

PAPER REF: 7434

ESTUDO PARAMÉTRICO DO CONTROLO DE UMA ESTRUTURA COM 1GDL PREENCHIDA COM PAREDE NÃO ESTRUTURAL USANDO 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

Este artigo apresenta um estudo paramétrico sobre os parâmetros de controlo de um Amortecedor de Massa Sintonizada ou do inglês *Tuned Mass Dampers* (TMD) para reduzir a resposta sísmica de uma estrutura com um grau de liberdade (1GDL) com um comportamento histerético não linear. Um modelo numérico foi implementado no *MATLAB/Simulink* para obter a resposta estrutural e avaliar a contribuição de cada parâmetro de controlo do sistema. Com base nos resultados, pode concluir-se que a definição adequada de alguns parâmetros de controlo é crucial para alcançar, de forma rápida e consistente, o desempenho ideal de um TMD.

Palavras-chave: Controlo estrutural, sistemas passivos, amortecedores de massa sintonizada, Tuned Mass Dampers (TMD).

INTRODUÇÃO

Os amortecedores de massa sintonizada (TMDs) são dispositivos comuns de controlo passivo para aplicações de engenharia civil a larga escala, tais como edifícios altos, pontes, torres e outras estruturas esbeltas. A elaboração de projetos requer a definição de alguns parâmetros de controlo selecionados de acordo com as propriedades do sistema que irá ser controlado. O objetivo principal é reduzir o movimento (geralmente a amplitude do deslocamento e/ou aceleração) de um sistema estrutural sob a ação do vento ou de uma excitação sísmica. Embora um projeto estrutural comum seja baseado em análises elásticas lineares, as estruturas de engenharia civil reais são de facto sistemas não lineares e complexos que geralmente são linearizados para simplificar o procedimento do projeto. Além disso, os elementos não estruturais são muitas vezes negligenciados na fase de projeto, contribuindo para a simplificação do comportamento estrutural real.

A implementação de sistemas de controlo passivos, assumindo uma resposta elástica, é necessária para garantir um desempenho estrutural elástico durante eventos sísmicos fortes. No entanto, os sistemas estruturais reais apresentam uma determinada não linearidade que não é muitas vezes considerada num projeto estrutural. O ajuste dos parâmetros de controlo de um TMD requer o conhecimento das propriedades da estrutura, uma vez que estas não linearidades podem comprometer o desempenho global do sistema de controlo.

Este artigo apresenta uma análise numérica com o objetivo de investigar a influência de determinados parâmetros de controlo de um TMD na redução da resposta de um sistema não

linear. Neste caso, o TMD é usado como um sistema passivo de absorção harmônica objetivando controlar o deslocamento lateral de uma estrutura com um único grau de liberdade (1GDL) sujeito a uma excitação harmônica genérica ou sísmica. É realizado um estudo paramétrico para verificar a importância de cada parâmetro na resposta do sistema. Por exemplo, o rácio de massas (*i.e.*, a razão entre a massa do TMD e a massa da estrutura) é um parâmetro de extrema importância na obtenção de uma resposta controlada ótima. Assim, o efeito deste parâmetro será avaliado no desempenho do TMD na sua ação de controle de uma estrutura preenchida por elementos não estruturais com comportamento inelástico.

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 $T = 1.0s$ e o coeficiente de amortecimento estrutural $\xi = 0.05$.

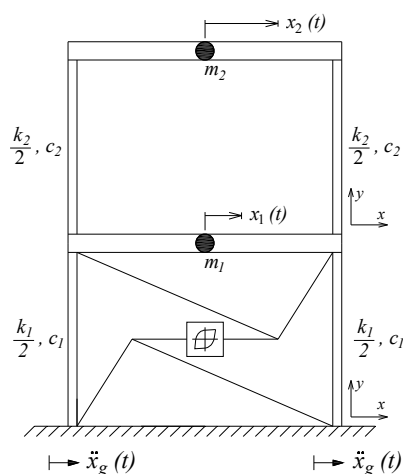


Fig. 1 - Representação esquemática do sistema estrutural de 2GDL.

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 and 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.

Em cada caso de comportamento histerético fez-se variar o valor do rácio de massas contemplando os valores: $\mu = 0.05$, $\mu = 0.10$, $\mu = 0.15$ e $\mu = 0.20$, por forma a avaliar o desempenho do TMD na presença de elementos não estruturais com comportamento inelástico, objetivando a resposta de controlo ótima.

Este estudo será realizado usando dois sinais de aceleração diferentes. O primeiro representa um sinal genérico harmónico composto por cinco tramos com acelerações diferentes, como pode ser visto na Figura 2 e pela 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.

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

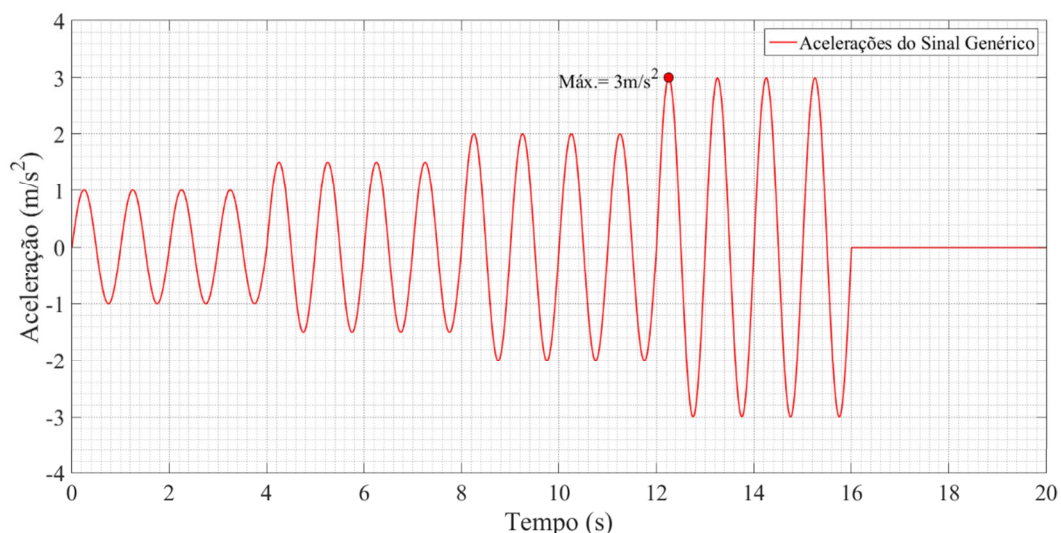


Fig. 2 - Acelerações do sinal genérico considerado em estudo.

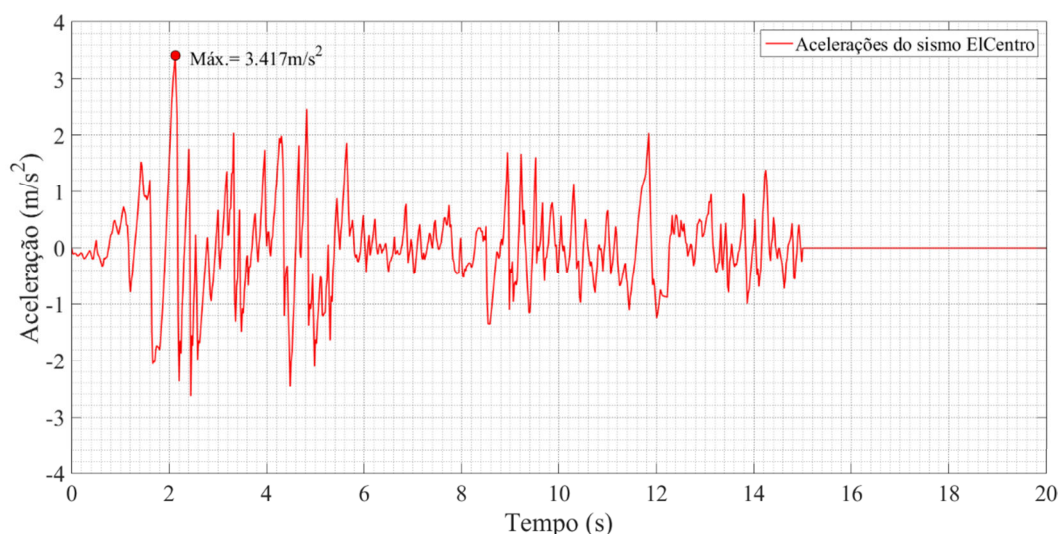


Fig. 3 - Acelerações do sismo El Centro componente N-S.

