades e nas áreas metropolitanas bem como o aumento das taxas de urbanização que se têm verificado nos últimos anos tem levado ao aumento das construções em altura. É esperado que esses indicadores continuem a aumentar nos próximos anos. No dimensionamento dessas construções a verificação às ações do vento e às ações sísmicas poderá ter de ser considerada em certas zonas. No que se reporta à ação sísmica em particular, a sismicidade histórica e mais recentemente a sismicidade instrumental permitem classificar a perigosidade sísmica do território Nacional a nível mundial como moderada. Contudo, dada a insuficiência na resistência sísmica das construções, o que torna a vulnerabilidade sísmica alta, o risco sísmico é elevado nalgumas regiões; SPES & GECORPA (2001).

A regulamentação atual face às ações sísmicas impõe um nível mínimo de desempenho das estruturas para um nível pré-definido de ação sísmica. Quando sujeitas a ações violentas (sismos raros), pretende-se: i) que a estrutura não colapse, aceitando-se portanto alguns danos estruturais; ii) e que se salvguarde a vida dos ocupantes. Já para ações de baixa intensidade (sismos frequentes) impõe-se como condição a ausência de danos estruturais significativos. A abordagem tradicional baseia-se portanto na exploração do comportamento dúctil das estruturas obrigando a que sejam admitidos danos que se desenvolvem nas denominadas rótulas plásticas. No entanto algumas estruturas não dispõem de ductilidade suficiente para a aplicação desta abordagem e, em certo tipo de estruturas não é aconselhável o dimensionamento com base no comportamento não linear. Aqui inserem-se as estruturas de importância vital para a proteção civil tais como hospitais, quartéis de bombeiros, centrais de geração de energia e outras. A par disto, na generalidade das construções põe-se também a tónica nas repercussões económicas pelo fato das estruturas poderem ficar inoperacionais. Foi nesse

sentido que se desenvolveram novas técnicas de proteção sísmica para as estruturas que são classificadas conforme se indica na figura 1; Lopes (2008).

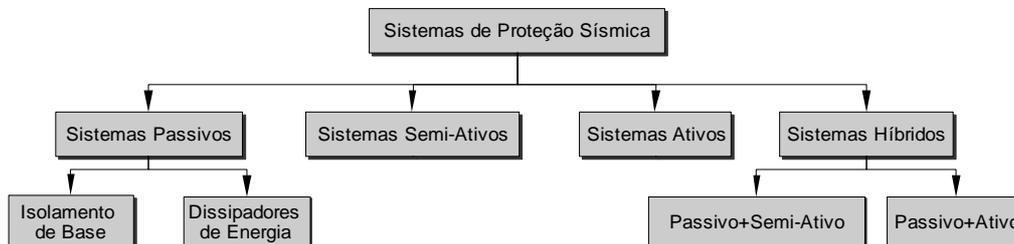


Figura 1: Sistemas de Proteção Sísmica para edifícios, pontes e viadutos.

Das várias soluções para a proteção sísmica uma das que tem merecido atenção por parte da comunidade científica e que se mostra promissora é o conceito de proteção Semi-Activo (SA). A proteção sísmica baseada em sistemas SA consiste em dotar a estrutura com um conjunto de sensores, dispositivos de actuação SA, controladores e ou algoritmos de controlo, de tal forma interligados entre si e com a estrutura, que contribuem para melhorar o desempenho estrutural desta. Os sensores são acelerómetros, transdutores de deslocamento e transdutores de força que permitem observar as acelerações, os deslocamentos relativos e a força respetivamente. Quanto aos dispositivos de actuação SA, que não são mais do que dispositivos passivos com características que podem ser alteradas em tempo real, várias soluções têm sido testadas e concretizadas: i) dispositivos para modificação da rigidez; ii) amortecedores viscosos; iii) amortecedores baseados em fluidos reológicos (eletro-reológico e magneto-reológico); iv) amortecedores de atrito; v) absorvor dinâmico (AD SA); vi) amortecedor de liquido sintonizado (ALS SA). Por fim, os controladores e algoritmos de controlo baseiam-se em estratégias de controlo e sequências de instruções que visam determinar a variável de controlo adequada que altera a característica do dispositivo SA em tempo real e em função dos resultados das leituras nos sensores, por forma a que sejam atingidos os objetivos de controlo; Symans & Constantinou (1999). Na figura 2 ilustram-se alguns exemplos de aplicações deste tipo de soluções em edifícios com estrutura fixa e com estrutura isolada (sistema híbrido).

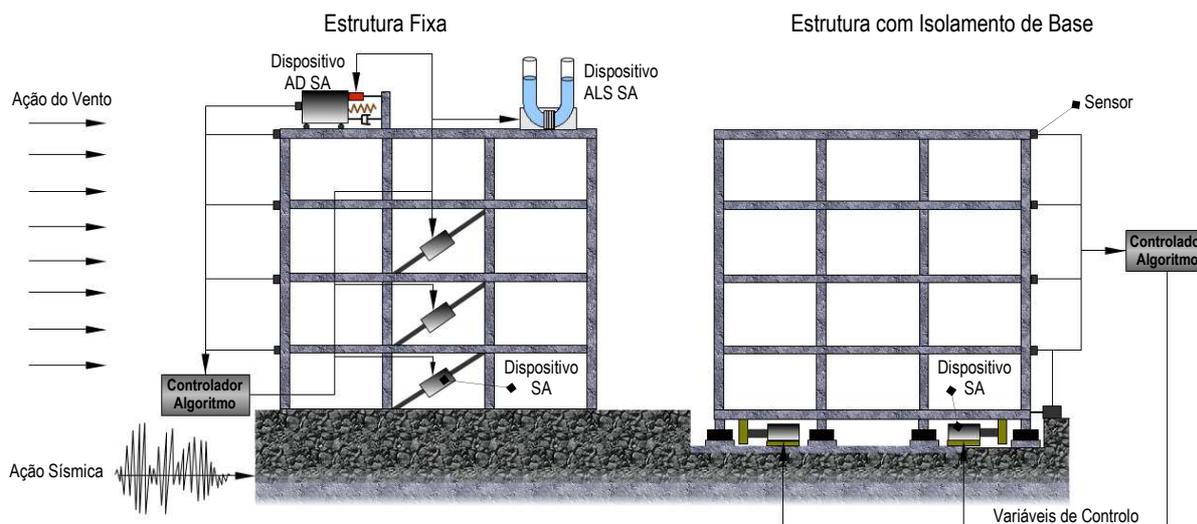


Figura 2: Desenho esquemático com alguns dispositivos SA instalados.

No que se refere ao desempenho estrutural e em particular no caso de edifícios, pretende-se: i) reduzir os deslocamentos entre pisos por forma a não ocorrerem danos estruturais; ii) reduzir as acelerações para proteger equipamentos sensíveis existentes nos edifícios de importância vital (classe IV do Eurocódigo 8) e também para aumentar o conforto humano; Kelly (1999).

