

Polímeros Termoplásticos como Amortecedores Estruturais Passivos: visão geral e exemplo de aplicação

Gustavo Fruet¹, Letícia Fleck Fadel Miguel², Jorge Daniel Riera³

RESUMO

O principal objetivo do trabalho é contribuir tecnicamente com base na utilização de Polímeros Termoplásticos no projeto e na avaliação do seu desempenho como sistemas de amortecedores estruturais passivos. Uma breve revisão sobre tipos e propriedades de materiais visco-elásticos é apresentada inicialmente. Foram obtidas experimentalmente as propriedades de uma poliamida (PA) julgada como sendo uma opção apropriada para utilização em amortecedores estruturais passivos. Posteriormente são apresentados o dimensionamento, construção e análise de amortecedores construídos com materiais poliméricos. O desempenho de um protótipo de amortecedor é analisado sob a ação de cargas harmônicas. A efetividade do amortecedor é ilustrada através da análise de uma torre metálica treliçada com e sem amortecedores inseridos. Os resultados mostram que os polímeros termoplásticos podem ser usados com sucesso no projeto de sistemas passivos de dissipação de energia em estruturas.

Palavras Chaves: *Dissipação de energia em estruturas, Amortecedores, Materiais termoplásticos, Estruturas metálicas.*

¹Engenheiro Civil, M.Sc., Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, gustavo.fruet@ufrgs.br

²Engenheira Civil, Dra., Professora Associada do Departamento de Engenharia Mecânica / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (DEMEC / PROMEC / PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, letffm@ufrgs.br

³Engenheiro Civil, Ph.D., Professor Convidado do Departamento de Engenharia Civil / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (DECIV / PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jorge.riera@ufrgs.br

Endereço para correspondência: Av. Osvaldo Aranha 99 3º andar – Porto Alegre–RS – Brasil. CEP 90035-190.

<http://dx.doi.org/10535/rsae.v17i3.9454>

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos grandes avanços registrados nas últimas décadas na determinação da resposta e no projeto de estruturas submetidas a ações dinâmicas, ainda existem tópicos pouco conhecidos, principalmente em relação à dissipação de energia e aos efeitos do amortecimento. Dentro dessa área, existem diversas alternativas para a redução de vibrações em estruturas submetidas a cargas dinâmicas, em geral pouco conhecidas por projetistas. Destacam-se os sistemas de controle passivo utilizando materiais visco-elásticos, com capacidade de amortecimento, atraentes pela sua robustez e simplicidade. Materiais visco-elásticos como os polímeros, objeto do presente estudo, quando incorporados apropriadamente na estrutura, dissipam energia em cada ciclo de oscilação, fazendo com que o sistema estrutural aumente sua taxa de amortecimento, o que resulta em reduções significativas das amplitudes de vibração.

Os primeiros estudos sobre materiais visco-elásticos com função de amortecimento estrutural encontrados na literatura foram as contribuições de Oberst e Frankenfeld (1952), assim como estudos posteriores de Kervin (1959) e de Ross *et al.* (1959), nos quais avaliou-se o amortecimento de placas visco-elásticas submetidas a vibrações por flexão. Um dos primeiros usos de amortecedores visco-elásticos em edifícios é descrito por Mahmoodi (1969), quem projetou esse tipo de amortecedor para o edifício World Trade Center, no qual 10.000 amortecedores foram utilizados em cada uma das torres para mitigar vibrações ocasionadas pela ação do vento.

Existem também outros tipos de mecanismos para a dissipação de energia passiva como, por exemplo, sistemas por atrito e sistemas metálicos. Nos primeiros trabalhos mencionados, a dissipação de energia ocorre através do contato entre sólidos sem lubrificação. Um exemplo dos mesmos é devido à Miguel (2002), que projetou e testou três modelos de amortecedores de fricção. Mais recentemente, Miguel *et al.* (2014; 2015; 2016a; 2016b; 2018) e Ontiveros-Perez *et al.* (2017a; 2017b; 2017c; 2019) avaliaram a resposta dinâmica de diferentes estruturas equipadas com amortecedores por atrito.

Curadelli (2003), por outro lado, estudou o processo de dissipação de energia em estruturas durante deformações plásticas de material metálico, especificamente, chumbo. Seus resultados mostraram ciclos com grandes áreas de histerese, confirmando a eficiência deste tipo de amortecedor. Curadelli e Riera (2004) analisaram a resposta de uma estrutura sob cargas

sísmicas usando amortecedores metálicos e a redução de amplitudes de vibração pôde ser verificada.

Sobre dissipação de energia usando sistemas por atrito, sistemas visco-elásticos e amortecedores em geral, usados para mitigar a resposta estrutural sob cargas sísmicas, também podem ser listados os trabalhos desenvolvidos por Martinez *et al.* (2013), Curadelli e Amani (2014), Martinez *et al.* (2014) e Martinez e Curadelli (2017).

Os sistemas denominados amortecedores de massa sintonizados (TMD) são conjuntos massa-mola (ou massa-mola-amortecedor) com a mesma frequência de vibração do modo natural da estrutura que se deseja controlar. Numerosos estudos sobre projeto e desempenho de TMD podem ser encontrados na literatura. Como exemplos ilustrativos, podem ser mencionados os trabalhos de Fadel Miguel *et al.* (2013; 2016a; 2016b) e Vellar *et al.* (2019).

Especificamente, em relação à utilização de materiais visco-elásticos, Aseka (2002) estudou um protótipo empregando um material visco-elástico em combinação com peças de aço. Observou-se que ocorreu alguma dissipação de energia, medida através dos ciclos de histerese, embora não tão efetiva quanto os outros três tipos mencionados anteriormente. Mais recentemente, Silwal *et al.* (2015) estudaram um amortecedor viscoso super-elástico para melhorar o desempenho frente à ação sísmica de estruturas de pórticos. Registros históricos de sismos foram utilizados para avaliar o comportamento de edifícios controlados e não controlados. Os resultados mostraram que os amortecedores podem efetivamente reduzir a amplitude da resposta dinâmica.

2. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

O objetivo desta seção é apresentar uma breve introdução aos polímeros termoplásticos mais comuns, que podem ser utilizados na fabricação de amortecedores para controle de vibrações em estruturas de aço, assim como suas propriedades - principalmente as mecânicas. Posteriormente será apresentada uma discussão do processo de escolha do material para um objetivo específico.

Em primeiro lugar, polímeros termoplásticos levam essa denominação porque apresentam a propriedade de deformar apreciavelmente sob a ação de cargas. Quando a carga é removida, eles recuperam sua rigidez inicial. Em geral, os termoplásticos têm baixa resistência mecânica e, por isso, também um baixo valor de seu módulo elástico. Os termoplásticos apresentam também baixo peso específico, todos são isolantes elétricos e caracterizados por uma boa resistência frente à corrosão eletrolítica.

Com relação às propriedades físicas dos polímeros termoplásticos, pode-se dizer que seu comportamento é visco-elástico. Isso significa que os polímeros têm características comuns com os sólidos que obedecem a lei de Hooke e dos fluidos newtonianos e seu comportamento é fortemente afetado pelos tempos de carregamento e também pela temperatura no momento da aplicação da carga. Apesar disso, pode-se utilizar a relação tensão-deformação para estimar a rigidez dos mesmos quando estes são submetidos a um curto tempo de carregamento. Isso é correto apenas para a escolha inicial dentre diferentes tipos de materiais termoplásticos, visto que são necessárias mais informações como, por exemplo, curvas de fluência e tempos de relaxamento (Crawford, 1987). Em muitos aspectos, a curva tensão-deformação para um termoplástico é semelhante à curva que caracteriza um metal elastoplástico, conforme se identifica na Figura 1.

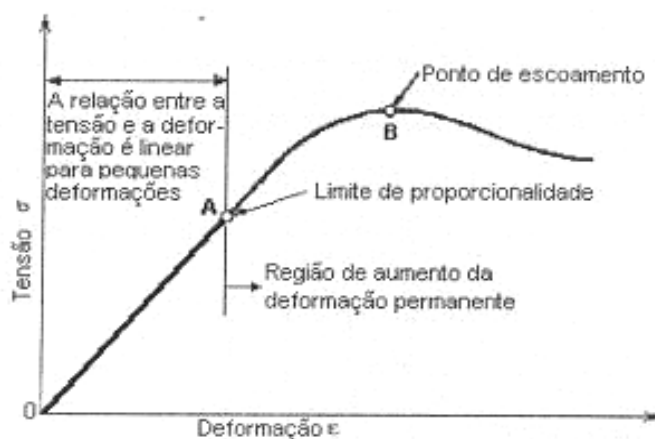


Figura 1: Relação Tensão - Deformação dos Termoplásticos (adaptado de Crawford, 1987).

