

ESTUDO NUMÉRICO SOBRE O CONTROLO SEMI-ACTIVO DE UM PÓRTICO METÁLICO COM AMORTECEDORES MR

Manuel T. Braz César

Assistente

ESTiG - IPB

Bragança - Portugal

Rui Carneiro de Barros

Prof. Associado

FEUP

Porto - Portugal

SUMÁRIO

O presente trabalho pretende apresentar parte da investigação desenvolvida no âmbito do Projecto COVICOCEPAD relativa ao controlo semi-activo de estruturas de engenharia civil através da utilização de amortecedores Magneto-Reológicos (MR). Para este efeito foi construído um modelo numérico que permite a inclusão do comportamento do amortecedor MR no modelo estrutural através de uma formulação em espaço de estado. Este modelo baseia-se na utilização de uma lei de controlo semi-activo do tipo “Clipped Optimal” que permite controlar o amortecedor MR e, assim, controlar a resposta da estrutura.

Para validar o modelo numérico foram adquiridos dois amortecedores MR e foi construído um pórtico metálico à escala reduzida com 3 pisos. Este modelo experimental permitirá a calibração do modelo numérico e a validação dos resultados obtidos com esse modelo numérico. Os amortecedores MR foram previamente ensaiados na FEUP de forma a obter a lei que define o seu comportamento. Realizou-se ainda um processo de identificação de parâmetros dinâmicos que permitiu obter as frequências próprias e os modos de vibração da estrutura metálica.

Finalmente, são apresentados alguns resultados numéricos do pórtico associado a um sistema de controlo semi-activo baseado na utilização de um amortecedor MR localizado ao nível do primeiro piso.

1. INSTRUDUÇÃO

Nas últimas duas décadas a investigação sobre potenciais sistemas de controlo de vibrações para estruturas de engenharia civil, nomeadamente edifícios e pontes, tem-se intensificado de forma a dar resposta às necessidades do mercado da construção que exige sistemas cada vez mais eficientes na redução dos danos provocados por ventos ou sismos de elevada intensidade.

Embora o principal objectivo do dimensionamento sísmico seja a protecção de pessoas aquando da ocorrência de um sismo, a protecção de bens e do investimento na própria estrutura também pode ser considerado como uma opção importante para o processo de concepção/dimensionamento.

O isolamento de base e os sistemas passivos de dissipação de energia são duas técnicas usualmente utilizadas na concepção de sistemas de controlo de vibrações devido à sua fiabilidade e ao elevado número de aplicações reais que validam a sua utilização [1][2]. No entanto, a sua natureza passiva, que lhe confere a reconhecida fiabilidade, também compromete o seu desempenho como verdadeiro sistema de controlo devido à inflexibilidade em se adaptar ao sinal e à resposta da estrutura. Neste contexto, os dispositivos activos, ou seja, os dispositivos que alteraram as características dinâmicas do sistema, apresentam-se como uma solução válida para ultrapassar estes inconvenientes. No entanto, a utilização de dispositivos activos requer a utilização de grandes quantidades de energia, sendo este o seu principal inconveniente. Acresce que a possível falha no abastecimento de energia aquando da ocorrência de um sismo pode levar à sua inutilização como dispositivo activo. Esta possibilidade justifica a desconfiança dos diversos agentes envolvidos no processo de concepção/construção de edifícios e pontes face à aplicação destes dispositivos.

Os dispositivos baseados na utilização de fluidos Magneto-Reológicos (MR) podem configurar uma alternativa válida aos dispositivos passivos e activos uma vez que apresentam fiabilidade e a possibilidade de alteração do seu comportamento com baixo consumo de energia. Esta fundamentação justifica a relevância destes dispositivos para aplicação em estruturas de engenharia civil e consequentemente a atenção dos investigadores para estudar o seu potencial como ferramenta de controlo de vibrações [3][4].

Os parâmetros β , γ e A permitem controlar a linearidade na descarga e a transição entre as regiões de pré-cedência e pós-cedência associadas ao comportamento do fluido.

