



ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE DISSIPADORES METÁLICOS EM EDIFÍCIOS ALTOS

Glediston N. C. Júnior

José L. V. de Brito

Fernando dos S. Oliveria

gledistonjr@yahoo.com.br

jlbrito@unb.br

oliveirafs@outlook.com

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, DF, Brasil

Suzana M. Avila

avilas@unb.br

Universidade de Brasília (UnB) - Faculdade do Gama – FGA

Área Especial de Indústria Projeção A, CEP: 72.444-240, Setor Leste (GAMA), Brasília, Brasil.

Resumo. Estruturas cada vez mais altas e esbeltas estão sendo projetadas e construídas, porém quando estão sob a ação de cargas dinâmicas, como terremotos e ventos, podem ficar sujeitas a vibrações inaceitáveis, logo o controle estrutural é uma alternativa para combater essas vibrações excessivas, no qual promove uma alteração nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura. Dentre os dispositivos existentes, destacam-se os amortecedores metálicos, como por exemplo: o Added Damping And Stiffness - ADAS e o Triangular Plate Added Damping And Stiffness - TADAS, amplamente utilizados na prática. Quando instalados corretamente, podem aumentar significativamente a capacidade de dissipação de energia das estruturas dos edifícios, reduzindo-a nos elementos principais da estrutura evitando, assim, possíveis danos. No presente estudo, foi realizado um estudo numérico que analisou o comportamento de dissipadores metálicos aplicados ao controle de vibrações em estruturas de edifícios, para tanto, um pórtico plano equipado com os dissipadores metálicos foi submetido a uma excitação sísmica. Foi realizado um estudo comparativo dos amortecedores, do tipo X Shape, Bottle Shape e Triangular, para verificar o comportamento de cada um desses dispositivos.

Palavras - chave: Dinâmica estrutural, Controle de vibração, Dissipadores metálicos.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do controle de vibrações em estruturas tem tido interesse tanto de pesquisadores como de engenheiros para tentar minimizar os problemas causados por vibrações excessivas devidas a cargas dinâmicas atuantes nas estruturas.

Uma alternativa para combater os efeitos das vibrações excessivas em sistemas estruturais é o controle estrutural, que basicamente, promove uma alteração nas propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela ação de forças externas. Com o uso do controle procura-se evitar o colapso da estrutura, permitindo que esta possa resistir de forma confortável e segura à ação de carregamentos tais como fortes ventos e terremotos. Pode ser classificado como: controle passivo, controle ativo, controle híbrido ou controle semi-ativo (Soong e Dargush, 1997; Spencer Jr. e Sain, 1997; Spencer Jr. e Soong, 1999).

O controle passivo consiste em um ou mais dispositivos que incorporados à estrutura, absorvem ou consomem uma parte da energia transmitida pelo carregamento dinâmico, reduzindo a dissipação dessa energia nos elementos da estrutura principal, evitando ou minimizando, assim, possíveis danos (Soong e Dargush, 1997). Segundo Fujino et al. (1996), essa dissipação se dá tanto pela conversão da energia cinética em calor, como também pela transferência de energia entre os modos de vibração.

Uns dos sistemas de controle passivo, amplamente utilizados na engenharia, são os amortecedores histeréticos, sendo que a dissipação consiste na deformação inelástica de um metal, normalmente um aço macio, ou mesmo ligas metálicas de chumbo ou outras mais complexas. Sendo assim, os amortecedores metálicos dissipam energia através do escoamento do metal (plastificação), ou seja, o seu efetivo funcionamento ocorre somente quando lhe for aplicada carga de magnitude suficiente para gerar tensões maiores que a de escoamento do metal. Este fato deve ser considerado na análise estrutural, bem como no projeto, de modo a poder aproveitar o máximo da ductilidade disponível do material utilizado.

De acordo com Maldonado (1995) os amortecedores histeréticos apresentam comportamento estável diante de um grande número de ciclos de carregamento, apresentam efeitos insignificantes em relação ao tempo de uso e possuem resistência às ações ambientais e aos efeitos da temperatura adequados. Além dessas características estes dispositivos são relativamente baratos e não se deterioram em longos períodos de tempo, mantendo assim suas propriedades estáveis durante toda a existência da estrutura, tendo que ser substituído somente após um evento que o leve à plastificação. E ainda, esses dispositivos têm a grande vantagem de poder ser construídos em todas as formas, facilitando assim o seu uso em espaços ou estruturas sem nenhum tipo de simetria (Soong e Dargush, 1997).

Dessa forma, os amortecedores metálicos são utilizados para dissipar energia em estruturas e assim resistir às ações dinâmicas como terremotos e ventos. Estes dispositivos oferecem uma grande capacidade de amortecimento com pequenos volumes em relação à totalidade do edifício.

