

PAPER REF: 7433

DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ E DA RESISTÊNCIA DE UMA PAREDE NÃO ESTRUTURAL NO DESEMPENHO DE UM TMD

Pedro L. P. Folhento^{1(*)}, Manuel T. Braz-César², António M. V. Paula², Rui C. Barros³

¹Mestrado em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança

²Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança

³Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia e Universidade do Porto

(*)Email: a28840@alunos.ipb.pt

RESUMO

O presente artigo apresenta o estudo da influência de uma parede de enchimento não estrutural no comportamento dinâmico de um amortecedor de massa sintonizada (TMD), projetado para controlar deslocamentos laterais de uma estrutura de um edifício submetido a uma excitação sísmica. Será utilizado um modelo *Macro-Simulink* com o objetivo de simular o comportamento histerético da parede de enchimento sob carga cíclica, considerando três modelos histeréticos: um comportamento histerético simples, degradação da rigidez e degradação da resistência. Foi implementado um código *MATLAB/Simulink* para avaliar a influência de cada modelo na resposta estrutural da estrutura controlada. Por fim, os resultados numéricos serão apresentados e discutidos para comparação e estudos futuros.

Palavras-chave: Controlo estrutural, sistemas passivos, amortecedores de massa sintonizada, comportamento histerético.

INTRODUÇÃO

O uso de sistemas de controlo de vibrações em aplicações de engenharia civil, particularmente sistemas de controlo passivo, tem crescido nos últimos anos devido a exigências de segurança na proteção de instalações ou edifícios sujeitos a eventos de ocorrência natural, como ventos ou sismos fortes. Existem atualmente várias aplicações de sistemas passivos em estruturas de construção civil, sendo por exemplo equipadas com isolamento de base, amortecedores viscosos e amortecedores de massa sintonizada (TMDs), devido à sua eficiência na mitigação de vibrações provenientes de sismos e ventos.

Uma abordagem comum no projeto de sistemas estruturais é a desconsideração da presença e, portanto, do comportamento de elementos não estruturais na análise e dimensionamento das estruturas. No entanto, estes elementos podem apresentar um comportamento altamente não linear com uma grande rigidez inicial, influenciando significativamente a resposta do sistema estrutural. A utilização dos referidos sistemas de controlo deve ser avaliada e estudada quanto à sua aplicabilidade nas estruturas de edifícios. Os TMDs podem ser vistos como osciladores secundários projetados para reduzir a amplitude das vibrações estruturais ou mecânicas. O desempenho destes dispositivos está intrinsecamente relacionado com as propriedades dinâmicas da estrutura principal. Assim, a existência de elementos não estruturais pode influenciar o comportamento estrutural e, conseqüentemente, o desempenho do sistema de controlo de vibrações.

Este artigo é dedicado ao estudo da influência de uma parede de enchimento não estrutural na eficácia de um TMD. Um sistema de dois graus de liberdade (2GDL) representado por uma estrutura de um único andar equipada com um TMD, será utilizado para avaliar o desempenho do sistema de controlo na presença do referido elemento não estrutural, quando sujeito a uma ação horizontal dinâmica. Modelos de degradação de rigidez e resistência serão usados para simular a resposta histerética da parede de enchimento não estrutural.

MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico da estrutura controlada sujeita a uma excitação sísmica encontra-se representado na Figura 1. A representação esquemática do sistema de 2GDL consiste numa estrutura com um único piso, m_1 , onde foi aplicado um TMD, m_2 . A estrutura principal está ligada ao exterior por uma mola de rigidez k_1 , e por uma constante de amortecimento c_1 . Da mesma forma, o TMD encontra-se ligado à estrutura principal por meio de uma mola de rigidez k_2 , e por uma constante de amortecimento c_2 (Folhento, 2017).

Um modelo *Simulink* foi implementado baseado nas propriedades do sistema estrutural. Foi considerado no presente estudo os seguintes parâmetros: a massa da estrutura $m_1 = 5000kg$; o período $T = 1.0s$; o coeficiente de amortecimento estrutural $\xi = 0.05$ e o rácio de massas entre o TMD e a estrutura $\mu = 0.15$.

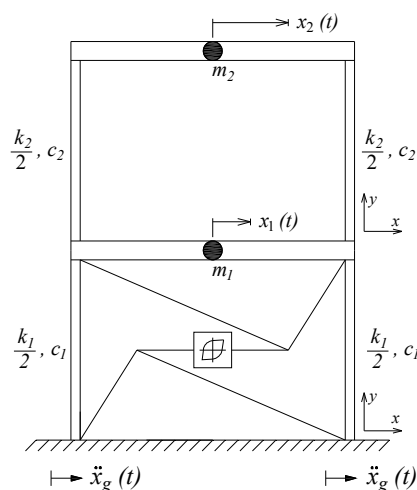


Fig. 1 - Representação esquemática do sistema estrutural de 2GDL.

O modelo numérico *Macro-Simulink* é baseado num *smooth hysteretic model* (SHM) sugerido originalmente por Bouc, 1967 (e desenvolvido por muitos outros: Wen, 1976, Baber & Noori, 1985, Casciati, 1989, Reinhorn *et al.*, 1995, Sivaselvan & Reinhorn, 2000, Braz-César *et al.*, 2013). O modelo *Macro-Simulink* usado no presente estudo foi modificado e adaptado de Mousavi, *et al.*, 2015.

Para verificar a influência da parede de enchimento no desempenho do TMD, foram considerados três casos de comportamento histerético da parede não estrutural. O primeiro caso é um comportamento histerético simples, sem qualquer degradação. No segundo caso de comportamento histerético, apenas a degradação da rigidez será considerada. O terceiro e último caso, além da degradação da rigidez será também considerada a degradação da resistência da parede não estrutural.

Este estudo será realizado usando dois sinais de aceleração diferentes. O primeiro representa um sinal genérico harmônico composto por cinco tramos com acelerações diferentes, como pode ser visto na Figura 2 e a sua função correspondente na Equação 1. O segundo sinal proposto, representado na Figura 3, é a aceleração do solo do bem conhecido sismo El Centro, ocorrido no sudeste da Califórnia a 18 de maio de 1940.

$$\text{Sinal Genérico} \rightarrow \begin{cases} \sin(2\pi t), & \text{para } 0s \leq t < 4s \\ \frac{3}{2} \sin(2\pi t), & \text{para } 4s \leq t < 8s \\ 2 \sin(2\pi t), & \text{para } 8s \leq t < 12s \\ 3 \sin(2\pi t), & \text{para } 12s \leq t < 16s \\ 0, & \text{para } t \geq 16s \end{cases} \quad (1)$$

Tabela 1 - Parâmetros considerados na simulação de diferentes comportamentos hysteréticos da parede em estudo (em todos os casos, $k_0 = 3 \text{ MN/m}$, $P_{fy} = 30 \text{ kN}$, $N = 5$, $a = 0.03$, $\eta = 1$).

