

Uma nova metodologia para a distribuição ótima de dissipadores em edifícios altos

A new methodology for the optimal distribution of dampers on tall buildings

Isabel Brás
Luís Guerreiro

Resumo

O uso de dissipadores viscosos para o controlo da resposta sísmica de edifícios é uma solução eficaz e bem conhecida no meio técnico especializado. Um dos principais problemas na definição de uma solução com dissipadores viscosos é a determinação dos melhores locais para instalação dos dissipadores. Para melhorar a eficácia da solução, os dissipadores devem ser instalados entre os pisos onde a capacidade para dissipar energia é maior. No caso dos dissipadores viscosos, estes devem ser localizados entre os pisos onde são esperados maiores valores da velocidade relativa. Neste artigo é apresentado um novo método para a identificação dos locais mais favoráveis para a instalação dos dissipadores, baseado na avaliação do valor esperado da velocidade relativa entre pisos. De acordo com este método, as melhores localizações dependem não só das características dinâmicas da estrutura mas também das características do sismo, já que a avaliação é feita através de um parâmetro que mede a resposta sísmica da estrutura.

Abstract

The use of viscous dampers for the control of seismic displacements on buildings is an efficient and well known solution between the specialized engineers. One of the main problems in the viscous dampers solution definition is the choice of the best locations to install the dampers. To improve the solution's behavior, the dampers must be placed between storeys, where the dissipation capacity is higher. When using viscous dampers, these must be placed between the storeys where the higher values of relative velocity are expected. In this paper a new methodology for the definition of the most favorable locations for the dampers installation based on the assessment of the expected values of the relative velocity is presented. According to this methodology, the best locations depend not only on the structural dynamic properties but also of the seismic characteristics.

Palavras-chave: Dissipadores viscosos / Edifícios altos / Controlo de deslocamentos

Keywords: Viscous dampers / Tall buildings / Displacement control

Isabel Brás

IST
Lisboa, Portugal
isabel.bras@ist.utl.pt

Luís Guerreiro

Professor Associado
IST
Lisboa, Portugal
luis.guerreiro@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

BRÁS, I. [et al.] – Uma nova metodologia para a distribuição ótima de dissipadores em edifícios altos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 2. ISSN 2183-8488. (novembro 2016) 43-50.

1 Enquadramento

A ação sísmica é uma das forças da natureza com maior capacidade de destruição. Muitas vezes associada a efeitos secundários, como tsunamis e incêndios, é do conhecimento comum que, se não forem tomadas medidas preventivas adequadas, pode levar a grandes perdas, quer sociais quer económicas.

Os sistemas de proteção sísmica, nos quais se incluem os sistemas de dissipação de energia, são dispositivos que contribuem para melhorar o desempenho das estruturas face à ação do sismo, evitando ou atenuando, dessa forma, a ocorrência de danos excessivos.

1.1 Sistemas de proteção sísmica

As técnicas de proteção sísmica podem classificar-se como ativas, passivas ou, ainda, semiativas, consoante a necessidade ou não de fornecer energia para o seu funcionamento.

Os sistemas ativos são os mais exigentes em termos de quantidade de energia a fornecer para controlar o movimento da estrutura. Por sua vez, os sistemas de proteção passivos são mais simples de aplicar que os anteriores e, contudo, bastante eficazes. Os sistemas de dissipação de energia (dissipadores de energia) e o isolamento de base são alguns exemplos de sistemas de proteção passivos.

Atualmente, os sistemas de dissipação de energia parecem ser uma das técnicas mais conhecidas [1]. São dispositivos que, ao dissiparem a energia do sismo, provocam uma diminuição dos deslocamentos nas estruturas, melhorando, assim, o desempenho das mesmas face à ação sísmica. Estes sistemas podem apresentar três tipos diferentes de comportamento: dissipadores do tipo histerético, do tipo viscoso e do tipo viscoelástico.