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.

COMPORTAMENTO HISTERÉTICO SIMPLES (CASO 0)

Um comportamento hysterético 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.

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

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

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*.

Para determinar as respostas estruturais do sistema representado na Figura 1 sujeito às duas acelerações consideradas no presente estudo, para cada caso de comportamento hysterético e cada valor do rácio de massas, utilizou-se o modelo numérico mencionado anteriormente.

Os gráficos das Figuras 4 e 5 mostram a resposta estrutural do sistema em estudo submetido à aceleração do sinal genérico, considerando o comportamento hysterético simples para os valores do rácio de massas $\mu = 0.15$ e $\mu = 0.20$, respectivamente, assim como os gráficos das Figuras 7 e 8, mas agora quando o sistema é submetido à aceleração sísmica.

O comportamento hysterético simples é descrito nos gráficos das Figuras 6 e 9 para o sinal de aceleração genérico e para a aceleração sísmica, respetivamente, onde mostra as respostas de força-deslocamentos generalizados para dois dos valores do rácio de massas considerados no presente estudo, comparando com o caso sem controlo correspondente.

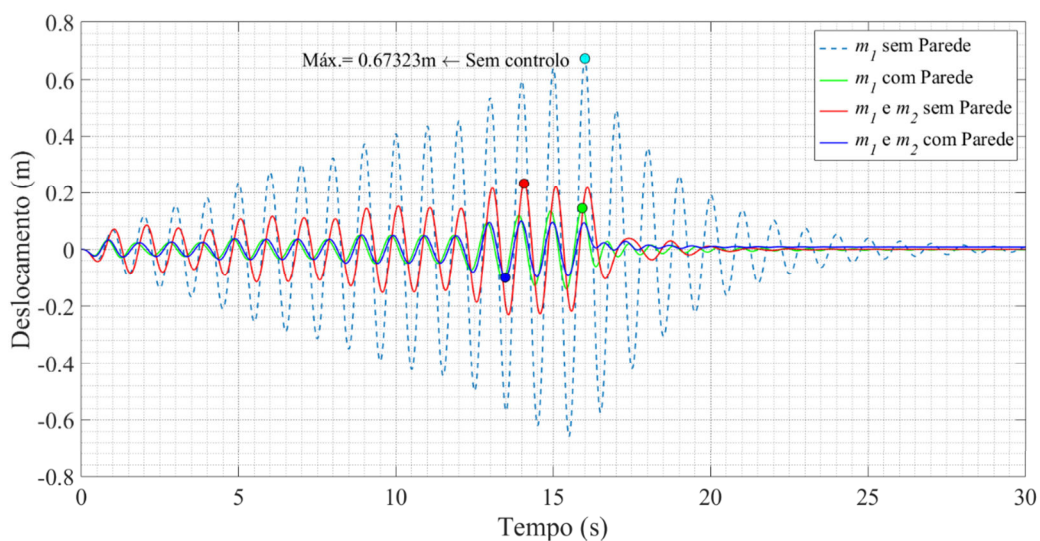


Fig. 4- Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 15% da massa da estrutura, solicitada pelo sinal de aceleração genérico considerando o Caso 0 de comportamento histerético.

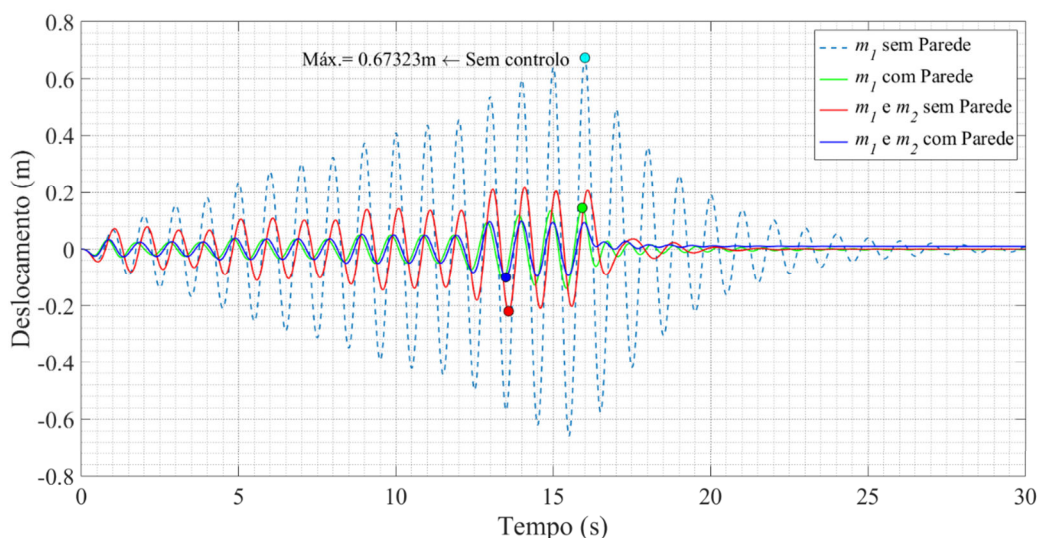


Fig. 5 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 20% da massa da estrutura, solicitada pelo sinal de aceleração genérico considerando o Caso 0 de comportamento histerético.

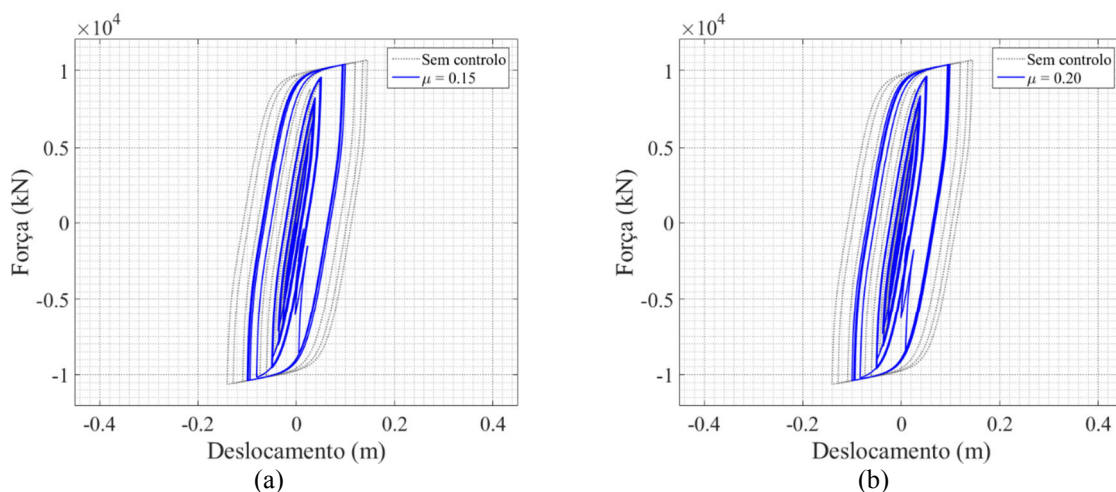


Fig. 6 - Ciclos histeréticos da estrutura com parede de enchimento solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando o comportamento histerético simples (Caso 0). (a) Rácio de massas de 15%; (b) Rácio de massas de 20%.

