3.
Amortecedores

3.1.
Introdução

Edifícios são cada vez mais comuns nas grandes cidades. Porém, em virtude de restrições como o peso próprio, o aumento na altura não é em geral acompanhado por um aumento de rigidez, nem pelo aumento no nível de amortecimento inerente à estrutura. Como a força do vento também cresce em função da altura, edifícios altos e esbeltos estão cada vez mais suscetíveis aos efeitos do vento.

Estruturas flexíveis podem apresentar um excessivo nível de vibração em função da ação do vento, afetando as suas condições de serviço ou até mesmo sua segurança e o conforto dos usuários. Para garantir que a estrutura seja funcional, diversas soluções de projeto têm sido propostas, desde sistemas estruturais adicionais à introdução de amortecedores ativos e passivos.

Kareem et al. (1999) mencionam, como ilustrado na Tabela 3.1, três formas principais de combater os esforços do vento: (1) criar uma arquitetura aerodinâmica, (2) mudanças no projeto estrutural, enrijecendo a estrutura e aumentando assim suas frequências naturais, através da introdução de sistemas que resistam às cargas laterais, ou aumentando sua massa, e (3) a introdução de amortecedores ativos ou passivos.

Neste capítulo analisa-se a utilização de amortecedores passivos como forma de reduzir as vibrações nas estruturas. Sua função básica é absorver e dissipar a porção de energia introduzida na estrutura através de cargas dinâmicas, reduzindo, portanto, a participação dos elementos principais da estrutura na dissipação de energia, e consequente danos aos elementos estruturais.

Nas últimas décadas, diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de promover um amortecimento adicional às estruturas de forma prática e diversos tipos de amortecedores surgiram e vêm sendo instalados em estruturas ao redor do mundo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

Tabela 3.1 - Formas de reduzir a ação do vento (Kareem et al., 1999)

MEIOS	TIPO	MÉTODO E FINALIDADE	OBSERVAÇÕES
Design Aerodinâmico	Passivo	Melhorar as propriedades aerodinâmicas do edifício para reduzir o coeficiente de força do vento	Cantos chanfrados e aberturas
‘Sistema Estrutural	Passivo	Aumento de massa na estrutura para reduzir a proporção ar/massa estrutural	Aumento no custo de material
		Aumentar a rigidez da estrutura ou a frequência natural, para reduzir a velocidade adimensional do vento	Paredes de travamentos e seções de elementos grandes
Amortecedores Auxiliares	Passivo	Adicionar materiais com propriedades que dissipam energia para aumentar o nível de amortecimento da estrutura	AM, AJM, AF, AVE, AV, AO
		Adicionar sistema auxiliar de massa para aumentar o nível de amortecimento	AMS, ALS
	Ativo	Gerar uma força de controle, usando os efeitos inerciais para minimizar a resposta	AMA, AMH
		Gerar controle aerodinâmico para reduzir o coeficiente de força do vento ou minimizar a resposta	Rotor, jatos, apêndices aerodinâmicos
		Alterar a rigidez para evitar a ressonância	RVA

AM: amortecedores metálicos; AJM: amortecedores de juntas metálicos; AF: amortecedores por fricção; AVE: amortecedores visco-elásticos; AV: amortecedores viscosos; AO: amortecedores a óleo; AMS: amortecedores de massa sintonizados; ALS: amortecedores de líquido sintonizados; AMA: amortecedores de massa ativos; AMH: amortecedores de massa híbridos; RVA: rigidez variável ativa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

3.2. Amortecimento inerente às estruturas

O amortecimento inerente às estruturas é função do material utilizado, das ligações e travamentos, da forma da estrutura, do solo em que a estrutura se encontra, dentre outros fatores. Esse tipo de amortecimento pouco pode ser alterado, diferente das frequências naturais, que podem variar conforme variam a massa e a rigidez da estrutura.

Não é possível quantificar adequadamente esse amortecimento. Portanto, há uma grande incerteza em torno do valor a ser considerado em cálculo. Historicamente, tem sido assumido um valor de amortecimento proporcional à massa e/ou rigidez, de maneira a simplificar a análise, sendo, em geral, os coeficientes de proporcionalidade obtidos de análises experimentais. Amortecimentos entre 1% e 5% do valor crítico têm sido aplicados, variando conforme o tipo de estrutura. Em muitas estruturas leves e esbeltas, o nível de amortecimento pode ser inclusive inferior a 1%. Em dúvida, recomenda-se reduzir o valor do amortecimento considerado.

A NBR 6123 (1988) apresenta uma tabela com valores de amortecimento indicado para diversos tipos de estruturas, representada pelo coeficiente de

amortecimento ζ. Estes valores são reproduzidos na Tabela 3.2 e são bastante baixos, levando a longos transientes e grandes amplificações dos deslocamentos na região de ressonância.