1.2 Metodologias de otimização em altura

Nos anos mais recentes, a problemática da otimização da distribuição em altura de dissipadores de energia em edifícios tem vindo a ser estudada [2] [3] [4]. No entanto, não existe ainda uma metodologia que possa ser considerada preponderante relativamente a outras.

De facto, as técnicas de otimização em altura têm por base alguns pressupostos e simplificações que fazem com que algumas das metodologias só sejam aplicáveis a casos de estudo específicos. Por outro lado, há métodos cuja implementação prática é difícil de levar a cabo devido à elevada complexidade computacional. Relativamente a este aspeto, salienta-se a importância de perceber se a complexidade inerente a estes métodos mais sofisticados conduz a soluções em que o desempenho das estruturas seja melhor que o dos métodos com aplicação mais simples [2].

Idealmente, toda a metodologia de distribuição ótima de dissipadores deve cumprir três condições: simplicidade, aplicabilidade e eficiência [5]. Num processo de dimensionamento de uma solução com dissipadores são colocadas à partida duas questões essenciais: i) irão ser aplicados dissipadores todos iguais ou não; ii) irão ser aplicados dissipadores entre todos pisos (solução uniforme) ou não. Neste trabalho admitiu-se que serão aplicados dissipadores iguais em todas as localizações. Relativamente à segunda questão, se a opção

for aplicar dissipadores somente entre alguns dos pisos, um novo problema surge: quais as melhores localizações para a aplicação deste número mais reduzido de dissipadores.

A metodologia apresentada neste trabalho permite ordenar as possíveis localizações em função da sua potencial capacidade de dissipar energia. Esta capacidade é avaliada com base no valor esperado da velocidade relativa entre pisos para uma determinada ação sísmica. Deste modo a solução obtida depende da ação considerada.

A avaliação da velocidade relativa é feita com base nas configurações modais obtidas através de uma análise modal clássica. Esta opção torna os resultados independentes do amortecimento considerado e da forma como os dissipadores são distribuídos. Os autores consideram que esta restrição não invalida a aplicação desta metodologia para definição de uma solução inicial, carecendo sempre de uma análise rigorosa da solução a definir.

2 Dissipadores viscosos e energia dissipada

2.1 Modo de funcionamento

O funcionamento dos dissipadores do tipo viscoso baseia-se na compressão e circulação de um fluido no dissipador. Na Figura 1 [6] representam-se de forma esquemática as várias fases do funcionamento de um dissipador deste tipo.

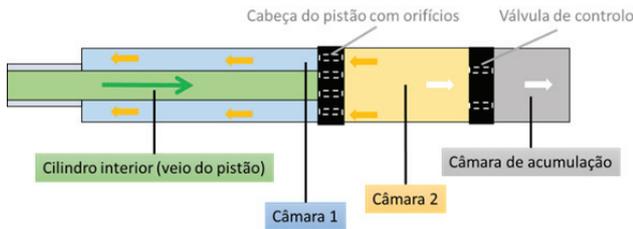


Figura 1 Modo de funcionamento de um dissipador viscoso [6]

O movimento do dissipador inicia-se quando a ação sísmica força o pistão para o interior do cilindro e, desta forma, a câmara 2 fica comprimida – seta a verde. De seguida, até a força de compressão na câmara 1 e na câmara 2 se igualarem, o fluido passa pelos orifícios na cabeça do pistão – setas a laranja. De modo a controlar o ressalto do fluido para montante, existe uma válvula de controlo que, quando necessário, liberta o fluido para uma câmara de acumulação – setas a branco.

2.2 Força de dissipação

A força num dissipador do tipo viscoso varia unicamente com a velocidade relativa entre as extremidades do dissipador (v). Esta relação é dada por (1) [7]:

$$F = C|v|^\alpha \text{sign}(v) \quad (1)$$

em que o parâmetro α depende das características do fluido e a constante C varia com as dimensões e geometria do aparelho (designam-se por dissipadores lineares quando $\alpha = 1$).