Outra propriedade fundamental dos termoplásticos é a taxa de deformação, que se ilustra na Figura 2, a qual mostra que a velocidade de deformação altera a rigidez: quanto maior é dita velocidade, maior é a rigidez. É importante lembrar que a rigidez de um componente estrutural depende das propriedades do material e da geometria dele e que pode conduzir a um comportamento não linear devido às grandes deformações.

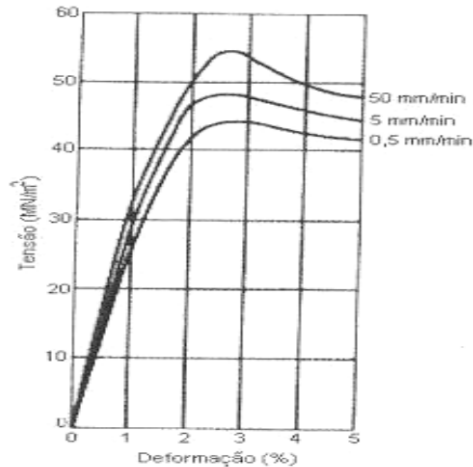


Figura 2: Efeito da Taxa de Deformação na Curva Tensão - Deformação de Termoplásticos (adaptado de Crawford, 1987).

Com relação às propriedades mecânicas, em geral os polímeros termoplásticos apresentam baixa resistência à tração ($<100\text{MPa}$); alto valor de alongamento (acima de até 900%); módulo de elasticidade (módulo de Young) abaixo de 5000MPa . A resistência à compressão é inferior a resistência dos materiais tradicionais de engenharia; a resistência ao impacto é boa e, às vezes, melhor até que o alumínio, por exemplo. Já a densidade varia entre $0,9$ até $1,5\text{g/cm}^3$ e o coeficiente de atrito entre $0,2$ e $0,8$, enquanto a borracha macia pode mostrar valores até maiores que 4.

Considera-se importante definir brevemente os conceitos utilizados no emprego de termoplásticos. A *recuperação* do material indica a capacidade de uma peça para retornar a suas dimensões originais após a remoção do carregamento e depende da intensidade das cargas e do tempo de aplicação das mesmas. A histerese designa um fenômeno em que a propriedade sob consideração do material depende de um estado anterior. No caso das propriedades mecânicas, a histerese pode ser medida pela perda de carga em um ciclo de deformação do material. Essa perda de carga (dissipação de energia) normalmente é convertida em calor.

No projeto de amortecedores termoplásticos também são importantes as propriedades térmicas e as químicas. Em relação às térmicas, normalmente os termoplásticos são muito sensíveis à mudança de temperatura. Para aplicação no presente estudo, será escolhido um material cujas propriedades sejam pouco alteradas para temperaturas inferiores a 100°C . As propriedades químicas também precisam ser analisadas pois podem, em alguns casos, inviabilizar o uso. Por exemplo, em estruturas abertas, a resistência à água pode ser importante porque alguns plásticos absorvem água e aumentam suas dimensões. Outras características químicas que precisam ser

lavadas em conta no projeto são a inflamabilidade do termoplástico, a resistência sob degradação térmica, a resistência frente à ação de ácidos e bases, entre outros.

Os termoplásticos apresentam os usos mais diversos, desde brinquedos até componentes automotivos. Podem ser citados, por exemplo, PE (polietileno), PP (polipropileno), PVC (policloreto de vinilo), PS (poliestireno), PMMA (polimetil metacrilato), PA (poliamida), POM (poliacetil) e PTFE (politetrafluoretileno). Em relação aos usos, normalmente o PE é usado em tubulações, filmes, baldes; o PP é usado em recipientes, eletrodomésticos, garrafas, pára-choques automotivos; o PVC é usado principalmente em tubulações para conduzir água e outros fluidos em baixas temperaturas; o PS é usado principalmente em peças automotivas; o PMMA é usado em telhados ou outro dispositivo onde se permita a passagem da luz; o PA é usado em lavadoras, peças de máquinas, tubos, entre outros. As propriedades podem apresentar alta variabilidade em seus valores. Por exemplo, o PA pode apresentar o módulo de Young em torno de 300MPa enquanto o PE, no caso do LDPE, pode apresentar valores em torno de 20MPa; a densidade do PTFE está em torno de 2,4g/cm³, enquanto a densidade do PA está em torno de 1,0g/cm³; o alongamento na ruptura para o PE pode estar entre 300 e 900%, enquanto o PTFE apresenta valores em torno de 20%.

Para fins de dissipação de energia cinética, é necessário que o polímero analisado apresente boa resistência mecânica sob cargas de tração/compressão e elevada relação entre tensão de ruptura e escoamento. Com base nessas necessidades, conclui-se que, dentre os polímeros termoplásticos, o PA (poliamida) apresenta as melhores características.

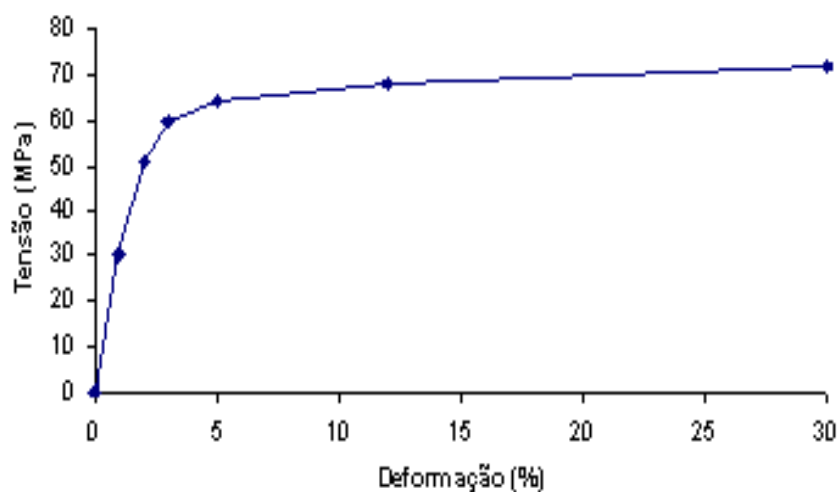


Figura 3: Tensão - Deformação para o PA.

Seu comportamento é fortemente visco-elástico, ou seja, suas propriedades mecânicas variam de acordo com o tempo e frequência de aplicação das tensões resultando em alterações de rigidez do material. Outra característica é que os termoplásticos apresentam valores maiores do módulo de Young que outros polímeros. O comportamento desse polímero frente às condições químicas e climáticas não é importante porque sua absorção de água é insignificante. No entanto, existem problemas em seu comportamento sob temperaturas muito baixas, em que pode ocorrer ruptura frágil. A Figura 3 mostra a curva tensão - deformação para esse material, na qual pode-se observar que o módulo de Young na origem, isto é, para a parte elástica, está em torno de 1900MPa. Além do limite de proporcionalidade, a relação entre a tensão e a deformação diminuiu para cerca de 67% desse valor ($\sim 1250\text{MPa}$). Portanto, o projeto do amortecedor levará isso em conta.

3. PROTÓTIPO DE AMORTECEDOR POLIMÉRICO

Para avaliação do comportamento do polímero termoplástico escolhido, um elemento de barra uniaxial foi testado sob carga cíclica, totalizando aproximadamente 25 ciclos para cada avaliação de carga e frequência. Assim, foi aplicada uma carga senoidal com valores máximos de acordo com a relação tensão-deformação do material visto na seção anterior. Os ensaios se iniciaram com carga de 2000N e frequência de excitação de 0,5 Hz posteriormente sendo modificada para 2,0 Hz e 5,0 Hz. Para a aferição de outras distintas faixas de tensões, foi alterado o carregamento para 2750N e 3250 N sendo estes também avaliadas para as mesmas frequências apresentadas anteriormente. Para a realização dos ensaios, fora utilizado o equipamento denominado MTS-810 que se trata de um atuador de funções harmônicas de carregamento. A Figura 4 mostra a imagem do dispositivo.



Figura 4: Atuador MTS-810.