Assim sendo, foi realizado um estudo numérico que analisou o comportamento de três dissipadores metálicos aplicados ao controle de vibrações em estruturas de edifícios. Foi feito um estudo comparativo dos amortecedores, do tipo X Shape (Whittaker et al., 1989), Triangular (Tsai et al., 1993) e Bottle Shape (Oliveira, 2016), para verificar o comportamento de cada um desses dispositivos.

2 DISSIPADORES METÁLICOS

2.1 ADAS - Added Damping And Stiffness

É provavelmente o mais popular entre os amortecedores metálicos. Consiste em múltiplas placas de aço em paralelo em forma de "X", como mostrado na Fig. 1. O número dessas placas em paralelo é variável permitindo ajustar o dissipador às necessidades da estrutura a qual se incorpora.

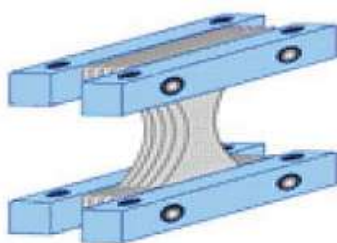


Figura 1. Dispositivo ADAS (Bagheri et al., 2011)

Este dispositivo é projetado para ser instalado em um pórtico de edifício, onde sua base seja conectada na parte superior do contraventamento tipo chevron (V invertido) e sua mesa na parte inferior da viga do pavimento. São utilizados para auxiliar a reduzir a resposta sísmica de estruturas através da sua deformação plástica, que produz um aumento substancial da energia histerética dissipada na estrutura.

Resistem principalmente às forças horizontais relacionadas com o deslocamento entre andares via deformação à flexão das placas individuais. Ao longo do dissipador ocorre uma proporcionalidade linear com a distribuição de momentos fletores, o qual deriva em uma generalização da plastificação em um curto intervalo de deslocamento (Chalco Pari, 2014).

Apesar de constituírem uma solução relativamente econômica e de serem eficazes na redução da resposta sísmica, no entanto, apresentam deformações permanentes após o seu funcionamento o que obriga à sua substituição.

2.2 TADAS - Triangular Plate Added Damping And Stiffness

Foi originalmente desenvolvido na Nova Zelândia e usado em aplicações em várias bases de isolamento. Após o trabalho experimental realizado por Tsai et al. (1993), foram utilizados em edifícios. Dispositivos de aço triangular também têm sido utilizados no Japão. De acordo com Constantinou et al. (1998) dispositivos semelhantes aos amortecedores com placa triangular têm sido desenvolvidos pela Obayashi Corporation.

É um dissipador constituído por placas Triangulares de aço dispostas em paralelo como mostrado na Fig. 2. A base maior da placa liga-se ao nível da viga de uma estrutura de pórticos, enquanto que a outra se articula com uma união de pino a dois contraventamentos dirigidos à base dos pilares do pórtico. A plastificação por flexão por curvatura simples é obtida com um deslocamento relativo entre os extremos da placa perpendicular a seu plano. Foi observado que ocorreu redução na resposta similar às obtidas com o ADAS, ao incorporar este sistema em um pórtico de aço em escala real (Chalco Pari, 2014).



Figura 2. Dispositivo TADAS (Tsai et al., 1993)

2.3 Bottle Shape

Oliveira (2016), em sua pesquisa, propõe uma nova geometria para um dissipador metálico, encontrada através da otimização topológica, como uma alternativa aos dissipadores de energia do tipo ADAS. A geometria proposta por Oliveira (2016) pode ser visualizada na Fig. 3.

Em seu trabalho foi realizado tanto estudo experimental como numérico, e foram obtidos resultados satisfatórios no desempenho do novo dissipador, confirmando a eficiência da geometria proposta.



Figura 3. Dispositivo Bottle Shape (Oliveira, 2016)

3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 Sistema Estrutural

Com os parâmetros do modelo de Bouc-Wen encontrados por Costa Júnior (2016) para o dissipador Triangular e com os parâmetros do modelo de Bouc-Wen encontrados por Oliveira (2016) para os dissipadores do tipo X Shape e Bottle Shape, foi comparado o comportamento desses dispositivos em um modelo estrutural mais completo, no qual, em um pórtico plano submetem-se os três dispositivos à mesma excitação sísmica e avaliaram os

comportamentos de cada um desses elementos. Os parâmetros do modelo de Bouc-Wen encontrados por Costa Júnior (2016) e Oliveira (2016) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros do modelo de Bouc-Wen encontrados por Costa Júnior (2016) e Oliveira (2016)

Parâmetros	Dissipadores			Unidades
	X Shape	Bottle Shape	Triangular	
f_y	1447	1344	984	N
d_y	0.005478	0.004549	0.003936	m
k_s	264000	295000	250000	N/mm
k_y	36000	25000	62000	N/m
r	0.136	0.085	0.248	-

Sendo:

- f_y : Força de escoamento
 d_y : Deslocamento de escoamento
 k_s : Rigidez elástica inicial
 k_y : Rigidez pós-escoamento
 r : Taxa de endurecimento

O pórtico plano estudado foi o mesmo usado por Tena-Colunga (1997) que realizou a modelagem numérica do comportamento do dissipador metálico. A Fig. 4 exibe as dimensões do pórtico plano utilizado e o número de placas dos dissipadores metálicos utilizados em cada pavimento.