A equação do movimento que descreve o comportamento do edifício com o sistema de controlo incorporado sob a acção sísmica [6], é dada por

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -\Gamma f - M\lambda\ddot{x}_g \quad (3)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de massa, \mathbf{C} é a matriz de amortecimento, \mathbf{K} é a matriz de rigidez, \mathbf{x} é o vector dos deslocamentos dos pisos, $\dot{\mathbf{x}}$ e $\ddot{\mathbf{x}}$ são respectivamente os vectores da velocidade e da aceleração, \mathbf{f} é a força de controlo medida, λ é o vector unitário e Γ é um vector que reflecte a posição do amortecedor MR na estrutura. Esta equação pode ser reescrita na forma de espaço de estado como

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g \quad (4)$$

$$y = Cz + Df + v \quad (5)$$

sendo z o vector de estado, y a força medida nas saídas e v o vector do ruído medido. As restantes variáveis são obtidas através das seguintes matrizes

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \quad E = -\begin{bmatrix} 0 \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} -M^{-1}K & -M^{-1}C \\ I & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} M^{-1}\Gamma \\ 0 \end{bmatrix}$$

Depois de calibrar o modelo numérico do amortecedor MR é necessário seleccionar um algoritmo de controlo que permita utilizar eficientemente este dispositivo para reduzir a resposta dinâmica do sistema estrutural. A condição fundamental para comandar o amortecedor MR baseia-se na geração de uma força de amortecimento que está relacionada com a tensão/corrente aplicada ao dispositivo; a estratégia de controlo é seleccionada de forma a permitir que a força de amortecimento aplicada possa aproximar-se da força de amortecimento pretendida.

Nos últimos anos foram estudadas e testadas intensivamente diversas estratégias para o controlo de amortecedores MR de forma a escolher aquela que melhor traduz o comportamento do amortecedor, ou seja, a que permite obter um melhor desempenho deste dispositivo através da variação da tensão aplicada [6] [7] [8].

No presente estudo será utilizado uma estratégia denominada “Clipped Optimal Control”, cujo esquema de funcionamento está representado na Figura 2.

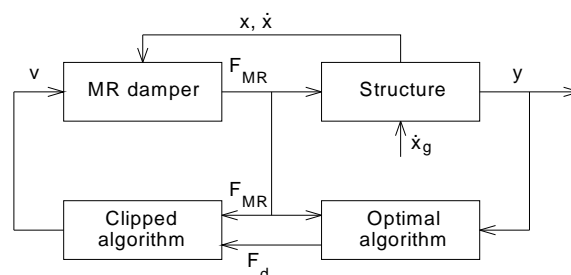


Figura 2: Esquema do Controlo “Clipped Optimal”

Esta estratégia consiste na aplicação de um controlador do tipo Bang-Bang (on-off) que permite gerar a força de controlo pretendida, determina através de um controlador activo “ideal” (na forma de realimentação de estado). A força de realimentação é então usada para produzir a força de controlo f_d , que é determinada através de um controlador linear óptimo $Kk(s)$, baseado nas medições da resposta da estrutura y e na medição da força gerada pelo amortecedor f_c . O controlador linear é obtido com uma estratégia LQG (neste estudo).

No caso dos amortecedores MR a única variável que é comandada directamente é a tensão aplicada ao dispositivo v_a , ou seja, não se comanda directamente a força no amortecedor. O algoritmo para seleccionar a tensão é dado por

$$v_a = v_{\max} H(f_d - f_c) f_c \quad (7)$$

sendo v_{\max} o nível de tensão associada à saturação do campo magnético no amortecedor MR e $H(\cdot)$ é a função degrau unitário.

Para escolher a tensão que se vai aplicar utiliza-se o seguinte algoritmo: Quando a força que está a ser gerada pelo amortecedor f_c iguala a força pretendida f_d , a tensão aplicada permanece inalterada. Quando a magnitude da força f_c é mais pequena que a magnitude de f_d e ambas as forças têm o mesmo sentido, então a tensão aplicada corresponde ao nível máximo para incrementar a força no amortecedor. Caso contrário a tensão permanece nula.

3. MODELO EXPERIMENTAL

De acordo com o programa de investigação [9], a próxima etapa está relacionada com o estudo do comportamento dinâmico experimental à escala reduzida de um pórtico metálico com três pisos equipado com dispositivos semi-activos. No presente estudo será considerado um comportamento de pórtico unidireccional, ou seja um pórtico com 3GDL. O esquema estrutural foi dimensionado para permitir o controlo semi-activo através da introdução de uma amortecedor MR localizado ao nível do primeiro piso numa configuração horizontal.