Desta forma, a função de carga usada foi:

$$X = a \sin(\omega t) \quad (1)$$

em que “ a ” é a amplitude de carga em “N” (2000N, 2750N, 3000N e 3250N); “ $\omega=2\pi f$ ” é a frequência (neste caso, $f=0,5\text{Hz}$, $2,0\text{Hz}$ e $5,0\text{Hz}$) e “ t ” é o tempo. Particularmente, os valores de carga entre 2000N e 3250N representam o intervalo entre a tensão de escoamento e a tensão de ruptura do material. Os valores de frequência representam valores típicos de frequências naturais de estruturas em geral.

Para a análise desse material sob cargas cíclicas, foi projetado um modelo de amortecedor composto por elementos de aço combinados com o material visco-elástico para que os elementos do amortecedor fossem solicitados apenas por esforços axiais. A Figura 5 mostra uma imagem do amortecedor construído e posteriormente testado neste artigo. As Figuras 6 e 7 mostram vistas esquemáticas do amortecedor proposto.



Figura 5: Imagem do Amortecedor Uniaxial.

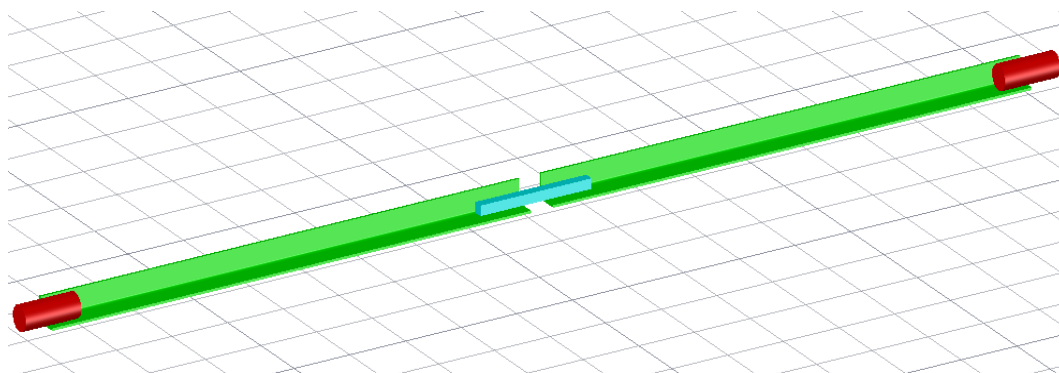


Figura 6: Vista 3D do Modelo Estrutural.

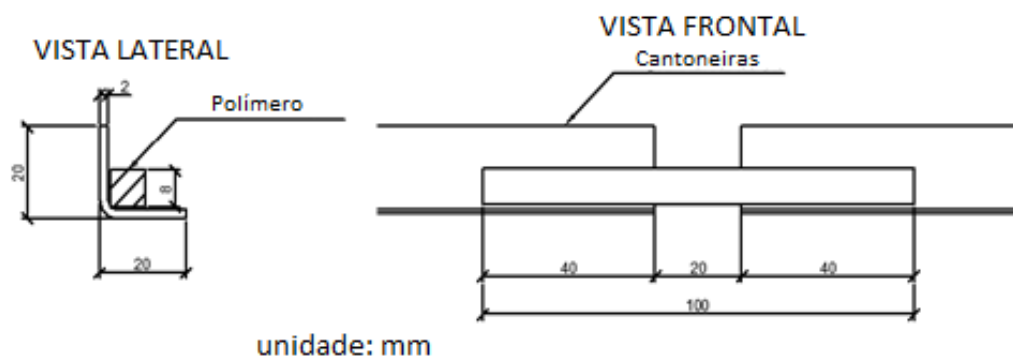


Figura 7: Vistas Lateral e Frontal do Amortecedor.

O projeto do amortecedor com essas características geométricas foi necessário porque o equipamento utilizado para avaliação da resposta necessitava de certas condições físicas, como o comprimento do elemento. Para isso foi necessário unir os elementos de aço ao polímero diretamente. É importante comentar que os centros de gravidade dos elementos de aço e da peça polimérica são os mesmos e as condições do efeito de flambagem foram restringidas pelo equipamento. Ainda com relação à possibilidade de flambagem, a posição do polímero, que foi instalado no centro da barra, pode ser transferida para qualquer uma das extremidades do elemento, aumentando a carga crítica de flambagem da peça. Nesse experimento não foi observada instabilidade no elemento, podendo ser verificada tal situação através dos resultados obtidos nas curvas de histerese determinadas experimentalmente.

3.1. RESPOSTA DO AMORTECEDOR

Com base nas explicações mencionadas na seção anterior, foi realizado um estudo experimental do amortecedor polimérico, visando gerar os ciclos de histerese apresentados nas Figuras 8 e 9.

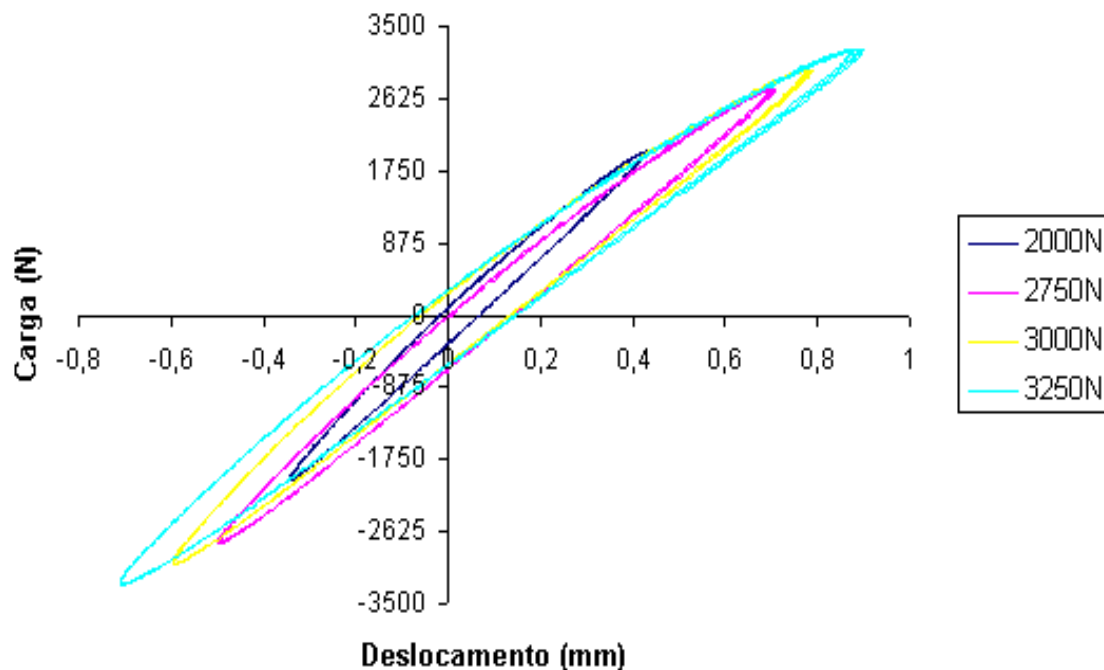


Figura 8: Ciclos de Histerese para 0,5Hz.