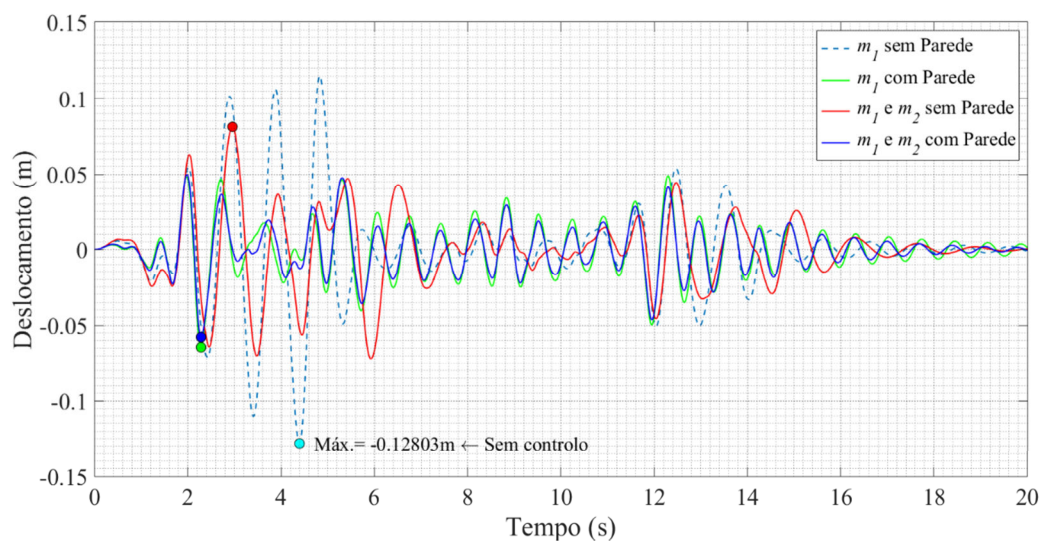


Fig. 7 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 15% da massa da estrutura, solicitada pela aceleração sísmica considerando o Caso 0 de comportamento hysterético.

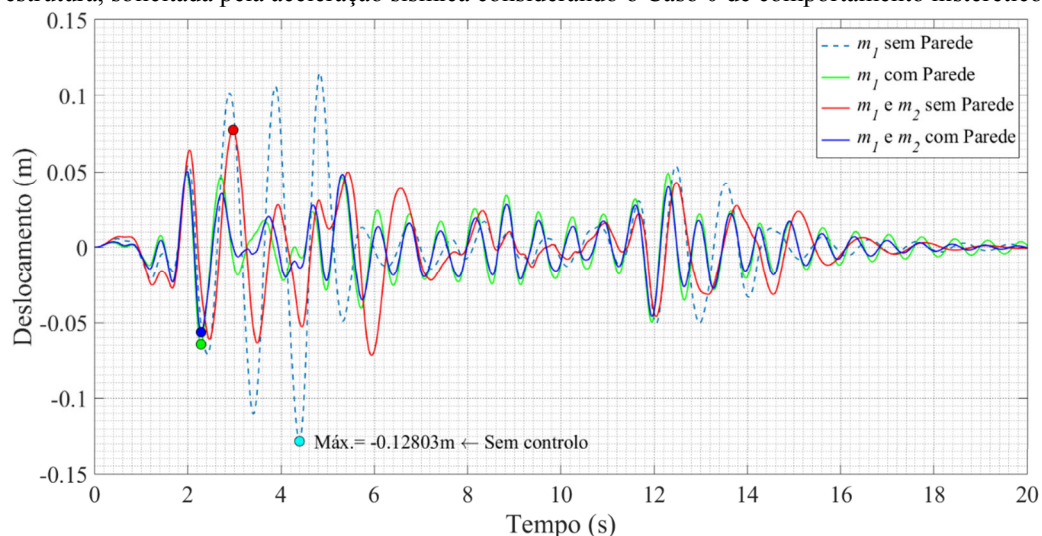


Fig. 8 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 20% da massa da estrutura, solicitada pela aceleração sísmica considerando o Caso 0 de comportamento hysterético.

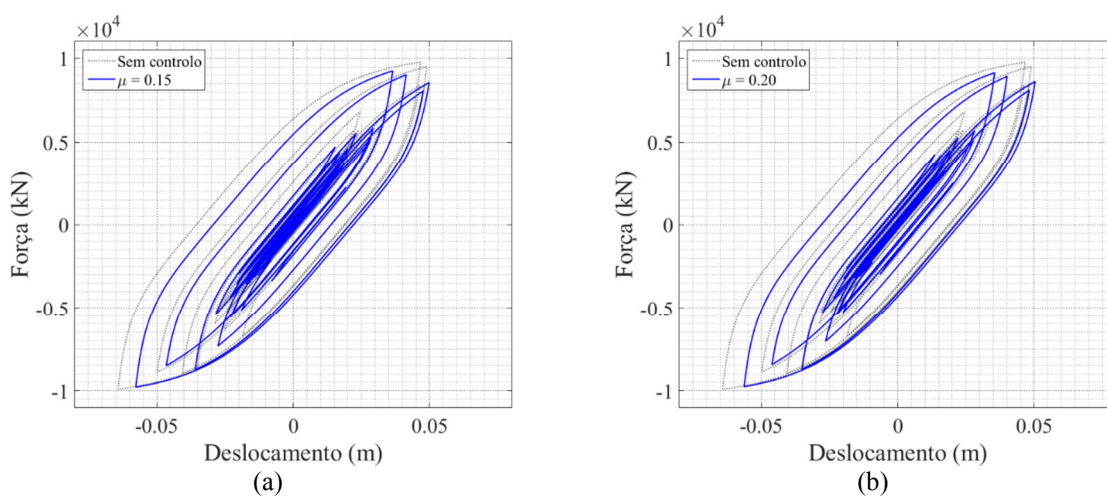


Fig. 9 - Ciclos hysteréticos da estrutura com parede de enchimento solicitada pela aceleração sísmica, considerando o comportamento hysterético simples (Caso 0). (a) Rácio de massas de 15%; (b) Rácio de massas de 20%.

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

$$P_f = k_f x = (ak_0 + k_{hist})x \quad \text{e} \quad R_k = \frac{P_f + \alpha P_{fy}}{k_0 x + \alpha P_{fy}} \quad (5)$$

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.

A degradação da rigidez pode ser simulada usando as Equações 4 e 5, com os respetivos valores apresentados na Tabela 1. Aplicando estas considerações no modelo numérico em estudo, as respostas estruturais podem ser obtidas para os dois sinais de aceleração considerados no presente estudo.

As respostas estruturais obtidas para o sinal genérico de aceleração e para a aceleração sísmica, para dois valores dos rácios de massa considerados, são apresentadas nas Figuras 10 e 11 e Figuras 13 e 14, respetivamente.

Os gráficos que mostram o comportamento histerético para dois dos diferentes valores dos rácios de massa contemplados no presente estudo são apresentados nas Figuras 12 e 15, respetivamente, para o sinal genérico de aceleração e para a aceleração sísmica.