Uma solução para a proteção sísmica de edifícios que tem vindo a ser aplicada um pouco por todo mundo é o isolamento de base. Esta solução apresenta como principais vantagens a redução de acelerações e deslocamentos relativos da superestrutura e portanto também a redução dos esforços, mas, por outro lado tem como contrapartida o aumento dos deslocamentos relativos ao solo. Pretende-se também que esta variável seja minimizada o mais possível uma vez que tem influência no tipo de aparelhos de apoio a considerar e nas ligações flexíveis para os bens essenciais (nomeadamente água, electricidade, gás e comunicações). Para minimizar esse efeito é referido também o aumento de amortecimento ao nível da base com dissipadores de energia; Lopes (2008). No entanto o aumento de amortecimento não é tão eficiente na redução das respostas de forma generalizada levando por vezes mesmo ao aumento das acelerações e até ao dano estrutural no caso de ações sísmicas próximas. É por isso que a solução híbrida (sistemas SA com isolamento de base) se tornou numa opção a considerar; Shook et al. (2007).

Nesta comunicação serão apresentadas algumas estratégias e algoritmos para controlo semi-ativo de edifícios com isolamento de base sujeitos a ações sísmicas. Resultados de simulações numéricas considerando edifícios típicos serão apresentados tendo em conta duas ações sísmicas geradas artificialmente (as mais severas do tipo 1 e 2). Efectuam-se comparações com a estrutura original e com sistemas passivos semelhantes.

2. MITIGAÇÃO DE VIBRAÇÕES COM RECURSO A SISTEMAS SEMI-ATIVOS

O objetivo de qualquer sistema adicional seja passivo, ativo, semi-ativo (SA) ou híbrido, que se associa à estrutura (sistema), neste caso o edifício, é que o desempenho seja globalmente melhorado. O desempenho poderá ser medido em termos de redução da resposta da estrutura com o sistema adicional em relação à estrutura original.

A solução que se apresenta neste trabalho consiste numa solução híbrida dum sistema de isolamento de base mais um dispositivo semi-ativo instalado ao nível da base (figura 3). A superestrutura será assim construída num sistema de isolamento de base composto por uma massa rígida assente em aparelhos de apoio. Entre essa base e o solo serão instalados os dispositivos SA adicionais. Como uma das soluções para controlo do dispositivo SA se baseia no controlo colocado (pois a ação de controlo, neste caso a ação dissipativa, é aplicada nos mesmos pontos onde são efetuadas as medições das respostas necessárias para controlo do dispositivo), facilita o desenvolvimento tecnológico duma aplicação prática, visto que o próprio dispositivo pode ser autónomo e vir já apetrechado com capacidade de leitura e decisão embebidas.

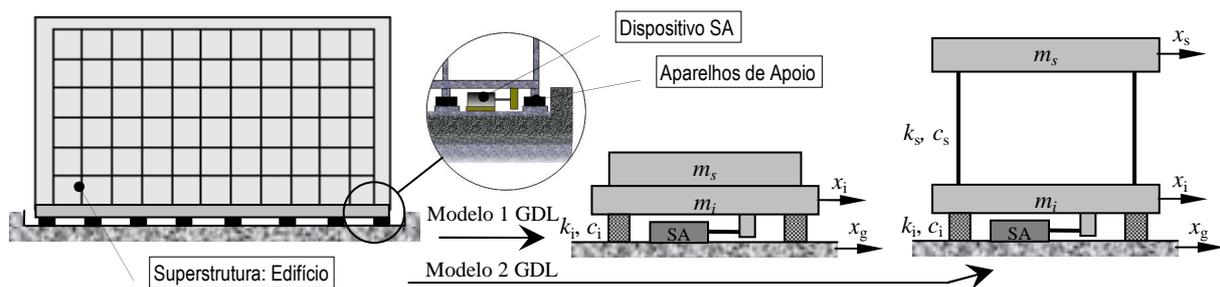


Figura 3: Desenho esquemático do sistema híbrido (superestrutura, edifício com isolamento de base e dispositivo SA) e dos modelos considerados (1 e 2 GDL).

Atendendo ao objetivos em termos de desempenho estrutural e em particular ao primeiro (redução dos deslocamentos relativos entre pisos para a não ocorrência de danos estruturais), fica subjacente que a superestrutura se deve manter no regime elástico. É portanto razoável admitir um modelo linear para a superestrutura representado pelas matrizes de massa M_e , rigidez K_e e amortecimento viscoso C_e . Quanto ao sistema de isolamento este tem em geral um comportamento não linear por força do comportamento mecânico dos aparelhos de apoio. Contudo, numa primeira aproximação e mesmo em certos casos em que se considerem determinados materiais é razoável considerar um modelo massa m_i , mola k_i e amortecedor c_i linear; Morales (2003). O modelo global pode ser assim obtido acoplando os dois subsistemas anteriores e é representado pelas matrizes de massa M , rigidez K e amortecimento viscoso C , sendo descrito por:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{x}}_{rg} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{x}}_{rg} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_{rg} = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{I}_{n,1} \cdot \ddot{x}_g + \mathbf{G} \cdot \mathbf{f} \quad (1)$$

onde: \mathbf{x}_{rg} é o vetor de deslocamentos relativos de cada piso em relação ao solo; $\mathbf{I}_{n,1}$ é um vetor coluna unitário; \mathbf{G} é o vetor da localização da ação dissipativa, que no presente caso é um vetor coluna em que o primeiro termo é unitário e os restantes são nulos; \mathbf{f} é o vetor de entradas controladas, neste caso com uma só entrada, que é a força gerada pelo dispositivo semi-ativo. Para avaliar o desempenho das estruturas com isolamento de base e dispositivos SA dois modelos foram considerados: i) modelo de um grau de liberdade (1 GDL), em que a superestrutura é considerada como um corpo rígido; ii) modelo com 2 GDL, em que a superestrutura é representada por um modelo de 1 GDL. Neste segundo caso a superestrutura é representada por um modelo equivalente massa m_s , rigidez k_s e amortecimento c_s ; (figura 3).

De entre os vários dispositivos SA mencionados o amortecedor viscoso de característica variável foi considerado para a variação em tempo real do amortecimento na base. O dispositivo é essencialmente um amortecedor viscoso clássico com um by-pass entre as câmaras para controlo da característica. Uma solução corrente compreende um cilindro hidráulico com uma haste guiada nas cabeças do cilindro e provida dum êmbolo. A ligação entre as duas câmaras é efetuada pela folga entre o cilindro e o êmbolo e também pela ligação hidráulica pelo exterior. Esta última está provida dum válvula para controlo do caudal entre as duas câmaras; veja-se um desenho esquemático na figura 4. Sob certas condições o comportamento do dispositivo é aproximadamente linear sendo por isso razoável admitir uma relação linear para o comportamento mecânico do dispositivo:

$$\mathbf{f} = -c_v \cdot \mathbf{v}, \quad c_{v \min} \leq c_v \leq c_{v \max} \quad (2)$$

em que: c_v é o coeficiente de amortecimento viscoso, dependente da abertura da válvula e que está limitado entre um valor mínimo e máximo; e \mathbf{v} é a velocidade da haste em relação ao corpo (cilindro); o sinal negativo decorre da ação ser dissipativa.

Quanto ao controlo dos dispositivos do tipo semi-ativo duas estratégias podem ser consideradas: i) controlo bang-bang ou on-off, adequado para utilização com válvulas de solenoide que funcionam em regime on-off, pelo que a variável de controlo, neste caso o amortecimento (ou a entrada elétrica na válvula que estará relacionada com este), apenas pode tomar um valor mínimo ou máximo; ii) controlo por realimentação de força, em que a variável de controlo é determinada tendo em conta a força desejada obtida a partir de um controlador sintetizado, e a força aplicada (medida ou não). Os anéis de controlo simplificados são os que se apresentam na figura 5.