Caso	Comportamento hysterético	α	β_1	β_2
0	Simples	50	0	0
I	Degradação da rigidez	1	0	0
II	Degradação da rigidez e da resistência	1	0.3	0.3

Mousavi, *et al.* 2015

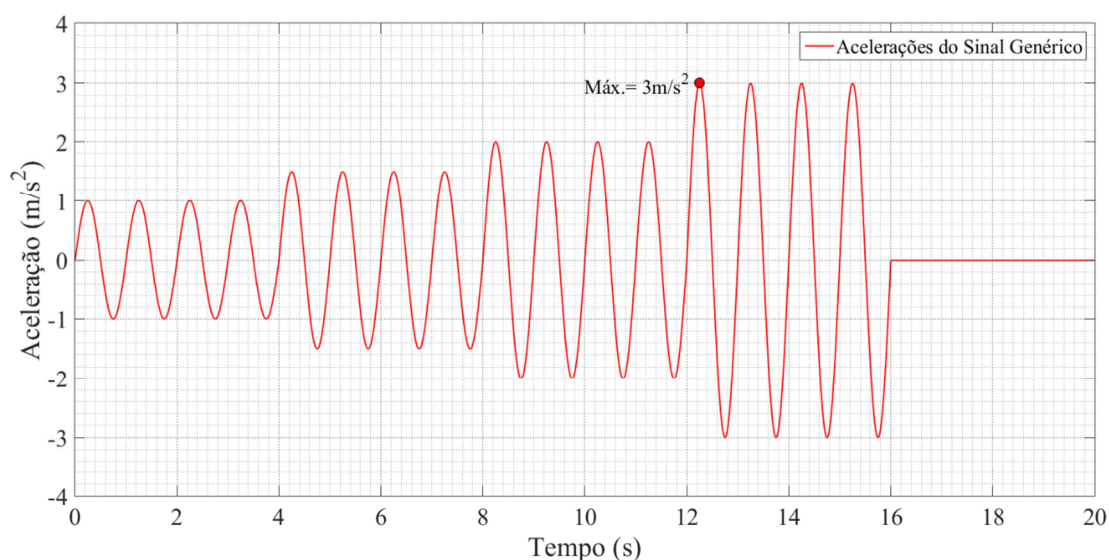


Fig. 2 - Acelerações do sinal genérico considerado em estudo.

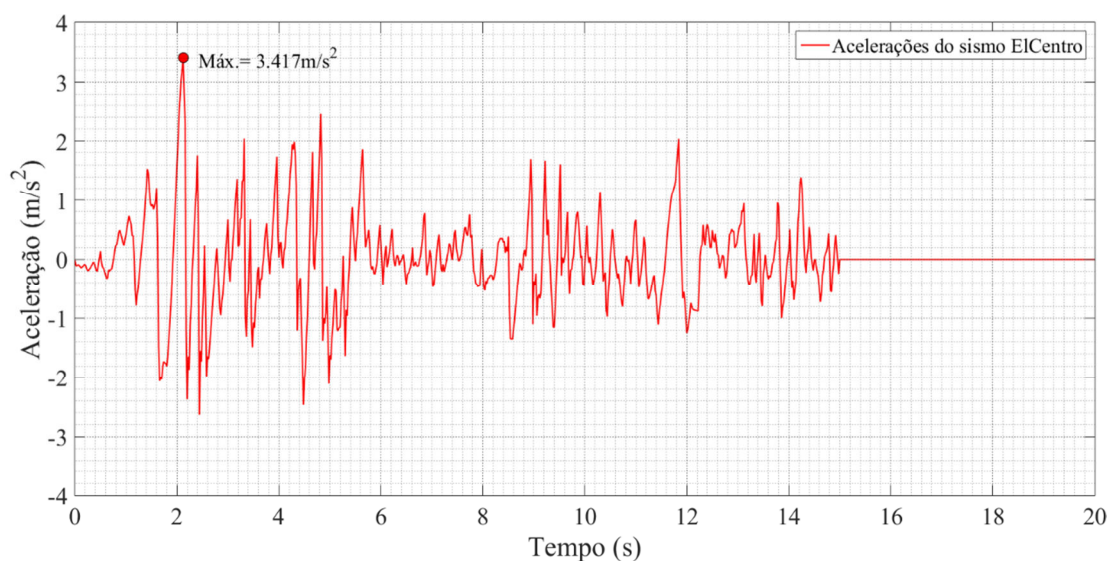


Fig. 3 - Acelerações do sismo El Centro componente N-S.

COMPORTAMENTO HISTERÉTICO SIMPLES (CASO 0)

Um comportamento histerético simples sem degradação, adequado para estruturas de aço bem detalhadas, como estruturas resistentes a momentos especiais ou *special moment resisting frames* (SMRFs), é representado pelas Equações 2 e 3.

$$P_f = k_f x = (ak_0 + k_{hist})x \quad (2)$$

$$k_{hist} = (1-a)k_0 \left\{ 1 - \left| \frac{P_f}{P_{fy}} \right|^N \left[\eta \operatorname{sgn}((1-a)P_f/x) + 1 - \eta \right] \right\} \quad (3)$$

onde k_f é a rigidez lateral total não linear da estrutura, k_0 é a sua rigidez lateral inicial, a é a relação de rigidez pós-cedência, N é um parâmetro que controla a suavidade da transição da pré para a pós-cedência e η controla a forma do caminho de descarga (a descarga não linear também pode ser simulada). P_f e P_{fy} são o corte atual da estrutura e o seu valor de cedência correspondente, respetivamente. Ainda sgn é a função *signum*.

Usando o modelo numérico referido anteriormente, considerando o caso do comportamento histerético simples da estrutura (Caso 0) e, portanto, utilizando as Equações 2 e 3, com base nos valores da Tabela 1, as respostas estruturais do sistema representado na Figura 1, sob as duas acelerações consideradas neste estudo, sendo uma delas o sinal genérico de aceleração crescente e a aceleração sísmica correspondente ao sismo El Centro, podem ser obtidas.

O gráfico da Figura 4 mostra a resposta estrutural do sistema controlado e não controlado com ou sem parede de enchimento, sujeito à aceleração do sinal genérico em termos de deslocamentos em função do tempo.

Os dois gráficos seguintes descrevem as respostas de força-deslocamento generalizados ou ciclos histeréticos da parede de enchimento da estrutura sob a aceleração genérica, tendo na Figura 5(a) e (b) a resposta não controlada e controlada com o TMD com 15% da massa da estrutura, respetivamente.