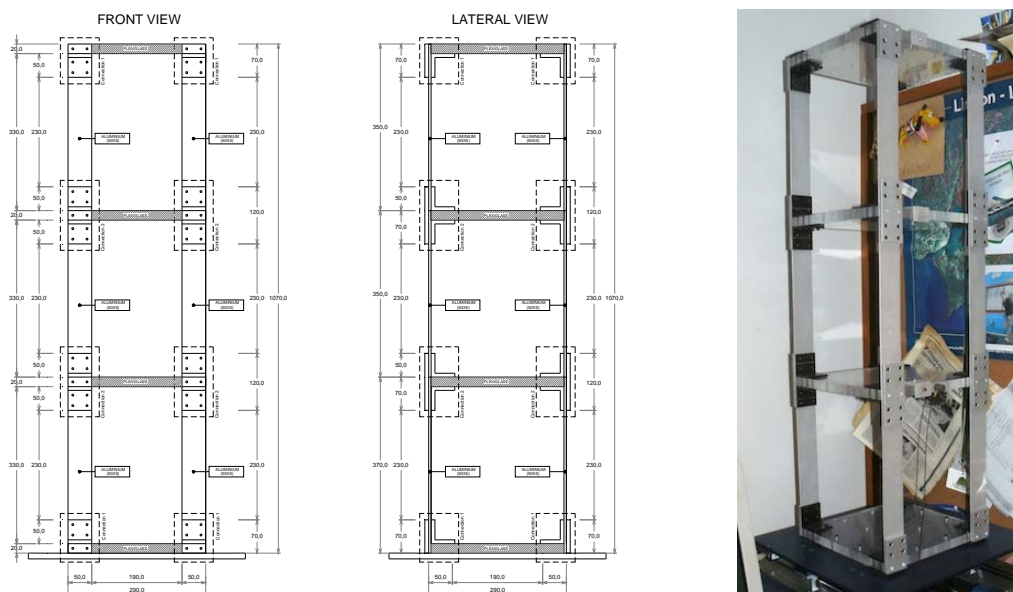


Figura 3: Pórtico metálico (FEUP): geometria e perspectiva

O pórtico experimental está representado na Figura 3 e consiste numa estrutura à escala reduzida com três pisos (3GDL na configuração de pórtico plano). Os pilares estão localizados nas esquinas dos pisos e são constituídos por barras de alumínio com uma secção de 1.5mm por 50mm. Os pisos apresentam um comportamento de diafragma rígido e foram realizados com placas de policarbonato monoliticamente ligadas aos pilares. A massa total do pórtico é de aproximadamente 19 kg e cada piso tem uma massa média de 3.65 kg. O pórtico foi dimensionado para que a frequência fundamental se situe próxima dos 2 Hz. Assumido uma configuração de pórtico plano, a matriz de massa (M) e a matriz de rigidez (K) são obtidas através de:

$$M = \begin{bmatrix} 3.65 & 0 & 0 \\ 0 & 3.65 & 0 \\ 0 & 0 & 3.65 \end{bmatrix} (kg) \quad K = \begin{bmatrix} 5820 & -2910 & 0 \\ -2910 & 5820 & -2910 \\ 0 & -2910 & 2910 \end{bmatrix} (N/m) \quad (8)$$

Considerando um amortecimento de 0.5%, as três frequências naturais obtidas com estas matrizes são: 2.00Hz, 5.60Hz e 8.09Hz. O pórtico experimental foi montado sobre uma mesa excitadora Quanser II, como representado nas Figuras 3 e 4.

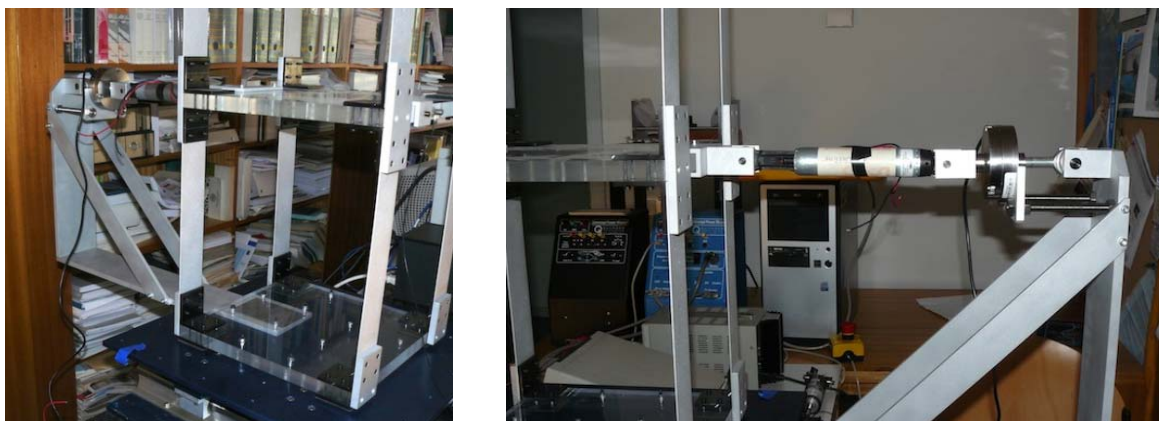


Figura 4: Sistema de controlo (Amortecedor MR conectado à estrutura metálica)