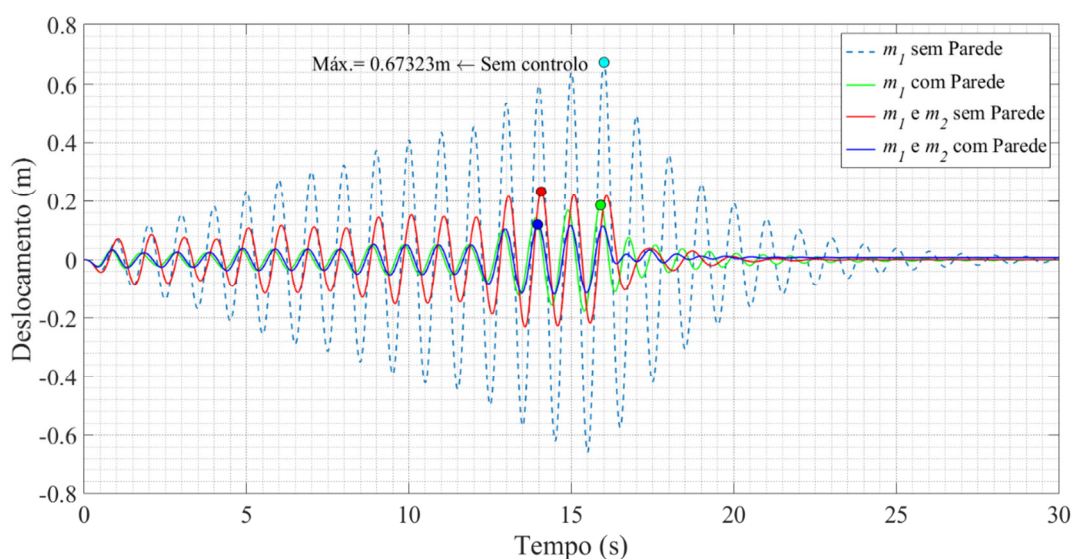


Fig. 10 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 15% da massa da estrutura, solicitada pelo sinal de aceleração genérico considerando o Caso I de comportamento histerético.

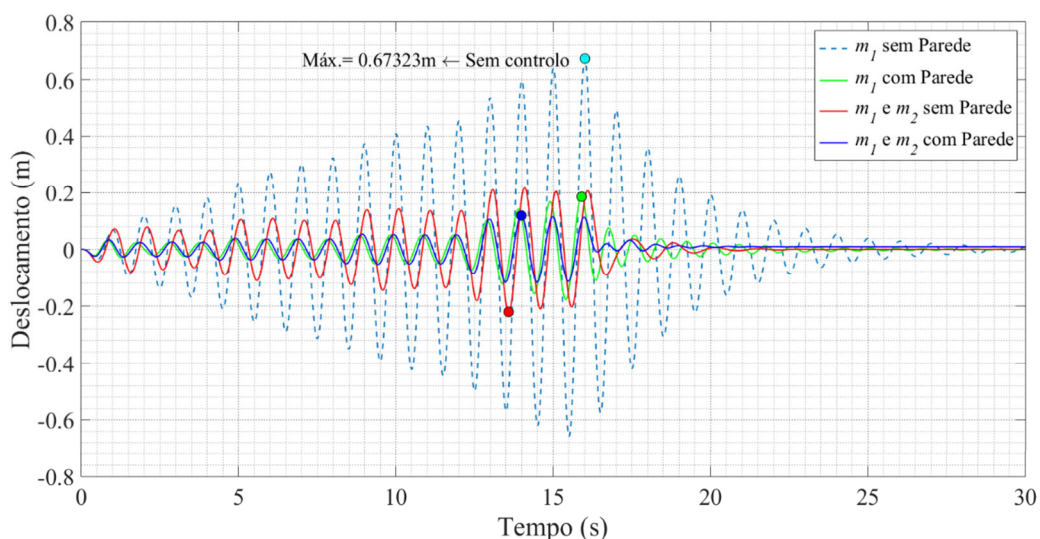


Fig. 11 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 20% da massa da estrutura, solicitada pelo sinal de aceleração genérico considerando o Caso I de comportamento histerético.

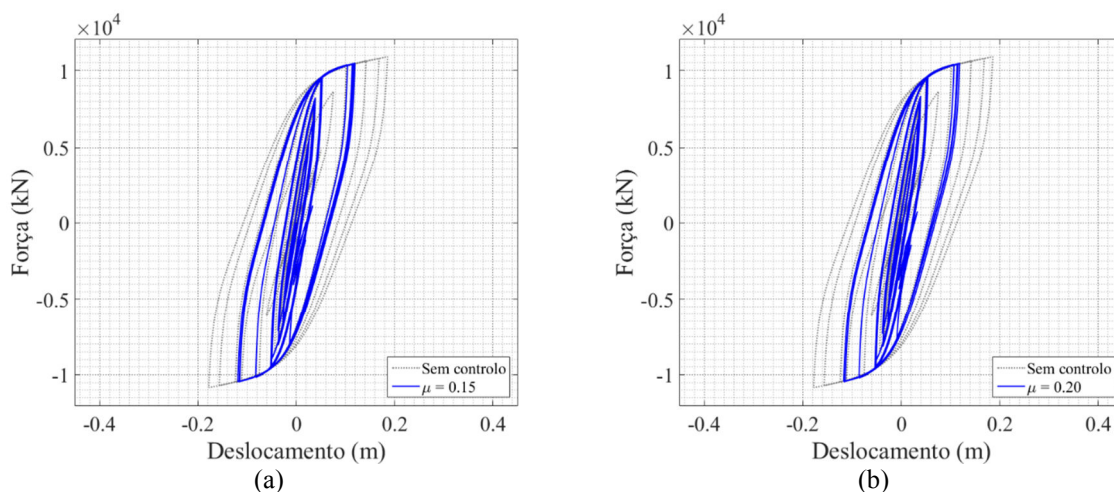


Fig. 12 - Ciclos histeréticos da estrutura com parede de enchimento solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando a degradação da rigidez (Caso I). (a) Rácio de massas de 15%; (b) Rácio de massas de 20%.

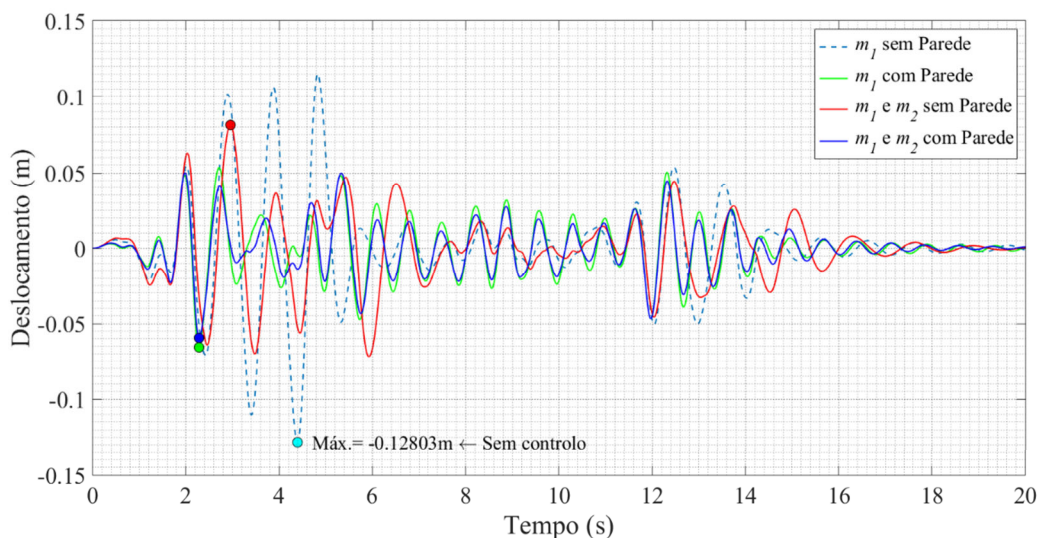


Fig. 13 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 15% da massa da estrutura, solicitada pela aceleração sísmica considerando o Caso I de comportamento histerético.