Desta forma, a força de dissipação resulta do movimento relativo entre os pontos aos quais estão ligadas as extremidades do dissipador. Dado que a solução mais tradicional é ligar os dissipadores em dois pisos consecutivos, a força de dissipação depende do movimento relativo entre pisos.

2.3 Medida da energia dissipada

A energia dissipada em cada ciclo de um dissipador do tipo viscoso é proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre as suas extremidades [6]. Como consequência, assume-se que uma forma de avaliar a capacidade de dissipar energia de uma determinada localização pode ser feita com base na estimativa do valor esperado do quadrado da velocidade relativa entre as extremidades do dissipador ($E[V^2(t)]$).

Assumindo um dissipador com as extremidades ligadas a dois pisos consecutivos, o valor de $E[V^2(t)]$ pode ser estimado para um determinado piso i através da expressão (2) [6].

$$E[V_i^2(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{v_i}(w) dw \quad (2)$$

em que S_v é a Função de Densidade Espectral de Potência (espectro de potência) de velocidades relativas entre pisos, calculada para o piso i (velocidade relativa entre o piso i e o piso $i - 1$).

Por sua vez, S_v depende do espectro de potência da ação (S_a) e das características dinâmicas da própria estrutura. Esta relação é expressa em (3) [8].

$$S_{v_i}(w) = |H(w)|_i^2 S_a(w) \quad (3)$$

As características dinâmicas da estrutura estão explícitas na expressão da função de transferência de velocidades relativas entre pisos ($H(w)$), calculada para o piso i .

Por outro lado, uma vez que a deformação do dissipador é na direção do seu eixo, a função de transferência tem de ter em conta a inclinação do mesmo, por forma a que a velocidade relativa entre as extremidades seja calculada segundo a direção do dissipador. A função de transferência proposta nesta metodologia encontra-se expressa na equação (4) [6].

$$H(w)_i = \sum_n -FP_n \phi_{d_i}^{rel} \frac{-(2\xi \rho_n w^2) - w(\rho_n^2 - w^2)i}{(\rho_n^2 - w^2)^2 + (2\xi \rho_n w)^2} \quad (4)$$

em que:

FP_n é o fator de participação modal do modo de vibração n ;

ξ é o coeficiente de amortecimento da estrutura;

ρ_n é a frequência angular de vibração do modo n ;

w é a frequência angular.

A definição da grandeza $\phi_{d_i}^{rel}$ está esquematizada na Figura 2 e é expressa pela equação (5) [6].

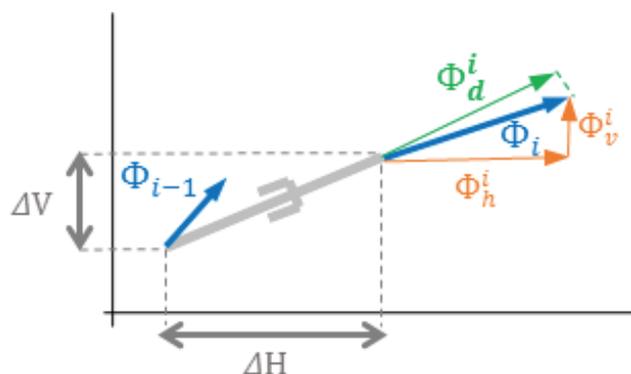


Figura 2 Parcela do vetor configuração modal segundo a direção do dissipador ϕ_{di}^{rel} [6]

$$\phi_{di}^{rel} = \frac{(\phi_h^i - \phi_h^{i-1})\Delta H + (\phi_v^i - \phi_v^{i-1})\Delta V}{\sqrt{\Delta H^2 + \Delta V^2}} \quad (5)$$

em que:

ϕ_h^i e ϕ_v^i são, respetivamente, as parcelas do deslocamento horizontal e vertical do vetor configuração modal ϕ ; e ΔH e ΔV são a projeção do comprimento do dissipador, respetivamente, na direção horizontal e vertical.

