

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LABORATÓRIO DE DINÂMICA ESTRUTURAL E CONFIABILIDADE

**DISSIPACÃO DE ENERGIA EM ESTRUTURAS COM
UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS**

Gustavo Fruet

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

Maio de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE DINÂMICA ESTRUTURAL E CONFIABILIDADE

**DISSIPACÃO DE ENERGIA EM ESTRUTURAS COM
UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS**

Gustavo Fruet

Dissertação apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, CPGEC, UFRGS, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de *Mestre em Engenharia*.

Área de Concentração: Estruturas

Porto Alegre
Maio de 2005

F944d

Fruet, Gustavo

Dissipação de energia em estruturas com utilização de polímeros termoplásticos / Gustavo Fruet. - 2005.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

Orientador: Profº Jorge Daniel Riera.

1. Vibração-Estruturas. 2. Amortecimento. 3. Polímeros termoplásticos. 4. Dissipação de energia. I. Riera, Jorge Daniel, orient. II. Título.

CDU-624.042(043)

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós Graduação.

Prof. Jorge Daniel Riera
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Raúl Oscar Curadelli (UPF)

Prof. Dr. Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jorge Daniel Riera sempre acessível e franco, pela orientação, paciência e apoio dedicados durante o desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade que me foi dada em realizar este curso.

Aos colegas do Laboratório de Dinâmica Estrutural, LDEC, em especial a Letícia Fleck Fadel Miguel pelo esclarecimento de dúvidas e pelo auxílio no procedimento dos ensaios.

Ao Laboratório de Metalurgia Física, LAMEF, pelo empréstimo de equipamentos para realização dos ensaios, em especial, ao bolsista Genaro Zanon pela colaboração na realização dos mesmos.

Ao Laboratório de Ensaios de Modelos Estruturais, LEME, pelo empréstimo de equipamentos para a confecção dos amortecedores.

A Empresa de Plásticos Para Engenharia ENSINGER® por financiar parte deste trabalho e por fornecer os materiais para realização do mesmo. Um agradecimento especial a Engenheira Ana Paula Celiberto pelo esclarecimento de dúvidas referentes ao comportamentos dos polímeros.

RESUMO

FRUET, G. Dissipação de Energia Em Estruturas Com Utilização de Polímeros Termoplásticos. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – UFRGS- Porto Alegre.

Esta dissertação tem por objetivo contribuir à compreensão dos mecanismos e efeitos de dissipação de energia em estruturas mediante a utilização de materiais viscoelásticos. São obtidas experimentalmente as propriedades destes polímeros termoplásticos enfatizando seu uso como meio de redução das amplitudes de vibrações em estruturas submetidas a ações dinâmicas.

Inicialmente, apresenta-se uma breve resenha histórica sobre o uso de materiais viscoelásticos com finalidade de amortecimento estrutural. São descritos modelos reológicos referentes ao comportamento mecânico, químico e térmico e também modelos matemáticos relacionados ao fenômeno do amortecimento necessários para o desenvolvimento do projeto dos amortecedores.

A seguir, descreve-se detalhadamente o projeto, construção e análise de dissipadores de energia confeccionados com polímeros termoplásticos, mediante aplicações de carregamentos harmônicos cíclicos, é analisado seu comportamento.

Finalmente, faz-se uma análise numérica da influência da incorporação de dissipadores numa estrutura real com problemas de vibrações excessivas. Conclusões sobre a aplicação deste tipo de amortecedor em estruturas em geral são apresentadas.

Palavras Chave: “dissipação de energia”; “amortecedores”; “polímeros termoplásticos”.

ABSTRACT

FRUET, G. Dissipação de Energia Em Estruturas Com Utilização de Polímeros Termoplásticos. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – UFRGS- Porto Alegre.

The aim of this dissertation is to contribute to the understanding of energy dissipation effects in structures using viscoelastic materials. The properties that thermoplastics polymers are obtained experimentally emphasizing its use in dampers designed to reduce amplitudes in structures submitted to dynamic actions.

A review on the use of viscoelastic materials for structural damping purpose it first presented. Rheologic models regarding the behavior mechanical, chemical and thermal as well as related mathematical models of damping.

On that basis, the design, construction and analysis of dampers build with viscoelastic materials are described. The performance of this prototype damper is analyzed applying cyclical harmonic loads.

Finally the influence of dampers on a real structure with problems of excessive vibrations is determined numerically. Conclusions about the application of thermoplastic dampers in structures are presented.

Keywords: “dissipation of energy”; “dampers”; “thermoplastic materials”.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. PRELIMINARES.....	1
1.3. RESUMO HISTÓRICO	2
1.4. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	4
1.5. ESCOPO DO TRABALHO.....	4
2. MATERIAIS PLÁSTICOS	6
2.1. POLÍMEROS	6
2.2. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS	7
2.3. CADEIA DE MOLÉCULAS.....	7
2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS TERMOPLÁSTICOS	8
2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS	11
2.6. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	14
2.7. PROPRIEDADES QUÍMICAS	15
2.8. PRINCIPAIS TERMOPLÁSTICOS DE ENGENHARIA E SEUS USOS	16
2.8.1. <i>Polietileno (PE)</i>	17
2.8.2. <i>Polipropileno (PP)</i>	17
2.8.3. <i>Polivinil Cloride (PVC)</i>	18
2.8.4. <i>Poliestireno (PS)</i>	18
2.8.5. <i>Polimetil Metacrilato (PMMA)</i>	19
2.8.6. <i>Poliamida (PA)</i>	19
2.8.7. <i>Poliacetil (POM)</i>	20
2.8.8. <i>Politetrafluoretileno (PTFE)</i>	20
3. COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DOS POLÍMEROS	22
3.1. INTRODUÇÃO	22
3.2. FLUÊNCIA E RELAXAÇÃO	23
3.3. MODELOS CONSTITUTIVOS BÁSICOS DOS MATERIAIS	24
3.3.1. <i>Modelo de Hooke</i>	25
3.3.2. <i>Modelo de Newton</i>	26
3.4. MODELOS VISCOELÁSTICOS SIMPLES	26
3.4.1. <i>Modelo de Kelvin</i>	27
4. MODELOS MATEMÁTICOS E PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO ESTUDO DO AMORTECIMENTO.....	32
4.1. INTRODUÇÃO	32
4.2. AMORTECIMENTO.....	32
4.2.1. <i>Amortecimento devido ao meio</i>	33
4.2.2. <i>Amortecimento devido ao material</i>	33
4.3. TIPOS DE AMORTECEDORES.....	34
4.3.1. <i>Amortecedores de Newton</i>	34
4.3.2. <i>Amortecedores por Atrito de Coulomb</i>	35
4.3.3. <i>Amortecedores Viscoelásticos</i>	36
4.4. COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS.....	36
4.4.1. <i>Material elástico perfeito (Hooke)</i>	38
4.4.2. <i>Modelo de Kelvin</i>	38

4.4.3.	<i>Modelo de Maxwell</i>	38
4.4.4.	<i>Modelo Histerético Standard</i>	38
5.	MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO AMORTECIMENTO	42
5.1.	INTRODUÇÃO	42
5.2.	QUANTIFICAÇÃO DO AMORTECIMENTO A UMA RESPOSTA TRANSIENTE ATRAVÉS DO DECREMENTO LOGARÍTMICO.....	42
5.3.	QUANTIFICAÇÃO DO FATOR DE PERDA ATRAVÉS DO CICLO DE HISTERESE	44
6.	PROJETO DOS DISSIPADORES DE ENERGIA	47
6.1.	INTRODUÇÃO	47
6.2.	MATERIAIS POLIMÉRICOS AVALIADOS	47
6.3.	DISSIPACÃO DE ENERGIA.....	49
6.3.1.	<i>Dissipação de Energia Através de Esforços de Cisalhamento (CIS)</i>	49
6.3.2.	<i>Dissipação de Energia Através de Esforços Axiais (AXL)</i>	50
6.4.	PROJETO DO ESTUDO EXPERIMENTAL	52
6.4.1.	<i>Metodologia do Ensaio</i>	54
7.	RESULTADOS	56
7.1.	INTRODUÇÃO	56
7.2.	CICLOS DE HISTERESE DO AMORTECEDOR	56
7.2.1.	<i>Ciclos de Histerese do Modelo CIS</i>	56
7.2.2.	<i>Ciclos de Histerese Do Modelo AXL</i>	64
8.	ANÁLISE DE UMA TORRE TRELIÇADA	70
8.1.	INTRODUÇÃO	70
8.2.	TORRE METÁLICA	70
8.3.	AMORTECIMENTO NATURAL E CARGA APLICADA.....	72
8.4.	DISCRETIZAÇÃO DO AMORTECEDOR.....	72
8.5.	RESULTADOS	74
9.	CONCLUSÕES	77
10.	BIBLIOGRAFIA	80