Para estudar o efeito do sistema de controlo semi-activo no comportamento dinâmico da estrutura colocou-se um amortecedor MR ao nível do primeiro piso. Este amortecedor foi colocado na posição horizontal tendo uma extremidade ligada ao pórtico e a outra ligada à mesa excitadora através de uma estrutura de reacção como se pode verificar na Figura 4. Foi ainda adicionada uma célula de carga em série com o amortecedor de forma a obter a força gerada pelo dispositivo durante os ensaios.



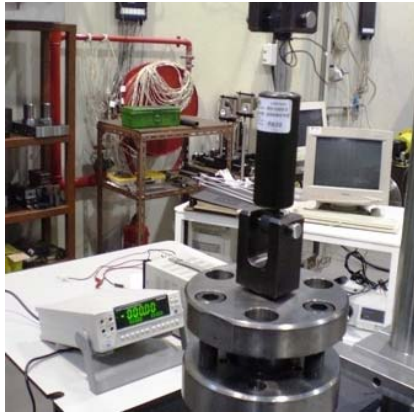
Figura 5: Amortecedor MR – RD-1097-01 (Lord Corp.)

O amortecedor utilizado neste sistema de controlo (RD-1097-01) está representado na Figura 5 e apresenta as seguintes características: força mínima no modo passivo (passive-off) < 9 N (para uma corrente de 0.0A e uma velocidade do pistão de 200 mm/s), força máxima = 100 N (para uma corrente de 1.0A e uma velocidade do pistão de 51 mm/s), curso do pistão de ± 25 e tempo de resposta < 25 ms (tempo necessário para atingir 90% do valor estacionário da força quando ocorre uma variação da corrente de 0.0 para 1.0A, com 51 mm/s).

3.1. Ensaio experimental do amortecedor MR

Antes de se poder utilizar o amortecedor MR no modelo experimental ou numérico é necessário conhecer a lei constitutiva do mesmo. Para esse efeito foram adquiridos dois modelos comerciais (RD-1005-01 e RD1097-01) da empresa norte-americana *LORD Corporation* que foram posteriormente submetidos a vários ensaios experimentais numa máquina de ensaios MTS localizada no Laboratório de Engenharia Mecânica da FEUP

Depois de conectar os amortecedores na máquina MTS, aplicou-se um movimento sinusoidal mantendo constantes a frequência, a amplitude e a corrente aplicada. Foram realizados vários ensaios de forma a obter a resposta do amortecedor para várias combinações de frequência, amplitude e energia fornecida (corrente), como representado na Figura 6. Neste caso foram usadas as seguintes variações destes parâmetros [6]: Frequências (0.5, 1.0, 1.5 e 2.0 Hz), amplitudes (2, 4, 6, 8 e 10 mm) e correntes (0.0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 e 1.5 A).



Parâmetro	Valor
Comprimento max.	208mm
Curso do pistão	±25mm
Força máxima	4448N
Temp. máxima	71°C
Comprimento min.	155mm
Tempo de Resposta	<10ms
Corrente max.	2A

Figura 6: Amortecedor MR – RD-1005-01 – Lord Corp.

Alguns dos resultados obtidos com estes ensaios estão representados nos gráficos das Figuras 7 e 8. A variação da corrente permitiu verificar que um incremento deste parâmetro implica um incremento do valor da força necessária para provocar a cedência do fluido MR sendo visível no ciclo histerético um comportamento parecido a um regime plástico. Nos ensaios que não dependem da corrente verificou-se que a força máxima de amortecimento aumenta com a frequência devido à elevada componente plástica do comportamento viscoso do amortecedor para velocidades elevadas.

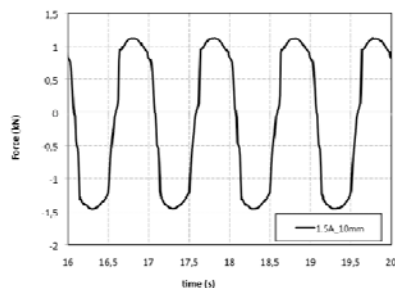


Figura 7: Amortecedor MR - RD-1005-03
Força-Tempo (1.5 A e 10mm).