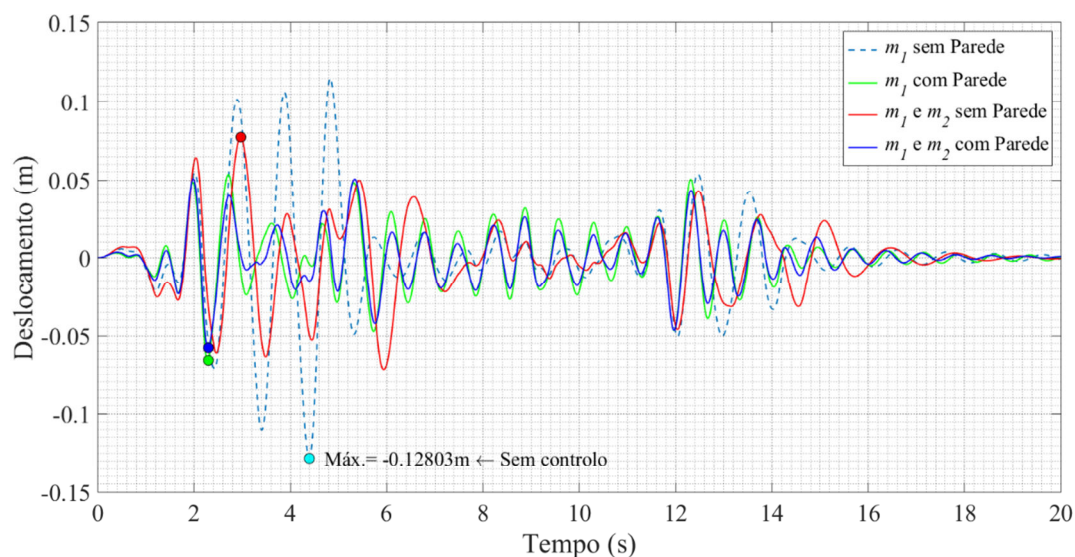


Fig. 14- Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 20% da massa da estrutura, solicitada pela aceleração sísmica considerando o Caso I de comportamento hysterético.

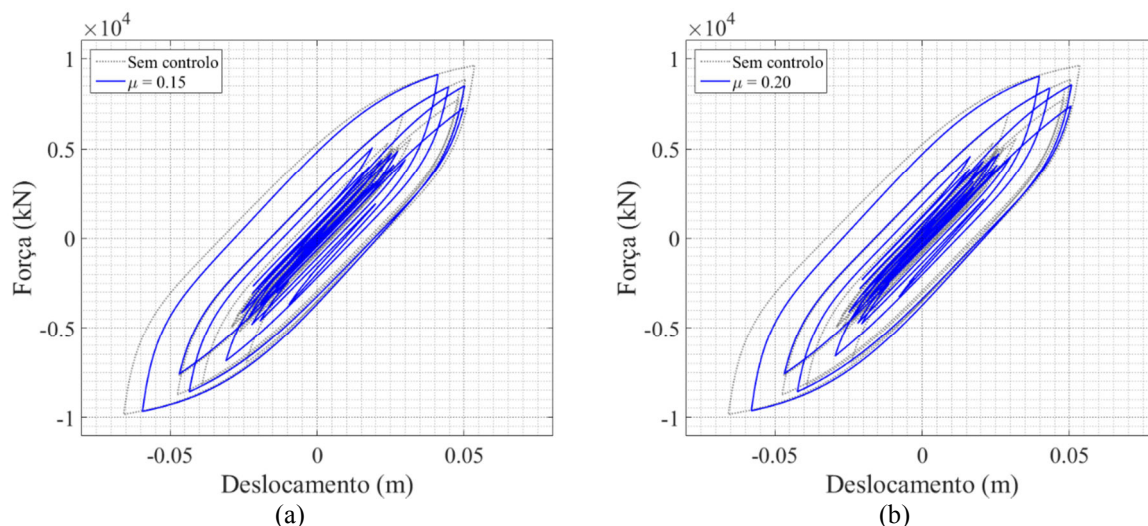


Fig. 4 - Ciclos hysteréticos da estrutura com parede de enchimento solicitada pela aceleração sísmica, considerando a degradação da rigidez (Caso I). (a) Rácio de massas de 15%; (b) Rácio de massas de 20%.

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.

$$P_{fy} = P_{fy0} \left[1 - \left(\frac{x_{max}}{x_{ult}} \right)^{\frac{1}{\beta_1}} \right] \left[1 - \frac{\beta_2 H}{(1 - \beta_2) H_{ult}} \right] \quad (6)$$

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 também experimentar degradação da resistência.

A degradação da rigidez e da resistência podem ser simuladas usando os respetivos valores da Tabela 1 na Equação 6. Fazendo isto, as respostas estruturais do sistema ilustrado na Figura 1, submetidas às duas acelerações, podem ser calculadas.

As respostas em termos de deslocamentos do sistema sujeito à aceleração do sinal genérico de aceleração são apresentadas nas Figuras 16 e 17 para dois dos diferentes valores do rácio de massas considerados. De forma semelhante, as respostas da estrutura sujeita à aceleração sísmica são mostradas nas Figuras 19 e 20, para os mesmos valores do rácio de massas considerados.

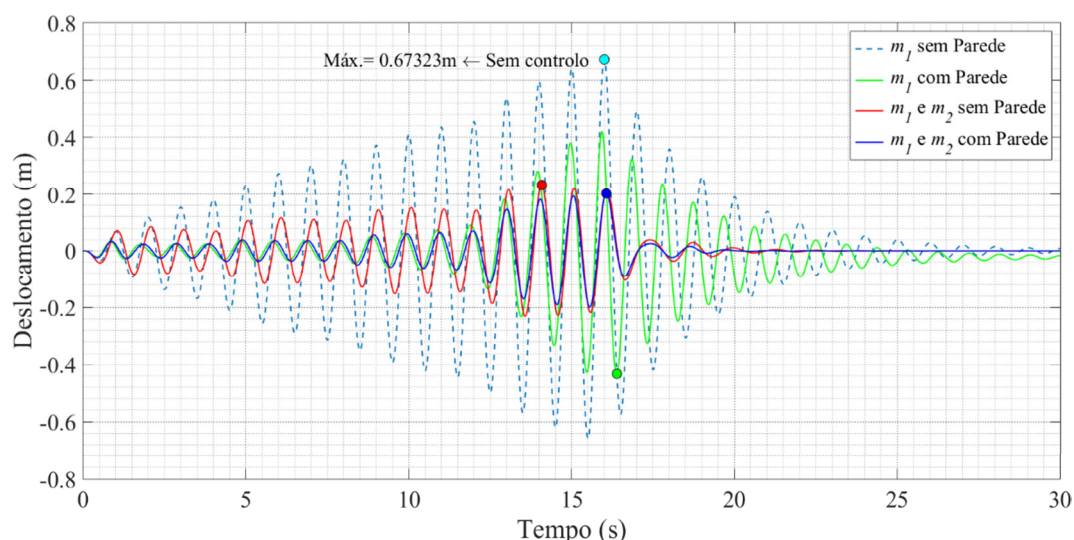


Fig. 16 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 15% da massa da estrutura, solicitada pelo sinal de aceleração genérico considerando o Caso II de comportamento hysterético.