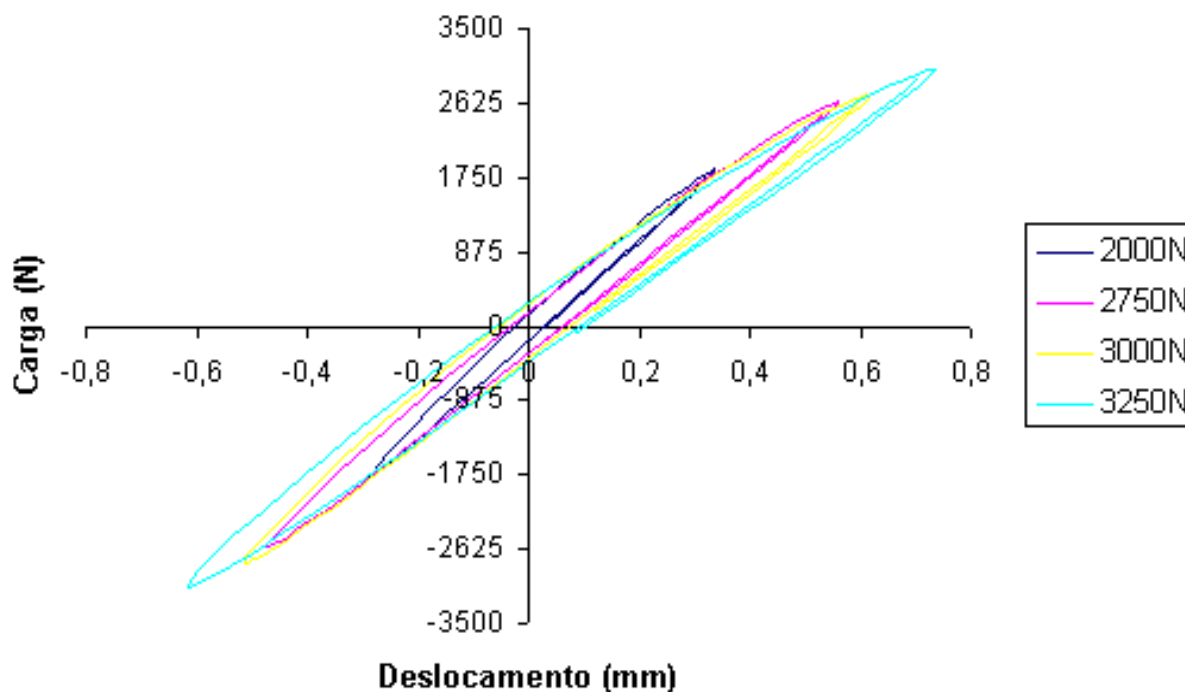


Figura 9: Ciclos de Histerese para 5,0Hz.

3.2. RIGIDEZ E FATOR DE PERDA

A partir dos ciclos mostrados nas Figuras 8 e 9 é possível determinar a rigidez e o fator de perda. A rigidez é definida como a relação entre o valor da carga com o valor do deslocamento. Já o fator de perda correlaciona a área do ciclo de histerese com a rigidez (Jones, 1978):

$$\eta = \frac{D}{2\pi U} \quad (2)$$

$$U = \frac{kx_o^2}{2} \quad (3)$$

em que “ η ” é o fator de perda; “ D ” a área de cada ciclo da histerese; “ k ” a rigidez e “ x_o ” o deslocamento. A Tabela 1 mostra o fator de perda e a rigidez para uma faixa de valores da carga. As Figuras 10 e 11 apresentam as variações do fator de perda e da rigidez com a frequência, respectivamente, sendo ambas dependentes da carga. A Figura 12 mostra a relação entre a rigidez e a carga.

Tabela 1: Fator de Perda e Rigidez.

Fator de Perda (%) e Rigidez (N/mm)						
Frequência (Hz)		0,5	2,0	5,0		
Carga (N)	2000	η	0,0921	0,0830	0,0803	
		K	4516	4776	5141	
	2750	η	0,09306	0,0881	0,0893	
		K	4042	4282	4373	
	3000	η	0,1148	0,1060	0,1041	
		K	3597	3844	3910	
	3250	η	0,1200	0,1145	0,1115	
		K	3293	3513	3467	

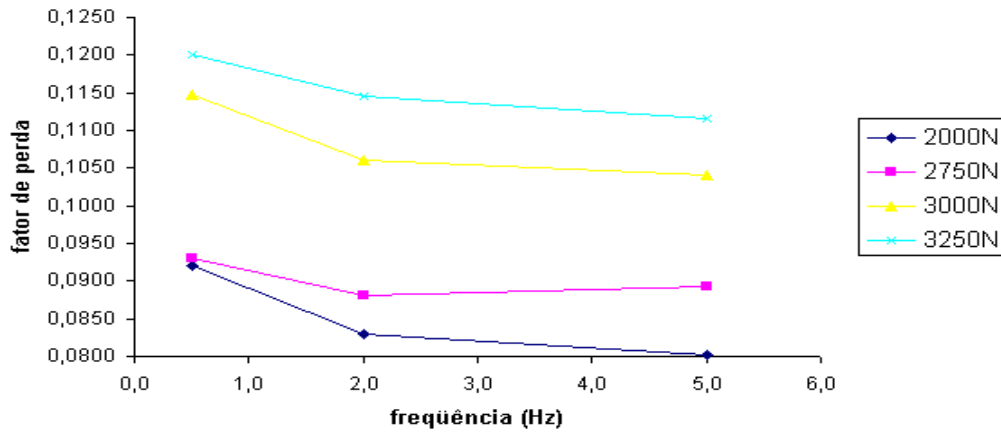


Figura 10: Fator de Perda e Frequência.

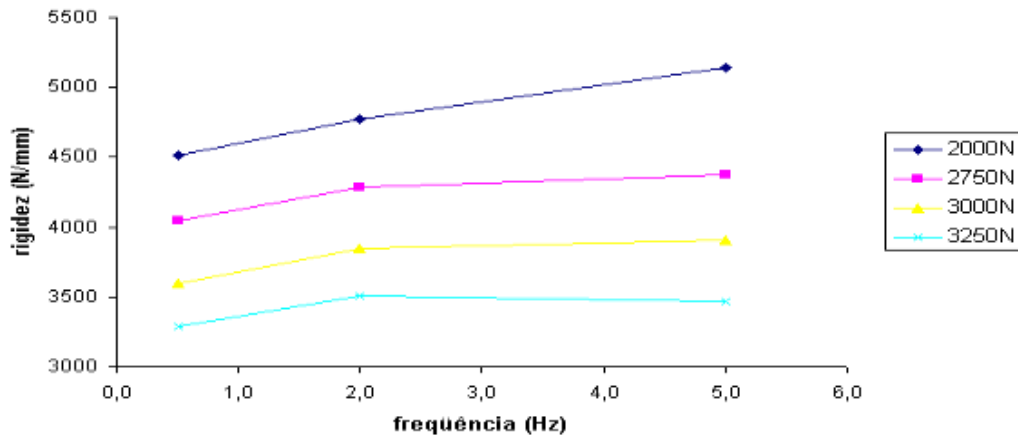


Figura 11: Rigidez e Frequência.

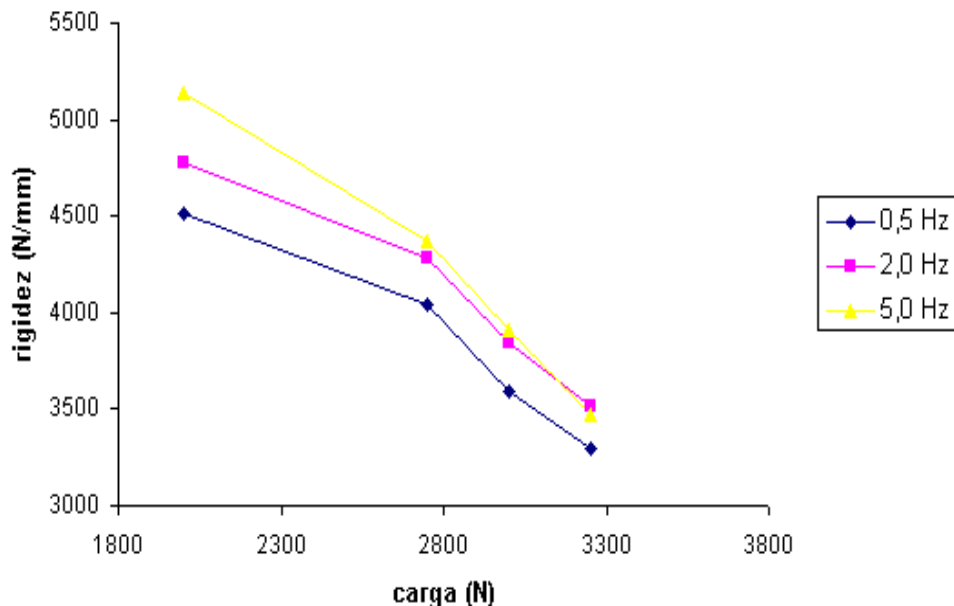


Figura 12: Rigidez e Carga Aplicada.

Observa-se que o fator de perda diminui com o aumento da frequência, isto é, η é proporcional ao período de vibração. A rigidez aumenta com a frequência e diminui com a amplitude da carga aplicada. Com base nessas observações conclui-se que o amortecedor apresenta melhor desempenho na faixa de frequências menores e também de menor rigidez, em que o fator de perda chega a 0,1200 para rigidez igual a 3293 N/mm. Isso era esperado porque a relação tensão-deformação indica que valores mais altos de tensão produzem valores mais altos de deformação aumentando assim a área encerrada pelos ciclos de histerese.