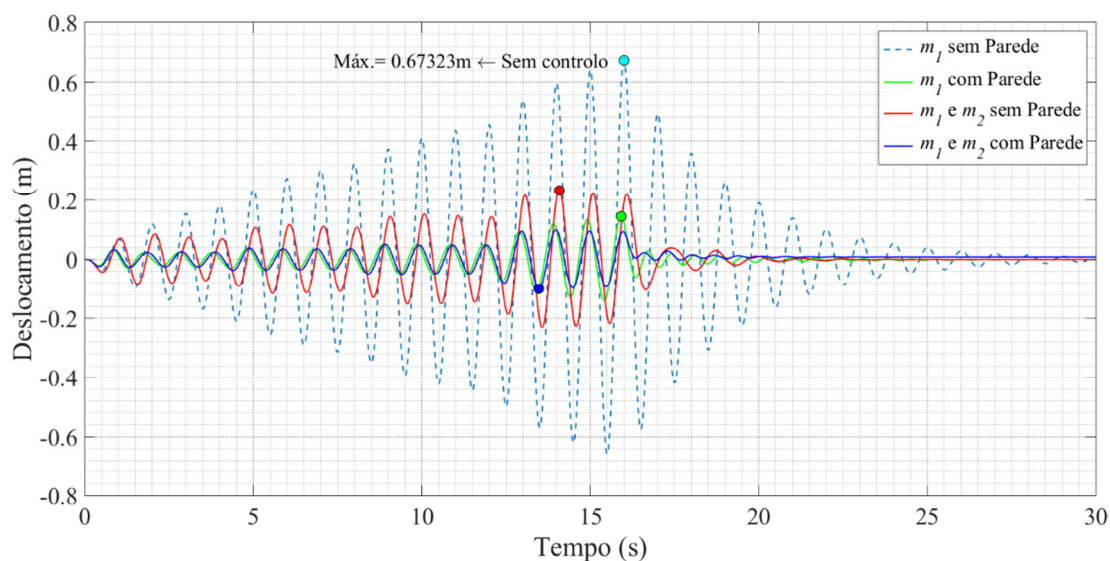


Fig. 4 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando o Caso 0 de comportamento histerético.

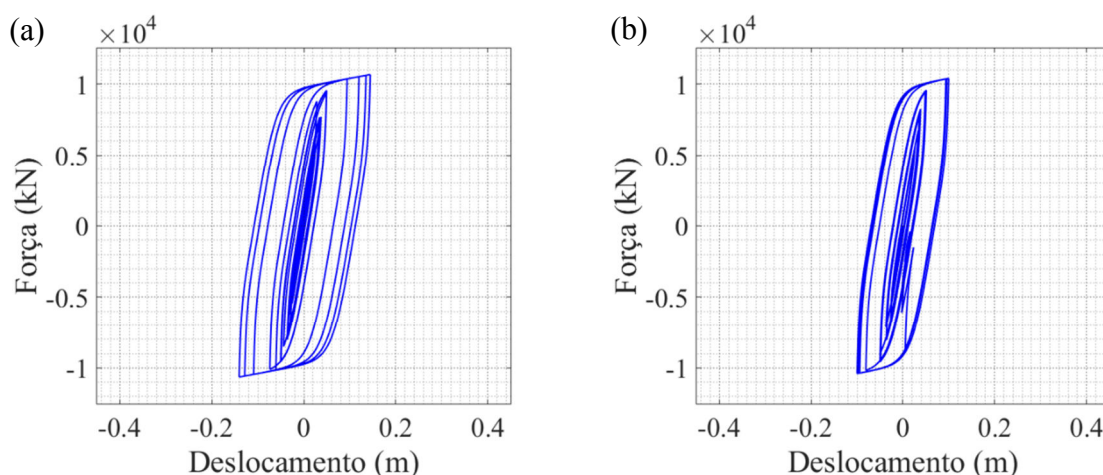


Fig. 1 - Ciclos histeréticos da parede de enchimento da estrutura solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando o comportamento histerético simples (Caso 0). (a) Resposta sem controlo; (b) Resposta controlada com o TMD.

Usando o mesmo modelo numérico as respostas estruturais do sistema em estudo submetido à aceleração sísmica do sismo El Centro, podem ser encontradas usando as mesmas expressões do comportamento histerético simples do sistema (Caso 0).

Tendo isto, a Figura 6 apresenta, portanto, a resposta da estrutura controlada e não controlada com ou sem parede de enchimento, em termos de deslocamentos em função do tempo.

Os gráficos da Figura 7 mostram os ciclos histeréticos, representados pela relação entre a força ou capacidade resistente da estrutura e o seu deslocamento correspondente, quando o sistema está submetido à aceleração sísmica considerada. A Figura 7(a) mostra os ciclos histeréticos do sistema sem controlo em comparação com os ciclos histeréticos do sistema controlado com o TMD apresentados na Figura 7(b).

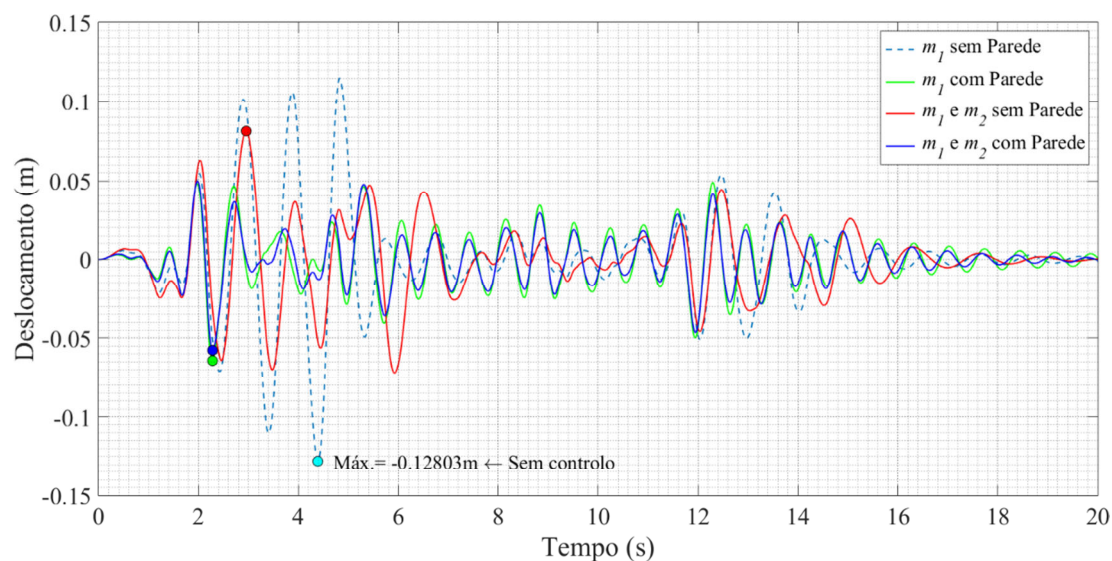


Fig. 2 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura solicitada pela aceleração sísmica, considerando o Caso 0 de comportamento hysterético.