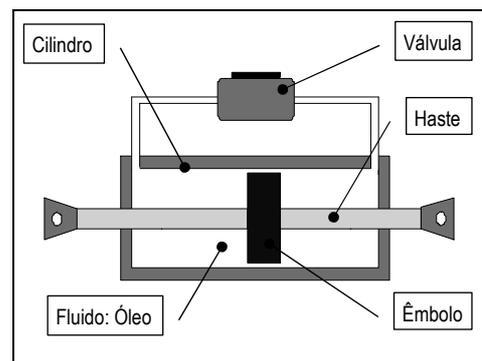


Figura 4: Desenho esquemático dum amortecedor viscoso semi-ativo.

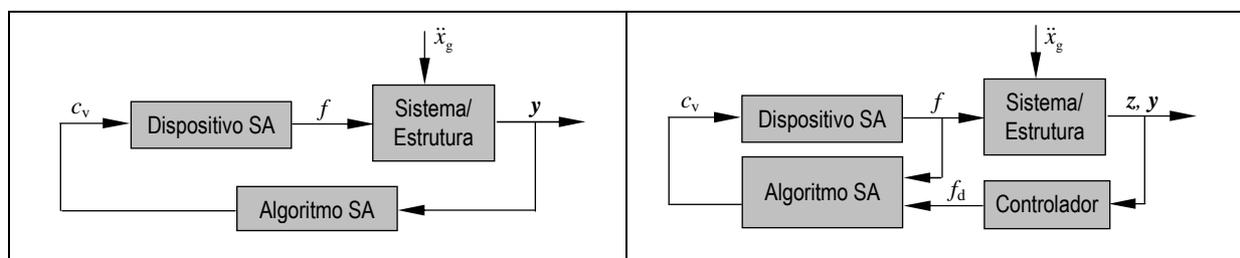


Figura 5: Estratégias de controlo: controlo bang-bang (esquerda); controlo por realimentação em força (direita).

O algoritmo de controlo é por sua vez consumado numa lei de controlo que irá determinar a variável de controlo em tempo real que melhor permite atingir os objetivos pré-estabelecidos (desempenho estrutural). No caso do controlo por realimentação essa lei seria idealmente a expressão inversa do comportamento do dispositivo tendo em conta as restrições em termos de amortecimento. Contudo, em certas aplicações a lei de comportamento do dispositivo é de tal forma complexa que se torna impossível obter uma expressão analítica

inversa explícita. É por isso que nalgumas situações se recorre a leis de controlo do tipo ‘seguimento de referência’, em que essa lei irá determinar a variável de controlo que minimiza o erro entre a força desejada f_d e aplicada f . Nesta situação os algoritmos podem ser do tipo on-off ou contínuo. Alguns dos algoritmos de controlo encontram-se descritos em várias publicações: Sadek & Mohraz (1998), Jansen & Dyke (2000), Preumont (2002) e Yoshida e Dyke (2004). Recentemente o autor desta comunicação fez uma comparação de resultados com diversas estratégias e algoritmos de controlo aplicadas aos modelos de 1 GDL e 2 GDL considerando um dispositivo semi-ativo do tipo viscoso. Esses resultados serão brevemente apresentados na conferência Controlo 2012 e na conferência mundial de engenharia sísmica (15WCEE); Oliveira et al. (2012a) e Oliveira et al. (2012b). Nesses trabalhos mostra-se que a melhor estratégia e algoritmo para controlo semi-ativo são o controlador integrador (também denominado ‘sky-hook’) com um algoritmo para variação contínua do amortecimento. Foi com base nesses resultados que se aprofundou o estudo dessa técnica que culminou numa metodologia para projeto de sistemas semi-ativos do tipo viscoso com controlador sky-hook.

O controlo sky-hook consiste numa realimentação de velocidade que é obtida a partir da integração da aceleração. No presente caso foi considerada a aceleração da base \ddot{x}_i para sintetizar o ganho do controlador g , tendo-se verificado que era a que conduzia a um melhor desempenho estrutural. A lei de controlo é assim dada por:

$$f_d = -g \int_0^t \ddot{x}_i(\tau) d\tau = -g \cdot \dot{x}_i \quad (3)$$

O critério para determinação do ganho do controlador baseia-se no princípio de adição de amortecimento ao sistema com um anel fechado ideal em que se considera que seria possível ter a ação à saída do controlador diretamente na entrada do sistema (figura 6 - esquerda). Nestas condições determina-se o ganho que mais amortece os pólos do sistema correspondentes ao primeiro modo de vibração. Desta forma consegue-se reduzir o pico de ressonância sem comprometer a atenuação nas frequências mais altas.

Por outro lado, a lei para o algoritmo de controlo é obtida invertendo a lei de comportamento do dispositivo considerando que se pretende no limite que a força desejada se aproxime da verificada ($f_d=f$):

$$c_v = -\frac{f_d}{\dot{x}_{ig}}, \quad c_{v \min} \leq c_v \leq c_{v \max} \quad (4)$$

em que \dot{x}_{ig} é a velocidade da base do sistema de isolamento relativamente ao solo. Como essa variável pode tomar valores nulos, pois trata-se de um problema de vibrações em que o sistema oscila em torno do ponto de equilíbrio, forçou-se também o algoritmo a prover valores de amortecimento mínimo c_{\min} sempre que a velocidade toma valores muito pequenos ($\approx 10^{-4}$ cm/s), para evitar a divisão por zero.

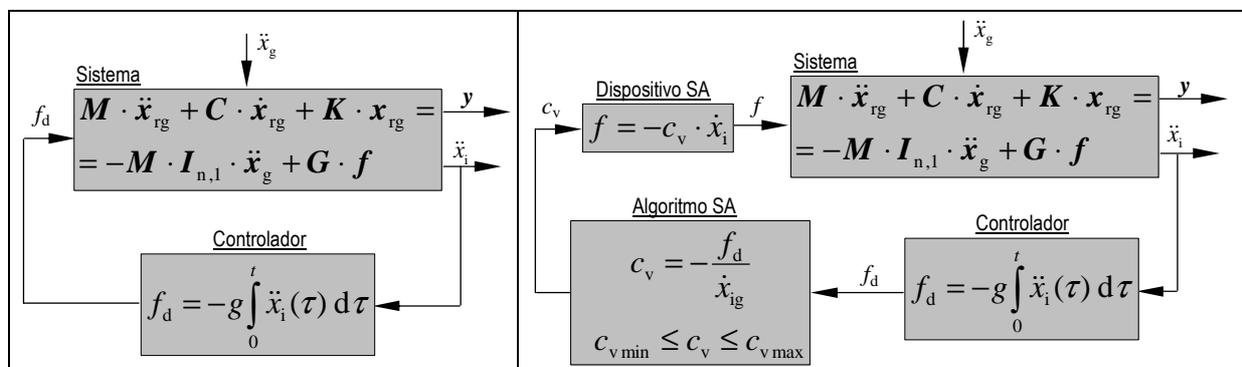


Figura 6: Anéis de controlo: para determinação do ganho do controlador (esquerda); do sistema completo (direita).