Nos casos em que o amortecimento inerente à estrutura não é suficiente para combater os efeitos de vibração, amortecedores auxiliares podem ser adicionados à estrutura. Além disso, o amortecimento adicional pode ser ajustado às necessidades do projetista, em cada caso. Essa solução se tornou bastante popular, e tem sido largamente usada para reduzir as vibrações causadas tanto pelo vento quanto por sismos. Exemplos de estruturas com diversos tipos de amortecedores adicionais serão apresentados mais adiante.

Tabela 3.2 - Amortecimento inerente às estruturas (NBR 6123, 1988)

Tipo de edificação	ζ
Edifícios com estrutura aporticada de concreto, sem cortinas	0,020
Edifícios com estruturas de concreto, com cortinas para absorção de forças horizontais	0,015
Torres e chaminés de concreto, seção variável	0,015
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	0,010
Edifícios com estrutura de aço soldada	0,010
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	0,008
Estruturas de madeira	0,030

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

3.3. Amortecedores passivos, ativos, semi-ativos e híbridos

Em seu estudo, Kareem et al. (1999) apresentam quatro categorias de amortecedores aplicados às estruturas, que estão apresentadas a seguir.

Os amortecedores passivos podem ser divididos em dois tipos: os que atuam com dissipação indireta de energia e os que atuam com dissipação direta. Os dispositivos de dissipação indireta constituem um sistema inercial secundário incorporado à estrutura principal. Esse tipo de sistema acrescenta amortecimento indireto à estrutura alterando sua frequência de resposta. Os amortecedores mais tradicionais que utilizam esse sistema são os amortecedores de massa sintonizados

(AMS), os amortecedores líquidos sintonizados (ALS) e os amortecedores de impacto.

Os amortecedores de dissipação direta de energia atuam através de mecanismos tradicionais de dissipação de energia, como o fluxo de um fluido viscoso por um orifício (amortecedores fluidos) ou o cisalhamento de um material viscoelástico, como polímero ou borracha (amortecedores visco-elásticos). Outros tipos de amortecedores passivos são os amortecedores por fricção e os dissipadores metálicos. Esses dispositivos se tornaram bastante populares uma vez que podem ser facilmente incorporados aos elementos da estrutura, como vigas e travamentos.

Os amortecedores ativos surgiram em função da incapacidade dos amortecedores passivos de se ajustar à variação do carregamento, uma vez que resultados mais eficientes podem ser obtidos por sistemas com capacidade de se adaptar a mudanças no ambiente. Isso é possível através de sistemas hidráulicos ou eletromecânicos, regidos por um algoritmo apropriado, que podem ser determinados tanto através da resposta da estrutura, quanto por medições externas à excitação da estrutura. Esse tipo de amortecedor possui uma deficiência, pois ele depende de uma fonte de energia externa. Nos casos que esse fornecimento não é possível, sua atuação fica comprometida, podendo provocar instabilidade na estrutura.

Amortecedores semi-ativos combinam as melhores características dos amortecedores passivos e dos ativos. Possuem a capacidade dos amortecedores ativos de se ajustar a diversas condições de cargas dinâmicas rapidamente, no entanto não demandam tanta energia quanto os amortecedores ativos, além de não oferecerem o risco de instabilidade.

Por último, existem os sistemas de amortecedores híbridos, que combinam sistemas de amortecedores ativos a sistemas passivos. Em caso de cargas muito elevadas o sistema ativo entra em ação, porém, se o fornecimento de energia falhar, ainda há o sistema passivo.

Analisam-se a seguir os sistemas passivos, uma vez que são amplamente utilizados, e não oferecem o risco de instabilizar a estrutura. Estuda-se especificamente a aplicação dos amortecedores com fluido viscoso, que serão detalhados mais adiante.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

3.4. Resposta das estruturas a amortecedores passivos

Segundo Soong, Dargush (1997), o sistema de equações de movimento de uma estrutura com amortecedores se dá por:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + \Gamma x = (M + \bar{M})\ddot{x}g + p \tag{3.1}$$

Nesta equação, a parcela se refere à carga de sismos, enquanto a parcela p se refere à carga de vento. Nesse estudo, não se considera os efeitos dos sismos. Portanto, o sistema reduz-se a:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + \Gamma\dot{x} = p \tag{3.2}$$

onde Γ é a matriz correspondente ao amortecimento passivo adicionado à estrutura.

Em alguns casos o sistema de equações pode ser reduzido a uma forma desacoplada, o que ocorre no caso de amortecimento proporcional. Em alguns casos, não linearidades, parcelas não proporcionais de amortecimento ou efeitos hereditários podem aparecer, não permitindo o desacoplamento das equações. Para esses casos são usados algoritmos numéricos para resolver esse sistema de equações através da integração direta do sistema de equações, como o algoritmo de Newmark, que é usado em diversos programas computacionais.

A resposta de pico desta equação, quando a frequência de excitação se aproxima da ressonância, é reduzida consideravelmente em função da dissipação de energia promovida pelo amortecimento. Quanto maior o coeficiente de amortecimento, menor a resposta de pico, conforme apresentado na Figura 3.1.