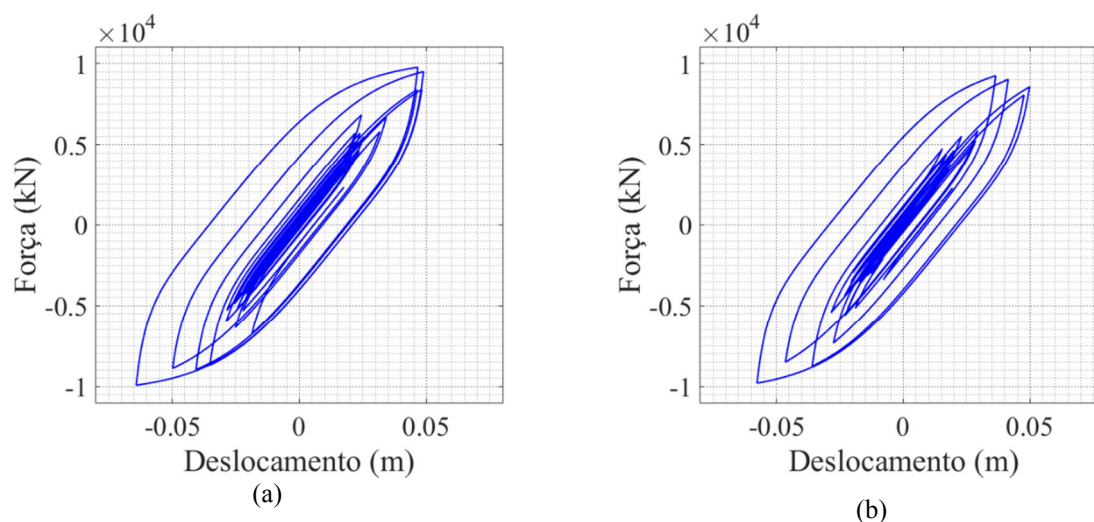


Fig. 3 - Ciclos hysteréticos da parede de enchimento da estrutura solicitada pela aceleração sísmica, considerando o comportamento hysterético simples (Caso 0). (a) Resposta sem controle; (b) Resposta controlada com o TMD.

DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ (CASO I)

A degradação da rigidez advém de efeitos geométricos. A rigidez elástica degrada-se com o incremento da ductilidade. A degradação da rigidez é implementada no modelo *Macro-Simulink* através da chamada regra de pivô (Park *et al.* 1987). A maioria dos betões armados sofre degradação de rigidez que deve ser contabilizada numa análise dinâmica não linear. Para abordar este caso, k_{hist} deve ser modificado da seguinte forma

$$k_{hist} = (R_k - a)k_0 \left\{ 1 - \left| \frac{P_f}{P_{fy}} \right|^N \left[\eta \operatorname{sgn}((1-a)P_f) + 1 - \eta \right] \right\} \quad (4)$$

onde

$$P_f = k_f x = (ak_0 + k_{hist})x \quad (5)$$

$$R_k = \frac{P_f + \alpha P_{fy}}{k_0 x + \alpha P_{fy}} \quad (6)$$

O parâmetro α pode regular a degradação da rigidez. Quanto maior o valor de α , menor a degradação da rigidez. Deve-se salientar que R_k na Equação 4 é um parâmetro positivo sendo o seu valor máximo possível a unidade. Não obstante, R_k também é uma função decrescente do tempo, pois a rigidez da estrutura não aumentaria após a deterioração, independentemente do deslocamento atual.

Considerando agora a degradação da rigidez utilizando as Equações 4, 5 e 6, de acordo com os respectivos valores apresentados na Tabela 1, as respostas estruturais do sistema ilustrado na Figura 1, quando submetido aos dois sinais de aceleração considerados no presente estudo, podem ser obtidas.

As respostas estruturais são obtidas da mesma maneira que o caso de comportamento hysterético anterior. Assim, os resultados relativos ao sistema considerando a degradação da rigidez da parede de enchimento (Caso I), sob a aceleração do sinal genérico, são apresentados nas Figuras 8 e 9. Da mesma forma, as respostas estruturais do sistema admitindo o mesmo caso de comportamento hysterético sob a aceleração sísmica são mostrados nas Figuras 10 e 11.

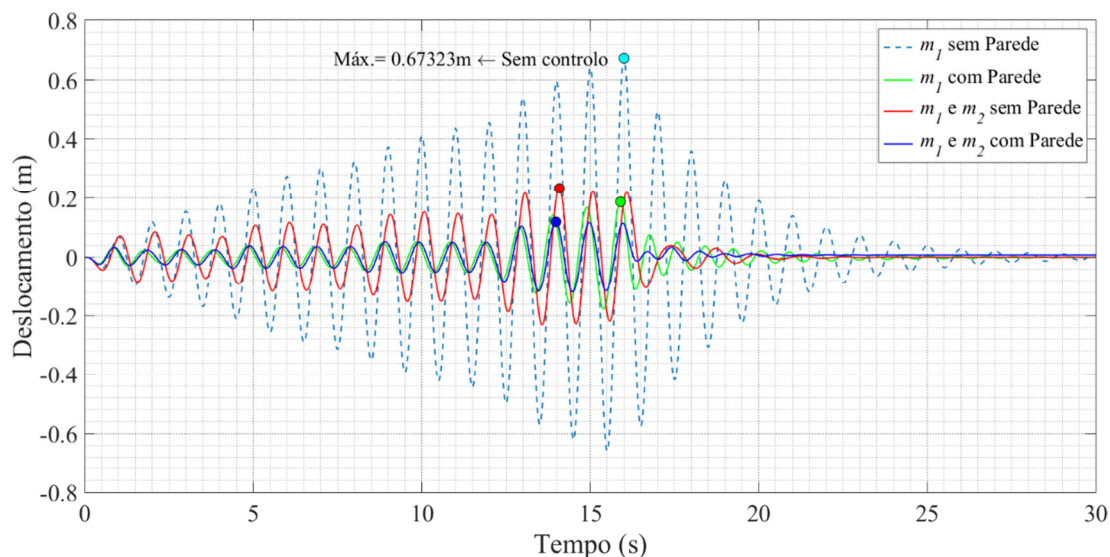


Fig. 8 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando o Caso I de comportamento hysterético.

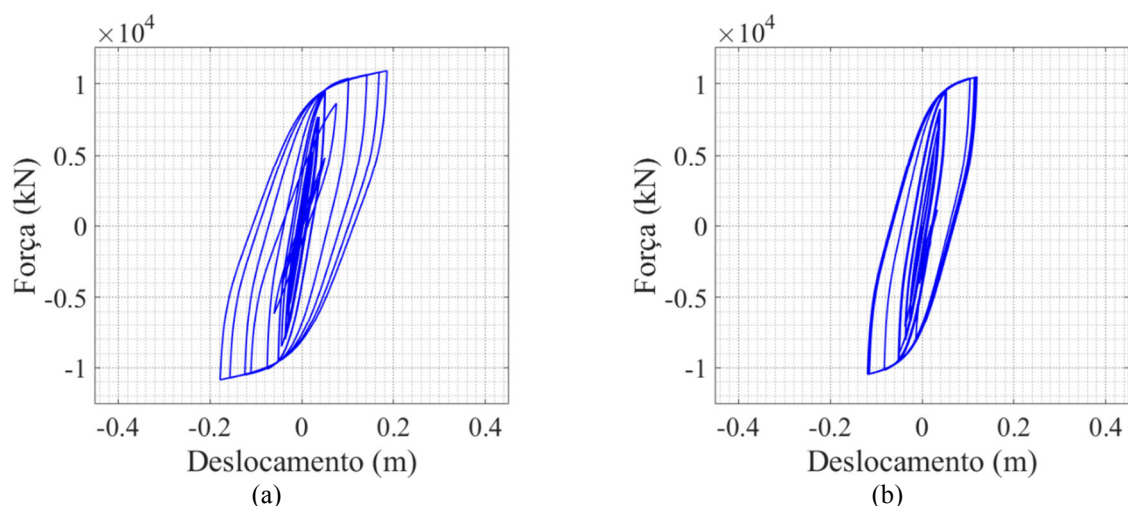


Fig. 9 - Ciclos histeréticos da parede de enchimento da estrutura solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando a degradação da rigidez (Caso I). (a) Resposta sem controle; (b) Resposta controlada com o TMD.