Na figura 6 (direita) apresenta-se o anel de controlo com as equações e leis consideradas para a estratégia de controlo proporcional integral (sky-hook) em conjunto com o algoritmo de controlo para variação contínua da variável de controlo, neste caso o coeficiente de amortecimento c_v , considerado nas simulações numéricas.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta secção apresentam-se os resultados de simulações numéricas efetuadas considerando o controlo semi-ativo de um dispositivo do tipo viscoso linear com amortecimento variável instalado ao nível do sistema de isolamento de base duma estrutura. Os modelos considerados são os referidos anteriormente: modelo de 1 GDL e o modelo de 2 GDL. As ações consideradas nas simulações foram sintetizadas a partir dos espectros de resposta do Eurocódigo 8. Duas séries foram geradas artificialmente a partir dos espectros de resposta mais severos para as ações do tipo 1 e 2. Foram considerados os espectros correspondentes ao solo do tipo D e escolheu-se um fator de importância das estruturas unitário (classe de importância II). As ações consideradas para as simulações foram: 1) ação do tipo 1 zona 1: EC8DNA11DIIlcel; 2) ação do tipo 2 zona 1: EC8DNA21DIIlcel. As séries consideradas apresentam-se na figura 7.

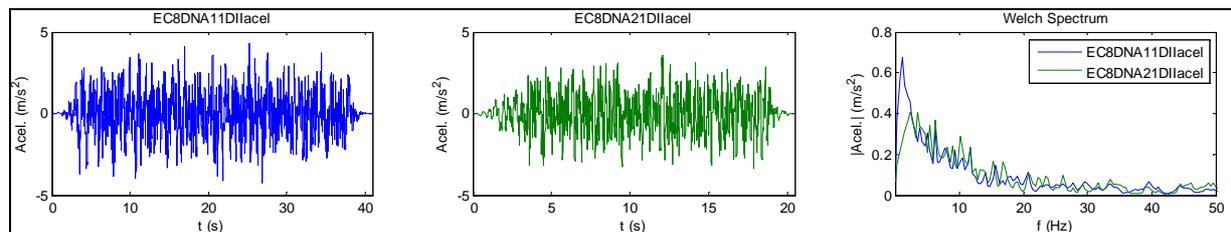


Figura 7: Ações consideradas nas simulações: série temporal da ação do tipo 1 zona 1, EC8DNA11DIIlcel (esquerda); série temporal da ação do tipo 2 zona 1, EC8DNA21DIIlcel (centro); espectros em frequência das duas ações (direita).

As simulações foram efetuadas em ambiente Matlab/Simulink e o desempenho foi avaliado em termos dos valores de pico das variáveis de interesse: deslocamentos relativos e acelerações. Os resultados serão apresentados em termos de espectros de resposta, pois pretende-se mostrar em que condições a solução proposta tem validade. Nesses gráficos serão apresentados os resultados da: i) estrutura original (sem controlo); ii) estrutura com amortecimento mínimo; iii) estrutura com amortecimento máximo; iv) da estrutura com o sistema semi-ativo. Os valores de amortecimento mínimo e máximo são aqueles em que o dispositivo semi-ativo irá variar em tempo real de acordo com a estratégia e algoritmo de controlo referidos: i) correspondente a 5 % de amortecimento adicional ao nível da base; ii) e o valor que amortece mais os pólos correspondentes ao primeiro modo de vibração.

3.1 Simulações no modelo com 1 GDL

Considera-se em primeiro lugar o sistema de 1 GDL por forma a ilustrar o metodologia para síntese do controlador SA. O sistema original considerado tem as seguintes características: frequência natural $f_i=0,5$ Hz (Período $T_i=2$ s) e fator de amortecimento $\zeta_i=6,4$ %, com uma massa $m_i+m_s=3750$ kg, rigidez $k_i=37,0$ kN/m e coeficiente de amortecimento $c_i=1,5$ kN s/m. O modelo que caracteriza o sistema (figura 3) é representado pela seguinte equação do movimento:

$$(m_i + m_s)\ddot{x}_{ig} + c_i \cdot \dot{x}_{ig} + k_i \cdot x_{ig} = -(m_i + m_s)\ddot{x}_g + f \quad (5)$$

em que $x_{ig}=x_i-x_g$ é o deslocamento relativo ao solo, x_i é o deslocamento do sistema de isolamento e x_g é o deslocamento do solo.

Pela análise do Lugar Geométrico das Raízes (LGR) da saída em aceleração na base \ddot{x}_i com integrador em relação à força f , pode ver-se que o ganho que conduz ao amortecimento crítico é $g=22,1$ kN s/m (figura 8). Este é também o valor de amortecimento máximo adicional para o sistema passivo. Pode ver-se também que a resposta em frequência do sistema (diagrama de Bode) é melhorada em termos de aceleração com o controlo embora em termos de deslocamento relativo seja influenciada nas baixas frequências.

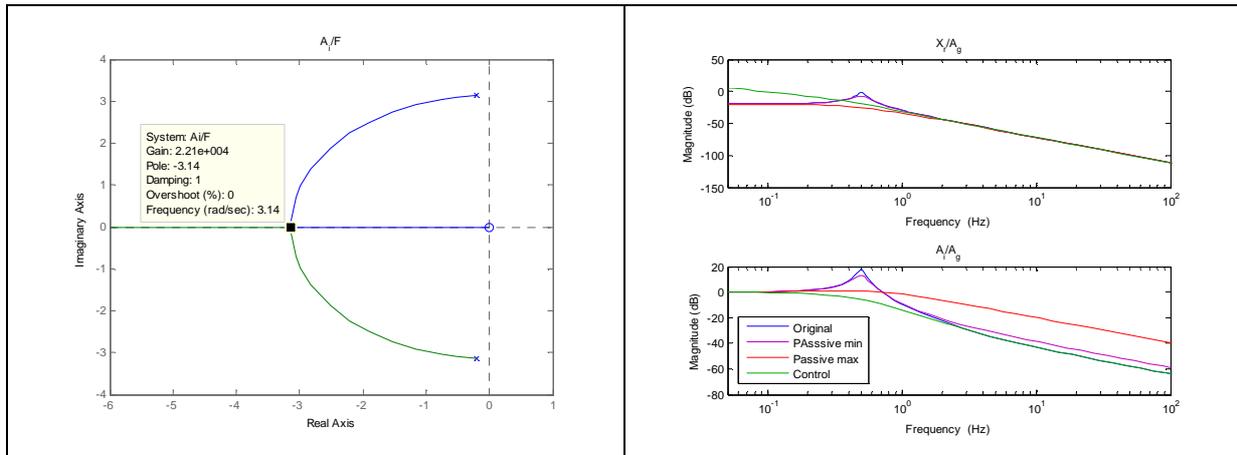


Figura 8: LGR da saída em aceleração na base com integrador em relação à força (esquerda) e resposta em frequência do sistema original (diagrama de Bode), com amortecimento passivo e SA em termos de deslocamento relativo e aceleração (direita) para o modelo com 1 GDL.