Soong, Dargush (1997) afirmam que, quando os amortecedores são puramente viscosos, a resposta é sempre reduzida, uma vez que a força dos amortecedores corresponde justamente a um acréscimo no coeficiente de amortecimento da estrutura. Para os demais tipos de amortecedores passivos, deve ser feita uma análise cuidadosa de sua disposição ao longo da estrutura, para garantir que o efeito desses amortecedores seja benéfico. A localização e a orientação desses dispositivos são fundamentais para definir sua efetividade. Caso não sejam corretamente dispostos, podemos conseguir efeitos contrários aos desejados, aumentando os deslocamentos da estrutura. Apropriadamente

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

aplicados, os amortecedores são capazes de reduzir tanto os deslocamentos, quanto as tensões na estrutura.

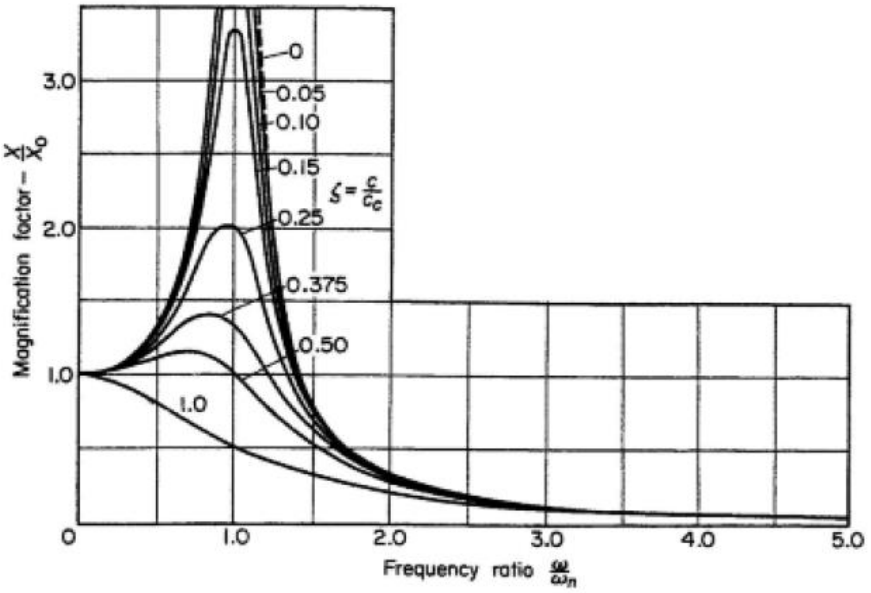

Figura 3.1 - Curva de ressonância (Taylor, 1999)

Em muitos casos as forças de amortecimento são independentes da frequência natural da estrutura. Portanto, é possível variar a disposição e a capacidade desses amortecedores, sem alterar o período de resposta da estrutura.

3.5. Tipos de Amortecedores Passivos

3.5.1. Amortecedores de massa sintonizados (AMS)

Tipicamente, um sistema AMS consiste em uma massa localizada no topo do edifício, local de maior amplitude do movimento. Essa massa é conectada à estrutura através de uma mola e um sistema de amortecedor viscoso ou viscoelástico. O AMS transmite força inercial à estrutura, reduzindo sua resposta à carga excitadora. Sua efetividade é função das características dinâmicas, do seu deslocamento e da quantidade de massa adicionada à estrutura. Em geral, o AMS possui entre 0,25% a 1,0% da massa total da estrutura.

Exemplos de estruturas que utilizam esse sistema de amortecimento, segundo apresentado por Kareem et al. (1999) são:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

- Washington National Airport Control Tower: o AMS apresentou um aumento de aproximadamente 3% no amortecimento da estrutura, que tinha aproximadamente 0,5% de amortecimento inicial;
- Petronas Towers (Kuala Lumpur - Malásia): as torres eram sensíveis ao efeito de desprendimento de vórtices e, com a introdução do AMS, a estrutura apresentou um amortecimento suficiente para reduzir esse efeito;
- Hancock Tower (Boston – EUA): dois AMSs foram utilizados para absorver os efeitos de torção.

3.5.2. Amortecedores líquidos sintonizados (ALS)

Amortecedores líquidos são práticos, uma vez que em geral existem tanques d'água na estrutura para abastecimento do edifício. Este tipo de amortecedor consiste em configurar as partições internas de forma a criar diversos amortecedores, sem comprometer o funcionamento original dos tanques. Esse sistema é indicado para estruturas com pequenas vibrações, e pode reduzir a resposta de aceleração da estrutura em até 1/3.

Esses amortecedores dissipam energia através da ação viscosa da água e das ondas provocadas pela movimentação da água. A frequência natural de um ALS pode ser ajustada através da profundidade da água no tanque e de suas dimensões. Portanto, há limitações práticas em relação à frequência obtida por esse sistema.