4. APLICAÇÃO: TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA COM AMORTECEDORES TERMOPLÁSTICOS POLIMÉRICOS INCORPORADOS

Torres de linhas de transmissão são estruturas muito esbeltas e altas. Normalmente, essas estruturas são suscetíveis a efeitos dinâmicos. Entre as alternativas para dissipação de energia, visando o controle da resposta dinâmica, encontra-se o emprego de amortecedores mencionados anteriormente. No exemplo ilustrativo de aplicação de amortecedores descrito a seguir, será considerada uma torre chamada “DFS”, a qual é uma estrutura muito utilizada em sistemas de transmissão de energia no Brasil. Esta torre é composta por cantoneiras de aço com diversas seções transversais. A torre “DFS” e a localização dos amortecedores são mostrados na Figura 13, enquanto as primeiras frequências naturais são apresentadas na Tabela 2, e uma ilustração dos 2 primeiros modos de vibração são mostrados na Figura 14.

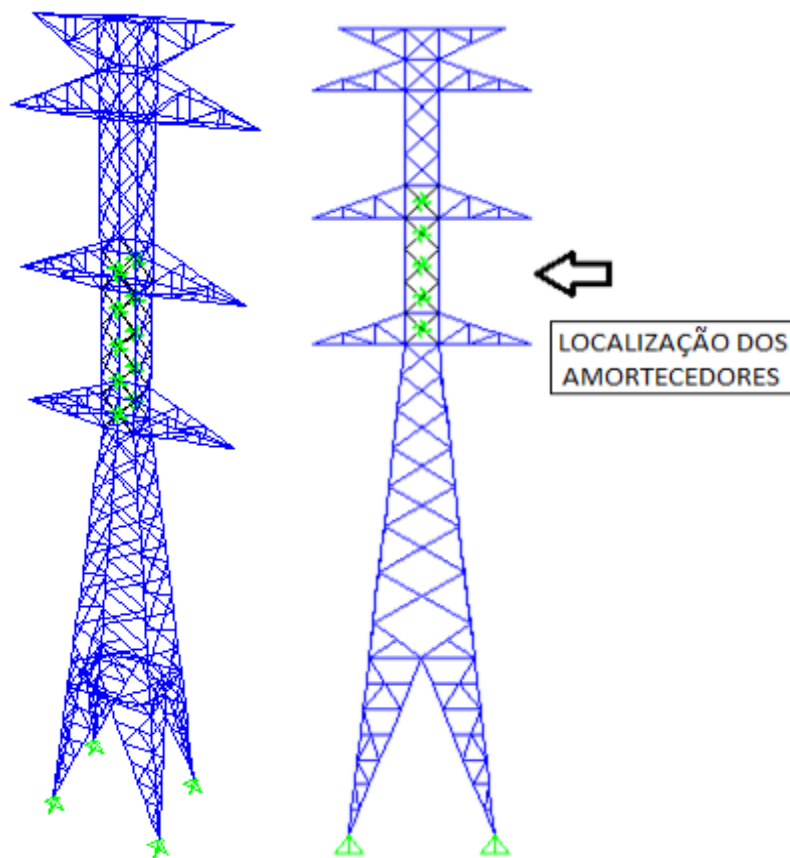


Figura 13: Torre DFS e Localização dos Amortecedores.

Tabela 2: Frequências Naturais de Vibração da Torre DFS.

Frequências Naturais (Hz)	1º	2º	3º	4º	5º
	1,011	1,145	2,124	2,144	2,300

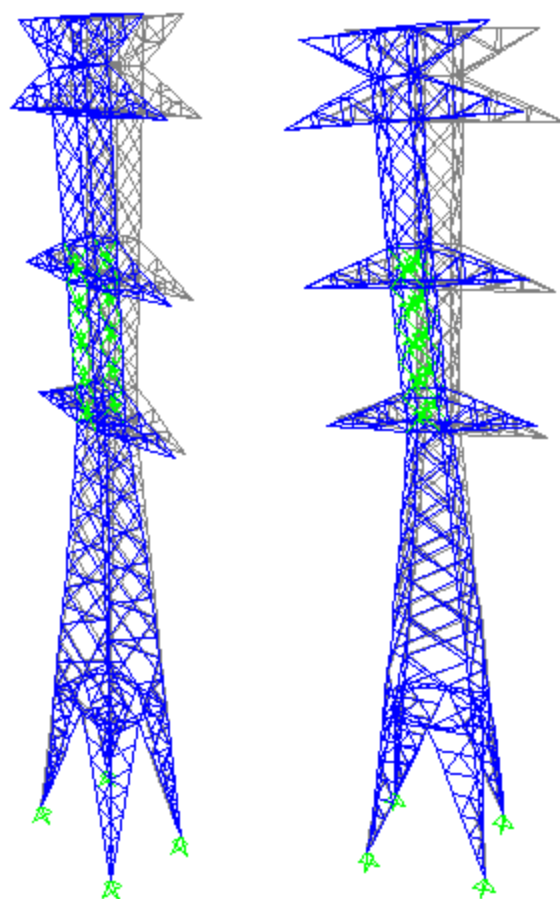


Figura 14: Modos de Vibração: Amortecedores Adicionados (primeiro e segundo modo, respectivamente).

O objetivo da análise modal consiste na identificação da frequência do modo de vibração que gera os maiores esforços axiais nos amortecedores. No presente caso, trata-se do segundo modo cuja frequência é 1,145Hz ($T_2 = 0,873s$). Como visto anteriormente, para frequência de 0,5Hz foram obtidos 0,12 e 3293N/mm para fator de perda e rigidez, respectivamente e para frequência de 2,0Hz, o fator de perda foi de 0,1145 e a rigidez foi de 3513N/mm. Um ajuste linear foi feito para obter o fator de perda e rigidez na frequência do segundo modo, resultando 0,1176 para o fator de perda e 3388N/mm para a rigidez, baseados nos ensaios experimentais. Portanto, o amortecedor equivalente numérico deve manter essas propriedades para cada ciclo na curva de histerese, como mostrado na Figura 15.

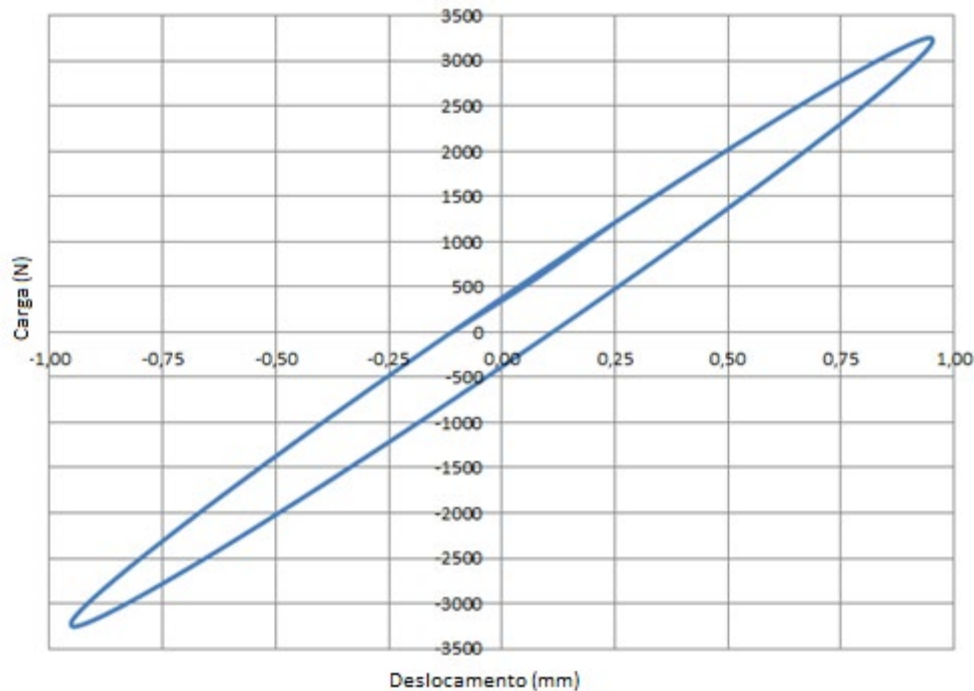


Figure 15: Ciclos de Histerese para $f=1,145\text{Hz}$ e $k=3388\text{N/mm}$.