É importante salientar que, apesar de se ter referido a ligação como sendo entre dois pisos consecutivos, se percebe pela análise da expressão obtida anteriormente que a estimativa da energia dissipada é possível para outra forma de ligação dos dissipadores.

3 Metodologia de cálculo

As etapas que se propõem nesta metodologia para a determinação da distribuição ótima de dissipadores são as seguintes:

1. Definir o espectro de potência da ação (S_a);
2. Definir a função de transferência para cada posição a testar ($H(w)$);
3. Obter o espectro de potência da resposta em velocidades relativas para cada posição a testar (S_v);
4. Calcular o valor esperado do quadrado da velocidade relativa para cada posição a testar ($E[V^2(t)]$);
5. Ordenar os valores de $E[V^2(t)]$.

Uma vez ordenados os valores da velocidade relativa em cada posição, ficam conhecidas, dessa forma, as posições ótimas para colocar os dissipadores, isto é, consegue-se definir a distribuição ótima de dissipadores, que será a que contém as localizações onde o valor de $E[V^2(t)]$ é mais elevado.

Fica claro que a distribuição ótima nesta metodologia resulta da análise da estrutura sem dissipadores, não dependendo, por isso, do número nem das características dos dissipadores que se pretende instalar. Depende apenas da forma de ligação dos dissipadores que, por norma, é condicionada pela arquitetura do edifício.

Neste sentido, embora as localizações ótimas fiquem bem definidas a partir da especificação das grandezas necessárias no final de cada etapa, é de salientar a importância de, numa última fase, se verificar, o desempenho da solução ótima encontrada.

Para o efeito torna-se necessário proceder a uma avaliação da resposta da estrutura, tendo em conta o número e o tipo de dissipadores que se pretende colocar.

Assinala-se, contudo, que as localizações ótimas previamente determinadas no método aqui apresentado não dependem desta avaliação, a qual apenas consiste numa verificação posterior à aplicação do método.

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Apresentação dos exemplos

Nesta secção são apresentados os resultados da aplicação desta metodologia a três pórticos planos com vinte pisos. Com base nos resultados obtidos foram estudadas soluções com um número de dissipadores inferior ao número de pisos, tendo-se optado por considerar soluções com 10 dissipadores (metade do número de pisos). Numa segunda fase fez-se uma comparação entre o desempenho da solução com 10 dissipadores e o desempenho da configuração uniforme de dissipadores em altura (um dissipador por piso).

Os dissipadores vão ser instalados entre dois pisos consecutivos e as estruturas em análise são denominadas A, B e C. O pórtico tipo para cada uma das estruturas encontra-se definido em [6] e é composto por quatro pilares, dispostos lateralmente, e uma parede central, simulada por um elemento de maiores dimensões.

A largura do elemento central aumenta progressivamente da estrutura A para a estrutura C. Desta forma, o comportamento tipo parede vai sendo sucessivamente mais predominante da estrutura A para a estrutura C.

As características genéricas das estruturas encontram-se na Tabela I. Na Tabela II encontram-se as dimensões da parede central de cada uma das estruturas.

Tabela I Características genéricas dos exemplos de aplicação

| | |
|----------------------------|----------------------------|
| Número de pisos | 20 |
| Espaçamento entre pisos | 4 m |
| Espaçamento entre pórticos | 5 m |
| Espessura da laje | 0,20 m |
| Tipo de betão | C40/50 |
| Pilares | 0,80 × 0,80 m ² |
| Vigas | 0,25 × 0,75 m ² |

Tabela II Exemplos de aplicação

| Estrutura | Elemento central | Imagem ilustrativa |
|-----------|----------------------------|--|
| A | 0,80 × 0,20 m ² |  |
| B | 5,0 × 0,20 m ² |  |
| C | 10,0 × 0,20 m ² |  |

4.2 Energia dissipada

Os gráficos que mostram os resultados da medida da energia dissipada por piso para cada uma das estruturas A, B e C encontram-se, respetivamente, na Figura 3, Figura 4 e Figura 5 [6].