Depois de sintetizado o controlador procedeu-se à simulação numérica do sistema completo (anel de controlo da figura 6) e obtiveram-se as respostas no tempo. Na figura 9 mostra-se um exemplo da resposta no tempo e respetivos espectros em frequência dos sinais obtidos para a ação do tipo 1. A partir das respostas no tempo extraíram-se os valores de pico. Fazendo este procedimento para várias frequências do sistema de isolamento f_i (ou períodos T_i), obtêm-se os espectros de resposta.

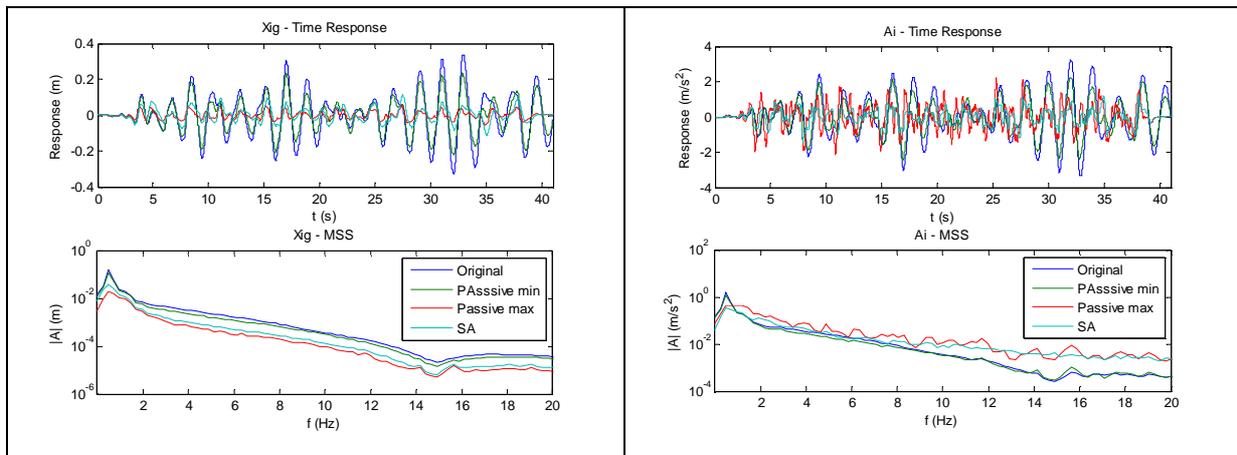


Figura 9: Resposta no tempo e em frequência dos sinais para a ação do tipo 1 do sistema original, passivo e SA com o modelo de 1 GDL.

Pode ver-se na figura 9 que introdução do sistema SA melhora a resposta em relação à estrutura original tanto em termos de deslocamento relativo como em aceleração. Contudo em termos de deslocamento relativo a estrutura com o sistema passivo com amortecimento máximo é a melhor mas apresenta uma resposta pior que a da estrutura com sistema SA em termos de aceleração. A solução SA apresenta assim a vantagem de ser a melhor em termos de aceleração. O desempenho inferior obtido com o sistema SA em termos de deslocamento relativo é assim um compromisso para manter as acelerações ao nível da superestrutura num nível mais reduzido.

A figura 10 mostra os espectros de resposta do sistema original, passivo e SA do modelo com 1 GDL. Como se pode ver as várias soluções adicionais incorporadas no sistema melhoram o seu desempenho em relação ao sistema original. Pode ver-se também que a estrutura com o sistema SA revela-se melhor em termos de acelerações para estruturas com períodos maiores que 0,5 s (ou seja, frequências inferiores a 2 Hz) mas com resultados em termos de deslocamentos relativos com um desempenho ligeiramente inferior à estrutura com o dispositivo passivo e amortecimento no valor máximo.

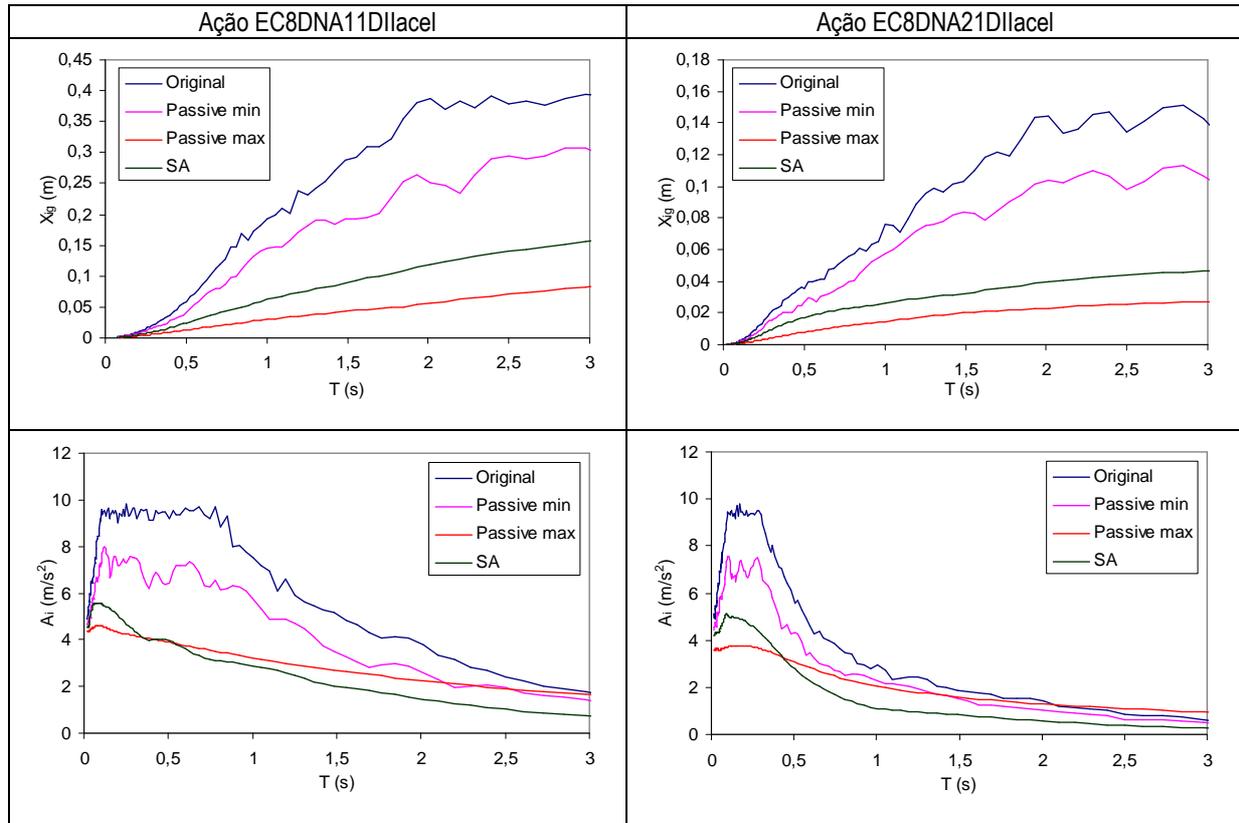


Figura 10: Espectros de resposta do sistema original, passivo e SA para o modelo de 1 GDL.