A estrutura foi modelada utilizando o procedimento de SAP2000 e, por conseguinte, um modelo baseado no método de Wen (1976) para os elementos X Shape, Bottle Shape e Triangular. Os elementos são modelados em SAP2000 atribuindo uma zona de painel com uma propriedade link não linear (plasticidade de Wen com o parâmetro ($n = 1$) ao nó do centro do vão onde o contraventamento chevron intercepta à viga no nível do pavimento. A propriedade não linear é especificada para a direção horizontal (cisalhamento no plano X-Y). Em relação às condições de contorno, os dispositivos foram modelados assumindo que os graus de liberdade rotacional e translacional (na direção axial) daqueles nós que conectam os dispositivos foram restringidos.

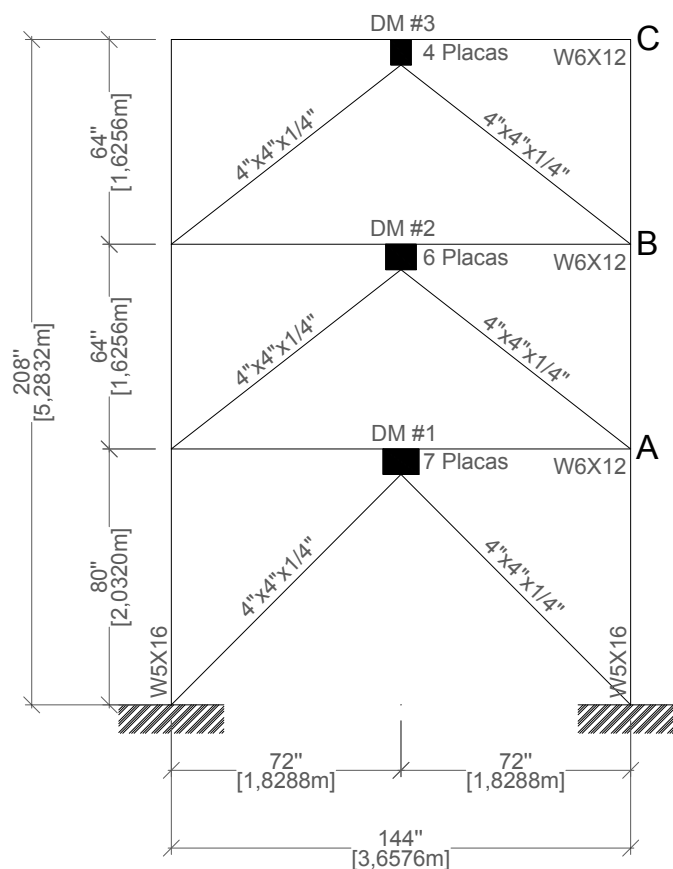


Figura 4. Estrutura reticulada analisada (Oliveira, 2016)

As propriedades dos elementos estruturais do pórtico plano analisado que foram inseridas no programa, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades dos elementos estruturais do pórtico plano analisado (Whittaker et al., 1989)

Elementos/Propriedades	A (m ²)	I (m ⁴)
Viga - (W6x12)	0.002284	0.0000090322
Pilar - (W5x16)	0.003032	0.0000088657
Contraventamento - (4"x4"x1/4")	0.002316	-

Sendo:

A: Área da seção transversal

I: Momento de inércia da seção transversal em torno do eixo z

Os parâmetros utilizados para a análise do pórtico plano para os 3 tipos de dissipadores são apresentados na Tabela 3. Ressaltando que os pilares, as vigas e os contraventamentos possuem elevada resistência em relação aos dissipadores metálicos, garantindo assim que o comportamento não linear seja concentrado nos mecanismos de dissipação de energia,

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na análise do pórtico plano para os 3 tipos de dissipadores

Nº de Placas	Parâmetros	Dissipadores			Unidades
		X Shape	Bottle Shape	Triangular	
4	f_y	5788	5376	3936	N
	k_s	0.001056	0.001180	0.001000	N/m
	r	0.136	0.085	0.248	-
6	f_y	8682	8064	5904	N
	k_s	0.001584	0.001770	0.001500	N/m
	r	0.136	0.085	0.248	-
7	f_y	10129	9408	6888	N
	k_s	0.001848	0.002065	0.001750	N/m
	r	0.136	0.085	0.248	-

3.2 Excitação Sísmica

O modelo em estudo foi submetido à excitação sísmica correspondente ao registrado no terremoto El Centro 1940 relativa à componente norte sul do registro de aceleração escalado para uma aceleração de pico do solo de 0.33g. A Fig. 5 exibe os registros das acelerações em função do tempo.