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: POSIÇÃO E LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS DISSIPADORES VISCOELÁSTICOS (WORLD TRADE CENTER)	3
FIGURA 1.2: WORLD TRADE CENTER ONDE FORAM INSTALADOS OS AMORTECEDORES DE MAHMOODI (1969) ANTES DO ATENTADO DE 2001	3
FIGURA 2.1: ESTRUTURA DO PROPILENO E PROLIPOPILENO	6
FIGURA 2.2: ESTRUTURA DO ESTIRENO E POLIESTIRENO	6
FIGURA 2.3: ESTRUTURA CRISTALINA DE POLÍMEROS	8
FIGURA 3.1: ELEMENTO DE HOOKE E ELEMENTO DE NEWTON	24
FIGURA 3.2: MODELOS DE MAXWELL E KELVIN	27
FIGURA 4.1: MODELO DE AMORTECIMENTO DE NEWTON	35
FIGURA 6.1: DETALHE DISSIPADOR POR CISALHAMENTO	50
FIGURA 6.2: IMAGEM DO AMORTECEDOR POR CISALHAMENTO	50
FIGURA 6.3: DETALHE DO AMORTECEDOR POR ESFORÇOS AXIAIS (AXL)	51
FIGURA 6.4: VISTA DO AMORTECEDOR POR ESFORÇOS AXIAIS (AXL)	52
FIGURA 6.5: MODELO ATUADOR MTS-810	53
FIGURA 8.1: PERFIL DA TORRE DANIFICADA NO JAPÃO EM 1991	71
FIGURA 8.2: POSIÇÃO DE INCORPORAÇÃO DOS DISSIPADORES	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1: DIAGRAMA DE TENSÃO DEFORMAÇÃO DOS TERMOPLÁSTICOS	9
GRÁFICO 2.2: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA DEFORMAÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS.	10
GRÁFICO 2.3: EFEITO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO SOBRE A CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS TERMOPLÁSTICOS.....	10
GRÁFICO 3.1: TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA UM MATERIAL VISCOELÁSTICO PARA DIFERENTES TEMPOS.....	24
GRÁFICO 3.2: COMPORTAMENTO DO MODELO DE HOOKE COM RELAÇÃO AO TEMPO EM TERMOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO	25
GRÁFICO 3.3: COMPORTAMENTO DO ELEMENTO DE NEWTON.....	26
GRÁFICO 3.4: MODELO DE KELVIN REPRESENTANDO A FLUÊNCIA VISCOELÁSTICA.....	28
GRÁFICO 3.5: RESPOSTA DO MODELO DE KELVIN.....	29
GRÁFICO 3.6: MODELO DE MAXWELL REPRESENTANDO A RELAXAÇÃO DE UM TERMOPLÁSTICO	29
GRÁFICO 3.7: RESPOSTA DO MODELO DE MAXWELL	30
GRÁFICO 5.1: FORMA EXPONENCIAL DO DECREMENTO LOGARÍTMICO	43
GRÁFICO 5.2: CICLO DE HISTERESE.	45
GRÁFICO 7.1: EXCITAÇÃO HARMÔNICA ATUADOR MTS-810.....	56
GRÁFICO 7.2: CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 2185N 0,5HZ.....	57
GRÁFICO 7.3: CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 2185N 5,0HZ.....	57
GRÁFICO 7.4: CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 3260N 2,5HZ.....	58
GRÁFICO 7.5: SUPERPOSIÇÃO CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 2185 N.	58
GRÁFICO 7.6: SUPERPOSIÇÃO CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 3260N	59
GRÁFICO 7.7: SUPERPOSIÇÃO DE CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 0,5HZ	59
GRÁFICO 7.8: SUPERPOSIÇÃO DE CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 2,5H	60
GRÁFICO 7.9: SUPERPOSIÇÃO DE CICLOS DE HISTERESE DO MODELO CIS PARA 5,0HZ	60
GRÁFICO 7.10: VARIAÇÃO DO FATOR DE PERDA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA	61
GRÁFICO 7.11: VARIAÇÃO DA RIGIDEZ EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA	62
GRÁFICO 7.12: VARIAÇÃO DA RIGIDEZ EM FUNÇÃO DA CARGA APLICADA	63
GRÁFICO 7.13: CICLOS DE HISTERESE DO MODELO AXL PARA 2000N 5,0 Hz.....	64
GRÁFICO 7.14: CICLOS DE HISTERESE DO MODELO AXL PARA 2750N 2,0 Hz.....	65
GRÁFICO 7.15: GRUPO CICLOS DE HISTERESE DO MODELO AXL PARA 3000N 0,5 Hz.....	65

GRÁFICO 7.16: SUPERPOSIÇÃO DE CICLOS DE HISTERESE DO MODELO AXL PARA 0,5Hz	66
GRÁFICO 7.17: SUPERPOSIÇÃO DOS CICLOS DE HISTERESE DO MODELO AXL PARA 5,0 Hz.....	66
GRÁFICO 7.18: VARIAÇÃO DO FATOR DE PERDA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA O MODELO AXL.....	67
GRÁFICO 7.19: VARIAÇÃO RIGIDEZ EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA O MODELO AXL.....	68
GRÁFICO 7.20: VARIAÇÃO DA RIGIDEZ EM FUNÇÃO DA CARGA APLICADA PARA O MODELO AXL	68
GRÁFICO 8.1: CARGA APLICADA NO TOPO DA TORRE.....	72
GRÁFICO 8.2: RESPOSTA NO TOPO COM USO DOS DISSIPADORES PARA AMORTECIMENTO NATURAL INEXISTENTE.....	74
GRÁFICO 8.3: RESPOSTA NO TOPO COM USO DOS DISSIPADORES PARA AMORTECIMENTO NATURAL 0,50%.....	75
GRÁFICO 8.4: RESPOSTA NO TOPO COM USO DOS DISSIPADORES PARA AMORTECIMENTO NATURAL 1,00%.....	76

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1.1: LOCAL E USO DE AMORTECEDORES VISCOELÁSTICOS	2
TABELA 2.1: PROPRIEDADES FÍSICAS E TÉRMICAS DOS POLÍMEROS.	13
TABELA 2.2: PROPRIEDADES DO POLIETILENO.	17
TABELA 2.3: PROPRIEDADES DO POLIPROPILENO.	18
TABELA 2.4: PROPRIEDADES DO PVC	18
TABELA 2.5: PROPRIEDADES DO POLIESTIRENO.	19
TABELA 2.6: PROPRIEDADES DO METACRILATO DE METILA.	19
TABELA 2.7: PROPRIEDADES DOS POLIAMIDAS ALIFÁTICAS.....	20
TABELA 2.8: PROPRIEDADES DO PTFE	21
TABELA 2.9: TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DOS PLÁSTICOS	21
TABELA 6.1: PROPRIEDADES MECÂNICAS TECAST TDB.....	49
TABELA 6.2: VARIÁVEIS DOS MODELOS ENSAIADOS.....	54
TABELA 7.1: DADOS DO ENSAIO DO MODELO CIS	63
TABELA 7.2: FATOR DE PERDA E RIGIDEZ EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA O MODELO CIS .	64
TABELA 7.3: FATOR DE PERDA E RIGIDEZ EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA O MODELO AXL69	69
TABELA 8.1: FREQUÊNCIAS NATURAIS DA ESTRUTURA	71
TABELA 8.2: CARGAS NAS DIAGONAIS	73
TABELA 8.3: GANHOS NA RAZÃO DE AMORTECIMENTO EM FUNÇÃO DA INCORPORAÇÃO DOS DISSIPADORES POLIMÉRICOS	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