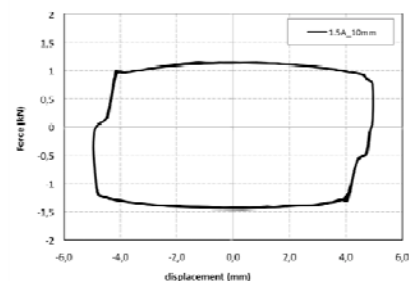


Figura 8: Amortecedor MR - RD-1005-03
Força-Deslocamento (1.5 A e 10mm).

Este procedimento foi utilizado na obtenção do comportamento reológico do amortecedor RD-1097-01. Este foi o dispositivo utilizado no presente trabalho devido a que o reduzido valor das forças envolvidas na análise do pórtico experimental se enquadram na gama de forças desenvolvidas por este amortecedor. Com base nos resultados obtidos nos referidos ensaios, definiram-se os parâmetros associados ao modelo de Bouc-Wen. Para simplificar a identificação separaram-se os parâmetros em função da sua dependência da corrente aplicada (I). Neste caso, os parâmetros dependentes da corrente são os seguintes:

$$\alpha(I) = 72.80I^3 - 42.88I^2 + 14.83I + 0.29 \quad (9)$$

$$C_d(I) = -9.37I^4 + 10.22I^3 - 4.33I^2 + 0.89I + 0.02 \quad (10)$$

Os parâmetros que não dependem da corrente aplicada são: $k_0= 0.0$, $\beta= -7.078$, $\gamma=10.614$, $A=36.21$ e $n= 1.0$. Estes são valores aproximados que permitem simular com rigor o comportamento histerético do amortecedor MR [10].

3.2. Identificação de parâmetros dinâmicos

Para obter as propriedades dinâmicas da estrutura foi realizado um ensaio com martelo de impacto. A resposta da estrutura foi medida com um acelerômetro piezoelétrico (Brüel & Kjaer modelo 4393 e um amplificador/condicionador B&K modelo 2525) localizado ao nível do primeiro piso. Para a obtenção das funções de transferência foi utilizado um analisador portátil em tempo real (OROS 35 *real-time multi-analyzer*). As funções de resposta em frequência (intensidade e fase) estão representadas nos gráficos das Figuras 9-11 [11].