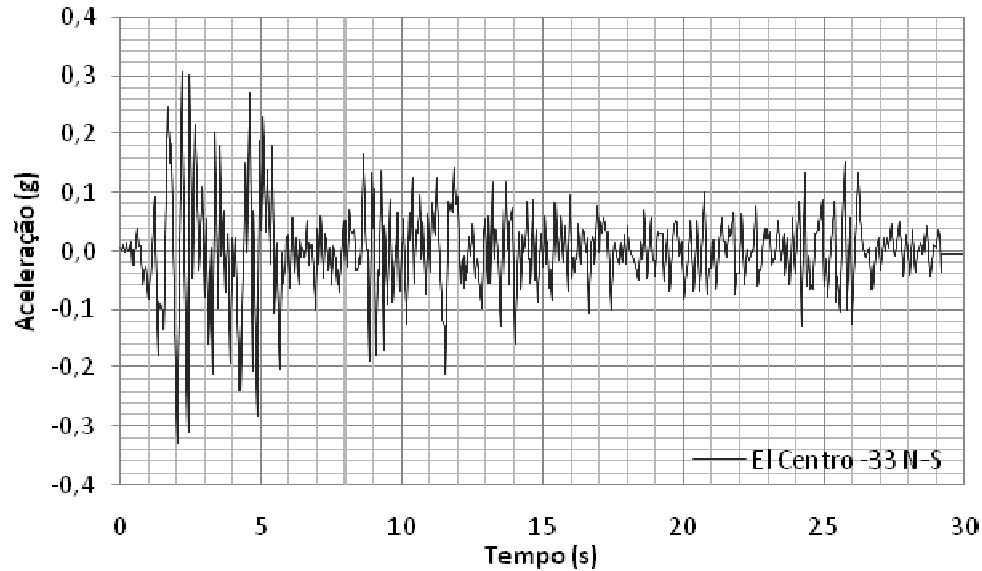


Figura 5. Acelerograma El Centro 33 N-S

4 APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Adiante são apresentados os resultados da análise dinâmica não linear do sistema estrutural submetido à excitação sísmica. Foram avaliados os deslocamentos da estrutura nos pontos A, B, C, DM#1, DM#2 e DM#3 de acordo com a nomenclatura apresentada na Figura 4. E em seguida foram avaliadas as forças atuantes nos dissipadores metálicos DM#1, DM#2 e DM#3.

Primeiramente foram analisados os deslocamentos da estrutura composta com os dissipadores metálicos do tipo X Shape, Bottle Shape e Triangular para os nós A, B e C e logo após foram comparados com os deslocamentos da estrutura sem controle.

Os gráficos de deslocamentos em função do tempo para a estrutura com e sem controle para os nós A, B e C são apresentados na Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8, respectivamente.

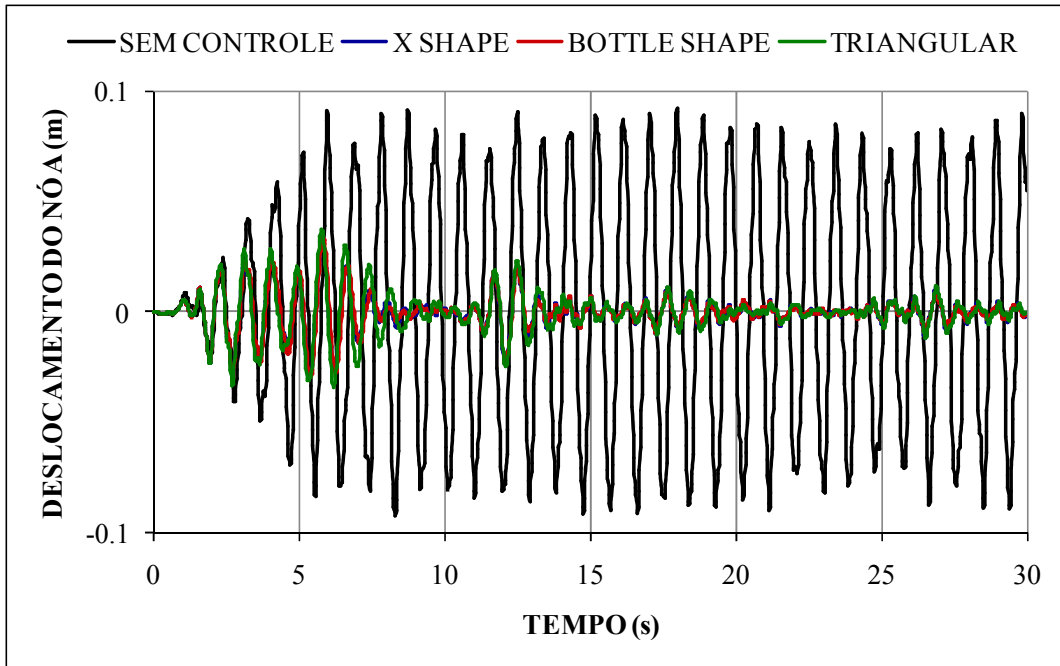


Figura 6. Deslocamentos em função do tempo para a estrutura com e sem controle no nó A