Aplicações práticas desse sistema incluem, Kareem et al. (1999):

- Hobart Towers (Tasmânia, Austrália): foram usados 80 ALSs.
- Gold Tower (Kagawa, Japão): foram usados 16 ALSs, com um total de 10 toneladas. Neste caso foram usadas redes metálicas na superfície da água, de forma a dissipar o movimento do líquido, permitindo um ajuste na frequência obtida.
- Shin Yokohama Prince Hotel (Yokoama, Japão): neste edifício foi usada uma configuração alternativa, com 9 tanques circulares, cada um com 2 metros de diâmetro. Cada tanque recebeu 12 divisórias, divididas radial e simetricamente em toda sua extensão, de forma a obter o amortecimento adicional necessário.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

3.5.3.
Amortecedores de impacto

Esses amortecedores consistem em uma pequena massa situada no topo da estrutura e dissipa a energia através de impactos com anteparos conectados à estrutura. As dimensões do amortecedor são definidas de forma a permitir um espaço ótimo para sua massa se mover, permitindo colisões conforme a vibração da estrutura, como mostra a Figura 3.2. Esse sistema é eficiente para oscilações em um único plano, sendo utilizado em estruturas em formato de torres e mastros. Cabe ressaltar que o impacto conduz a uma não linearidade do sistema, sendo o problema de difícil solução numérica.

Não há muitas aplicações desse tipo de amortecedor, mas há conhecimento de que esse sistema foi usado pela marinha americana em torres de comunicação. Essas estruturas provaram que houve uma significativa redução nos deslocamentos provocados pelo vento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

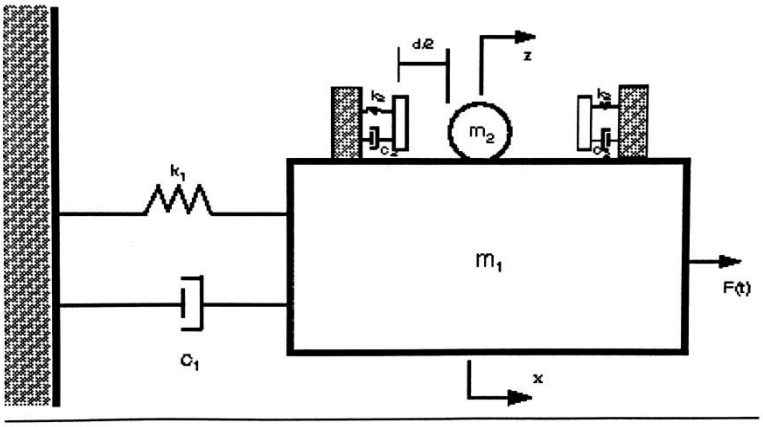

Figura 3.2 - Amortecedor de Impacto (Kareem et al., 1999)

3.5.4.
Amortecedores viscoelásticos

Amortecedores viscoelásticos usam em geral polímeros ou borrachas que geram dissipação de energia através de cisalhamento. São indicados para estruturas com altas frequências, com baixos níveis de vibração e situadas em regiões de fortes ventos, ou sismos relativamente fracos. Esse sistema é constituído de duas chapas metálicas envolvendo o material visco elástico. A força gerada por esse sistema depende da velocidade, e fica fora de fase com o

deslocamento, tornando esse sistema especialmente eficiente quando localizado nas diagonais da estrutura.

Esse sistema fornece além de um acréscimo no amortecimento, um acréscimo na rigidez da estrutura, e pode ser usado tanto em estruturas de aço quanto de concreto.

O edifício mais famoso em que foram usados esses amortecedores é o World Trade Center (Nova York, EUA). Outras aplicações são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Aplicações de amortecedores visco elásticos (Kareem et al., 1999)

Construção (Localização)	Localização e Data de instalação	Número de unidades	Localização na estrutura	Performance
World Trade Center	Nova York 1969	10.000/torre	Instalados no banzo inferior das treliças de suporte dos pisos	ζ=2,3-3% no furacão Gloria
Edifício Columbia Sea First	Seattle 1992	260	Paralelos ao travamento diagonal principal do edifício	ζ=3,2% na força de vento de projeto, até 6,4% em tempestades
Edifício Two Union Square	Seattle 1988	16	Paralelos a quatro colunas em um piso do edifício	
Torre Torishima Riverside Hill	Japão 1999	224	8AVE/ piso nos primeiros 19 andares 4AVE/piso nos andares 20 a 38	Resposta à aceleração do vento: 80%

3.5.5. Amortecedores por fricção

Esses amortecedores permitem o comportamento plástico do sistema, promovendo um comportamento não linear, enquanto a estrutura em si permanece com um comportamento linear. Esse sistema é composto por uma superfície deslizante, com uma alta rigidez inicial, que possibilita que o ângulo entre pilar e viga permaneça praticamente reto na situação deformada.

Existem dois tipos de amortecedores por fricção, um situado na conexão entre viga e pilar, no caso de pórticos rígidos, e outro inserido nos travamentos diagonais, para o caso de pórticos rotulados.