Nos gráficos são representados os valores esperados do quadrado da velocidade de cada piso normalizados ao valor máximo estimado para a estrutura em causa. Deste modo o valor máximo de cada gráfico é unitário.

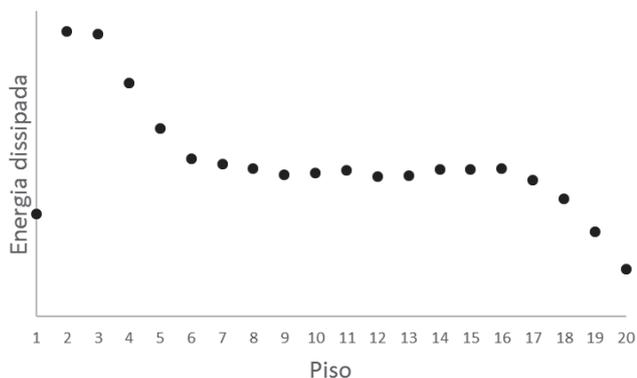


Figura 3 Energia dissipada por piso – estrutura A [6]

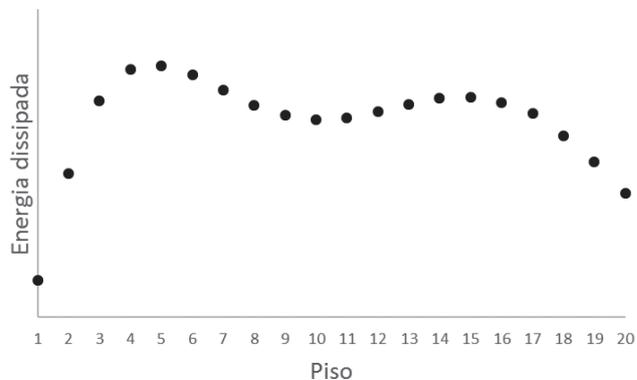


Figura 4 Energia dissipada por piso – estrutura B [6]

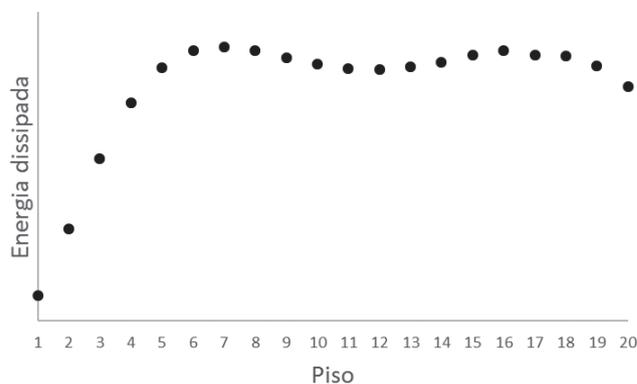


Figura 5 Energia dissipada por piso - estrutura C [6]

4.3 Distribuição ótima

A partir dos valores da medida da energia dissipada por piso obtiveram-se as distribuições das dez melhores posições em cada uma das estruturas.

As configurações ótimas resultantes da aplicação da metodologia estão assim representadas na Figura 6 [6].

Observa-se, pela figura, que as melhores localizações vão variando da estrutura A para a estrutura C, evoluindo de posições mais baixas para posições mais perto do topo da estrutura. Confirma-se, desta forma, o que era esperado, uma vez que esta variação acompanha a evolução global do comportamento da estrutura, revelando um aumento do comportamento tipo parede da estrutura A para a estrutura C. Observa-se também que a distribuição ótima contém duas zonas de distribuição distintas: uma zona com dissipadores em pisos mais baixos e outra zona em pisos mais elevados.