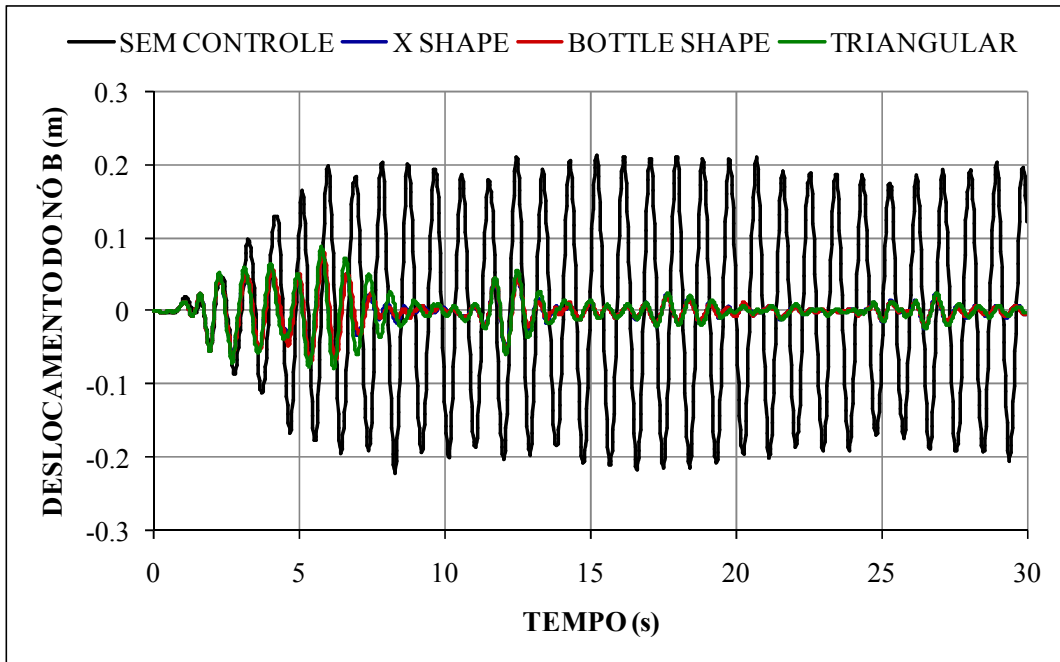


Figura 7. Deslocamentos em função do tempo para a estrutura com e sem controle no nó B

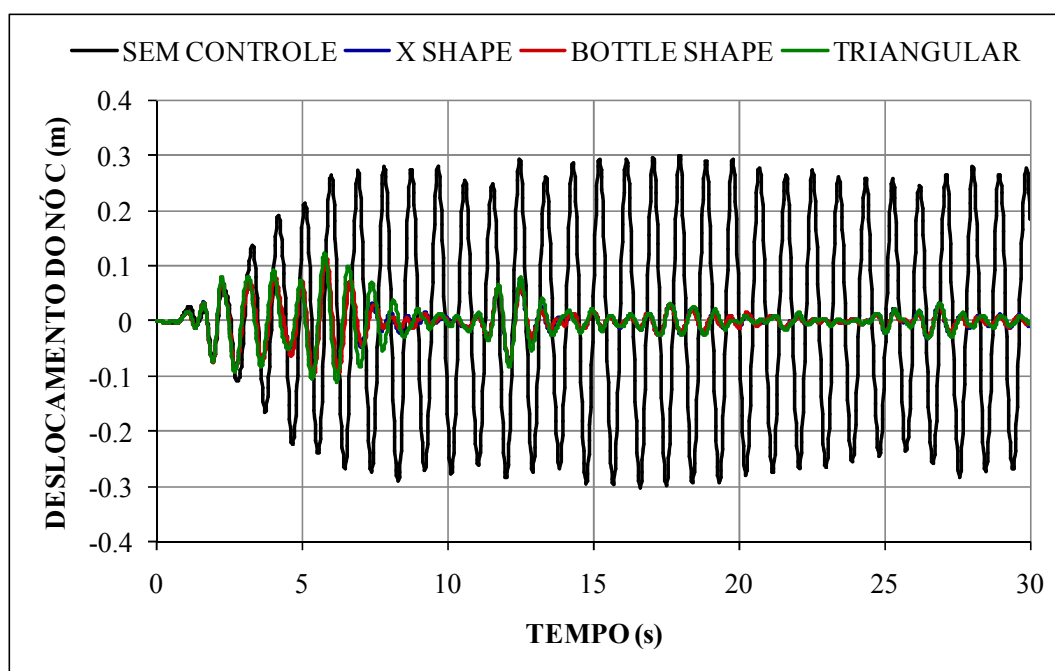


Figura 8. Deslocamentos em função do tempo para a estrutura com e sem controle no nó C

Na Tabela 4, são mostrados os deslocamentos máximos e o valor quadrático médio (RMS - do inglês: Root Mean Square) do deslocamento da estrutura equipada com os dissipadores metálicos do tipo X Shape, Bottle Shape e Triangular e da estrutura sem controle. Pode ser observado que houve significativo ganho na redução dos deslocamentos, variando entre 144% e 577%.