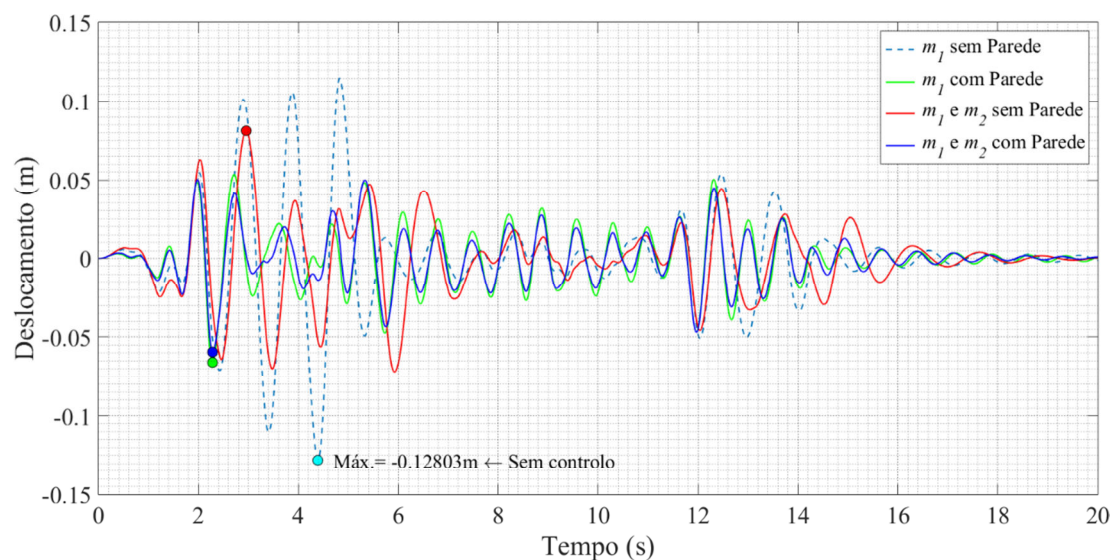


Fig. 10 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura solicitada pela aceleração sísmica, considerando o Caso I de comportamento histerético.

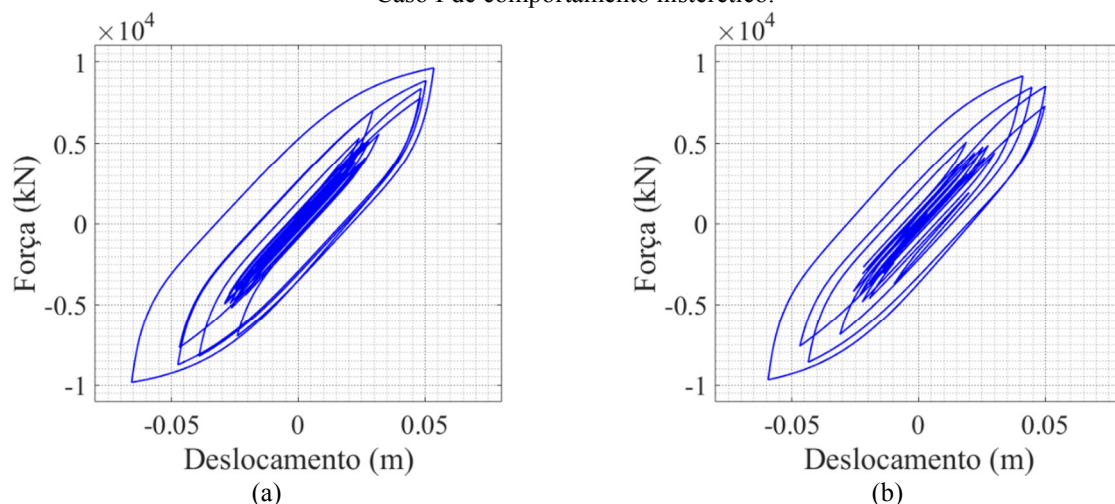


Fig. 11 - Ciclos histeréticos da parede de enchimento da estrutura solicitada pela aceleração sísmica, considerando a degradação da rigidez (Caso I). (a) Resposta sem controle; (b) Resposta controlada com o TMD.

DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ E DA RESISTÊNCIA (CASO II)

Para contrariar os efeitos $P-\Delta$, bem como a deterioração da capacidade resistente durante inversões repetidas de carga, é implementada no modelo *Macro-Simulink* uma degradação de resistência baseada na energia/ductilidade. Sendo conseguido através da seguinte modificação sobre a força de cedência.

$$P_{\bar{f}_y} = P_{\bar{f}_y0} \left[1 - \left(\frac{x_{\max}}{x_{\text{ult}}} \right)^{\frac{1}{\beta_1}} \right] \left[1 - \frac{\beta_2 H}{(1 - \beta_2) H_{\text{ult}}} \right] \quad (7)$$

A resistência degradada e de cedência inicial da estrutura são indicadas pelo P_{fy} e P_{fy0} , respetivamente. Os parâmetros x_{\max} e x_{ult} são o deslocamento máximo na inversão de carga atual e capacidade de deslocamento último da estrutura, respetivamente. A energia dissipada acumulada no deslocamento atual é representada por H e H_{ult} é a energia dissipada máxima sob carga monotónica (não cíclica). Ainda, β_1 e β_2 são parâmetros de degradação baseados na ductilidade e nas necessidades de dissipação de energia, respetivamente.

A degradação da resistência deve ser considerada para estruturas resistentes a momentos normais ou intermédios sob grandes necessidades de ductilidade. A maioria das estruturas de betão armado e paredes resistentes irão experimentar degradação da resistência.

Para considerar a degradação da resistência e rigidez (Caso II) da parede de enchimento da estrutura em estudo, os valores apresentados na Tabela 1 correspondentes a este caso de comportamento histerético devem ser aplicados na Equação 7 e no modelo numérico referido.

Para obter as respostas estruturais considerando o caso de degradação da resistência e rigidez, é realizado o mesmo procedimento usado nas simulações anteriores.