Utilizando as informações apresentadas acima, será aplicada uma carga horizontal no topo da estrutura e, em seguida, será avaliada a resposta dinâmica e o efeito da incorporação de amortecedores nessas posições. A função de carga é a mesma apresentada em Miguel *et al.* (2004), isto é, uma função linear com valor máximo de 20kN em 10s. Em ensaios de torres metálicas submetidas a um deslocamento inicial, a mesma função de carga é usualmente utilizada, mas com uma taxa de carga menor, para evitar as vibrações observadas na simulação numérica entre 0 e 10s. As funções de carga começam em zero e aumentam seu valor até 10s e depois retornam a zero novamente (Figura 16). Adicionalmente, foram considerados três valores do amortecimento natural (amortecimento próprio de torre, sem amortecedores incorporados) que são 0,0%, 0,5% e 1,0%, cobrindo assim a faixa de variação usual em estruturas metálicas em treliça.

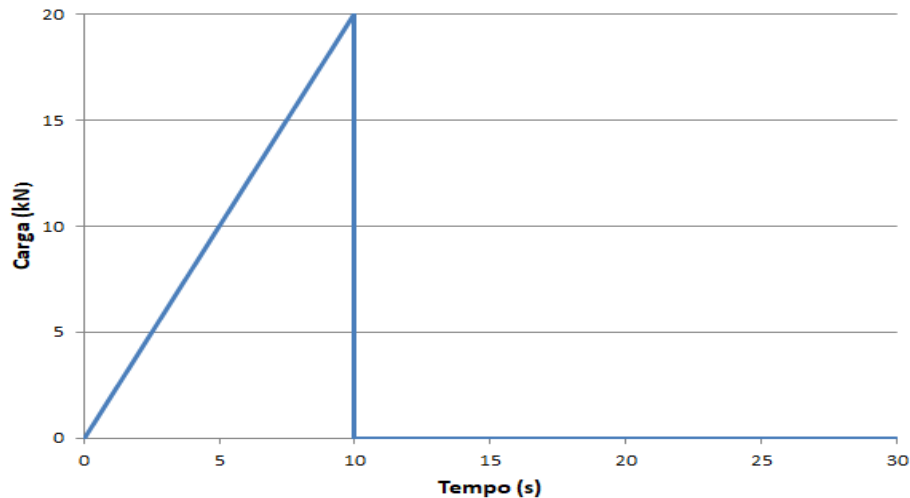


Figura 16: Função Carga-tempo.

4.1. RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO AMORTECIMENTO

Em primeiro lugar, serão mostrados os resultados nas três situações apresentadas anteriormente, já com os amortecedores instalados, considerando o amortecimento natural (amortecimento próprio) de 0,0%, 0,5% e 1,0%, nas Figuras 17, 18 e 19, respectivamente.

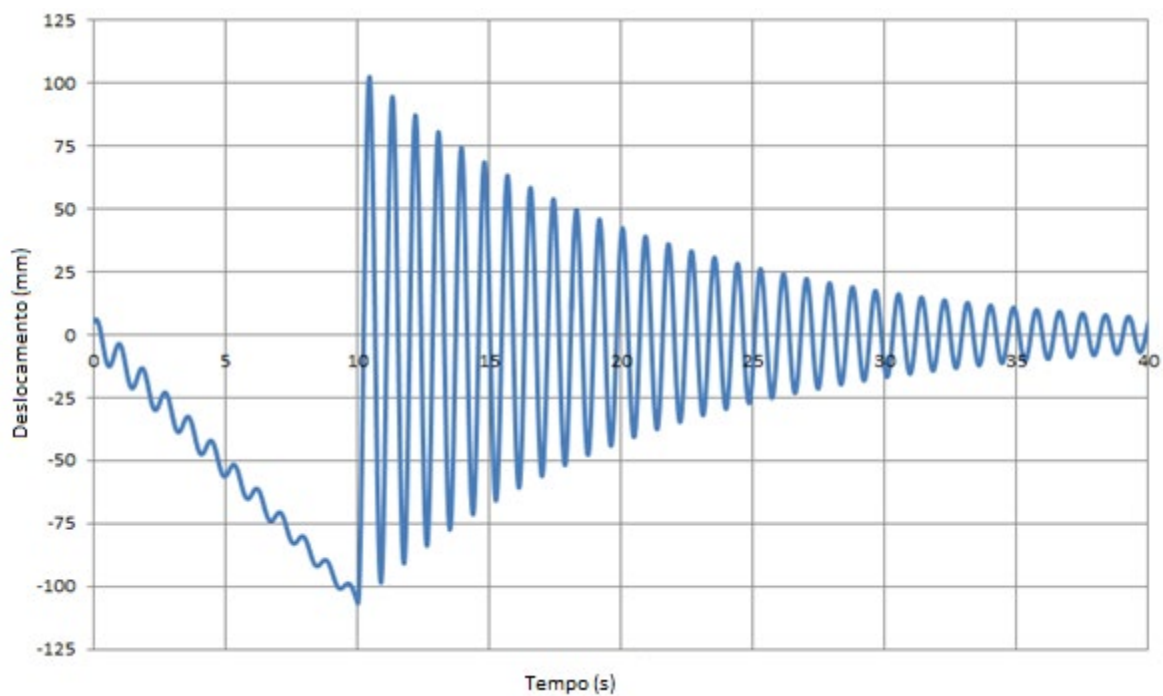


Figura 17: Resposta com Incorporação de Amortecedores para Amortecimento da Estrutura de 0,0%.

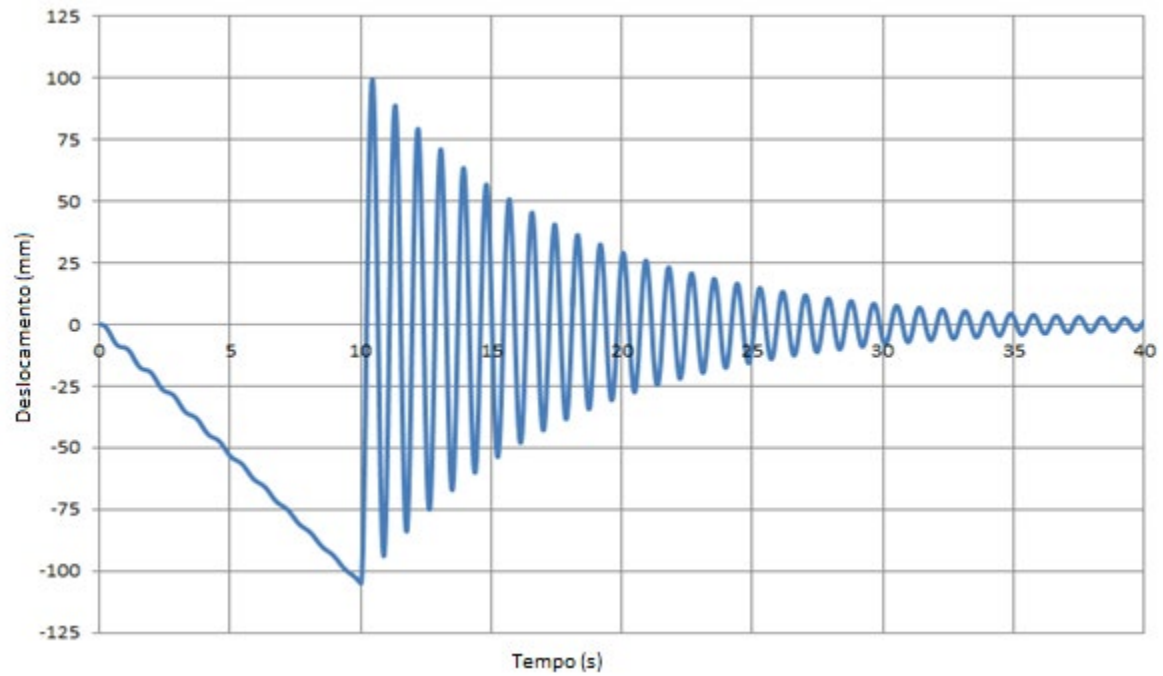


Figura 18: Resposta com Incorporação de Amortecedores para Amortecimento da Estrutura de 0,5%.