Tabela 4 - Comparação entre deslocamentos do pórtico plano

Deslocamentos		Sem Controle	X Shape	Bottle Shape	Triangular	Δ	Δ	Δ
		(m)	(m)	(m)	(m)	(%)	(%)	(%)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)/(2)	(1)/(3)	(1)/(4)
Nó A	RMS	0.05343	0.00805	0.00825	0.00971	564%	548%	450%
	Máximo	0.09213	0.03314	0.03435	0.03782	178%	168%	144%
Nó B	RMS	0.12875	0.01903	0.01963	0.02288	576%	556%	463%
	Máximo	0.22131	0.07545	0.08077	0.08747	193%	174%	153%
Nó C	RMS	0.18041	0.02664	0.02749	0.03204	577%	556%	463%
	Máximo	0.30117	0.10694	0.11510	0.12265	182%	162%	146%

Na Tabela 5 são apresentados os dados relativos aos deslocamentos absolutos máximos dos pontos analisados do pórtico plano para os diferentes tipos de dissipadores metálicos. Pode ser observado que o dispositivo do tipo X Shape apresentou deslocamentos absolutos máximos menores em relação aos outros, sendo que a diferença entre os deslocamentos variou entre 3.54% e 15.36%.

Tabela 5 - Comparação entre deslocamentos absolutos máximos de pontos do pórtico plano

	X Shape	Bottle Shape	Triangular	Δ	Δ	Δ
	(m)	(m)	(m)	(%)	(%)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(1)/(2)	(1)/(3)	(2)/(3)
Nó A	0.03314	0.03435	0.03782	3.54%	12.39%	9.18%
Nó B	0.07545	0.08077	0.08747	6.59%	13.74%	7.66%
Nó C	0.10694	0.11510	0.12265	7.09%	12.81%	6.16%
DM#1	0.03305	0.03427	0.03770	3.56%	12.33%	9.09%
DM#2	0.04210	0.04645	0.04974	9.36%	15.36%	6.62%
DM#3	0.03101	0.03383	0.03516	8.33%	11.80%	3.78%

Após as avaliações dos deslocamentos da estrutura, foi feita uma análise das solicitações nos dissipadores metálicos DM#1, DM#2 e DM#3.

Para cada um dos dispositivos foram criados os diagramas de histerese, sendo assim possível fazer a análise das solicitações nos dissipadores metálicos. As curvas de histerese do dissipador metálico denominado DM#1 nos formatos X Shape, Bottle Shape e Triangular são apresentados na Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11, respectivamente.

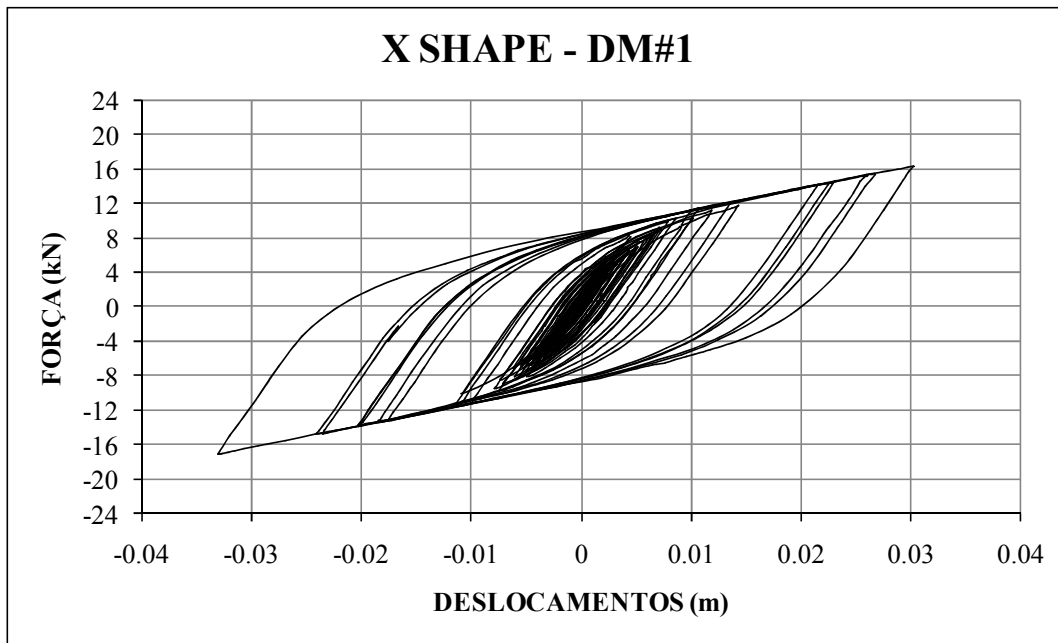


Figura 9. Comportamento histerético do dissipador metálico DM#1 do tipo X Shape quando a estrutura é submetida à excitação sísmica