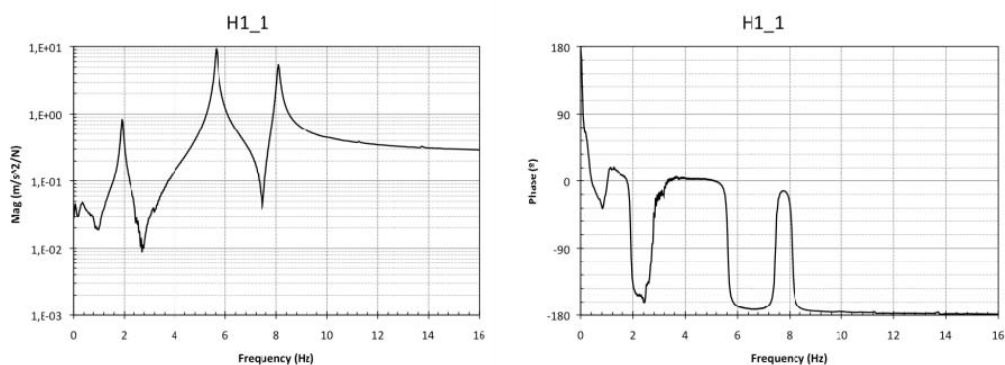


Figura 9: FRF – Intensidade e fase de H1_1

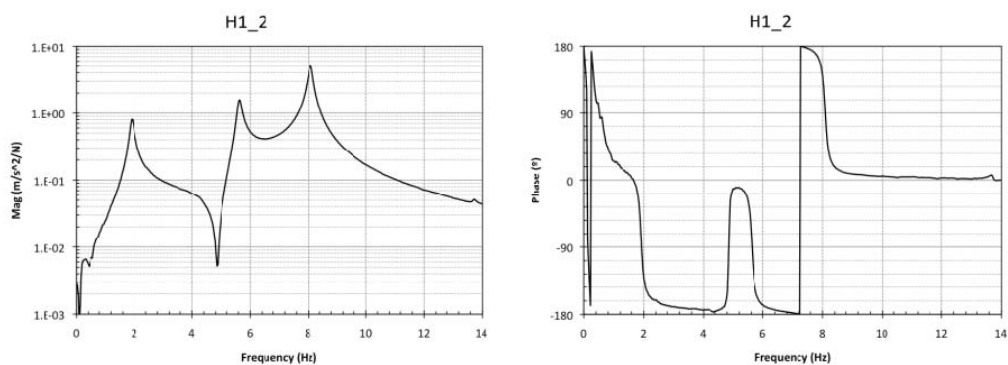


Figura 10: FRF – Intensidade e fase de H1_2

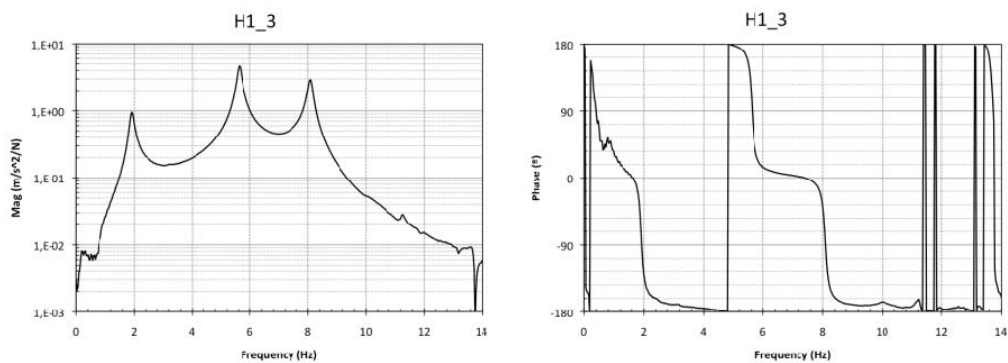


Figura 11: FRF – Intensidade e fase de H1_3

Os parâmetros dinâmicos do pórtico experimental foram obtidos com base nestas funções de resposta em frequência e estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do pórtico experimental

	Frequência	Amortecimento	Participação Modal
1º modo	1,913986	0,03157	34,43248
2º modo	5,627778	0,01198	35,25975
3º modo	8,086245	0,00899	30,30777

4. RESULTADOS

Para estudar a resposta do sistema estrutural considerando o controlo semi-activo (estrutura/amortecedor) foram considerados vários registos sísmicos. Estes registos foram ainda utilizados para calibrar o modelo numérico através da comparação dos resultados obtidos com este modelo e os resultados obtidos com o modelo experimental. Neste artigo só serão apresentados os resultados obtidos para um dos registos do sismo de El Centro [11].

Para verificar a eficiência da lei de controlo escolhida neste estudo, optou-se por considerar o deslocamento horizontal ao nível de cada piso como parâmetro de controlo/comparação.

Alguns dos resultados obtidos com a análise numérica para o sistema não-controlado estão representados nas Figuras 12-14, e na Figura 15 para o sistema controlado.

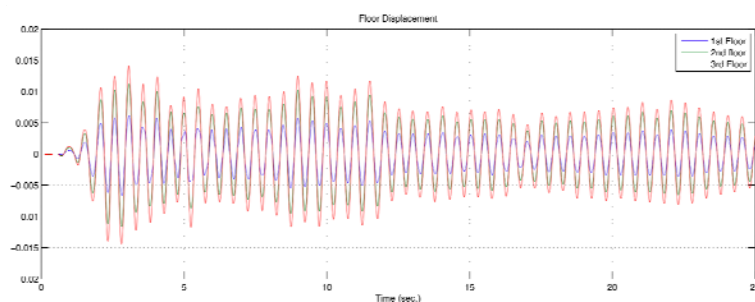


Figura 12: Resposta do sistema não-controlado – Sem amortecedor MR

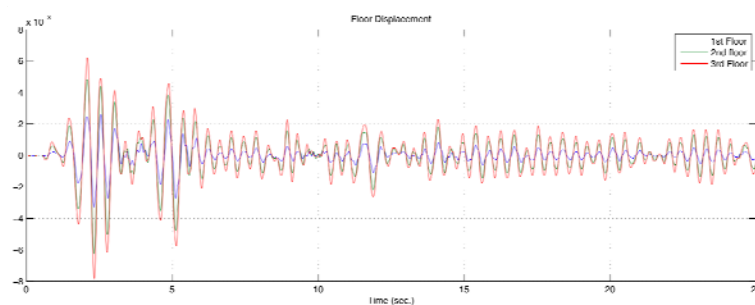


Figura 13: Resposta do sistema não-controlado – Com amortecedor MR @ 0.0A (passive OFF)