\dot{x}	velocidade (m/s)
A	área de seção transversal (m ²)
a_o, a_1, \dots, a_n	constantes
b_o, b_1, \dots, b_n	constantes
c	coeficiente de amortecimento viscoso (kg/s)
D	energia específica dissipada (J/kg)
F	amplitude da força de excitação (N)
$F(t)$	força de excitação (N)
F_d	força reativa (N)
k	rigidez (N/mm)
L	comprimento (m)
m	massa (kg)
N	força normal (N)
U	energia acumulada (J)
W	energia dissipada (J)
X	amplitude de deslocamento (m)
δ	decremento logarítmico
μ	coeficiente de atrito
ω	freqüência de excitação (Hz)
ω_n	freqüência natural (Hz)
ϕ, θ	fase (rad)
ε	deformação específica (%)
ζ	razão de amortecimento
σ	tensão específica (MPa)

1. INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se um breve histórico sobre o uso de dissipadores em engenharia. Apresentam-se alguns tipos de amortecedores e os efeitos que geram nas estruturas.

1.2. PRELIMINARES

Problemas de vibrações em estruturas sob ação de carregamentos dinâmicos têm sido um grande tema de estudos e pesquisas, em especial nos últimos dez anos. Isto se deve ao avanço significativo que a indústria da construção civil experimentou nas últimas décadas, com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas; ferramentas numérico-computacionais, cada vez mais precisas em virtude do grande aumento da capacidade de processamento dos computadores, que nos tornam capazes de resolver o problema estrutural com modelos cada vez mais precisos e confiáveis.

Entretanto ainda hoje persistem dúvidas sobre o funcionamento dos sistemas, principalmente com relação a dissipação de energia: o amortecimento. Em geral, as cargas dinâmicas variáveis no tempo mais comuns tais como vento, trânsito de pessoas ou veículos, operações de equipamentos geram vibrações nas estruturas que podem ocasionar até mesmo o colapso. Por exemplo, rajadas de vento podem provocar danos a estruturas diversas pois a incidência do mesmo pode estar na mesma frequência da estrutura a que está impactando e isto resulta em efeitos de ressonância. Assim, a redução dos efeitos provocados por estas solicitações diminui a possibilidade de falhas decorrente da fadiga do material e com isso prolonga a vida da estrutura envolvida, reduzindo o risco de colapso.

A busca pela solução dos problemas em estruturas advindos de ações dinâmicas fez com que surgisse e se desenvolvesse uma linha de pesquisa na área da Dinâmica das Estruturas relacionada ao controle de vibrações.

Com o desenvolvimento de pesquisas nessa linha, diversas alternativas para a redução e o controle de vibrações em estruturas foram apresentadas. Dentre eles, destacam-se os sistemas

de controle passivo, como o uso de materiais com propriedades amortecedoras, por exemplo materiais viscoelásticos acoplados a estruturas, aparecem como uma alternativa na redução ou eliminação de vibrações excessivas.

Matérias viscoelásticos, tais como os polímeros apresentam dissipação de energia por ciclo de oscilação, fazendo com que o sistema acoplado aumente sua taxa de amortecimento e proporcione reduções significativas das vibrações.

1.3. RESUMO HISTÓRICO

Os primeiros estudos sobre materiais viscoelásticos com função de amortecimento estrutural datam da década de 50 com a utilização das técnicas de *Obesrt e Frankenfeld (1952)* e dos trabalhos de *Kervin (1959)* e *Ross et al (1959)* sobre o amortecimento com materiais viscoelásticos em lâminas submetidas a vibrações por flexão.

No âmbito de engenharia civil, uma das primeiras aplicações do uso de amortecedores viscoelásticos ocorreu em 1969, com *Mahmoodi (1969)* que projetara este tipo de amortecedores para o “World Trade Center”. No mesmo foram utilizados 10.000 dissipadores em cada uma das torres com a função de amortecer vibrações oriundas de solicitações dinâmicas do vento.

Tabela 1.1: Local e Uso de Amortecedores Viscoelásticos

NOME E TIPO DE ESTRUTURA	LOCALIZAÇÃO	ANO	AMORTECEDORES
World Trade Center (2 Torres Com 110 Pavimentos)	Nova York, NY (EUA)	1969	10.000
Columbia Seafirst (73 pavimentos)	Sattle, Washington (EUA)	1982	260
Two Union Square (60 pavimentos)	Sattle, Washington (EUA)	1988	16
Light Towers (Rich Stadium)	Buffalo, NY (EUA)	1993	12
28 State Street, Boston (452 m altura)	Boston, Nassachusetts (EUA)	1996	40

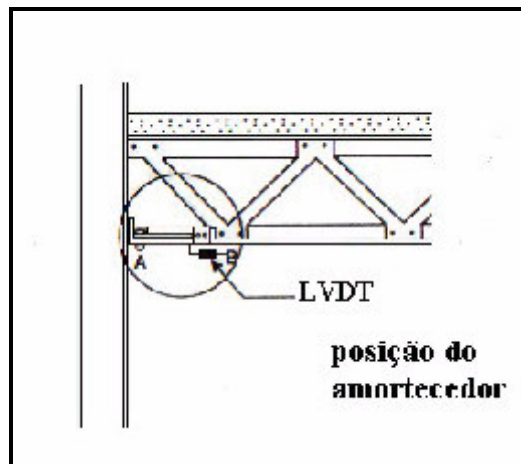


Figura 1.1: Posição e Local de Instalação dos dissipadores viscoelásticos (World Trade Center)

Nos edifícios o uso de amortecedores viscoelásticos é utilizado principalmente para reduzir as amplitudes de vibrações ocasionadas pela força dinâmica do vento, as quais causam desconforto humano, fadiga e posteriormente um possível colapso da estrutura.



Figura 1.2: World Trade Center onde foram instalados os amortecedores de Mahmoodi (1969) antes do atentado de 2001.

1.4. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo é, através dos conhecimentos teóricos adquiridos e das propriedades que já foram conferidas aos materiais viscoelásticos, propor a incorporação de dissipadores projetados com elementos plásticos poliméricos termoplásticos com objetivo de reduzir efeitos vibratórios em estruturas, em especial as reticuladas. Serão apresentados conceitos básicos com relação ao comportamento mecânico destes materiais assim como conceitos relativos ao fenômeno do amortecimento.

Dando continuidade ao estudo, apresentam-se dois tipos de dissipadores confeccionados com este material, estuda-se o seu comportamento mediante variações de frequência e de cargas aplicadas.

A seguir, foi modelada uma estrutura reticulada que apresentou problemas dinâmicos durante um tufão. Incorporou-se a mesma os dissipadores e verificou-se a aplicabilidade e eficiência dos amortecedores viscoelásticos poliméricos.