3.2 Simulações no modelo com 2 GDL

Tendo-se verificado que o sistema de isolamento com dispositivos SA é eficaz, analisou-se posteriormente um sistema de isolamento com uma frequência de isolamento fixa para avaliar em que superestruturas este seria uma solução mais eficaz. Analisou-se portanto a influência da frequência natural f_s (ou período T_s) nas respostas dos sistemas estruturais considerados. O sistema considerado tem as seguintes características: i) sistema de isolamento com frequência natural $f_i=0,5$ Hz (Período $T_i=2$ s) e fator de amortecimento $\zeta_i=6$ %; ii) estrutura com uma frequência natural $f_s=2$ Hz (Período $T_s=0,5$ s) e fator de amortecimento $\zeta_s=5$ %. De molde a determinar os parâmetros do modelo considerou-se a tipologia de edifícios de estrutura mista pórtico-parede, sendo a sua frequência fundamental determinada a partir de; RSA (1983):

$$f_1 = 16/n \quad (6)$$

em que n é o número de pisos. A frequência fundamental escolhida f_s corresponde portanto a um edifício típico com $n=8$ pisos. Assume-se que a massa do sistema de isolamento é idêntica à massa de cada piso e que o fator de participação em massa é unitário. Na verdade este fator será inferior à unidade e no caso duma estrutura em pórtico o fator de participação do primeiro modo será sempre o mais elevado. Contudo, o facto de se considerar igual à unidade vai conduzir a uma massa do sistema de isolamento de base ligeiramente superior à que se verifica na prática, o que de certa forma também é razoável admitir. As expressões para o sistema com um grau de liberdade vão assim permitir determinar os parâmetros espaciais do modelo:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_i}{m_i + m_s}}, \xi_i = \frac{c_i}{2 \cdot (m_i + m_s) \cdot \omega_1}, \omega_s = \sqrt{k_s / m_s}, \xi_s = \frac{c_s}{2 \cdot m_s \cdot \omega_s} \quad (7)$$

O modelo do sistema original com 2 GDL é assim caracterizado por: $m_i=469$ kg, $k_i=41,6$ kN/m, $c_i=1,6$ kN s/m, $m_s=3750$ kg, $k_s=592,2$ kN/m e $c_s=4,7$ kN s/m. O modelo que caracteriza o sistema (figura 3) é representado pelo seguinte sistema de equações representado em termos matriciais por:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{ig} \\ \ddot{x}_{sg} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{ig} \\ \dot{x}_{sg} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{ig} \\ x_{sg} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} f \quad (8)$$

em que $[x_{ig} \ x_{sg}]^T = [x_i - x_g \ x_s - x_g]^T$ são os deslocamentos relativos da base e da massa superior em relação ao solo. O deslocamento relativo entre pisos é então definido como $x_{si} = x_s - x_i$. As frequências e amortecimentos modais do sistema original são assim: $f_1 = 0,49$ Hz, $\zeta_1 = 5,6$ %; $f_2 = 6,2$ Hz, $\zeta_2 = 18,5$ %.

Pela análise do Lugar Geométrico das Raízes (LGR) da saída em aceleração na base \ddot{x}_i com integrador em relação à força f , pode ver-se que o ganho que conduz ao amortecimento crítico do primeiro modo de vibração é $g = 24,1$ kN s/m. Este valor amortece também razoavelmente o segundo modo de vibração (figura 11). Este é também o valor de amortecimento máximo adicional para o sistema passivo. Pode ver-se também que a resposta em frequência do sistema em termos de aceleração e deslocamento relativo ao nível da superestrutura é melhorado com o controlo, embora em termos de deslocamento relativo do sistema de isolamento seja influenciada nas baixas frequências.

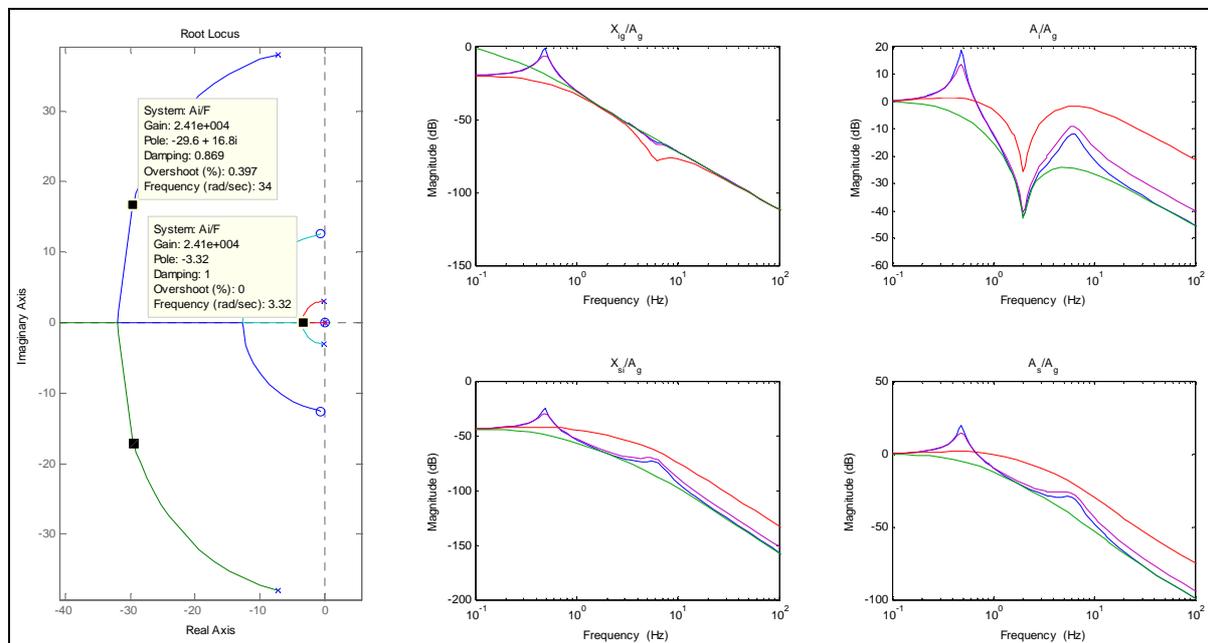


Figura 11: LGR da saída em aceleração na base com integrador em relação à força (esquerda) e resposta em frequência do sistema original, com amortecimento passivo e SA em termos de deslocamento relativos e acelerações (direita) para o modelo com 2 GDL.

Depois de sintetizar o controlador procedeu-se à simulação numérica do modelo completo (anel de controlo da figura 6). Na figura 12 mostra-se um exemplo da resposta no tempo e respetivos espectros em frequência dos sinais. Como se pode ver também neste caso o sistema SA melhora em geral a resposta da estrutura em relação ao sistema original tanto em termos de deslocamento relativo como em aceleração. Contudo, em termos de deslocamento relativo do sistema de isolamento o sistema passivo com amortecimento máximo é melhor mas apresenta uma resposta em termos de aceleração e deslocamento relativo entre pisos pior que a estrutura com sistema SA. Veja-se no espectro em frequência para a aceleração ao nível do sistema de isolamento que o sistema SA e mesmo o passivo com amortecimento no máximo perdem atenuação a partir dos 3 Hz, observando-se que a partir daí a estrutura original tem um desempenho melhor. Tal como anteriormente, o desempenho inferior da estrutura com o sistema SA em termos de deslocamento relativo é o compromisso assumido para manter as acelerações ao nível dos pisos e o deslocamento relativo entre pisos inferiores ao original, quando observados ao nível da superestrutura.