Conclui-se, assim, que a metodologia proposta obtém resultados em que o efeito do comportamento misto pórtico-parede da estrutura tem peso significativo, com as posições ótimas a deslocarem-se para pisos mais elevados à medida que se incrementa o comportamento tipo parede.

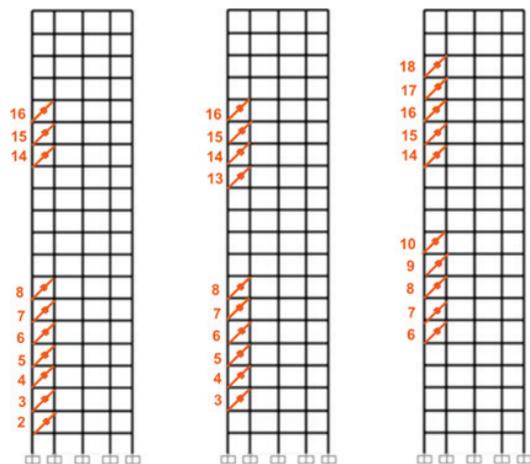


Figura 6 Distribuição ótima (10 dissipadores) – esquerda: A, centro: B; direita: C [6]

4.4 Avaliação da distribuição ótima face à distribuição uniforme

Numa última fase procedeu-se à avaliação do desempenho das distribuições obtidas em cada uma das três estruturas analisadas, conseguindo-se assim avaliar a eficácia da metodologia proposta.

Para o efeito avaliou-se a resposta das estruturas para duas situações distintas: aplicando a distribuição de 10 dissipadores localizados de acordo com a metodologia proposta e aplicando a distribuição uniforme (um por piso) de dissipadores.

Tendo por base pressupostos simplificativos relativamente aos custos dos dissipadores, comparou-se o desempenho das estruturas para o caso da distribuição uniforme com o desempenho para o caso da distribuição ótima, para igual custo global dos dissipadores em ambas as situações.

O custo associado a uma dada configuração de dissipadores foi estimado tendo em contas duas condições:

- Estabeleceu-se que para cada distribuição de dissipadores, estes são iguais em todos os pisos.
- Assumiu-se que os custos dos dissipadores variam com as dimensões dos mesmos.

Assumiu-se esta relação (custo-dimensões) como aproximadamente linear. Desta forma, como a constante C do dissipador é a grandeza que tem em conta a geometria do mesmo, assumiu-se que o custo de um dissipador varia linearmente com o valor dessa constante C .

Como consequência, ao se adotar que o custo dos dissipadores varia linearmente com a constante C de cada um, o valor utilizado como parâmetro representativo do custo total (C_{tot}), de uma distribuição de dissipadores, corresponde ao somatório dos valores das constantes C características de cada dissipador no número total de dissipadores (N), o que, uma vez que todos os dispositivos aplicados nos exemplos analisados, para uma dada distribuição, são iguais entre si, é dado pela expressão (6).

$$C_{tot} = N \times C \quad (6)$$

O parâmetro utilizado para avaliar a resposta da estrutura foi o deslocamento horizontal no topo. Este deslocamento resultou de uma análise não linear no domínio do tempo, procedendo-se à combinação da resposta, de modo a obter o valor médio da resposta máxima no tempo, de dez sismos artificiais compatíveis com a ação especificada no espectro de potência da ação. Para o efeito, utilizou-se o software *SAP2000* [9] recorrendo-se à opção *Time History – Non Linear*.

Para o caso da utilização de dissipadores do tipo linear, apresentam-se de seguida os resultados da avaliação da solução para as três estruturas A, B e C. Estes resultados encontram-se na Figura 7, na Figura 8 e na Figura 9, respetivamente.