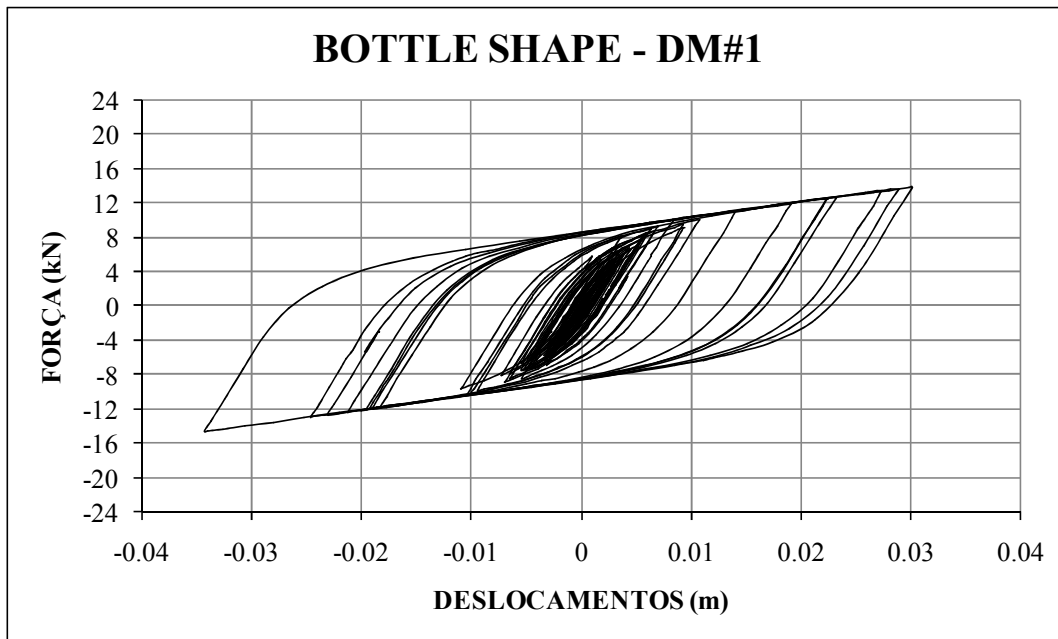


Figura 10. Comportamento histerético do dissipador metálico DM#1 do tipo Bottle Shape quando a estrutura é submetida à excitação sísmica

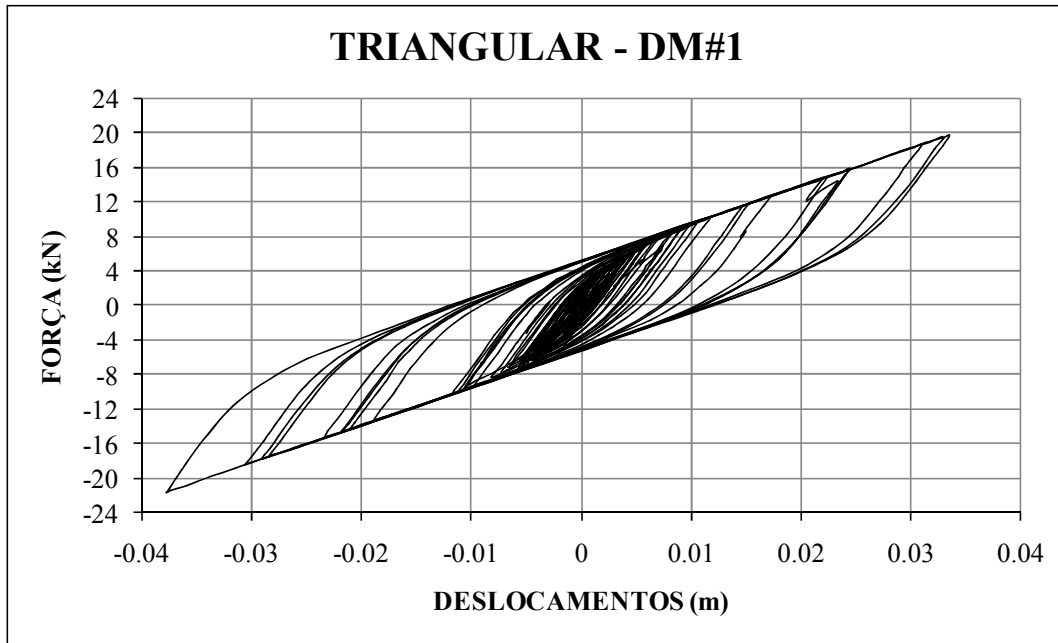


Figura 11. Comportamento histerético do dissipador metálico DM#1 do tipo Triangular quando a estrutura é submetida à excitação sísmica