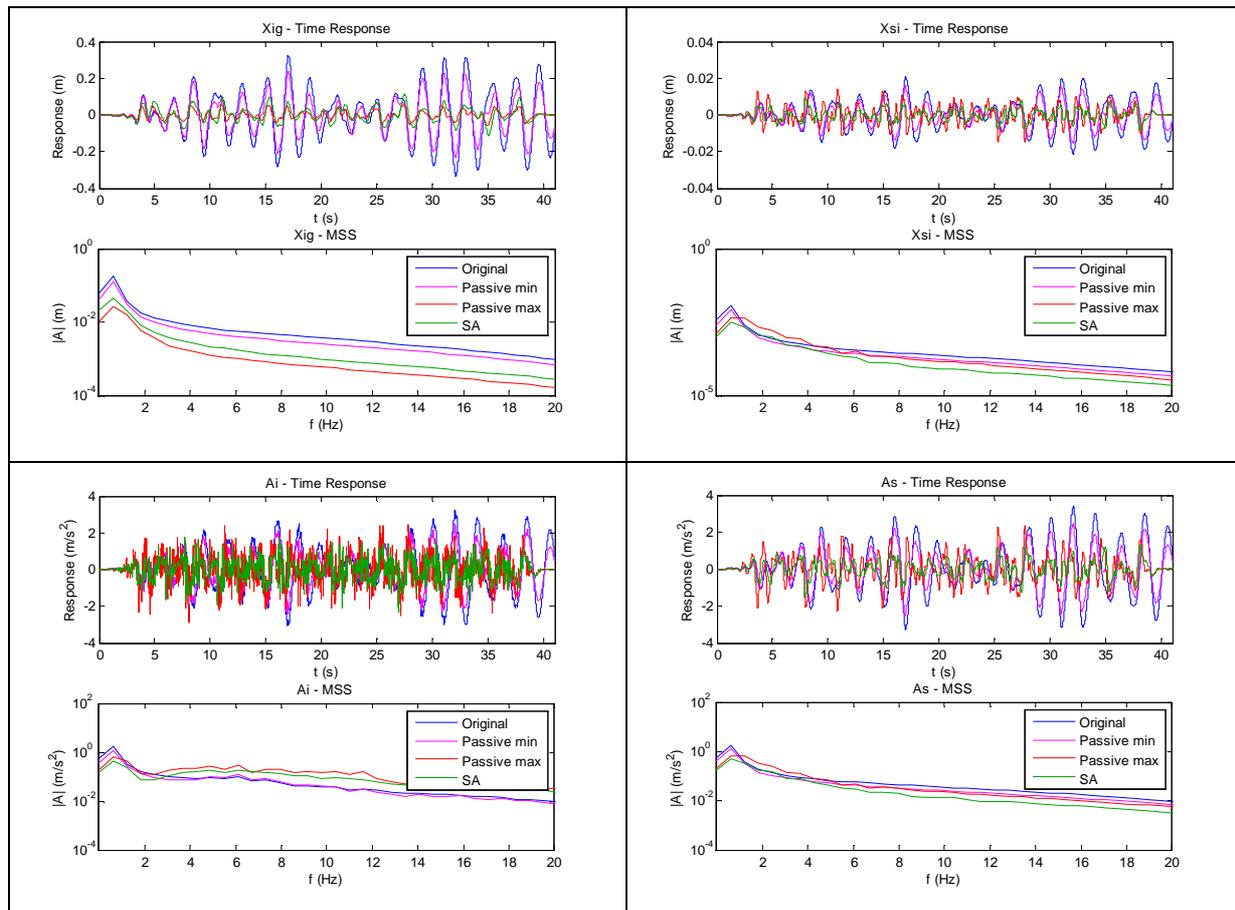


Figura 12: Resposta no tempo e respetivos espectros em frequência dos sinais para a ação do tipo 1 do sistema original, passivo e SA com o modelo de 2 GDL.

Os espectros de resposta foram então obtidos considerando o sistema de isolamento referido ($f_i=0,5$ Hz e $\xi_i=6$ %) e superestruturas com diferentes frequências naturais e fator de amortecimento fixo $\xi_s=5$ %. Na figura 13 apresentam-se os espectros de resposta do sistema original, passivo e SA com o modelo de 2 GDL para as duas ações consideradas. Os resultados mostram que a estrutura com o sistema SA é melhor em termos de deslocamentos relativos entre pisos e acelerações ao nível da superestrutura. Já em termos de acelerações ao nível do sistema de isolamento de base verifica-se que o sistema SA apesar de conduzir geralmente a desempenhos melhores que os da estrutura com o dispositivo passivo com amortecimento máximo, revela desempenhos inferiores aos da estrutura original para superestruturas com períodos de vibração superiores a 1 s, para ações do tipo 1, e superiores a cerca de 0,8 s para ações do tipo 2. Contudo há que ter em consideração que períodos de vibração altos já correspondem a estruturas muito altas, p. ex., $T_s=2$ s ($f_s=0,5$ Hz) corresponde a uma estrutura com cerca de 32 pisos, o que à partida não é a primeira opção para aplicação deste tipo de solução. Mas digamos que será dirigido para estruturas com períodos de vibração abaixo de 1,5 s. Neste caso pode ver-se que a solução com sistemas SA apresenta desempenho na generalidade melhor que a estrutura original quando a ação é do tipo 1. Para a ação do tipo 2, como já foi referido, essa gama de desempenho superior verifica-se para superestruturas com frequências superiores a cerca de 1,3 Hz (ou com períodos de vibração inferiores a 0,8 s). Este resultado é a consequência da conjugação de dois fatores: i) por um lado a ação do tipo 2 apresenta um conteúdo em frequência com maior energia em frequências ligeiramente mais altas (figura 7); ii) por outro, como se pôde ver nos espectros em frequência das respostas, o sistema SA perde capacidade de atenuação acima dos 3 Hz (aprox.), na aceleração do sistema de isolamento. No entanto pode verificar-se que a resposta às ações do tipo 2 com o sistema SA é inferior à resposta da estrutura original para a ação do tipo 1. Pode tomar-se esta a situação como majorante uma vez que a resposta da estrutura com o sistema SA a ações do tipo 2 é sempre inferior à resposta da estrutura original a ações do tipo 1, como se pode ver nos espectros de resposta da aceleração ao nível do sistema de isolamento na figura 13.