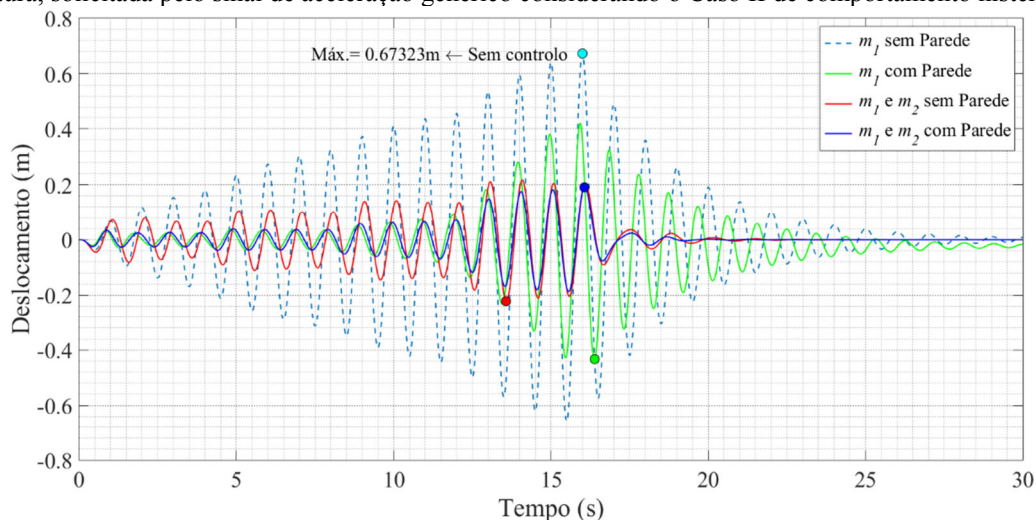


Fig. 17- Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 20% da massa da estrutura, solicitada pelo sinal de aceleração genérico considerando o Caso II de comportamento hysterético.

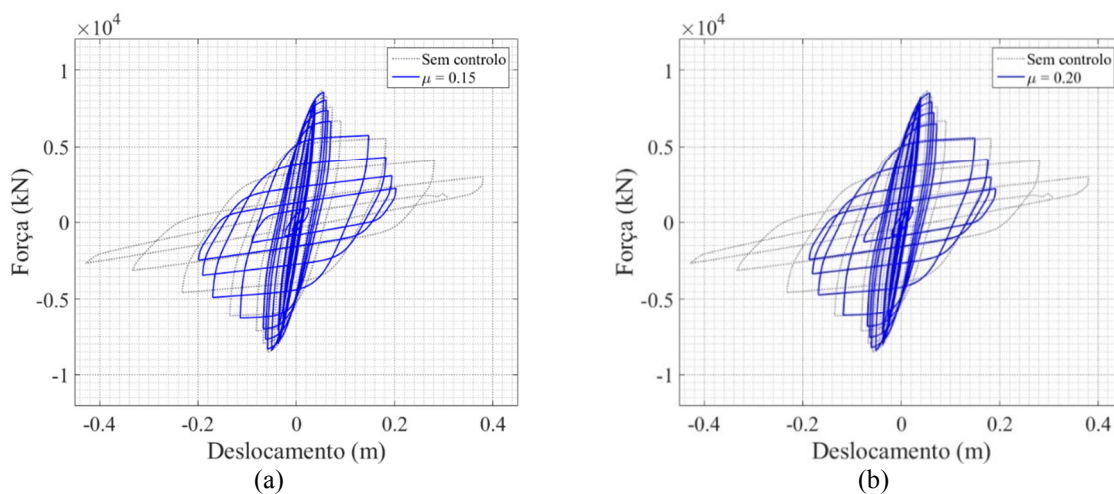


Fig. 18- Ciclos histeréticos da estrutura com parede de enchimento solicitada pelo sinal genérico de aceleração, considerando a degradação da rigidez e da resistência (Caso II). (a) Rácio de massas de 15%; (b) Rácio de massas de 20%.

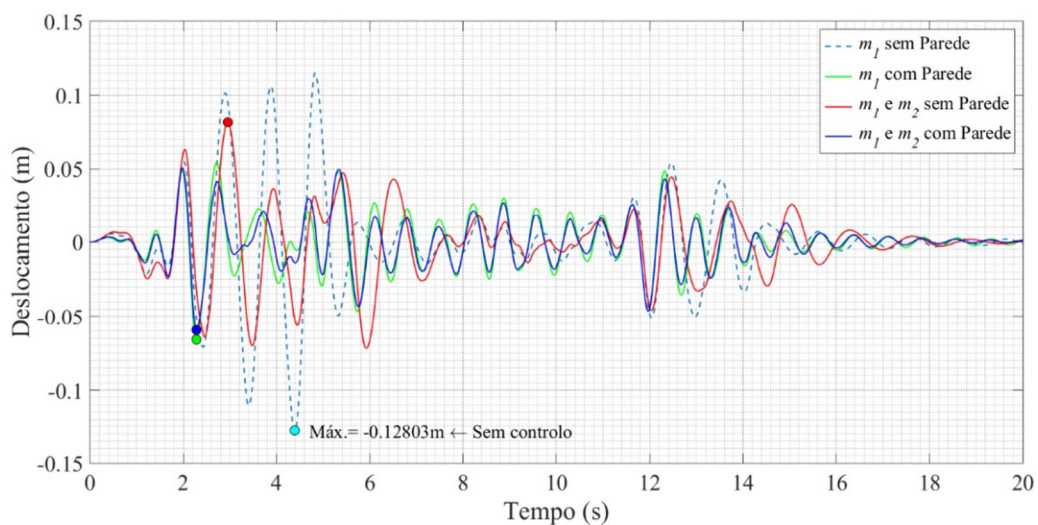


Fig. 19 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 15% da massa da estrutura, solicitada pela aceleração sísmica considerando o Caso II de comportamento histerético.

Os ciclos histeréticos nos quais as degradações da rigidez e da resistência são consideradas são mostrados nas Figuras 18 e 21, respetivamente para a aceleração do sinal genérico e para a aceleração sísmica e para os diferentes valores do rácio de massas contemplados.

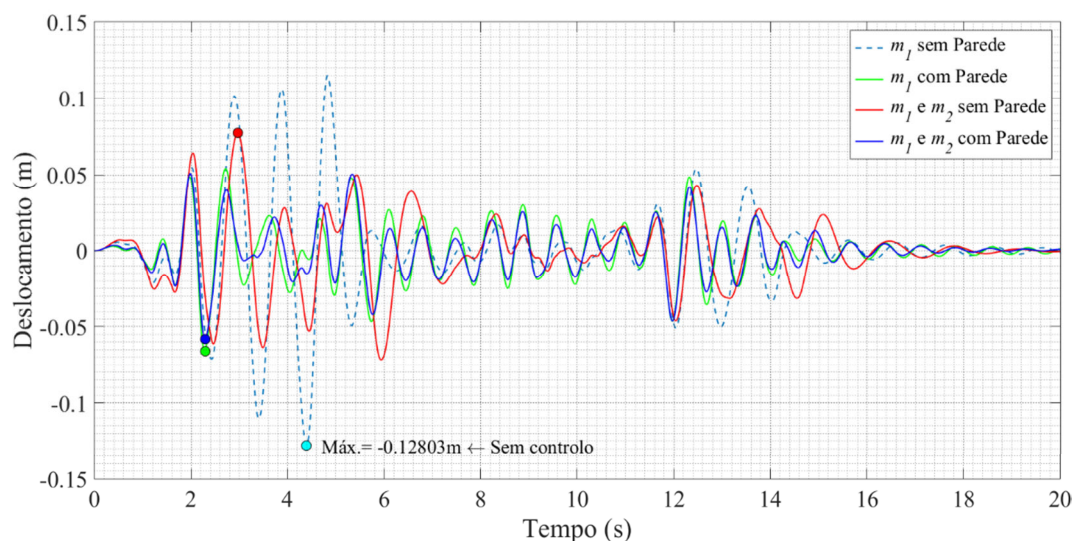


Fig. 20 - Resposta em termos de deslocamentos da estrutura controlada com o TMD com 20% da massa da estrutura, solicitada pela aceleração sísmica considerando o Caso II de comportamento hysterético.