Exemplos de estruturas com esse tipo de amortecedor estão listados na Tabela 3.4.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

Tabela 3.4 - Aplicação de amortecedores por fricção (Kareem et al., 1999)

Edifício	Tipo de estrutura /Utilização	Ano	Altura (m)	Frequência natural (Hz)	Equipamento/Mecanismo
Sonic City Office Ohmiya	Aço/ Comercial	1988	140	S/ amortecedores: 0,32 (x), 0,33 (y) C/ amortecedores: 0,35 (x), 0,36 (y)	Dir. x: 4 amortecedores/andar Dir. y: 4amortecedores/andar Força dos amortecedores de fricção: 10t
Asahi Beer Tower Tokio	Aço/ Comercial	1989	94,9	S/ amortecedores: 0,32 (x e y) C/ amortecedores: 0,35 (x e y)	Dir. x: 4 amortecedores/andar (1º a 20º andar) Dir. y: 4amortecedores/andar (1º a 20º andar)

3.5.6. Amortecedores metálicos

Amortecedores metálicos usam a deformação plástica do aço-carbono, ou outras ligas metálicas para reduzir os efeitos na estrutura após ação de cargas dinâmicas. O sistema consiste numa série de chapas metálicas. A maior parte da deformação plástica é absorvida por esses dispositivos, e os elementos principais da estrutura não sofrem danos. A Tabela 3.5 apresenta exemplos de edificações em que foram usados amortecedores metálicos.

Tabela 3.5 - Estruturas com amortecedores metálicos (Kareem et al., 1999)

Edifício	Tipo de estrutura/Utilização	Ano de Instalação	Altura	Mecanismo
Fujita Corp. Edifício Principal Tokyo	Aço/Comercial	1990	19 andares	20 amortecedores principais nas duas direções
KI Building Tokyo	Aço/Concreto Armado/Comercial	1989	5 andares 9 andares	12 AM
Hitachi, Escritório Principal Tokyo	Aço/Comercial	1984	72,6m	AM
Ohjiseishi Tokyo	Aço/Comercial	1991	81,4m	AM
Sea Fort Square	Aço/Concreto Armado/Hotel e residencial		93,65m	120 AM
ART Hotels Saporo	Aço/Hotel	1996	90,4m	Dir. x: 952 AM Dri. Y: 1068 AM
Two Apartment Houses	Concreto armado/Residencial		5 andares	AJM Forma de sino
Garden City School	Aço/Escola		75,5m	AM para vibrações torcionais
Kobe Fashion Plaza	Aço/Lojas e hotel	1997	81,6m	AM do 12º ao 18º andar

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

3.5.7.
Amortecedores fluidos

Taylor (1999) afirma que a pesquisa desse tipo de dispositivo se iniciou na década de 1960, nos Estados Unidos, sendo usados inicialmente na indústria militar. Por se tratar do período da Guerra Fria, não era permitida a divulgação de tecnologias consideradas estratégicas para a defesa americana. Com o fim da Guerra Fria, na década de 1990, no entanto, essa tecnologia se difundiu rapidamente, e passou a ser usada largamente em obras civis, de forma a absorver a energia provocada pelas cargas dinâmicas nas estruturas.

O amortecedor fluido dissipa a energia introduzida na estrutura ao aplicar uma força resistente ao movimento através do deslocamento de um pistão em uma câmara preenchida com um fluido altamente viscoso. A Figura 3.3 ilustra esquematicamente o funcionamento do amortecedor.

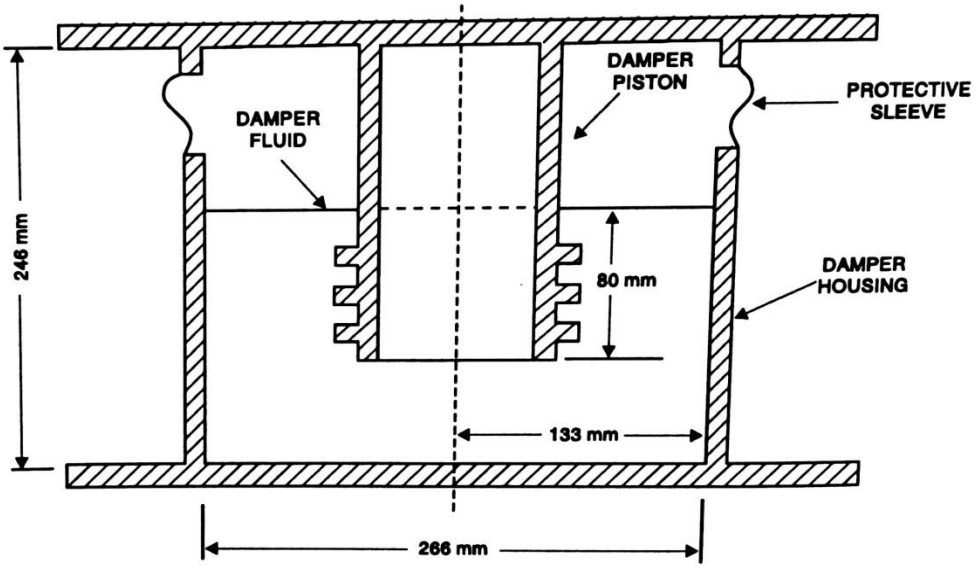

Figura 3.3 - Amortecedor fluido (Soong & Dargush, 1997)

A dissipação ocorre com a transformação de energia mecânica em calor. Em alguns casos são incluídos detalhes geométricos no projeto do pistão, de forma a melhorar o seu desempenho. Segundo Soong & Dargush (1997), a pioneira nesse tipo de amortecedor é a empresa americana Taylor Devices. A Figura 3.4 apresenta um típico amortecedor produzido por ela.