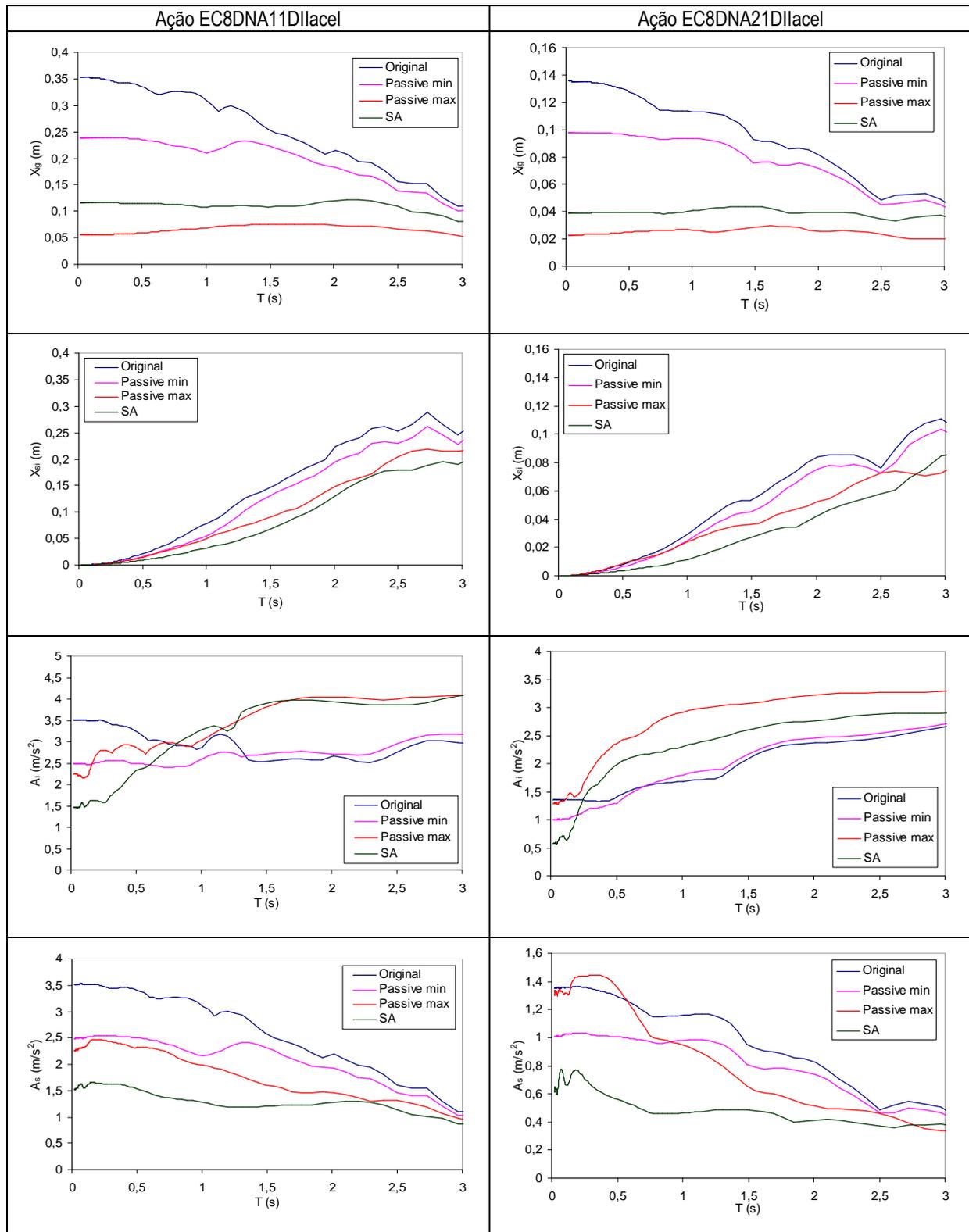


Figura 13: Espectros de resposta do sistema original, passivo e SA para o modelo com 2 GDL.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente comunicação fez-se uma breve introdução aos sistemas de proteção sísmica de estruturas e em particular aos sistemas semi-ativos. Este tipo de solução baseia-se na modificação em tempo real das

propriedades (caraterísticas) de dispositivos e ou materiais. São descritas algumas das soluções práticas existentes bem como as estratégias para controlar os dispositivos em tempo real. A solução que se propõe consiste na utilização de sistemas semi-ativos com dispositivos instalados em conjunto com sistemas de isolamento de base. Na sequência de trabalho efetuado anteriormente onde se havia verificado que a estratégia de controlo sky-hook com variação contínua de amortecimento é superior a outras técnicas utilizadas, procedeu-se a uma análise mais aprofundada desta solução para avaliar o seu campo de aplicação. A solução proposta tem potencialidade para ser exequível tecnologicamente como uma solução compacta visto que recorre à técnica de controlo colocado. Desta forma, o próprio dispositivo semi-ativo pode estar provido de sensores, capacidade de processamento e fonte de alimentação, que lhe fornece a capacidade de funcionar autonomamente. Note-se que a alimentação necessária será reduzida uma vez que pretende apenas comandar uma válvula para controlo da característica do dispositivo SA, alimentar os sensores e o sistema de controlo, podendo por isso recorrer a soluções de energia autónomas. Tendo em conta a solução proposta foram efetuadas simulações numéricas num modelo de 1 GDL e 2 GDL tendo-se verificado na generalidade melhorias em termos de desempenho (deslocamentos relativos e acelerações) em relação à estrutura original. Em relação à solução com tecnologia passiva verificam-se melhorias na generalidade das variáveis com excepção do deslocamento relativo ao nível da base. Contudo, é esse o compromisso que se assume para obter melhores desempenhos ao nível da superstrutura.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SPES (Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica) e GECORPA (Grémio das Empresas de Conservação e Restauro do Património Arquitectónico) – *Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado*. Encontro realizado na Ordem dos Engenheiros sobre o Programa para Mitigação do Risco Sísmico. Lisboa: Ordem dos Engenheiros, 2001.
- [2] Lopes, M. – *Sismos e Edifícios*. 1ª edição. Alfragide: Edições Orion, 2008.
- [3] Symans, M.D., Constantinou, M.C. – *Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review*. *Engineering Structures* 21:469–487, 1999.
- [4] Kelly, J.M. – *The Role of Damping in Seismic Isolation*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28:3-20, 1999.
- [5] Shook, D., Lin, P., Lin, T. and Roschke, P.N. – *A comparative study in the semi-active control of isolated structures*. *Smart Materials and Structures* 16:1433–1446, 2007.
- [6] Morales, C.A. – *Transmissibility concept to control base motion in isolated structures*. *Engineering Structures* 25:1325–1331, 2003.
- [7] Sadek, F. and Mohraz, B. – *Semiactive control algorithms for structures with variable dampers*. *Journal of Engineering Mechanics* 124(9):981-990, 1998.
- [8] Preumont, A. – *Vibration Control of Active Structures, An Introduction*. 2nd edition. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [9] Jansen, L.M. and Dyke, S.J. *Semi-Active Control Strategies for MR Dampers: A Comparative Study*. *Journal of Engineering Mechanics* 126(8):795–803, 2000.
- [10] Yoshida, O. and Dyke, S.J. *Seismic Control of a Nonlinear Benchmark Building Using Smart Dampers*. *Journal of Engineering Mechanics* 130(4):386-392, 2004.
- [11] Oliveira, F., Ayala Botto, M., Suleman, A. and Morais, P. (a) – *Semi-active viscous damper for controlling civil engineering structures subjected to earthquakes*. 10th Portuguese Conference on Automatic Control – CONTROLO'12. Funchal, July 16th to 18th, 2012.
- [12] Oliveira, F., Morais, P and Suleman, A. (b) – *Semi-active control of a fluid viscous damper for vibration mitigation*. 15th World Conference of Earthquake Engineering. Lisbon, 24 to 28 September, 2012.
- [13] R.S.A. – *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto- Lei nº 235/83*. Lisboa: Imprensa Nacional, Casa da Moeda, E. P., 1983.