Assim, os resultados correspondentes ao sistema submetido à aceleração do sinal genérico são apresentados nas Figuras 12 e 13, assim como os resultados relativos ao mesmo sistema, mas agora sujeito à aceleração sísmica, são mostrados nas Figuras 14 e 15.

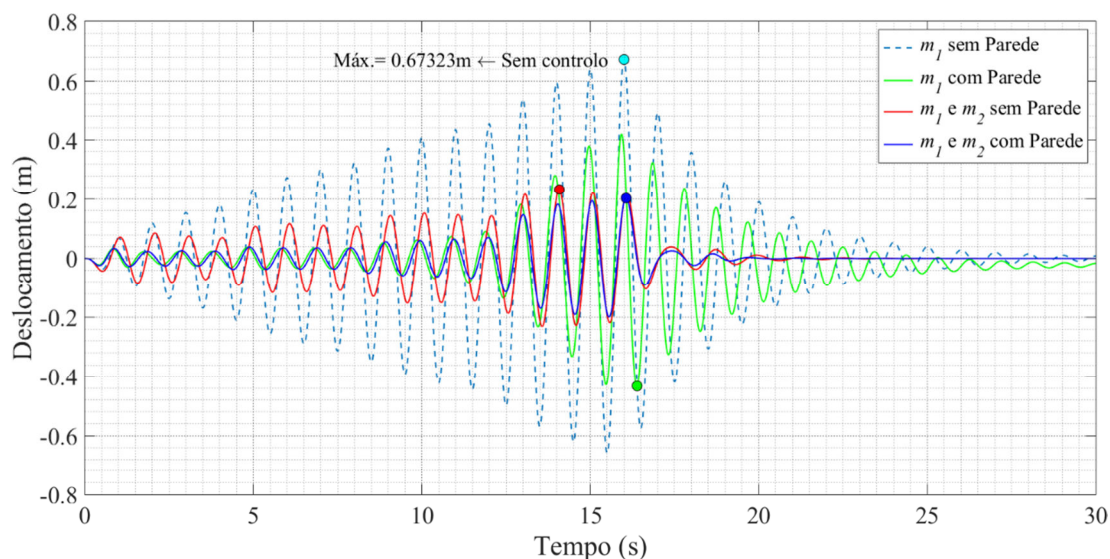


Fig. 12 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando o Caso II de comportamento histerético.

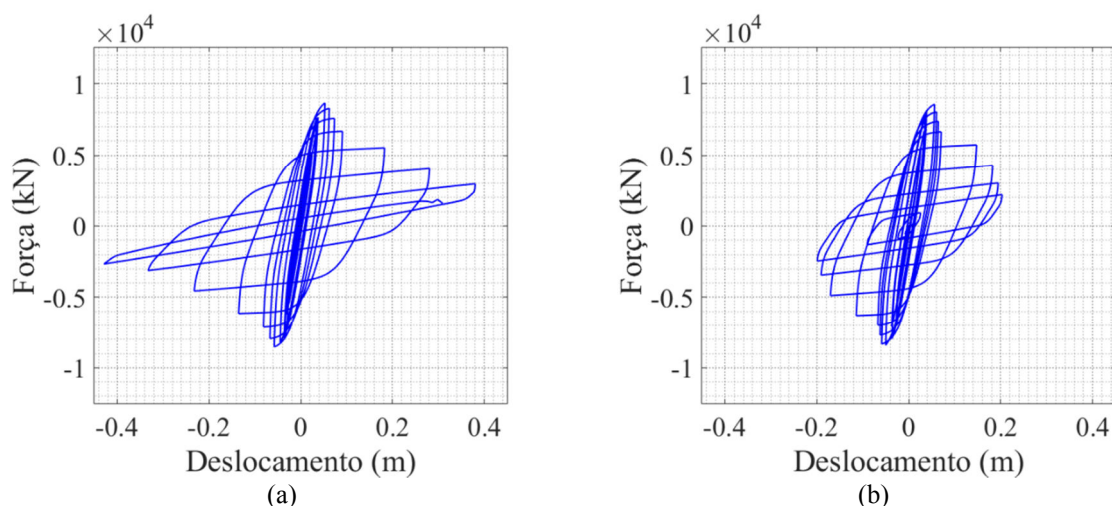


Fig. 13 - Ciclos histeréticos da parede de enchimento da estrutura solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando a degradação da rigidez e resistência (Caso II). (a) Resposta sem controle; (b) Resposta controlada com o TMD.

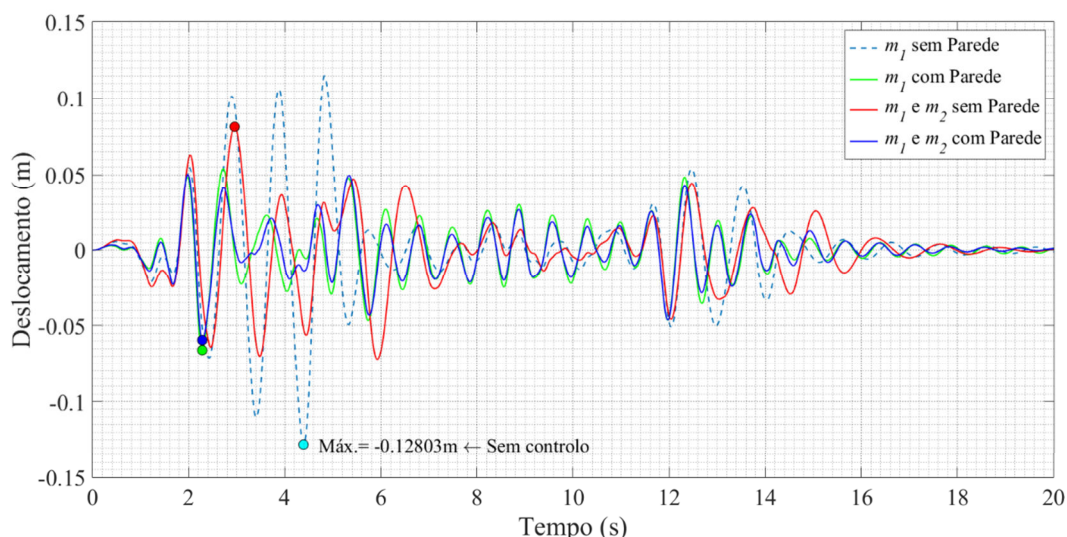


Fig. 14 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura solicitada pela aceleração sísmica, considerando o Caso II de comportamento histerético.