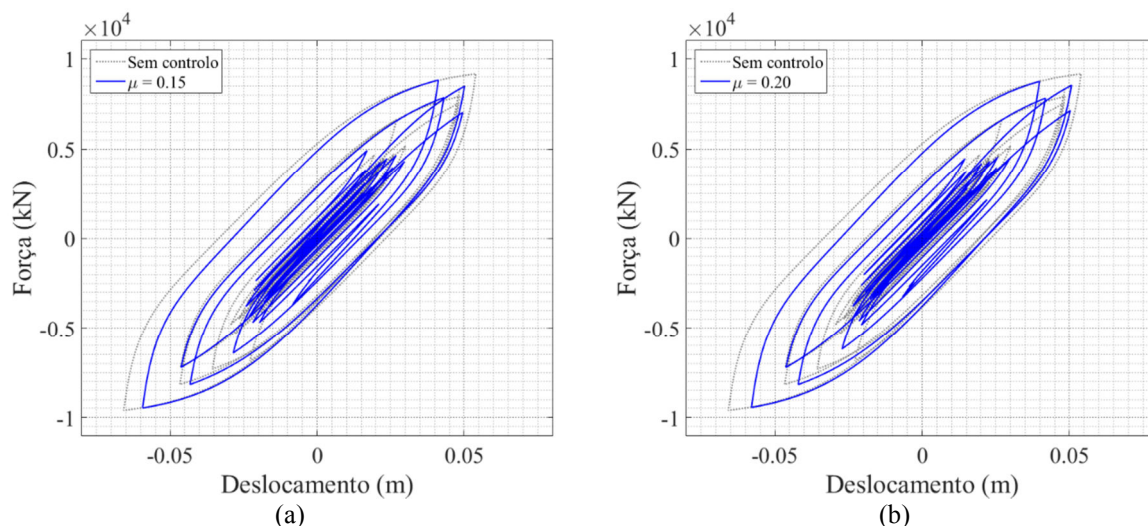


Fig. 21- Ciclos hysteréticos da estrutura com parede de enchimento solicitada pela aceleração sísmica, considerando a degradação da rigidez e da resistência (Caso II). (a) Rácio de massas de 15%; (b) Rácio de massas de 20%.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados das respostas de pico do sistema representado na Figura 1, que contemplam os deslocamentos, velocidades, acelerações e deslocamentos de desvio entre a estrutura e o TMD, para os três diferentes casos de comportamento hysterético e diferentes valores do rácio de massas entre o TMD e a estrutura são apresentados nas Tabelas 2 e 3, para a aceleração do sinal genérico e para a aceleração sísmica, respetivamente.

Observando a Tabela 2, é possível verificar em comparação com os outros rácios de massa, que o rácio de massas de 20% oferece os melhores resultados na redução de qualquer tipo de resposta de pico, seguido do rácio de massas de 15%. Conclui-se também que à medida que se aproxima de um caso de comportamento hysterético mais realista, as percentagens de redução tornam-se menores.

Tabela 2 - Respostas de pico da estrutura submetida à aceleração do sinal genérico.

		Respostas de pico					
Caso de comportamento histerético	Rácio de massas	x (m)	\dot{x} (m/s)	\ddot{x} (m/s ²)	desvio entre pisos (m)		
Sem parede	0.05	0.301	1.882	11.795	0.301		
		1.127	6.719	41.796	1.064		
	0.10	0.254	1.584	9.891	0.254		
		0.681	3.968	24.758	0.637		
	0.15	0.233	1.443	9.007	0.233		
		0.512	2.947	18.267	0.484		
	0.20	0.221	1.363	8.457	0.221		
		0.431	2.398	14.821	0.408		
Com parede	Caso 0	0.05	0.106 (-183%)	0.643 (-193%)	4.680 (-152%)	0.106 (-183%)	
			0.567 (-99%)	3.501 (-92%)	21.910 (-91%)	0.528 (-102%)	
		0.10	0.101 (-150%)	0.613 (-158%)	4.453 (-122%)	0.101 (-150%)	
			0.383 (-78%)	2.383 (-67%)	14.943 (-66%)	0.355 (-80%)	
	0.15	0.100 (-133%)	0.604 (-139%)	4.406 (-104%)	0.100 (-133%)		
		0.311 (-65%)	1.918 (-54%)	11.997 (-52%)	0.285 (-70%)		
	0.20	0.100 (-120%)	0.604 (-126%)	4.393 (-93%)	0.100 (-120%)		
		0.272 (-59%)	1.659 (-45%)	10.326 (-44%)	0.247 (-65%)		
	Caso I	0.05	0.132 (-128%)	0.819 (-130%)	5.520 (-114%)	0.132 (-128%)	
			0.661 (-70%)	4.066 (-65%)	25.237 (-66%)	0.623 (-71%)	
		0.10	0.123 (-106%)	0.762 (-108%)	5.158 (-92%)	0.123 (-106%)	
			0.444 (-54%)	2.730 (-45%)	17.109 (-45%)	0.414 (-54%)	
	0.15	0.120 (-94%)	0.743 (-94%)	5.031 (-79%)	0.120 (-94%)		
		0.353 (-45%)	2.171 (-36%)	13.576 (-35%)	0.331 (-46%)		
	0.20	0.119 (-86%)	0.735 (-85%)	4.987 (-70%)	0.119 (-86%)		
		0.306 (-41%)	1.862 (-29%)	11.616 (-28%)	0.286 (-43%)		
Caso II	0.05	0.278 (-8%)	1.699 (-11%)	10.653 (-11%)	0.278 (-8%)		
		1.027 (-10%)	5.977 (-12%)	35.704 (-17%)	0.948 (-12%)		
	0.10	0.227 (-12%)	1.395 (-14%)	8.739 (-13%)	0.227 (-12%)		
		0.648 (-5%)	3.697 (-7%)	22.541 (-10%)	0.594 (-7%)		
0.15	0.203 (-14%)	1.252 (-15%)	7.908 (-14%)	0.203 (-14%)			
	0.493 (-4%)	2.725 (-8%)	16.796 (-9%)	0.451 (-8%)			
0.20	0.192 (-15%)	1.178 (-16%)	7.460 (-13%)	0.192 (-15%)			
	0.415 (-4%)	2.209 (-9%)	13.630 (-9%)	0.378 (-8%)			

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

O caso em que as degradações da rigidez e da resistência são consideradas apresenta as menores reduções em qualquer tipo de respostas de pico e em qualquer valor do rácio de massas, quando comparado com o caso sem parede de preenchimento.

Também é possível verificar que no Caso II em que as degradações da rigidez e da resistência são consideradas, sendo este um cenário mais realista, os valores de qualquer uma das respostas de pico para o rácio de massas de 15% e 20% têm apenas uma pequena variação, quando comparados com os outros casos de comportamento histerético.

As mesmas conclusões podem ser retiradas ao analisar a Tabela 3, considerando agora as respostas de pico do sistema em estudo quando submetido à aceleração sísmica, embora a variação das percentagens de redução entre os casos de comportamento histerético e entre os valores do rácio de massas sejam menores devido à irregularidade da aceleração sísmica.