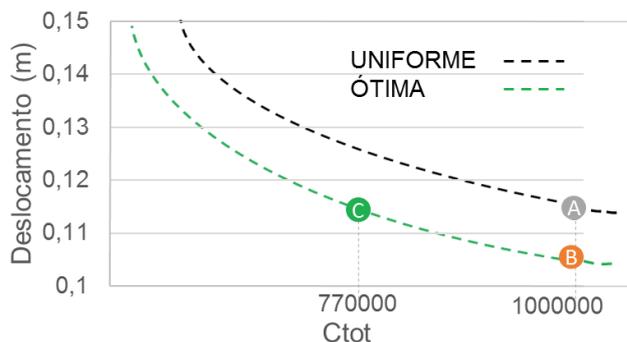


Figura 7 Comparação entre a distribuição ótima e a uniforme para a Estrutura A

A análise dos resultados permite as seguintes conclusões:

- comparando duas soluções com o mesmo custo (mesmo C_{tot}), verifica-se que a solução que corresponde a uma distribuição uniforme conduz a valores mais elevados do deslocamento estrutural (comparação entre os pontos A e B do gráfico);
- quando comparadas duas soluções com o desempenho semelhante em termos de controlo de deslocamentos (soluções A e C), verifica-se que a distribuição otimizada conduz a custo total inferior.

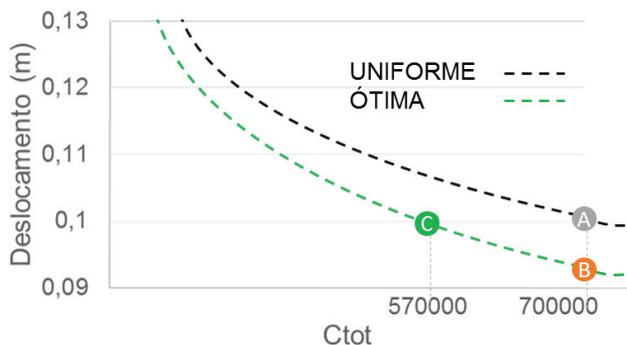


Figura 8 Comparação entre a distribuição ótima e a uniforme para a Estrutura B

Especificou-se um nível de desempenho a alcançar correspondente à redução do deslocamento horizontal no topo das estruturas para metade do valor desse deslocamento na situação das estruturas sem dissipadores (para amortecimento intrínseco de 2%) [6].

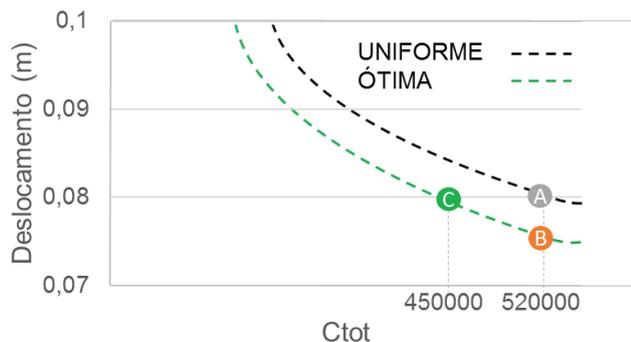


Figura 9 Comparação entre a distribuição ótima e a uniforme para a Estrutura C

Pela análise dos valores obtidos, verifica-se que a redução no parâmetro C_{tot} teve um valor médio no valor de 18% nas três estruturas analisadas.

5 Conclusões

A metodologia proposta define um método simples e com utilidade prática que permite determinar a distribuição ótima de dissipadores do tipo viscoso em edifícios altos. Da metodologia resultam distribuições ótimas que dependem essencialmente de dois parâmetros:

- das frequências com maior conteúdo energético em termos da ação sísmica local;
- das características dinâmicas da estrutura, avaliada sem dissipadores.