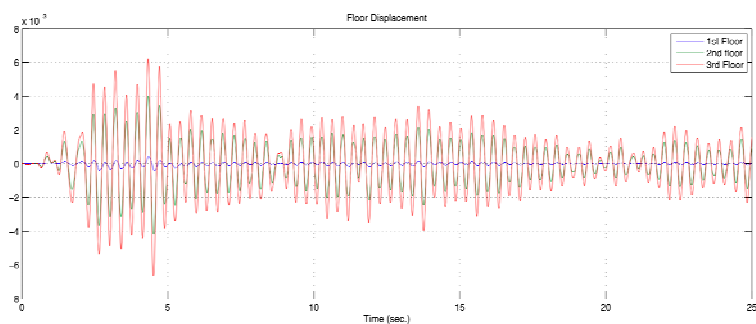


Figura 14: Resposta do sistema não-controlado – Com amortecedor MR @ 0.25A (passive ON)

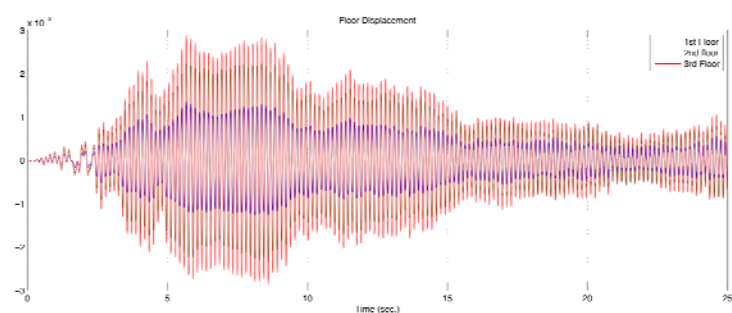


Figura 15: Resposta do sistema controlado – Com amortecedor MR (semi-activo ON)

A resposta da estrutura representada Figura 11 foi obtida considerando que não existe qualquer dispositivo acoplado ao pórtico, ou seja, consiste na resposta da estrutura. De seguida, o amortecedor MR foi introduzido no sistema estrutural tendo sido acoplado ao primeiro piso da estrutura no modo passivo (passive-OFF - sem a aplicação de corrente) tendo-se obtido novamente a resposta da estrutura, Figura 12. Neste gráfico é visível uma significativa redução dos deslocamentos dos pisos mesmo com a introdução com amortecedor no modo passivo. Realizou-se uma nova análise considerando que o amortecedor funciona no modo passivo mas com uma corrente constante de 0.25A (passive ON). Como se pode verificar na Fig. 13, o deslocamento do primeiro piso foi significativamente reduzido devido ao aumento de amortecimento e rigidez neste piso. Isto significa que o amortecedor MR introduz uma vinculação parcial na estrutura tendo como consequência um comportamento mais evidente nos dois últimos pisos, ou seja, os deslocamentos que comandam a resposta situam-se nestes pisos e o pórtico passa a ter um comportamento próximo de um pórtico com 2GDL. Finalmente, activou-se o controlo semi-activo e os deslocamentos laterais ao nível dos pisos foram novamente obtidos, Fig. 14. Como era esperado, o controlo semi-activo baseado no algoritmo “Clipped Optimal” foi aplicado com sucesso. Os deslocamentos laterais do pórtico foram significativamente reduzidos durante a duração do sinal sísmico. Embora se tenha obtido um resultado auspicioso e sabendo que o principal objectivo desta análise consiste na verificação da eficiência do algoritmo de controlo semi-activo do tipo “Clipped Optimal”, é evidente que será necessária mais investigação numérica e experimental para validar a utilização destes dispositivos como sistemas de controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil. Neste contexto, o projecto de investigação onde este trabalho se insere contribui para este objectivo através da futura validação experimental do modelo numérico e ainda através da implementação de outros algoritmos de controlo.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma metodologia para o controlo da vibração em estruturas com o recurso a amortecedores Magneto-Reológicos (MR). Neste contexto, foi construído um pórtico metálico à escala reduzida ao qual foi acoplado um amortecedor MR. Numa primeira fase, que corresponde ao trabalho apresentado neste artigo, foi elaborado um modelo numérico que pretende simular o comportamento do sistema estrutural pórtico/amortecedor.