1.5. ESCOPO DO TRABALHO

Inicialmente, na Introdução, são descritas a motivação e a relevância do tema tratado, bem como os objetivos a serem atingidos com o desenvolvimento do presente trabalho. A seguir, no capítulo 2, intitulado *Materiais Viscoelásticos*, são apresentadas as principais características dos polímeros termoplásticos em geral como as propriedades mecânicas, químicas, entre outras. Neste item será abordada uma visão meramente informal sobre os tipos existentes e suas particularidades. No capítulo 3, *Comportamento Viscoelástico dos Polímeros*, definem-se as propriedades do comportamento mecânico dos polímeros, Modelagem de Kelvin, de Maxwell e efeitos de relaxação e fluência. O Capítulo 4, *Modelos Matemáticos e Parâmetros envolvidos no estudo do Amortecimento*, trata sobre os modelos básicos de amortecimento de Newton, amortecimento por atrito de Coulombe amortecedores viscoelásticos. Nos *Métodos de Quantificação do Amortecimento*, no capítulo 5, apresenta-se o método de quantificação do amortecimento através do decremento logarítmico e quantificação do fator de perda através do ciclo de histerese. O Capítulo 6, *Projeto dos Dissipadores de Energia*, apresenta o projeto e construção dos dissipadores de energia a serem avaliados. Dois modelos serão analisados conforme a forma de aplicação de carga. Os *Resultados*, apresentados no Capítulo 7,

mencionam os ciclos de histerese dos dissipadores construídos segundo variação de frequência e carga aplicada. Avaliar-se-á a alteração da rigidez bem como o fator de perda dos mesmos. A seguir, no Capítulo 8, *Análise de Uma Torre Treliçada*, discretiza-se uma torre real com problemas de vibração e testa-se a eficácia dos dissipadores em termos do aumento da razão de amortecimento. Finalizando este trabalho, no Capítulo 9, *Conclusões e Comentários Finais*, são apresentados os comentários finais, conclusões e propostas para futuros trabalhos nesta linha de pesquisa e de aplicação prática.

2. MATERIAIS PLÁSTICOS

2.1. POLÍMEROS

Os materiais poliméricos são constituídos por macromoléculas formadas pela reunião de unidades fundamentais (os “meros”) repetidamente, que dão origem a longas cadeias.

Materiais poliméricos apresentam usualmente baixa densidade, baixa resistência a altas temperaturas, baixas condutividades elétrica e térmica, etc. Polímeros são sintetizados por reações de polimerização a partir de reagentes monômeros. Vários polímeros se tornam fluidos viscosos a temperaturas elevadas (100-300°C) e são ainda processados através de procedimentos termomecânicos que permitem a fabricação de peças em grande quantidade e diversidade.

A palavra “*polímero*” vem do grego poly = muitos e meros = partes. Os Polímeros sintéticos mais comuns são os formados por unidades como:

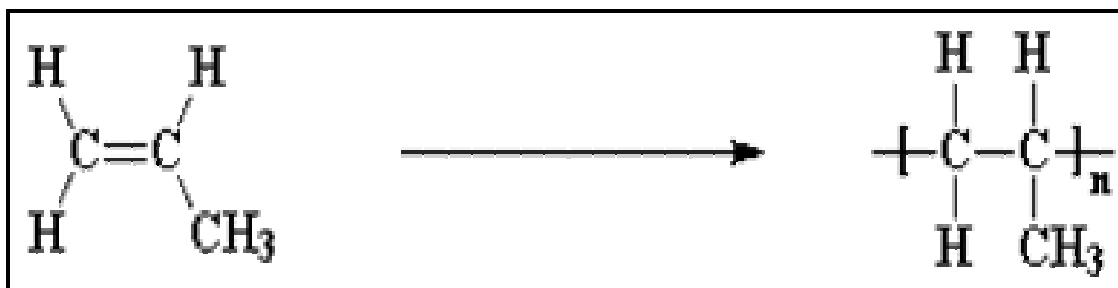


Figura 2.1: Estrutura do Propileno e Prolipileno

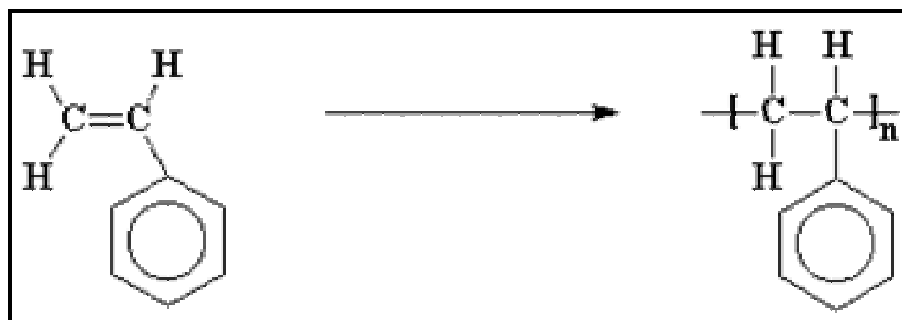


Figura 2.2: Estrutura do Estireno e Poliestireno

Se o polímero é formado por mais de um tipo de "mero", este é denominado copolímero, quando formado por três diferentes tipos de "mero" recebe o nome de terpolímero. Os Polímeros podem ser classificados de diversas formas. Do ponto de vista das características tecnológicas podem ser divididos em termoplásticos e termorrígidos.

2.2. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Polímeros denominados termoplásticos levam esta nomenclatura pois possuem a propriedade de poderem ser amolecidos, o que permite a deformação desses a partir da aplicação de pressão. Quando resfriados, tais polímeros retomam a sua rigidez inicial.

Um importante aspecto desses polímeros é que eles podem ser reciclados a partir de rejeitos e refugos, já que são facilmente remodelados através da aplicação combinada de pressão e temperatura. Exemplos desse tipo de polímero são o polietileno, polipropileno, PMMA [poli(metacrilato de metila)], politetrafluoretileno (Teflon®), Nylon®, etc.

Polímeros termoplásticos são caracterizados por possuir ligações químicas fracas (forças de van der Waals) entre as cadeias que assim podem ser facilmente rompidas com a introdução de energia. Dessa forma, quando tais materiais são aquecidos, as ligações de van der Waals são quebradas, permitindo que haja uma maior facilidade para a movimentação de cadeias poliméricas umas em relação às outras. A capacidade das cadeias de fluir com a aplicação de temperatura garante a esses materiais suas características fundamentais de fácil reprocessabilidade.

2.3. CADEIA DE MOLÉCULAS

Dependendo da característica química dos monômeros e da técnica empregada para a polimerização, os polímeros podem apresentar diversos tipos de arquitetura, sendo as mais comuns as estruturas linear, ramificada ou em rede.

No caso de polímeros, a natureza macromolecular do material restringe muitas vezes os processos de cristalização, já que cadeias poliméricas apresentam normalmente uma mobilidade restrita que dificulta a adequação dessas em sítios pré-estabelecidos

especialmente. Embora difícil, a cristalização em polímeros pode ocorrer. Em primeiro lugar, a arquitetura química das cadeias poliméricas deve ser regular para permitir um empacotamento mais perfeito das cadeias.

Um segundo requisito essencial para viabilizar a cristalização de polímeros é a presença de forças intermoleculares (entre cadeias) muito elevadas. Polímeros nos quais forças de hidrogênio ou mesmo fortes ligações dipolo são possíveis entre as cadeias, apresentam maior possibilidade de cristalização.

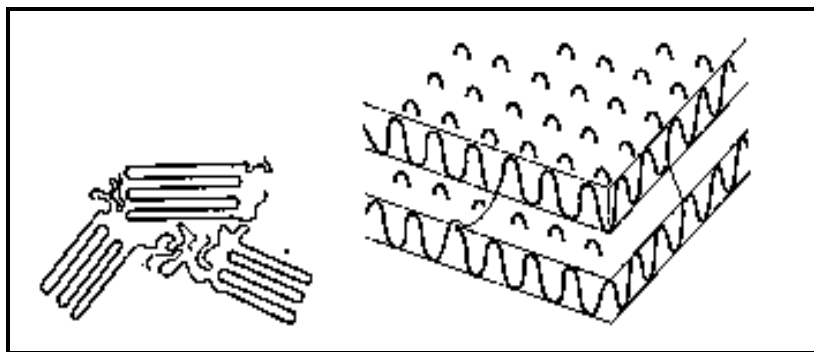


Figura 2.3: Estrutura Cristalina de Polímeros

2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS TERMOPLÁSTICOS

As propriedades físicas são aquelas que não implicam qualquer modificação a nível molecular dos materiais. O comportamento de polímeros frente às solicitações mecânicas é geralmente designado como visco elástico. Isso significa que os polímeros têm características comuns aos sólidos de Hooke e aos fluidos newtonianos. Como consequência de sua visco elasticidade, o seu comportamento é fortemente afetado pelo tempo de aplicação das solicitações bem como pela temperatura de aplicação. Dentre as propriedades físicas incluem-se as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e óticas.