Uma vez que a energia dissipada se deve ao movimento relativo entre as extremidades dos locais onde os dissipadores são ligados, a característica dinâmica que mais influencia a determinação da energia dissipada é a diferença dos valores da configuração modal entre os locais onde se ligam os dissipadores ao edifício. Como consequência, os modos de vibração, normalmente associados a frequências mais altas, em que a configuração modal muda de sentido (zonas de inflexão) não devem ser à partida desprezados. [6]. Isto significa que na determinação da função de transferência, necessária para a determinação da estimativa da energia dissipada, também devem ser considerados modos de vibração elevados.

A metodologia, tendo em conta o valor esperado do quadrado da velocidade relativa entre as extremidades do dissipador, permite estimar a medida da energia dissipada em cada um dos locais de um edifício onde os dissipadores podem ser colocados. Após a ordenação destes locais por valor da energia dissipada é então possível escolher aqueles onde devem ser instalados os dissipadores.

Nesse sentido, a distribuição ótima propriamente dita só fica perfeitamente definida após esta ordenação dos valores da estimativa da energia dissipada, e, independentemente da aplicação do método apresentado, após a especificação do número de localizações pretendido. Por outro lado, a estimativa da distribuição ótima obtida é também independente do tipo de dissipador aplicado, uma vez que é determinada pela análise da estrutura sem dissipadores. Como consequência, a avaliação do desempenho da distribuição ótima não é tida em conta de forma explícita na

determinação desta distribuição, e, por isso, deve ser realizada numa fase final.

Desta forma, a uma estrutura, sujeita a uma determinada ação sísmica, corresponde uma única configuração ótima em termos das melhores localizações (para um dado número fixo de localizações, escolhido independentemente da aplicação do método). No entanto, é possível e aconselhável, numa fase final e independente da abordagem de cálculo da metodologia aqui apresentada, testar o desempenho de diferentes tipos de soluções relativamente ao tipo de dissipador. Por exemplo, para as mesmas localizações ótimas, na avaliação do desempenho da solução, pode-se testar a resposta da estrutura com dissipadores do tipo linear ou não linear, não sendo forçoso que os dissipadores sejam do mesmo tipo e com as mesmas dimensões em toda a altura do edifício.

Nos exemplos apresentados foi testada a ligação mais tradicional, ou seja, os dissipadores foram ligados entre pisos consecutivos. No entanto, a metodologia proposta permite considerar outras formas de ligação (por exemplo ligar os pisos i e $i + 2$), uma vez que a expressão da medida da energia dissipada tem em conta a configuração modal para uma localização genérica.

Como daqui se conclui, a metodologia proposta, ao estimar para as diferentes localizações da estrutura a energia dissipada de forma independente do tipo de dissipador e não sendo necessário especificar *a priori* o número de localizações pretendidas, permite analisar um grande número de soluções práticas após a aplicação das diferentes etapas do método.

Referências

- [1] Buckle, Ian G. – *Passive control of structures for seismic loads*; The 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000.
- [2] Whittle, Jessica – *Strategic placement of viscous dampers for seismic structural design*, Tese de Doutoramento, Universidade de Oxford, 2011.
- [3] Lopez-Garcia D. – *A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures*; *Earthquake Spectra*, 17(3): 387–398, 2001.
- [4] Takewaki – *The optimal damper placement for minimum transfer functions*; *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26, 1113-1124, 1997.
- [5] Lopez-Garcia; Soong – *Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures*; *Journal of Structural Control*, 9: 19–30, 2002.
- [6] Brás, Isabel – *Otimização da distribuição de sistemas de dissipação de energia em edifícios altos*; Dissertação de Mestrado, 2015.
- [7] Guerreiro, Luís – *Sistemas de Dissipação de Energia*; Apontamentos da disciplina de Dinâmica e Engenharia Sísmica do Mestrado em Engenharia de Estruturas do IST, 2003.
- [8] Guerreiro, Luís – *Ação sísmica*; Apontamentos da disciplina de Engenharia Sísmica de Pontes do Mestrado em Engenharia de Estruturas do IST, 2011.
- [9] CSI – *Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge™*, Computers and Structures, Inc, 2011.