Esses amortecedores contêm um óleo de silicone compressível, que é forçado através do pistão de aço, com a cabeça de cobre. A cabeça do pistão possui orifícios que controlam o fluxo do fluido, aumentando seu desempenho.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

Esses amortecedores trabalham de forma uniaxial e são indicados para reduzir os deslocamentos em casos de sismos e as vibrações para cargas de ventos.

Em geral, a resposta força-deformação do amortecedor depende principalmente da forma do anel em torno do pistão, ou seja, da relação entre h e R, apresentados na Figura 3.5. Segundo Soon & Dargush (1997), a relação força-deformação do fluido, se h<<R, é definido pela equação:

$$\rho\dot{v} + \rho v v_{,z} - \mu v_{,rr} - \mu v_{,zz} + p_{,z} = 0 \tag{3.3}$$

onde *v* representa a velocidade axial do fluido, e os índices que seguem as vírgulas representam a diferenciação em relação às coordenadas espaciais.

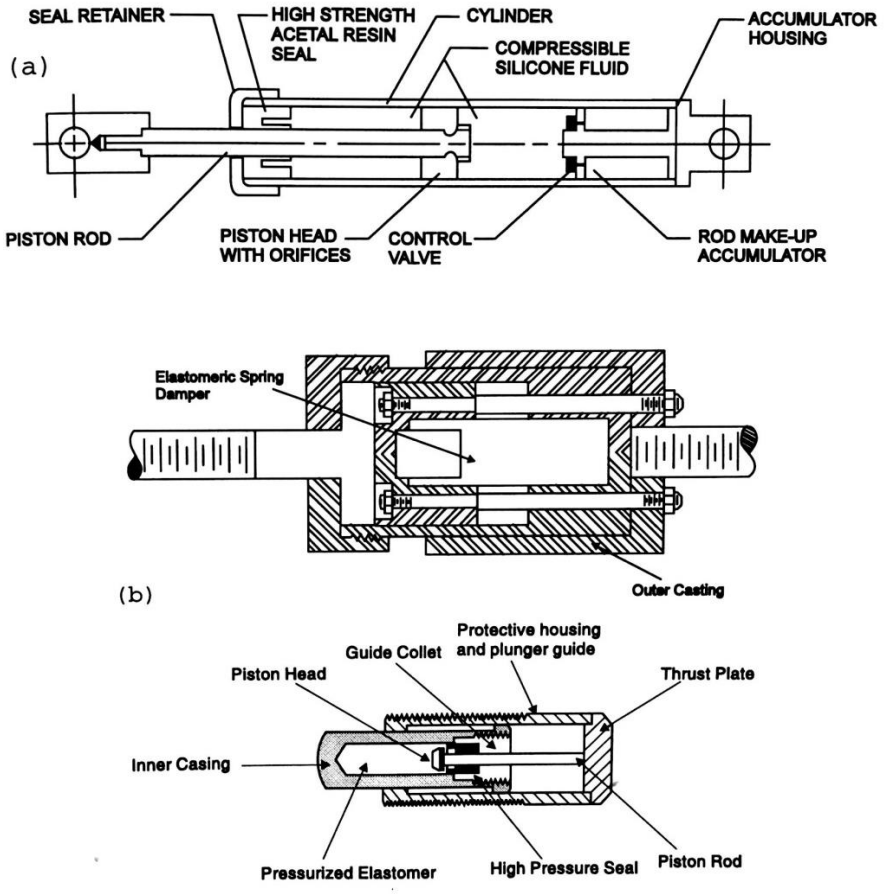

Figura 3.4 - Taylor Device (Soong & Dargush, 1997)

Se considerarmos que o fluido é altamente viscoso e os orifícios para a sua passagem são pequenos em relação ao tamanho da cabeça do pistão, *Lp*, pode-se ignorar a variação em função do calor, assim como a variação de *v* em *z*. Tem-se assim a seguinte equação para baixas frequências, apresentada por Soong & Dargush (1997):

$$\mu v_{,rr} = p_{,z} \tag{3.4}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

Aplicando as condições de contorno, chega-se a:

$$P_v = C_V V \tag{3.5}$$

sendo $C_V = 3\pi\mu L_p \left(\frac{R_p}{h}\right)^3$.