Segundo *Trantina (1994)* existem vários fatores que afetam as propriedades mecânicas dos polímeros além da temperatura e de sua composição química, tais como: o peso molecular, ligações internas e ramificações, orientação molecular, tensão e tempo, frequência de aplicação do carregamento.

Em geral, os termoplásticos têm baixa resistência mecânica e por conseqüência um baixo valor do módulo de elasticidade. Os termoplásticos apresentam baixo peso específico, são isolantes elétricos e resistentes à corrosão eletrolítica.

Apesar de os termoplásticos comportarem-se de maneira viscoelástica, usa-se a relação tensão-deformação para estimar-se a rigidez dos mesmos quando submetidos a cargas de curta duração que valem somente para uma escolha inicial do material. Após, devem-se fazer testes com cargas de longa duração, como curvas de fluência e relaxação que normalmente são fornecidas pelo fabricante, conforme sugere *Crawford (1989)*.

Em muitos aspectos, o gráfico tensão-deformação para um termoplástico é similar ao mesmo gráfico para um termorrígido conforme o gráfico 2.1, adaptado de *Crawford (1989)*.



Gráfico 2.1: Diagrama de Tensão Deformação dos Termoplásticos

Para pequenas deformações há uma região elástica até o limite de proporcionalidade. Após existe uma relação não-linear entre a tensão e a deformação, sendo que permanece uma porção residual desta última.

Outro ponto importante é que a altas temperaturas termoplásticos apresentam o comportamento de um líquido viscoso. Assim, a medida que se aumenta a temperatura, a deformação do material aumenta, conforme o gráfico 2.2, adaptado de *Crawford (1989)*.

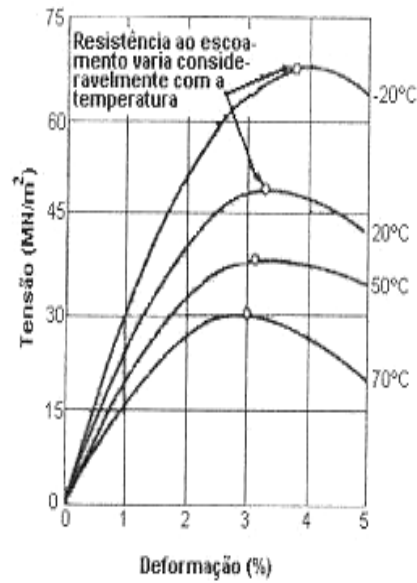


Gráfico 2.2: Influência da Temperatura na Deformação de Termoplásticos.

Outra característica fundamental do comportamento dos termoplásticos é o efeito da taxa de deformação. Isso significa dizer que a velocidade de deformação influi na rigidez de maneira que um valor superior na velocidade de deformação implica uma maior rigidez ao termoplástico dado pelo gráfico 2.3, adaptada de *Crawford, 1989*.

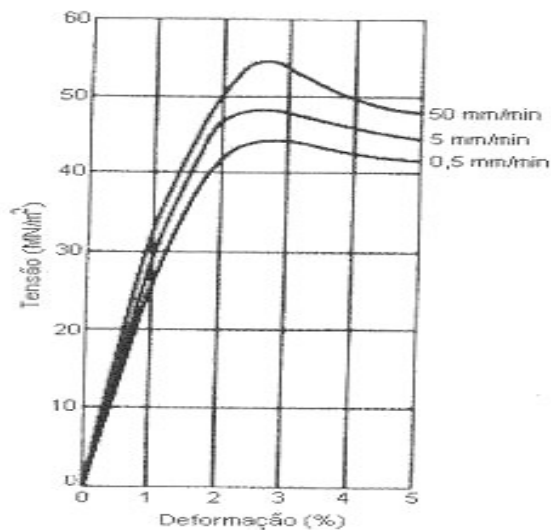


Gráfico 2.3: Efeito da Taxa de Deformação Sobre a Curva Tensão-Deformação dos Termoplásticos.

Vale lembrar que variantes de um determinado termoplástico podem alterar o comportamento mecânico do mesmo, em termos de sua rigidez. Alguns variantes para otimizar uma propriedade específica (como rigidez, por exemplo) podem provocar uma alteração em outra propriedade. (resistência ao escoamento, por exemplo). A rigidez descrita anteriormente é expressa de acordo com o módulo de elasticidade que representa a tangente à curva do diagrama tensão-deformação do material. Entretanto, em termoplásticos, este valor não deve ser tomado constante para todos os casos de projeto, visto que o comportamento do mesmo varia de acordo com a tensão aplicada, por exemplo.

A rigidez de um componente estrutural depende das propriedades do material e da geometria do componente. A contribuição do material define-se pela relação tensão-deformação mesmo que sua variabilidade seja considerável. Mesmo na região linear do diagrama há diferenças significantes entre os polímeros e outros materiais, onde os termoplásticos apresentam consideráveis deformações no trecho inicial do diagrama. Mantendo a comparação, o limite de deformação linear do aço é da ordem de 0,1% a 0,2% e um termoplástico, sem aditivos, apresentaria um valor de aproximadamente 2% até o limite de proporcionalidade. Isso é de fato muito importante, pois conduz a comportamentos não-lineares devido a grandes deslocamentos.

2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas compreendem as propriedades que determinam a resposta dos materiais às influências mecânicas externas manifestadas pela capacidade destes materiais desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis e resistirem à fratura. Essas características dos materiais são avaliadas por meio de ensaios que indicam dependência entre tensão e deformação.

As propriedades mais importantes decorrem de processos onde há grandes relaxações moleculares, como relaxação sob tensão, escoamento sob peso constante e histerese. Essas relaxações são dependentes da temperatura e da correlação entre processos mecânicos e químicos.

Algumas das propriedades mecânicas mais importantes, como resistência a tração e a compressão podem possuir valores distintos o que difere o comportamento dos termoplásticos

em relação ao aço, por exemplo. Assim, destacam-se abaixo as principais características que os termoplásticos apresentam em relação ao seu comportamento sob ação mecânica externa.

Resistência à Tração: nota-se que os polímeros em geral apresentam, a temperatura de aproximadamente 20°C, valores baixos (menores que 100 MPa) .

Alongamento na Ruptura: representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração no momento da ruptura. Observa-se que grandes valores ocorrem na ruptura (até 900%) e pode-se dizer que isto é uma característica marcante dos polímeros em geral.

Módulo de Elasticidade: o módulo de elasticidade dos polímeros não apresenta em geral valores superiores a 5000 MPa. Neste item é importante definirmos algumas propriedades do material como a recuperação e a histerese. A *recuperação* representa o grau em que o material retorna as dimensões originais após a remoção da tensão. Depende tanto da intensidade desta força quanto do tempo durante a qual foi aplicada. A *histerese* é um fenômeno observado em alguns materiais pelo qual certas propriedades, em determinado estado, dependem de estados anteriores; é comumente descrita como a *memória* do material para aquela propriedade. No caso de propriedades mecânicas, a histerese pode ser medida pela perda de energia em um dado ciclo de deformação e recuperação do material. O desenvolvimento de calor designa o calor gerado por uma sucessão de ciclos de deformação e recuperação, pela transformação da energia, perdida por histerese, em energia térmica; essa energia devolvida causa o aumento de temperatura da peça durante os ciclos.

Resistência a Compressão: com relação à resistência a compressão, nota-se a superioridade das resinas termorrígidas em relação às termoplásticas, porém estas ainda com valores muito inferiores aos materiais de engenharia convencionais.