Ao analisar os gráficos de histerese dos dissipadores, pode ser observado que as forças absolutas máximas absorvidas pelos dissipadores metálicos do tipo Bottle Shape são inferiores às absorvidas pelos outros dissipadores. Desta maneira, a Tabela 6 apresenta a comparação entre as forças absolutas máximas atuantes nos dissipadores, e é verificado que as diferenças dessas forças variam de 13.74% a 37.38%.

Da mesma forma foi verificado que os dissipadores metálicos posicionados na parte inferior do pórtico são os mais solicitados, consequentemente, necessitando de maior rigidez, comprovando a escolha de um maior número de dissipadores metálicos na estrutura à proporção que a mesma se aproxima da base.

Tabela 6 - Comparação entre forças absolutas máximas atuantes nos dissipadores metálicos

	X Shape	Bottle Shape	Triangular	Δ	Δ	Δ
	(N)	(N)	(N)	(%)	(%)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(1)/(2)	(1)/(3)	(2)/(3)
DM#1	17060	14620	21540	16.64%	20.82%	32.11%
DM#2	16570	14370	22940	15.35%	27.76%	37.38%
DM#3	9450	8310	11680	13.74%	19.07%	28.84%

5 CONCLUSÕES

A partir das análises e dos ensaios realizados foi constatado resultados satisfatórios, comprovando uma alternativa para o controle de vibrações em estruturas de edifícios. Além do mais, foi verificado que os 3 tipos de dissipadores metálicos diminuem consideravelmente a dissipação de energia em relação à estrutura que não possui nenhum tipo de controle.

Finalmente, estudando os resultados obtidos das forças atuantes nos dissipadores metálicos, bem como, os deslocamentos nos nós da estrutura, é averiguado que os diferentes tipos de dissipadores se comportam de modo similar com pequenos percentuais de diferença entre as variáveis comparadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGHERI, S., HADIDI, A., & ALILOU, 2011. A. Heightwise distribution of stiffness ratio for optimum seismic design of steel frames with metallic-yielding dampers. *Procedia engineering*, vol. 14, pp. 2891-2898.

CHALCO PARI, D. M., 2014. *Análise sísmica de pórticos planos com dissipadores metálicos de energia*. Dissertação em engenharia civil, PECC-UnB, Universidade de Brasília.

COMPUTER AND STRUCTURES INC. CSI, 2009. *Analysis Reference Manual For SAP2000*. ETABS and SAFE. Computers and Structures, Inc..

CONSTANTINOU, M. C., SOONG, T. T., & DARGUSH, G. F., 1998. *Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit*. MCEER Monograph No. 1, Multidisciplinary center for earthquake engineering research, Buffalo, NY.

COSTA JÚNIOR, G. N., 2016. *Estudo comparativo do desempenho de dissipadores metálicos em edifícios altos*. Dissertação em andamento em engenharia civil, PECC-UnB, Universidade de Brasília.

FUJINO, Y., SOONG, T. T., & SPENCER JR., B. F., 1996. Structural control: basic concepts and applications. *Proceedings of ASCE structures congress*, Chigago, Illinois.

MALDONADO, J. C., 1995. *Passive and active control of structures*. Dissertação de mestrado, Department of civil and Environmental engineering, Massachusetts institute technology.

OLIVEIRA, F. S., 2016. *Otimização topológica de dissipadores metálicos aplicados ao controle de vibrações em estruturas*. Tese em engenharia civil, PECC-UnB, Universidade de Brasília.

SOONG, T. T., & DARGUSH, G. F., 1997. *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Chichester: John Wiley & Sons.

SPENCER JR., B. F., & SAIN, M. K., 1997. Controlling buildings: a new frontier in feedback. *Special issue of the IEEE control systems magazine on emerging technology*, vol. 17, n. 6, pp. 19-35.

SPENCER JR., B. F., & SOONG, T. T., 1999. New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA. *Proceedings of international post-smirt conference seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibration of structures*, Cheju, Korea.

TENA-COLUNGA, A., 1997. Mathematical modelling of the ADAS energy dissipation device. *Engineering Structures*, vol. 19, n. 10, pp. 811-821.

TSAI, K. C. et al., 1993. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*, vol. 9, n. 3, pp. 505-528, 1993.

WEN, K. Y., 1976. Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, vol. 1-02, n. EM2, pp. 249-263.

WHITTAKER, A. S. et al., 1989. Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping And Stiffness Elements. *Earthquake Engineering Research Center*, University of California at Berkeley, Report N°. UCB/EERC-89/02.