Esta equação, portanto, descreve o comportamento de um amortecedor viscoso linear, com a dissipação de energia ocorrendo estritamente pela passagem do fluido pela passagem anelar entre o pistão e o compartimento externo. No caso dos amortecedores da Taylor Devices, há ainda recursos mais avançados, com o fluxo do fluido passando por orifícios especialmente desenvolvidos localizados na cabeça do pistão, que melhoram o seu desempenho e permitem um comportamento não linear, definido pela equação:

$$P_v = C_V V^{\alpha} \tag{3.6}$$

onde α é uma constante que pode variar conforme a necessidade do projeto. Na maioria dos casos, α possui valores entre 0,3 e 1,0. Segundo Taylor (1999), em estruturas submetidas a sismos são usados, em geral, os valores de 0,4 a 0,5. Estruturas submetidas a cargas de vento, em geral são dimensionadas para valores de α entre 0,5 e 1,0, sendo os valores mais baixos aplicados a estruturas submetidas tanto a vento quanto a sismos. Neste estudo, portanto, consideram-se somente os amortecedores lineares, uma vez que apresentam uma boa resposta às cargas induzidas pelo vento.

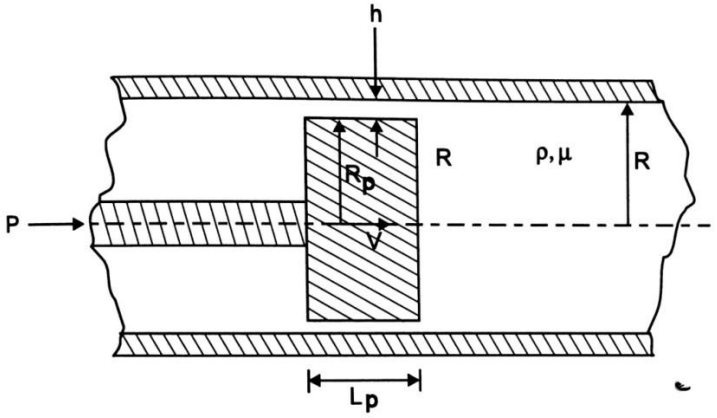

Figura 3.5 - Amortecedor de fluido viscoso esquemático (Soong, Dargush, 1997)

Taylor (1999) afirma que o parâmetro mais importante a ser determinado em uma análise dinâmica para a definição dos amortecedores é a velocidade translacional de pico. Esta velocidade determina a quantidade de energia que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

precisa ser absorvida pelo sistema. O segundo fator mais importante a ser determinado é a aceleração de pico, uma vez que os amortecedores devem ser definidos de forma a acomodar essa aceleração sem serem danificados pelas cargas de impulso.

Os fatores menos importantes a serem considerados na análise são aqueles relacionados à forma real da variação do impulso. Isso porque se trata de um efeito aleatório, e não há como saber com exatidão a sua forma. Se considerarmos como a estrutura amortecida se comporta em um transiente adotando os valores máximos de velocidade e aceleração aos quais a estrutura pode estar submetida, só dois casos extremos devem ser considerados:

- Caso 1: a estrutura é excitada por uma função degrau, com a aceleração igual à máxima aceleração prevista por uma duração em que a velocidade máxima seja obtida;
- Caso 2: a estrutura é excitada por uma função seno com a mesma frequência referente ao primeiro modo de vibração da estrutura, com a amplitude aumentando até que a máxima aceleração ou velocidade seja atingida.

Esses dispositivos são capazes de promover o amortecimento no modo de vibração principal, além de aumentar a rigidez da estrutura nos modos secundários, muitas vezes praticamente eliminando sua contribuição. Os amortecedores fluidos são indicados para trabalhar em frequências entre 0 e 2,0 Hz, e conseguem bons resultados também em casos de baixas amplitudes, tendo casos de sucesso sido obtidos para variações de até 0,02mm. Ao incorporar o uso de amortecedores fluidos em edifícios, é possível reduzir a sua resistência lateral, uma vez que os amortecedores, por si só, reduzem os deslocamentos provocados pelo vento, aumentando o conforto dos usuários, sem a necessidade de criar seções mais rígidas.

Para a definição dos amortecedores, é indicado usar um fator de segurança de 1,5 na definição da força que deve ser resistida pelo amortecedor.

Existem diversas aplicações de amortecedores de fluido viscoso ao redor do mundo, tanto em pontes quanto em edifícios.

Uma aplicação interessante desses amortecedores ocorreu na Torre Mayor, localizada na Cidade do México. A estrutura de 225 metros de altura usou ao todo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

98 amortecedores para combater o efeito de sismos. Segundo Post (2003), o empreendimento custou um total de $250 milhões, sendo $4 milhões referentes ao sistema de amortecimento, representando assim somente 1,6% do custo total da obra. Por outro lado, o uso de amortecedores permitiu uma redução de 21% na quantidade total de aço. Nesse edifício foram usados dois sistemas paralelos de amortecedores. Um no núcleo, com 74 dispositivos distribuídos em suas diagonais e outro na fachada, em que foram distribuídos 24 amortecedores com capacidade de 1200 kips cada. Os amortecedores da fachada foram distribuídos em formas de diamantes, que se interlaçavam formando diamantes menores, conforme mostra a Figura 3.6.