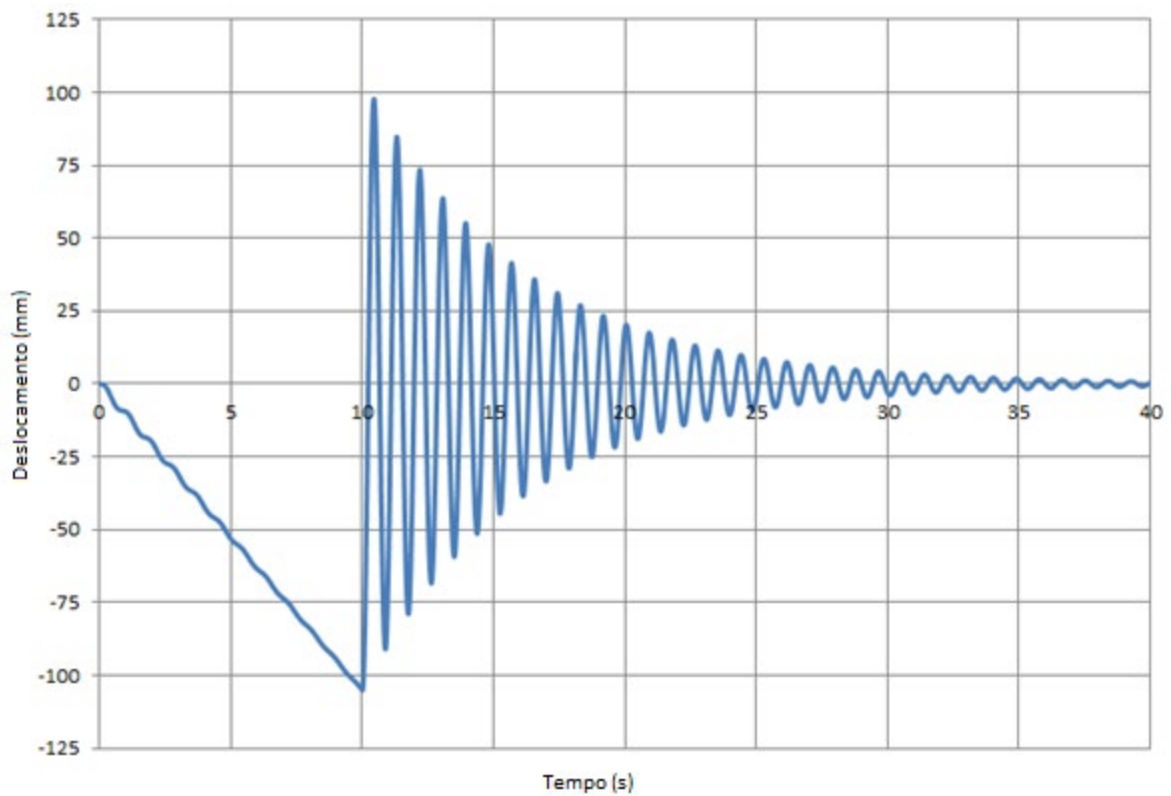


Figura 19: Resposta com Incorporação de Amortecedores para Amortecimento da Estrutura de 1,0%.

Para avaliar a razão de amortecimento resultante, é necessário determinar o denominado decremento logarítmico. Este método consiste em comparar dois picos de valores da amplitude de vibração medida ou determinada numericamente e, através da razão entre eles, obter a razão de amortecimento. O decremento logarítmico “ δ ” é definido como:

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{x_n}{x_{n+N}} \right) \quad (4)$$

na qual “ N ” é o número de ciclos; “ x_n ” a amplitude de resposta no ciclo inicial e “ x_{n+N} ” a amplitude da resposta após N ciclos. A razão de amortecimento “ ζ ” é dada pela equação (5).

$$\zeta \cong \frac{\delta}{2\pi} \quad (5)$$

No primeiro caso (Figura 16) para 0,0% de amortecimento natural, o amortecimento adicional gerado pelo uso de amortecedores visco-elásticos resultou em 1,28%. Para os outros dois casos, nos quais o amortecimento natural foi de 0,5% e 1,0%, a nova taxa de amortecimento passou para 1,78% e 2,28%, respectivamente. O uso de amortecedores, neste caso, resulta em um aumento linear na razão de amortecimento no sistema estrutural, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Ganho na Razão de Amortecimento devido ao Uso dos Amortecedores.

Amortecimento Próprio (%)	Amortecimento Adicional (%)	Aumento Percentual (%)
0,0	1,28	*
0,5	1,78	156
1,0	2,28	128

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliou-se a utilização de polímeros termoplásticos em amortecedores passivos com o objetivo de reduzir as amplitudes de vibração nas estruturas. Foram descritas as propriedades relevantes desse material, como relação tensão-deformação, comportamento térmico, químico, físico e mecânico. Na sequência foi construído um protótipo de amortecedor utilizando elementos de aço e um polímero termoplástico específico, uma poliamida, para uso em estruturas de aço em treliça. Verificou-se que, em polímeros termoplásticos, dentro do campo de estudo, o fator de perda aumenta com o período de vibração da estrutura. Do mesmo modo, menores valores de rigidez apresentaram maiores fatores de perda. Adicionalmente, foi realizada

uma avaliação do desempenho do amortecedor em uma estrutura real, na qual 20 barras de contraventamento foram substituídas por 20 amortecedores com as mesmas características determinadas em estudos experimentais. Assim, chegou-se a um valor de 1,28% para a relação de amortecimento induzido pelos amortecedores. Duas outras simulações foram realizadas considerando amortecimento próprio da estrutura (sem amortecedores) de 0,5% e 1,0%. Nesses casos, o aumento da taxa de amortecimento também foi de 1,28%, confirmando que os efeitos são aditivos. O uso de polímeros termoplásticos com objetivo de dissipação de energia em estruturas mostrou-se uma boa alternativa em vista do seu baixo custo e a facilidade de projeto e construção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq e da CAPES.

REFERÊNCIAS

- Aseka, E. H., “Projeto, Construção e Determinação de Propriedades de Amortecedor Viscoelástico Para Uso em Estruturas”, Dissertação de Mestrado, PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.
- Crawford, R. J., “*Plastics Engineering*”, 2^a ed. Pergamon Press, 1987.
- Curadelli, R. O., “*Controle de Vibração em Estruturas Usando Amortecedores Metálicos*”, Tese de Doutorado, PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003.
- Curadelli, R. O., Amani, M., “Integrated structure-passive control design of linear structures under seismic excitation”, *Engineering Structures*, vol. 81, pp. 256-264, 2014.
- Curadelli, R. O., Riera, J. D., “Reliability based assessment of the effectiveness of metallic dampers in buildings under seismic excitations”, *Engineering Structures*, vol. 26, pp. 1931-1938, 2004.
- Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F. “Discussion of paper: “Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search” [Eng. Struct. vol. 33, Issue 9, pp. 2716–2723, 2011]. *Engineering Structures*, vol. 54, pp. 262-264, 2013.
- Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F., Torii, A. J., “A novel approach to the optimum design of MTMDs under seismic excitations”. *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, pp. 1290-1313, 2016a.
- Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H., Torii, A. J., Miguel, L. F. F., Beck, A. T., “Robust design optimization of TMDs in vehicle-bridge coupled vibration problems”. *Engineering Structures*, vol. 126, pp. 703-711, 2016b.
- Jones, D., “A Reduced-Temperature Nomogram Characterization of Damping Materials Behavior”, *Shock and Vibrating Bull.*, vol. 48(2), pp 13-22, 1978.

- Kervin Jr., E. M. “Damping of Flexural Waves by a Constrained Viscoelastic Layer”, *Journal of Acoustical Society of America*, vol.31, nº 7, pp. 952-962, 1959.
- Mahmoodi, P. “Structural Dampers”, ASCE – *Journal of Structural Division*, vol. 95, nº. ST8, pp. 1661-1672, Aug.1969.
- Martinez, C. A., Curadelli, R. O., Compagnoni, M. E. “Optimal design of passive viscous damping systems for buildings under seismic excitation”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 90, pp. 253-264, 2013.
- Martinez, C. A., Curadelli, R. O., Compagnoni, M. E. “Optimal placement of nonlinear hysteretic dampers on planar structures under seismic excitation”. *Engineering Structures*, vol. 65, pp. 89-98, 2014.
- Martinez, C. A., Curadelli, R. O., “Testing and performance of a new friction damper for seismic vibration control”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 399, pp. 60-74, 2017.
- Miguel, L. F. F., “*Estudo Teórico e Experimental de Amortecedores de Vibração Por Atrito*”, Dissertação de Mestrado, PPGEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.
- Miguel, L. F. F., Curadelli, R. O., Riera, J. D., “*Uso de Amortecedores Por Atrito e Metálicos no Controle de Vibrações Induzidas Pelo Vento em Torre Metálica*”, In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, maio 2004.
- Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H. “Robust design optimization of friction dampers for structural response control”. *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 21, pp. 1240-1251, 2014.
- Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H. “A firefly algorithm for the design of force and placement of friction dampers for control of man-induced vibrations in footbridges”. *Optimization and Engineering*, vol. 16, pp. 633-661, 2015.
- Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H. “Simultaneous optimization of force and placement of friction dampers under seismic loading”. *Engineering Optimization*, vol. 48, Issue 4, pp. 582-602, 2016a.
- Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H. “Failure probability minimization of buildings through passive friction dampers”. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 25, Issue 17, pp. 869-885, 2016b.
- Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., Lopez, R. H. “Methodology for the simultaneous optimization of location and parameters of friction dampers in the frequency domain”. *Engineering Optimization*, vol. 50, Issue 12, pp. 2108-2122, 2018.
- Oberst, H., Frankenfeld, K. “Über die Dämpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch fest haftende Beläge”. *Acustica*, 2 (1952), pp. 181-194.
- Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F. “A New Assessment in the Simultaneous Optimization of Friction Dampers in Plane and Spatial Civil Structures”. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, pp. 1-18, 2017a.
- Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F. “Optimization of location and forces of friction dampers.” *REM-International Engineering Journal*, vol. 70, no. 3, pp. 273-279, 2017b.

- Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., “Robust Simultaneous Optimization of Friction Damper for the Passive Vibration Control in a Colombian Building”, *Procedia Engineering*, 199, pp. 1743-1748, 2017c.
- Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Riera, J. D., “Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions”, *Engineering Structures*, 190, pp. 276-284, 2019.
- Ross, D., Ungar, E. E., Kerin Jr., E. M. “Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Layer”, *Structural Damping*, ASME, pp.49-99, New York, USA, 1959.
- Silwal, B., Michael, J. M., Ozbulut, O. E., “A Superelastic Viscous Damper for Enhanced Seismic Performance of Steel Moment Frames”, *Engineering Structures*, 105 (2015) pp 152-164.
- Vellar, L. S., Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., “Robust Optimum Design of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in Buildings Subjected to Seismic Excitation”, *Shock and Vibration*, volume 2019, Article ID 9273714, 9 pages, 2019.

Thermoplastics Polymers use in passive structural dampers: overview and application example

ABSTRACT

The main objective of this paper is to contribute technically based on the use of Thermoplastic Polymers in the design and evaluation of their performance as passive structural damper systems. A brief review on types and properties of viscoelastic materials is presented first. The properties of a polyamide (PA) judged as an appropriate option for use in passive structural dampers were obtained experimentally. After, the design, construction and analysis of dampers built with polymeric materials are presented. The performance of a damper prototype is analyzed under harmonic loads action. The damper effectiveness is illustrated by the analysis of a latticed steel tower with and without dampers inserted. The results show that thermoplastic polymers can be used successfully in the design of passive energy dissipation systems in structures.

Keywords: *Energy dissipation in structures, Dampers, Thermoplastic materials, Steel structures.*

1. INTRODUCTION

Vibration problems in structures under dynamic loads have been subject of extensive studies and research, especially in the last fifty years. Particularly noticeable in this area were the numerous alternatives for reduction and control of structural vibrations published in this period, from which selected samples were included in the list of references. This paper focuses attention on the use of polymeric thermoplastics, which are characterized by viscoelastic behavior under dynamic loading and therefore dissipate energy in each oscillation cycle, but to the authors knowledge have not been previously employed in the design of passive structural dampers.

2. POLIMERIC THERMOPLASTICS

Polymeric thermoplastics are characterized by softening, *i.e.*, considerable deformation under load, which tend to disappear when the load is removed. Most thermoplastics have low strength and elastic modulus and may be modeled as viscoelastic materials. A typical stress-strain curve for a thermoplastic is shown in Figure 1. Thermoplastics are sensitive to the deformation ratio, as shown in Figure 2. Engineering thermoplastics, such as PVC and PMMA, have a wide field of applications, from toys to automotive components. For instance, PE is used for dry pipe, films, buckets; PP in containers, home appliances, automotive bumpers; PVC in cold water pipes; PS in

automotive parts; PMMA in applications that require transparency; while PA is used in washers, machinery parts and pipes. For use in dampers, it is necessary that the selected polymer presents sufficiently high strength under tensile or compressive loading, and large elongation before rupture. The previous requirements suggest that PA (polyamide) presents the best features for use in dampers. Its behavior is viscoelastic and also has higher values of Young modulus than other polymers. Figure 3 shows that Young modulus of PA, for the elastic range, is around 1900MPa, while the ratio between stress and strain decreases to around 67% of this value (~ 1250 MPa) for higher strains.

3. PROTOTYPE DAMPER FOR USE IN LATTICE STEEL STRUCTURES

The selected thermoplastic polymer was tested under cyclic load in order to assess its dynamic behavior. A sinusoidal cyclic load was applied to a damper model consisting of steel angles combined with a prism of viscoelastic material, as shown in Figure 6, to ensure that the elements are subjected to axial loads only. No evidence of buckling was observed in the experiments. Hysteresis cycles for the prototype damper were determined experimentally with the results shown in Figures 7 and 8. Table 1 presents the loss factor and the stiffness evolution with the amplitude of the load. Figures 9 and 10 show the loss factor vs. frequency and the stiffness vs. frequency curves. Figure 11 shows the relation between stiffness and load. The loss factor decreases with the frequency. Moreover, the stiffness increases with the frequency and decreases with the applied load within certain limits. It is concluded that the best performance occurs in lower frequencies and also lower stiffness, in which case the loss factor reaches 0.1200.

4. DAMPER APPLICATION TO TRANSMISSION LINE TOWER

Transmission line towers are usually slender and high structures, thus susceptible to suffer important dynamics effects. The tower examined in the illustrative example, shown in Figure 12, is composed mainly by steel angle members with different cross sections and widely used in transmission lines in Brazil. The location of dampers is also indicated in Figure 12, while the first natural frequencies of the tower are presented in Table 2. The modal analysis permits identifying the frequencies of the vibrations that will generate axial loads in the dampers. In the present case, the largest contribution is due to second mode, of frequency 1.145Hz. The loss factor and stiffness, for an excitation frequency of 0.5Hz were determined as 0.12 and 3293N/mm, respectively, while for frequency 2.0Hz, the loss factor and the stiffness were 0.1145 and

3513N/mm respectively. The loss factor and stiffness for the second mode frequency of the tower were obtained by linear interpolation, resulting equal to 0.1176 and 3388N/mm, respectively. Therefore, the equivalent damper must present these properties for each cycle in the hysteresis curve in the numerical analysis, as shown in Figure 14. Thus, a horizontal load was applied at the top of the structure in order to evaluate numerically its dynamic response and the effect of the dampers in those positions. The load function is the same presented in Miguel *et al.* (2004) and it is a linear function with maximum value of 20kN in 10s. The load function increases from zero to the final value in 10s and after returns to zero again (Figure 15). Additionally, three values of natural damping (own damping) were considered, namely 0.0%, 0.5% and 1.0% representing the features of the structure. In the first case (Figure 16) for 0.0% natural damping, the additional damping generated by use of viscoelastic dampers resulted in a 1.28%. For the other two cases, in which natural damping were 0.5% and 1.0%, the new damping ratio reached 1.78% and 2.28%, respectively. Therefore, in this case, result a linear increase of the damping ratio in the structural system was observed.

5. CONCLUSIONS

In this paper, the use of thermoplastic polymers in passive dampers with the objective of reducing structural vibration amplitudes was evaluated. For such purpose, relevant properties of that material such as its stress strain relation, its thermal, chemical, physics and mechanical behavior were initially described. The response of a polyamide subjected to cyclic loading was determined experimentally. A prototype of passive damper for use in lattice steel structures employing a thermoplastic polymer was built and laboratory tested. It is shown that, within the range of frequencies studied, for thermoplastic polymers the loss factor increases with the period of vibration while lower stiffness lead to higher loss factors. Additionally, the performance of the prototype damper in a transmission line tower was assessed. In the example, five locations of “X” bracing members were substituted (20 bars) by 20 dampers with the same properties measured in the experimental study. The dampers contribute with 1.28% to the critical damping ratio of the tower. Assuming typical damping ratios for welded structures of 0.5% and 1.0%, the results suggest that increases of the damping ratio higher than 100% may be achieved with the introduction of thermoplastic dampers. In view of its low cost, simplicity of design and construction, it is concluded that the approach constitutes an appealing alternative to structural vibration control.