Resistência à flexão e a fadiga: Representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de um elemento quando sujeita ao dobramento para a flexão. Para a fadiga, representa a resistência à flexão dinâmica, exprime a tensão máxima, desenvolvida alternadamente como a tração e compressão a que um material pode resistir quando a peça é exposta a dobramentos e desdobramentos consecutivos. Seus valores podem ser observados para os materiais plásticos segundo a tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades Físicas e Térmicas dos Polímeros.

Polímero	PROPRIEDADES FÍSICAS							PROPRIEDADES TÉRMICAS					
	Resistência à tração (kgf/mm ²)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo de Elasticidade (kgf/mm ²)	Resistência à compressão (kgf/mm ²)	Resistência à flexão (kgf/mm ²)	Densidade (kgf/mm ³)	Resistência ao impacto (kgf.mm/mm ²)	Calor Específico (cal/g°C)	Condutividade Térmica (10-4cal)	Dilatação Térmica (10-4/°C)	Fusão Cristalina (°C)	Transição Vítreia (°C)	Distorção Ao Calor (°C)
LDPE	~0	300~900	~20	2	12~14	0,8	*	0,55	8~10	1,2~2,2	100~130	-20	40
HDPE	~1	20~50	100	4	17~24	0,9	15~40	0,55	8~10	1~1,4	135	-110	50
PP	1~5	20~300	120	6	3~5	0,8	2~13	0,48	3	1,1	160	0	55
OS	~1	~0	280~350	10	5~12	1,1	0~4	0,32	3	0,7	240	100	100
PVC	~2	0~20	280	8	7~12	1,4	4	0,25	4	0,7	270	80	65
PTFE	~0	50~400	20	0	2~4	1,9~2,4	22	0,25	4,5	1,2	350	120	120
PVAC	~0	0~5	0	*	*	1,2	*	0,38	4	0,8	+	30	50
PMMA	~2	~0	300	12	8~12	1,2	1	0,34	4,5	0,75	150	100	70~100
PAN	25~30	20~40	400~700	*	*	1,2	*	0,35	*	1,6~1,8	340	100	90
ER	2~5	0~5	200~440	10~20	7~14	1,2	0~5	0,24	3~5	0,45	+	+	+
PET	20~85	0~50	400~1450	10	*	1,4	5	0,28	4	0,45	250	70	50~85
PC	2~4	60~100	260	8	7~12	1,2	80	0,28	4,5	0,55	260	150	130~1400
GRP	50~80	~0	340	50	7~16	1,6~2,0	0	0,48	5~9	0,2	+	+	+
PA-6	~2	200~300	200~300	3~6	5~10	1,2	5~25	0,4~0,55	4~8	1~1,15	210	50	60
PA-11	~2	100~300	300	3~6	5~10	1	5~25	0,4~0,55	4~8	1~1,15	180	50	50
PA-6,6	~2	~100	200-300	3~6	5~10	1,2	5~25	0,4~0,55	4~8	1~1,15	250	50	55
PA-6,10	~2	~200	200	3~6	5~10	1,1	5~25	0,4~0,55	4~8	1~1,15	210	50	80
PR	~3	0~5	700~1000	10~25	5~10	1,45	0~10	0,38	4	0,35	+	+	+
UR	~3	~0	700~1000	20~30	8	1,5	0	0,38	6~14	0,4	+	+	+
MR	~2	~0	700~1000	20~30	8	1,5	0	0,38	6~14	0,4	+	+	+
PU	~1	400~700	~0	15	2~6	1,1~1,30	+	0,42	4	1,9	+	+	+
NR	~1	700~900	~0	0	+	0,9	+	0,42	4	2,3	25	-75	+

Resistência ao Impacto: representa a resistência de um material rígido à deformação a uma velocidade muito alta. Observa-se a alta resistência do polietileno de baixa densidade que se deforma, no entanto não quebra. O policarbonato, cuja resistência é maior que a da cerâmica e do alumínio é até empregado em proteção contra balas de metralhadora.

Densidade e Dureza: Os materiais poliméricos são todos comparativamente leves. A maior parte dos polímeros apresenta valores de densidades 0,9-1,5 g/cm³ com maior concentração em torno de 1 g/cm³. Observa-se em geral que materiais não-poliméricos apresentam densidade bem superior a dos poliméricos. Em relação à dureza, que mede a resistência a penetração ou ao risco, materiais poliméricos são menos duros do que os materiais cerâmicos, vítreos e metálicos.

Resistência a Fricção: também definida como resistência ao deslizamento ou coeficiente de atrito, a resistência à fricção possui valores entre 0,2 e 0,8 para materiais poliméricos. Entre os materiais poliméricos, as borrachas macias têm coeficientes de fricção excepcionalmente altos (4 ou mais).

2.6. PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades térmicas são tão importantes quanto às propriedades mecânicas. Diferentemente dos metais e outros materiais, os polímeros são fortemente sensíveis à mudança de temperatura e para se observar as características mecânicas, químicas e elétricas dos polímeros é indispensável o conhecimento da temperatura na qual tais valores foram obtidos.

Em geral, os polímeros são maus condutores de calor. Por outro lado, as modificações observadas nos materiais quando sujeitos a variações de temperatura são de grande importância e incluem as temperaturas de fusão cristalina, T_m , e de transição vítrea, T_g .

Calor Específico, Condutividade Térmica e Expansão Térmica: os plásticos apresentam valores entre 0,2 e 0,5 cal/g°C em parte devido à mobilidade dos segmentos moleculares. Em relação à condutividade térmica, que expressa a característica de um material ser bom ou mal condutor de calor, os polímeros são tipicamente maus condutores de calor, diferentemente dos metais.

2.7. PROPRIEDADES QUÍMICAS

Destacam-se entre as propriedades químicas a resistência à oxidação, ao calor, às radiações ultravioletas, à água, a ácidos e bases, a solventes e a reagentes.

Resistência à Oxidação: esta resistência é mais encontrada em macromoléculas saturadas (ligações simples entre átomos de carbono, como o polietileno, polipropileno). Nos polímeros ligações rompendo as cadeias, diminuindo seu tamanho e conseqüentemente, a resistência mecânica do material.

Resistência à Degradação Térmica: a exposição de polímeros ao calor em presença de ar causa a sua maior degradação. Os polímeros clorados são mais sensíveis à degradação térmica durante o processamento, devido à fácil ruptura das ligações carbono-cloro. O poliacetal também é suscetível de decomposição térmica por despolimerização.

Resistência à água: é avaliada pela absorção de umidade, que aumenta o volume da peça, dificultando sua aplicação em trabalhos de precisão. A absorção da água é mais fácil quando a molécula apresenta grupamentos capazes de formar pontes de hidrogênio. Assim o nylon, por exemplo, pode absorver umidade aumentando suas dimensões.

Resistência a ácidos e bases: o contato com ácidos pode gerar destruição parcial das moléculas poliméricas, se houver nelas grupamentos sensíveis à reação com ácidos. As soluções alcalinas também são bastante agressivas a polímeros cuja estrutura apresente certos grupamentos, como a hidroxila.

Inflamabilidade: quando o polímero orgânico é aquecido, ele vai sofrendo modificações físicas e químicas terminando por sofrer decomposição total em produtos voláteis. Caso o polímero contenha aditivos minerais, a combustão deixa cinzas. A facilidade de queima é uma desvantagem dos polímeros orgânicos. Conforme a natureza química do polímero, a inflamabilidade pode ser facilitada ou dificultada. Polímeros termorrígidos apresentam maior dificuldade de combustão. Quando o polímero apresenta anéis aromáticos há um retardamento de sua inflamabilidade, sem manutenção de chama com pouca liberação de fumaça. Vale lembrar que existem compostos que se adicionados aos polímeros aumentam sua capacidade suportar a chama do fogo. São denominados “retardantes de chama” e são produtos que quando adicionados aos materiais poliméricos, em caso de exposição ao fogo ou alta

temperatura, devem inibir ou suprimir o processo de combustão. Devido à necessidade de se adicionar elevadas quantidades de retardante de chama aos materiais poliméricos, os retardantes de chama normalmente modificam algumas propriedades ou dificultam o processamento destes materiais poliméricos. Algumas características desejadas em um retardante de chama são sua elevada temperatura de decomposição, sua alta eficiência a baixas dosagens, não emitir gases tóxicos ou corrosivos durante a queima e por fim ser reciclável que é um fator preponderante na utilização de polímeros.