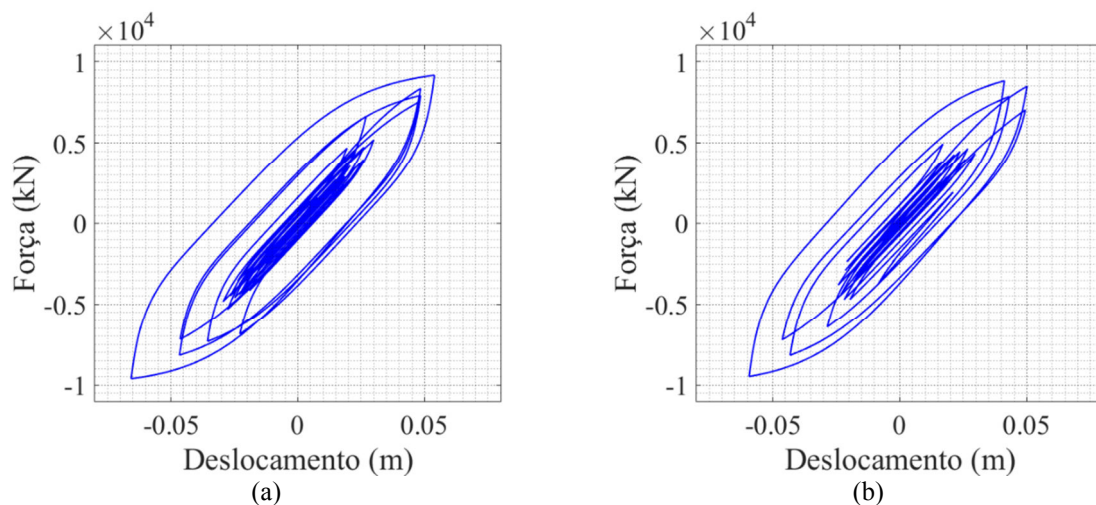


Fig. 15 - Ciclos histeréticos da parede de enchimento da estrutura solicitada pela aceleração sísmica, considerando a degradação de rigidez e resistência (Caso II). (a) Resposta sem controle; (b) Resposta controlada com o TMD.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados das respostas de pico (considerando deslocamentos, velocidades, acelerações e deslocamentos entre a estrutura e o TMD) do sistema em estudo quando solicitado pelo sinal genérico e pela aceleração sísmica, são apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, respetivamente.

Com base na observação da Tabela 2, é possível verificar sempre que a presença de um sistema de controlo de vibrações, como o TMD neste caso específico, influencia o comportamento da estrutura de forma eficaz em todos os casos e tipos de respostas, preenchida ou não com parede, na medida em que reduz significativamente as respostas dinâmicas do sistema estrutural.

Analisando agora os diferentes casos de comportamento hysterético da parede de enchimento da estrutura, é possível observar que no caso em que as degradações da rigidez e da resistência são consideradas, a percentagem de redução relativamente ao caso não controlado é maior (em módulo) do que nos outros casos de comportamento hysterético. Não obstante, se a comparação fosse entre os valores de percentagem da estrutura preenchida com parede e controlada com o TMD com os valores da estrutura não controlada sem parede de enchimento, iria verificar-se que a maior percentagem de redução seria no caso de comportamento hysterético simples.

Apesar do sinal sísmico possuir uma aceleração irregular, característica intrínseca dos sismos, as mesmas conclusões anteriores podem ser retiradas. No entanto, os resultados relativos à solicitação sísmica apresentam reduções muito pequenas, verificando-se apenas ligeiras reduções entre casos de comportamento hysterético, por outro lado, reduções significativas comparativamente ao caso não controlado.

Com a análise das respostas de pico, pode concluir-se que à medida que se avança para um caso de comportamento hysterético mais realístico, *i.e.*, do comportamento hysterético simples para a consideração da degradação da rigidez e da resistência, a redução relativamente ao caso da estrutura sem controlo e sem parede de enchimento é menor. Além disso, quando a comparação é feita entre casos de comportamento hysterético comparando com o caso não controlado correspondente, é possível concluir que num caso mais realista a percentagem de redução é maior (em módulo). Isto pode ser verificado em todos os tipos de respostas, *i.e.*, deslocamentos, velocidades, acelerações e deslocamentos de desvio entre pisos.

Observando sequencialmente os gráficos das Figuras 4, 8 e 12, verifica-se que a resposta em termos de deslocamentos da estrutura com parede de enchimento aumenta do comportamento hysterético simples (Caso 0) para o caso em que as degradações da rigidez e da resistência (Caso II) são consideradas (linhas verde e azul), corroborando com as conclusões retiradas nos parágrafos anteriores baseadas nos valores da Tabela 2.

Tabela 2 - Respostas de pico da estrutura sujeita ao sinal genérico de aceleração.

Respostas de pico						
Caso de Comportamento Histerético		x (m)	\dot{x} (m/s)	\ddot{x} (m/s ²)	desvio entre pisos (m)	
Sem controlo	Sem parede	0.673	4.184	26.565	0.673	
	Caso 0	0.145	0.860	6.357	0.145	
	Caso I	0.186	1.134	7.722	0.186	
	Caso II	0.433	2.929	24.342	0.433	
Controlado com o TMD	Sem parede	0.233 (-189%)	1.443 (-190%)	9.007 (-195%)	0.233 (-189%)	
		0.512	2.947	18.267	0.484	
	Caso 0	0.100 (-45%)	0.604 (-42%)	4.406 (-44%)	0.100 (-45%)	
		0.311	1.918	11.997	0.285	
	Caso I	0.120 (-56%)	0.743 (-53%)	5.031 (-53%)	0.120 (-56%)	
		0.353	2.171	13.576	0.331	
	Caso II	0.203 (-113%)	1.252 (-134%)	7.908 (-208%)	0.192 (-126%)	
		0.493	2.725	16.796	0.378	

- A primeira e segunda linha representam as respostas de pico para o primeiro e segundo andar, respetivamente, a estrutura principal e o TMD.
- As percentagens à direita representam as percentagens de redução ou aumento relativamente ao caso não controlado correspondente.

Tabela 3 - Respostas de pico da estrutura sujeita à aceleração sísmica do sismo El Centro.

Respostas de pico						
Caso de comportamento histerético		x (m)	\dot{x} (m/s)	\ddot{x} (m/s ²)	desvio entre pisos (m)	
Sem controlo	Sem parede	0.128	0.906	7.025	0.128	
	Caso 0	0.064	0.627	6.391	0.064	
	Caso I	0.066	0.636	6.381	0.066	
	Caso II	0.066	0.635	6.353	0.066	
Controlado com o TMD	Sem parede	0.081 (-57%)	0.577 (-57%)	4.854 (-45%)	0.081 (-57%)	
		0.160	0.922	5.899	0.147	
	Caso 0	0.058 (-11%)	0.610 (-3%)	6.007 (-6%)	0.058 (-11%)	
		0.101	0.643	5.206	0.106	
	Caso I	0.059 (-11%)	0.620 (-3%)	5.975 (-7%)	0.059 (-11%)	
		0.108	0.669	5.218	0.113	
	Caso II	0.059 (-11%)	0.619 (-3%)	5.952 (-7%)	0.059 (-11%)	
		0.109	0.669	5.196	0.113	

- A primeira e segunda linha representam as respostas de pico para o primeiro e segundo andar, respetivamente, a estrutura principal e o TMD.
- As percentagens à direita representam as percentagens de redução ou aumento relativamente ao caso não controlado correspondente.