O amortecedor MR foi testado para obter a lei constitutiva e as respectivas características dinâmicas. Com base nos resultados obtidos foi desenvolvido um modelo numérico para simular o seu comportamento. Para determinar as características dinâmicas do pórtico realizou-se um processo de identificação dos parâmetros dinâmicos. As funções de resposta em frequência obtidas através do processo de identificação permitiram validar o modelo numérico do pórtico. Uma vez calibrado, o modelo numérico foi utilizado para avaliar a resposta da estrutura considerando a utilização do amortecedor MR.

Os resultados obtidos permitem concluir que a utilização destes dispositivos associados a um algoritmo de controlo “Clipped Optimal” se traduz na melhoria da resposta da estrutura quando comparada com a resposta do sistema não-controlado.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho enquadra-se na actividade de investigação e desenvolvimento do projecto Eurocores COVICOCEPAD, cientificamente aprovado no âmbito do Programa S3T da Fundação Europeia de Investigação (ESF - Estrasburgo), coordenado pelo último autor. Agradece-se o financiamento que tem sido recebido através de fundos facultados pela “FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia” (Portugal) através do Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 (POCI 2010) do III Quadro Comunitário de Apoio, subsidiado pelo FEDER no actual Quadro Comunitário de Apoio.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Naeim, F., Kelly, J.M. (1999). Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice, John Wiley & Sons Inc., New York - USA.
- [2] Cesar, M.B., Barros, R.C. (2007). Influence of Resistant Cores Location on the Seismic Response of a R/C 3D-Frame Equipped with HDRB Base Isolation Devices. Proceedings of the Eleventh International Conference on Civil Structural and Environmental Engineering Computing, St. Julians (Malta), 18-21 September 2007, Editor: B.H.V. Topping, Paper 199 – 20 pages, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland.
- [3] Dyke, S.J., Spencer, B.F., Sain, M.K., Carlson, J.D. (1996). Modeling and Control of Magneto-Rheological Dampers for Seismic Response Reduction. Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp. 565-575.
- [4] Gattulli, V., Lepidi, M., Potenza, F. (2010). Mitigation of Seismic Vibration by Semi-Active Control. School and Symposium on Smart Structural System Technologies (S3T-2010), Porto (Portugal), 6-9 April 2010; in: School and Symposium on Smart Structural System Technologies, Editors: R. Barros and A. Preumont, pp. 347-367. Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), Porto, Portugal.
- [5] Cesar, M.B., Barros, R.C. (2010). Semi-Active Control of a Metallic Scalled Frame with a MR Damper: Numerical and Experimental Research. School and Symposium on Smart Structural System Technologies (S3T-2010), Porto (Portugal), 6-9 April 2010; in: School and Symposium on Smart Structural System Technologies, Editors: R. Barros and A. Preumont, pp. 419-440. Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), Porto, Portugal.
- [6] Barros, R.C., Baratta, A., Corbi, O., Cesar, M.B., Paredes, M.M. (2009). Some Research on Control of Vibrations in Civil Engineering under COVICOCEPAD Project. Third International Conference on Integrity Reliability & Failure (IRF 2009), Porto (Portugal), 20-24 July 2009, Editors: J.F. Silva Gomes and Shaker A. Meguid, Ref: S2606-A0583. Edicoes INEGI, Portugal.
- [7] Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F. (1997). A Comparison of Semi-Active Control Strategies for the MR Damper. Proceedings of the IASTED International Conference, Intelligent Information Systems, The Bahamas.
- [8] Jansen, L.M., Dyke, S.J. (1999). Semi-active control strategies for MR dampers: a comparative study. ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 8, pp. 795-803.
- [9] Barros, R.C. (2008). Project COVICOCEPAD under Smart Structural Systems Technologies of Program Eurocores. World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technologies (SMSST-2007), Chongqing and Nanjing (China), 22-27 May 2007; in: Smart Materials and Smart Structures Technology; Editors: B.F. Spencer, M. Tomizuka, C.B. Yun, W.M. Chen, R.W. Chen. 2008 Taylor & Francis Group, London, UK.
- [10] Shen, Y., Golnaraghi, M.F., Heppler, G.R. (2007). Load-Leving suspension system with a magnetorheological damper. Vehicle System Dynamics, 45:4, 297-312.
- [11] Barros, R.C. (2010). Control of Vibrations in Civil Engineering using Magneto-Rheological Devices: some experimental and numerical results. Personal Communication at VGTU (July 22-2010), Vilnius, Lithuania.