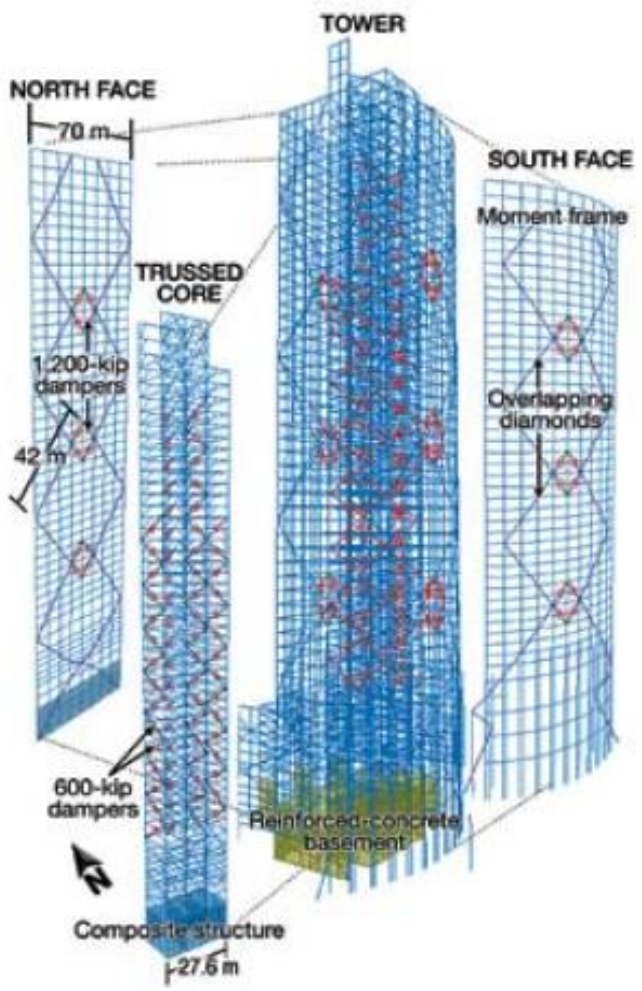

Figura 3.6 - Torre Mayor: disposição dos amortecedores da fachada (Post, 2003)

No combate às cargas de vento, esse tipo de amortecedor é muito usado em pontes estaiadas. Alguns exemplos são: Pomeroy-Mason Bridge (Grove City, EUA), Waldo-Penebscot river Bridge (Verona, EUA); Weirton-Steubenville Bridge (Weirton, WV); Veteran Memorial Bridge (Groves, EUA e Cochrane

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA

Bridge (Mobile, EUA). Também são usados em estádios, como é o caso do Ralph Wilson Stadium (Buffalo, EUA) e Minute Maid Park (Huston, EUA). Em edifícios, esses dispositivos foram usados em travamentos diagonais, conforme ilustra a Figura 3.7, em *outrigger systems*, como parte de um amortecedor AMS e em forma de *taggle bracings*. A Tabela 3.6 apresenta uma breve descrição de algumas aplicações desse tipo de controle passivo.

Figura 3.7 - Travamento diagonal com amortecedor (Taylor Devices, 2014)

Tabela 3.6 - Edifícios com amortecedores para resistir ao vento (Taylor Devices, 2014)

Edifício	Localização	Amortecedores Fluidos	Ano	Observações
250 West 55th Street	Nova Iorque, EUA	Total: 7 1690kN ± 100mm	2003	*Outrigger systems* Edifício de 39 andares com fachada em vidro
Solomon R. Guggenhein Museum	Nova Iorque, EUA	Total: 54 20kN ± 30mm	2008	Retrofit do museu Amortecedores instalados de forma radial no piso superior
Stamford Building	Auckland, Nova Zelândia	Tota:12 25kN ± 150mm	2007	Torres residenciais Amortecedores fluidos como parte de um sistema AMS
Porklane Apartments	Wellington, Nova Zelândia	Total: 8 10kN ± 89mm	2003	Retrofit de torres residenciais Amortecedores fluidos como parte de um sistema AMS
Pearson Airport Control Tower	Toronto, Canadá	Total:8 31kN ± 89mm	2003	Amortecedores fluidos como parte de um sistema AMS
111 Huntington Avenue	Boston, EUA	Total: 60 1300kN ± 101mm	2000	Edifício de 38 andares Combinação de amortecedores ativos com amortecedores fluidos instalados em *toggle bracings*
Millennium Place	Boston, EUA	Total: 40 445kN ± 125mm	2000	Edifício de 37 andares Amortecedores fluidos instalados em *toggle bracings*
Yerba Buena Tower	São Francisco, EUA	Total: 20 445kN ± 125mm	2000	Hotel/ condomínio de 37 andares Amortecedores fluidos instalados em *toggle bracings*
Hyatt Park Tower	Chicago, EUA	Total: 10 45kN ± 500mm 22kN ± 265mm 45kN ± 300mm 175kN ± 100mm	1999	Edifício de 67 andares em concreto armado Amortecedores como parte de um sistema AMS
28 State Street	Boston, EUA	Total: 40 60kN ± 25mm	1996	Edifício comercial Amortecedores em barras diagonais

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221655/CA