Na mesma linha de pensamento, observando agora os gráficos das Figuras 6, 10 e 14 em sequência, considerando que o sistema está sujeito à aceleração sísmica em vez da aceleração do sinal genérico, as variações entre os diferentes casos de comportamento histerético deixam de ser tão perceptíveis, uma vez que a aceleração sísmica é muito irregular, resultando numa resposta estrutural também irregular. Embora a resposta estrutural seja irregular, as respostas de pico sofrem um ligeiro aumento do Caso 0 para o Caso II.

Observando os valores da Tabela 2, todas as respostas de pico do TMD com exceção das respostas de pico em termos de acelerações, aumentam do Caso 0 para o Caso II, verificando que no caso da degradação da rigidez e da resistência a resposta tem a menor redução relativamente ao caso sem parede de enchimento, quando comparada com os outros casos de comportamento histerético. A observação dos valores da Tabela 3, considerando agora a aceleração sísmica conduz a conclusões idênticas, embora se verifique um aumento nas respostas de pico do Caso 0 para o Caso II, mais uma vez com exceção das respostas de aceleração, estas não são muito evidentes.

Observando agora os gráficos das Figuras 5, 9 e 13, que mostram os ciclos histeréticos dos Casos 0, I e II, respetivamente, e focando apenas os casos não controlados, é possível ver que no primeiro caso em que a degradação da rigidez não é considerada, as curvas de carga e descarga permanecem aproximadamente paralelas, o que significa que a degradação da rigidez é quase inexistente, uma vez que a rigidez se reflete na inclinação das curvas de carga e descarga. Além disso, o facto de o sistema ter uma rigidez elevada, leva a maiores deslocamentos para maiores valores da capacidade de resistência da estrutura. A evolução dos ciclos histeréticos com a atuação das acelerações ao longo do tempo implica uma maior dissipação de energia traduzida pela área crescente dos ciclos.

A degradação da rigidez é agora evidente quando se observa a Figura 9 em particular, onde agora a inclinação das curvas de carga e descarga varia de ciclo para ciclo. Além disso, a área dos ciclos é menor do que no caso anterior, apresentando um ligeiro aumento do deslocamento para um mesmo valor da capacidade resistente da estrutura, quando comparado com o caso de comportamento histerético simples.

Nos gráficos da Figura 13 que mostram o caso da degradação da rigidez e da resistência, observa-se que além da variação da inclinação das curvas de carga e descarga, refletindo a degradação da rigidez, pode verificar-se também uma diminuição da capacidade resistente da estrutura, resultando em maiores deslocamentos. Isto é facilmente percebido, uma vez que a transformação da forma dos ciclos histeréticos passa de uma forma aproximadamente vertical para uma horizontal. Verificando que nos primeiros ciclos do caso não controlado a parede possui uma capacidade resistente de aproximadamente 900kN, apresentando deslocamentos de cerca de 5cm, e nos últimos ciclos possui aproximadamente 250kN para deslocamentos de cerca de 40cm.

Deve-se notar, que no caso em que se considera a degradação da resistência, a capacidade de resistência inicial é menor que no caso de comportamento histerético anterior, em cerca de 250kN.

Este último caso de comportamento histerético resultou numa instabilidade numérica, tendo sido necessário interromper a simulação numérica aos 15.8s aproximadamente. Na realidade, isto traduz-se numa instabilidade estrutural da parede, mais especificamente a rotura da parede para fora do seu plano. Este fato pode ser facilmente comprovado pela observação do gráfico da Figura 12, onde a “linha verde” apresenta um deslocamento permanente de cerca de 5cm, quando comparado com sua posição original.

As mesmas características dos ciclos histeréticos podem ser verificadas quando se observam os casos controlados correspondentes. No entanto, a presença do sistema de controlo de vibrações, neste caso o TMD, proporciona uma redução significativa dos deslocamentos preservando a mesma capacidade resistente da parede de enchimento. A presença do TMD também proporciona uma contribuição menor da parede de enchimento na ação de dissipação de energia.

Além disso, deve salientar-se que a instabilidade estrutural não ocorre na presença do TMD, o que pode ser observado no gráfico da Figura 12 (linha azul) e no gráfico da Figura 13(b).

Pela observação sequencial das Figuras 7, 11 e 15, em que a aceleração sísmica é agora considerada, apesar da irregularidade dos ciclos histeréticos as mesmas conclusões e características podem ser retiradas, apesar destas não serem tão óbvias. No entanto, a presença do TMD ainda reduz significativamente os deslocamentos da parede, proporcionando uma menor contribuição da parede na dissipação de energia do sistema.

Por fim, verificou-se que a parede não estrutural tem um efeito significativo na resposta do sistema. O comportamento não linear da parede permite uma redução dos deslocamentos de pico. Este efeito é mais evidente no caso controlado em que o TMD é usado em combinação com os modelos histeréticos da parede de enchimento. Verificou-se que o elemento não estrutural afeta o desempenho do TMD. Mais investigação é sugerida no estudo do desempenho do sistema de controlo para diferentes modelos estruturais e parâmetros histeréticos.

REFERÊNCIAS

- [1]-Baber, T. T., & Noori, M. N. (1985). Article. Random Vibration of Degrading, Pinching Systems. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 111(8), 1010-1026.
- [2]-Bouc, R. (1967). Article. Forced Vibration of Mechanical Systems with Hysteresis. *Proceedings 4th Conf. on Non-linear Oscillations*.
- [3]-Braz-César M., Oliveira D., Barros R. Validação Numérica da Resposta Cíclica Experimental de Pórticos de Betão Armado (in portuguese). *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões - Mecânica Experimental*, 2013, 22, pp. 1-13.
- [4]-Casciati, F. (1989). Article. Stochastic Dynamics of Hysteretic Media. *Amsterdam: Struct. Safety*, 6, pp. 259-269.
- [5]-Folhento, Pedro L. P. (2017). *Dissertação de Mestrado. Estudo da Influência das Paredes de Alvenaria no Desempenho de Amortecedores de Massa Sintonizada*. Instituto Politécnico de Bragança.
- [6]-Mousavi, S. A., Zahrai, M. S., & Saatcioglu, M. (2015). Article. Toward Buckling Free Tension-Only Braces Using Slack Free Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 115, pp. 329-345 - Elsevier.
- [7]-Park, Y. J., Ang, A. H.-S., & Wen, Y. K. (1987). Article. Damage - Limiting Aseismic Design of Buildings. *Earthquake Spectra*, Vol. 3, N°1.
- [8]-Reinhorn, A. M., Madan, A., Valles, R. E., Reinchmann, Y., & Mander, J. B. (1995). *Technical Report NCEER-95-0018. Modeling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis*. State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- [9]-Sivaselvan, M. V., & Reinhorn, A. M. (2000). Article. Hysteretic Models for Deteriorating Inelastic Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, Issue 6, pp. 633-640.
- [10]-Wen, Y.-K. (1976). Article. Method for Random Vibration of Vibration of Hysteretic Systems. *J. Engrg. Mech. Div.*, ASCE, 102(2), pp. 249-263.