Existem ainda outras propriedades importantes e que definem a aplicação de diferentes tipos de plásticos. Podemos citá-las como as propriedades elétricas, que definem as propriedades que os polímeros apresentam de conduzir eletricidade, e as propriedades óticas, que podem informar a estrutura e ordenação molecular bem como sobre a existência de tensões sob deformação.

Pode-se caracterizar as propriedades elétricas dos materiais como rigidez dielétrica, resistividade, constante dielétrica, fator de potência e fator de dissipação, e resistência ao arco. Devemos resumidamente salientar que como os polímeros são maus condutores de calor também são maus condutores de eletricidade tendo como uma das suas principais aplicações o isolamento elétrico.

Já as propriedades óticas subdividem-se em transparência, índice de refração, birrefringência e foto elasticidade. Polímeros semicristalinos ou cristalinos possuem alta transparência. O índice de refração para a maioria dos polímeros está entre 1,38 e 1,65 tendo o PET os valores mais elevados.

2.8. PRINCIPAIS TERMOPLÁSTICOS DE ENGENHARIA E SEUS USOS

Os termoplásticos de engenharia encontram usos mais diversos variando desde brinquedos a componentes automotivos. Lista-se a seguir os principais termoplásticos e seus usos mais comuns.

2.8.1. Polietileno (PE)

Termoplástico de importantíssima utilização, subdivide-se em três tipos: polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno de ultra-alto peso molecular (UHWPE). Suas principais características são a alta resistência ao impacto, mesmo a baixas temperaturas; boa resistência a produtos químicos; alta resistividade elétrica e baixa perda dielétrica.

Quanto à sua utilização, LDPE's podem ser utilizados em tubulações de drenagem, filmes para todos os tipos de embalagens ou até mesmo para construção de camadas impermeabilizantes no solo. Já os HDPE's são utilizados na fabricação de baldes, caixas de transporte e tanques. Complementando, os UHWPE's podem ser utilizados como placas de revestimento de máquinas para a indústria de alimentos e mineração, engrenagens, entre outras... Além destas, é usado na fabricação de um tipo de fibra "super-resistente" que é mais resistente que o aço e outras fibras de alta resistência.

Tabela 2.2: Propriedades do Polietileno.

Polietileno	Peso Molecular	Densidade	Índ. Refração	Tm	Cristalinidade	Características
HDPE	200.000	0,94-0,97	1,54	130-135°C	Até 95%	Termoplástico Branco e Opaco
LDPE	50.000	0,92-0,94	1,51	109-125°C	Até 60%	Termoplástico Opaco e Translúcido
UHMWPE	~4.500.000	0,93-0,94	-	135°C	45%	Termoplástico Branco e Opaco

No Brasil, polietilenos são fabricados com o nome comercial Tecafine PE.

2.8.2. Polipropileno (PP)

Bastante semelhante ao polietileno, porém possui maior rigidez e dureza que o anterior. Possui um amolecimento a temperaturas superiores a do polietileno, no entanto, em função da sua alta temperatura de vitrificação, o polipropileno apresenta uma fragilidade e uma resistência ao impacto inferior a baixas temperaturas. Através de modificações de sua estrutura com a adição de porcentagens de borracha pode-se produzir o polipropileno de alta densidade. Tem como principais aplicações na confecção de garrafas, caixas para transporte e contêineres, pára-choques de carros, carcaças de eletrodomésticos, recipientes, entre outras...

Tabela 2.3: Propriedades do Polipropileno.

Polipropileno	Peso Molecular	Densidade	Índ.Refr.	Tm	Cristalinidade	Características
	80.000-500.000	0,9	1,49	165-175°C	60-70%	Branco e Opaco

No Brasil, polipropilenos são fabricados com o nome comercial Tecafine PP.

2.8.3. Polivinil Cloride (PVC)

Este polímero duro contém 50% em peso de Clorine, tornando-o fracamente combustível e também auto-extinguível. O PVC amolece a 87° C. A baixas temperaturas, possui baixa resistência ao impacto, o que pode ser melhorado através da adição de alguns tipos de borracha.

Outra característica deste polímero e sua instabilização a altas temperaturas (>170°), decompondo-se através da emissão do ácido hidroclórico (HCl), ficando com uma coloração marrom. Possui também como propriedades marcantes sua alta resistência à chama, ser maleável tanto para formação de peças rígidas quanto muito flexíveis e ter um custo relativamente baixo. Quanto à disposição direta ao fogo, o PVC rígido carboniza liberando uma fumaça esverdeada que se extingue imediatamente ao se remover a fonte de ignição. Já o PVC plastificado, com a remoção da fonte de ignição pode continuar queimando e liberando fumaça.

Tem como principais usos em tubulações, calhas de telhados, painéis para telhados, entre outras...

Tabela 2.4: Propriedades do PVC

PVC	Peso Molecular	Densidade	Índ.Refração	Tm	Cristalinidade	Características
	50.000-100.000	1,39	1,53-1,56	273°C	5-15%	Incolor e Transparente

No Brasil, há fabricação do PVC segundo os nomes de Tecavinil.

2.8.4. Poliestireno (PS)

Material duro, frágil e transparente com amolecimento em temperatura próxima a 90° C. Tem como propriedades marcantes a elevada rigidez, a alta resistência química, baixa resistência às

intempéries e baixo custo. Através da adição de borrachas pode obter-se o terpolímero que possui alta resistência ao impacto e também elevada temperatura de amolecimento (110°C). Tem o seu uso bastante diversificado desde componentes de automóveis até molduras de janelas de residências.

Tabela 2.5: Propriedades do Poliestireno.

Poliestireno	Peso Molecular	Densidade	Índ.Refração	Tm	Cristalinidade	Características
	300.000	1,05-1,09	1,59	235°C	Muito Baixa	Incolor e Transparente

Sua fabricação no Brasil é dada a produtos com nomes comerciais de EDN, Lustrex e Plystyrol.

2.8.5. Polimetil Metacrilato (PMMA)

Também denominado de Plástico Acrílico, o PMMA é um termoplástico bastante duro, transparente, e muito durável e resistente a fatores climáticos. Uma característica bastante importante é a manutenção de sua resistência nas proximidades da temperatura de amolecimento. Também possui uma boa resistência química, alta resistência às intempéries, resistência ao impacto, transparência. É usado em coberturas transparentes de segurança, em abóbadas, placas luminosas, lanternas de carros, calotas e janelas de aviões e até em fibra ótica.

Tabela 2.6: Propriedades do Metacrilato de Metila.

PMMA	Peso Molecular	Densidade	Índ.Refração	Tm	Cristalinidade	Características
	500.000-1.000.000	1,18	1,49	160°C	Muito Baixa	Incolor e Transparente

Pode ser encontrado com o nome de Tecacryl.

2.8.6. Poliamida (PA)

Polímeros com alto ponto de fusão, as poliamidas apresentam amolecimento somente a altas temperaturas embora sua rigidez diminua rapidamente. Possuem sensibilidade à umidade, de forma que a rigidez diminua a medida que quantidades de água vão sendo absorvidas.

Apresentam como características alta resistência ao impacto, boa resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito onde possuem sua aplicação voltada ao uso como fibra têxtil, engrenagens, buchas, tubulações, cabos de martelos, partes móveis de máquinas, entre outras.

Há também no mercado fibras aromáticas tais como a Kevlar e Arenka. Estas, por sua vez, possuem elevado módulo de elasticidade, grande resistência e apresentam pouca fluência. Tem sua utilização como fibra reforçada voltada em aplicações avançadas de plásticos.