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

Respostas de pico						
Caso de comportamento histerético	Rácio de massas	x (m)	\dot{x} (m/s)	\ddot{x} (m/s ²)	desvio entre pisos (m)	
Sem parede	0.05	0.093	0.607	5.181	0.093	
		0.259	1.646	9.740	0.259	
	0.10	0.086	0.592	5.007	0.086	
		0.189	1.123	6.977	0.184	
	0.15	0.081	0.577	4.854	0.081	
		0.160	0.922	5.899	0.147	
	0.20	0.077	0.562	4.798	0.077	
		0.141	0.779	5.108	0.132	
Com parede	Caso 0	0.05	0.062 (-50%)	0.618 (2%)	6.264 (17%)	0.062 (-50%)
			0.146 (-78%)	0.895 (-84%)	6.294 (-55%)	0.154 (-68%)
		0.10	0.059 (-45%)	0.613 (3%)	6.130 (18%)	0.059 (-45%)
			0.118 (-60%)	0.740 (-52%)	5.617 (-24%)	0.124 (-48%)
	0.15	0.058 (-41%)	0.610 (5%)	6.007 (19%)	0.058 (-41%)	
		0.101 (-58%)	0.643 (-43%)	5.206 (-13%)	0.106 (-39%)	
	0.20	0.056 (-38%)	0.608 (8%)	5.899 (19%)	0.056 (-38%)	
		0.090 (-56%)	0.574 (-36%)	4.888 (-5%)	0.094 (-40%)	
	Caso I	0.05	0.063 (-47%)	0.628 (3%)	6.247 (17%)	0.063 (-47%)
			0.155 (-67%)	0.930 (-77%)	6.695 (-45%)	0.164 (-58%)
		0.10	0.061 (-41%)	0.623 (5%)	6.105 (18%)	0.061 (-41%)
			0.125 (-50%)	0.771 (-46%)	5.636 (-24%)	0.132 (-39%)
	0.15	0.059 (-37%)	0.620 (7%)	5.975 (19%)	0.059 (-37%)	
		0.108 (-48%)	0.669 (-38%)	5.218 (-13%)	0.113 (-30%)	
	0.20	0.058 (-34%)	0.618 (9%)	5.868 (18%)	0.058 (-34%)	
		0.096 (-46%)	0.597 (-30%)	4.894 (-4%)	0.101 (-31%)	
Caso II	0.05	0.063 (-47%)	0.627 (3%)	6.221 (17%)	0.063 (-47%)	
		0.156 (-66%)	0.931 (-77%)	6.705 (-45%)	0.163 (-58%)	
	0.10	0.061 (-41%)	0.622 (5%)	6.081 (18%)	0.061 (-41%)	
		0.126 (-49%)	0.771 (-46%)	5.613 (-24%)	0.132 (-40%)	
0.15	0.059 (-37%)	0.619 (7%)	5.952 (18%)	0.059 (-37%)		
	0.109 (-47%)	0.669 (-38%)	5.196 (-14%)	0.113 (-31%)		
0.20	0.058 (-34%)	0.617 (9%)	5.837 (18%)	0.058 (-34%)		
	0.097 (-45%)	0.596 (-31%)	4.872 (-5%)	0.100 (-32%)		

- 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.

Outra conclusão que pode ser retirada da análise da Tabela 3 é que a presença da parede no desempenho do TMD resulta num aumento das respostas de pico em termos de velocidades e acelerações da estrutura, devido à irregularidade constante do sinal de aceleração sísmica.

Em cada caso de comportamento histerético da parede de enchimento da estrutura, à medida que se avança para uma massa mais elevada do TMD, as respostas de pico da estrutura em termos de velocidades e acelerações diminuem, mas quando comparado com o rácio de massas correspondente sem parede de enchimento sofre um aumento, embora ao considerar a degradação da rigidez e da resistência da parede de enchimento da estrutura este aumento não seja muito evidente.

Observando os gráficos das Figuras 4 e 5, considerando o comportamento histerético simples da parede de enchimento da estrutura, verifica-se a redução da resposta em termos de deslocamento com o aumento da massa do TMD. O mesmo acontece quando o sistema em estudo é submetido à aceleração sísmica, porém não tão perceptível.

Ao observar em sequência os gráficos dos outros casos de comportamento histerético, para os dois diferentes sinais de aceleração em estudo, conclusões semelhantes podem ser retiradas. No entanto, no caso de comportamento histerético em que as degradações da rigidez e da resistência são consideradas, é verificada uma maior redução da resposta em termos de deslocamento quando comparada com os outros casos de comportamento histerético, ainda que a variação entre os rácios de massa de 15% e 20% seja muito pequena. Mais uma vez, na situação em que o sistema em estudo é submetido à aceleração sísmica verifica-se reduções significativas, embora não tão evidentes como no caso em que se considera a aceleração do sinal genérico.

Analisando agora os ciclos histeréticos do sistema submetido à aceleração do sinal genérico, considerando o comportamento histerético simples da parede de enchimento da estrutura (Figura 6), onde não há degradação da resistência e da rigidez, em que a última é definida pela mesma inclinação das curvas de carga e descarga com a evolução dos ciclos histeréticos, pode ser visto que em comparação com o caso sem controlo à medida que se avança para uma massa mais elevada do TMD mais comprimidos se tornam os ciclos histeréticos, significando que se obtém menores deslocamentos para uma mesma capacidade resistente da parede da estrutura.

Ao considerar a degradação da rigidez (Figura 12), onde a inclinação das curvas de carga e descarga variam com a evolução dos ciclos histeréticos, os mesmos resultados são obtidos, *i.e.*, com o aumento do rácio de massas mais comprimidos se tornam os ciclos histeréticos, verificando uma redução significativa do deslocamento relativamente ao caso não controlado.

Observando agora um caso de comportamento histerético mais realista, onde as degradações da rigidez e da resistência são consideradas em conjunto (Figura 18), é evidente que a perda de capacidade resistente da parede leva a maiores deslocamentos e eventualmente à rotura da parede para fora do seu plano, facto explicado pelo deslocamento permanente verificado nas Figuras 16 a 17 (linha verde), onde consta o caso não controlado. Foi necessário interromper a simulação dos ciclos histeréticos para este caso aos 15.8s, uma vez que a rotura da parede resultou numa instabilidade numérica.

Pode-se concluir que após a aplicação do sistema de controlo de vibrações, o TMD, verifica-se que as reduções dos deslocamentos para uma mesma capacidade resistente da parede de enchimento da estrutura são muito significativas. O rácio de massas de 20% apresenta a melhor solução, embora na maioria dos casos quando comparada com a solução de 15% a diferença entre eles não seja significativa na análise dos ciclos histeréticos.

Os mesmos resultados podem ser observados quando o sistema é submetido à aceleração sísmica, embora as reduções não sejam tão perceptíveis como no caso da aceleração do sinal genérico, devido à irregularidade da aceleração.

Pode concluir-se que o rácio de massas de 20% geralmente oferece os melhores resultados de reduções relativamente ao caso sem parede de enchimento, seguido do rácio de massas de 15%, que apresenta resultados muito próximos e em alguns casos melhores, por exemplo, nas respostas de aceleração no caso em que o sistema é sujeito à aceleração sísmica. Assim, o rácio de massas de 15% poderá ser a melhor solução, uma vez que possui uma massa menor

tendo, portanto, uma melhor aplicabilidade e transferindo menor carga à estrutura, obtendo quase os mesmos resultados que o rácio de massas de 20%.

Assim, verificou-se que alguns parâmetros de controlo fornecem uma variação significativa na resposta do sistema não linear. Os resultados levam a concluir que a seleção dos parâmetros de controlo adequados para um comportamento não linear específico pode melhorar o desempenho do sistema quando comparado com o do sistema linear.

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. (2013). Validação Numérica da Resposta Cíclica Experimental de Pórticos de Betão Armado (in portuguese). *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões - Mecânica Experimental*, 22, pp. 1-13.
- [4]-Cascati, 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.
- [7]-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.
- [8]-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.
- [9]-Wen, Y.-K. (1976). Article. Method for Random Vibration of Vibration of Hysteretic Systems. *J. Engrg. Mech. Div.*, ASCE, 102(2), pp. 249-263.