Tabela 2.7: Propriedades dos Poliamidas Alifáticas

PA	Peso Molecular	Densidade	Índ.Refração	Tm	Cristalinidade	Características
	10.000-30.000	1,12-1,15	1,54	215-260°C	Até 60%	Amarelado e Translúcido

No Brasil pode ser encontrada com o nome comercial de Tecast, Tecamid e derivados destes.

2.8.7. Poliacetil (POM)

Polímeros com excelente estabilidade dimensional, com baixa absorção de água e significativa resistência à fricção e abrasão. Possuem também pouca estabilidade térmica e dificuldade de processamento melhoradas com copolimerização.

Quanto à sua aplicação, é utilizado principalmente em partes de peças industriais para uso mecânico como engrenagens, cintos de segurança, mecanismo de elevadores de janelas de automóveis; componentes de torneiras, fechaduras,....

No Brasil pode ser obtido sob o nome comercial de Tecaform AH e derivados do Tecaform.

2.8.8. Politetrafluoretileno (PTFE)

Conhecido como Teflon, esse é um polímero de alta temperatura de fusão. A temperatura de utilização varia de -250°C até $+250^{\circ}\text{C}$ e possui muito boa resistência a agentes químicos. Possui baixa resistência mecânica com forte tendência à fluência, baixo coeficiente de atrito mesmo a altas pressões de contato.

Possui sua utilização dada a mancais e vedantes bem como no suporte de pontes e outras estruturas. Tem como outras aplicações anéis de pistão de máquinas, suportes, selos mecânicos, entre outras...

Tabela 2.8: Propriedades do PTFE

PTFE	Peso Molecular	Densidade	Índ.Refração	Tm	Cristalinidade	Características
	500.000-5.000.000	2,13-2,20	-	327°C	955	Branco e Opaco

Assim, a partir da associação de diversos polímeros entre si é possível criar outros com características particulares que beneficiam uma propriedade específica que são os denominados copolímeros. Abaixo, mostra-se uma tabela dos principais polímeros bem como sua aplicação generalizada. Pode ser encontrado no mercado sobre o nome comercial de Tefalton.

Tabela 2.9: Tipos e Classificação dos Plásticos

Aplicação	Grupo	Principais plásticos	Sigla
Geral	Termoplástico	Polietileno	PE
		Polipropileno	PP
		Poliestireno	OS
		Poli(cloreto de vinila)	PVC
		Poli(acetato de vinila)	PVAC
	Termorrígido	Poli(metacrilato de metila)	PMMA
		Poli(acrilonitrila)	PAN
		Resina epoxídica	ER
		Resina de formol-formaldeído	PR
		Resina de uréia-formaldeído	UR
		Resina de melamina-formaldeído	MR
		Poliuretanos	PU

Dada esta resumida explicação sobre os termoplásticos, vale lembrar o que se tentou fazer foi dar uma explanação geral dos principais tipos, sua aplicabilidade e propriedades bem como a facilidade de sua obtenção em nosso país.

3. COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DOS POLÍMEROS

3.1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que qualquer modelo de material é composto pela combinação entre modelos constitutivos básicos baseados nas suas relações entre seu módulo elástico e sua capacidade de amortecimento (viscosidade). Estes modelos por sua vez apresentam particularidades que definem o seu comportamento frente às relações tensão-deformação do mesmo dependentes do tempo.

Conforme já mencionado anteriormente, o arranjo molecular destes elementos confere aos mesmos uma resposta dependente da velocidade de aplicação do carregamento. A aplicação de carga pode ser de dois tipos: tensão constante, onde se observa um aumento da deformação variando com o tempo (fluência) e deformação constante, onde se observa uma diminuição da tensão aplicada ao longo do tempo. (relaxação)

Além disso, o módulo de elasticidade dos termoplásticos e a deformação permanente variam em função da velocidade de aplicação da sollicitação e da temperatura. Isso é fundamental logo que se define o comportamento dos termoplásticos como materiais visco elásticos por estarem entre um sólido elástico e um fluido viscoso.

O conceito de viscosidade foi usado primeiro por Newton em “PRINCIPIA” e é sinônimo de atrito interno e é a medida de resistência ao fluxo. A força por unidade de área (τ) requerida para produzir movimento é proporcional ao gradiente de velocidade ($d\gamma/dt$). A constante de proporcionalidade η é chamada de coeficiente de viscosidade.

$$\tau = \eta \times \frac{d\gamma}{dt} \quad (3.1)$$

Um fluido é denominado newtoniano se a viscosidade não depende do gradiente de velocidade.

3.2. FLUÊNCIA E RELAXAÇÃO

A fluência ocorre quando a tensão for baixa a ponto de a deformação permanecer também baixa, o que permitiria ao material apresentar uma reação que contrabalance a tensão aplicada, de modo a cessar o processo de fluência. Esta fluência é reversível e há a recuperação da forma do polímero assim que o carregamento for removido.

Já a relaxação pode acentuar-se com o aumento da temperatura à qual é aplicada uma deformação constante a peça, de modo que, quanto maior a temperatura maior será a relaxação do material.

Os processos de relaxação e fluência para pequenas deformações são similares. Porém para grandes deformações observa-se a fluência dominada por um processo fluido de larga escala que difere do processo de relaxação. Neste último as deformações são suprimidas pela imposição de uma deformação constante. [Squenal, 2002]

Ainda, segundo Mills, (1993), este comportamento não ocorre somente a baixas tensões mas também nos casos de escoamento e fraturamento do material.

Para os materiais elásticos, a tensão varia linearmente com a deformação. Para um fluido viscoso, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação conforme já mencionado anteriormente. Como os polímeros exibem propriedades que se situam entre estes dois casos, isso os denomina como “materiais de comportamento visco elástico”. Assim, tempos acabam fazendo parte das equações constitutivas do material e temos então a tensão aplicada como uma função da deformação e do tempo, da seguinte forma, válida para o caso de visco elasticidade não-linear:

$$\sigma = f(\varepsilon, t) \quad (3.2)$$

Porém nos casos de aplicação corrente pode-se simplificar a expressão acima de modo que a tensão aplicada seja função então de uma constante de deformação multiplicada por uma função do tempo. (Squenal, 2002). Temos então:

$$\sigma = \varepsilon \cdot f(t) \quad (3.3)$$

Os diferentes tipos de respostas são mostrados na figura abaixo.

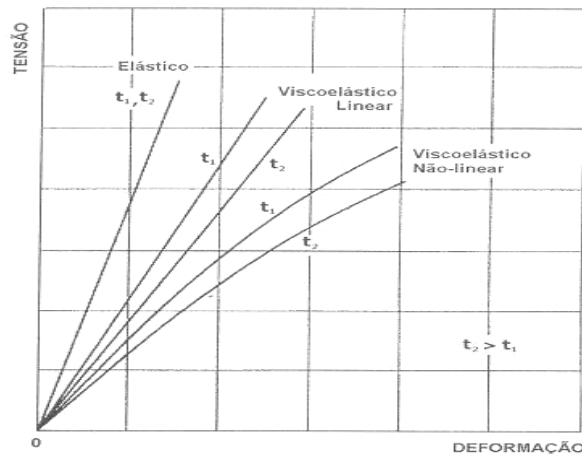


Gráfico 3.1: Tensão-Deformação para um material viscoelástico para diferentes tempos

No limite, um material viscoso deforma permanentemente não recuperando a sua deformação após a retirada do carregamento, enquanto que um material elástico a recupera integralmente.

Este comportamento visco-elástico pode ser descrito por meio de modelos físicos simples (molas e amortecedores). Dependendo da “montagem” destes modelos em série ou paralelo teremos os modelos viscoelásticos simples que serão vistos mais adiante.

3.3. MODELOS CONSTITUTIVOS BÁSICOS DOS MATERIAIS

Os modelos básicos usados em visco-elasticidade são a mola ou elemento de Hooke e o amortecedor ou elemento de Newton, que representam respectivamente as propriedades da elasticidade e da viscosidade. A seguir apresentam-se então estes modelos constitutivos básicos onde σ é a tensão aplicada.

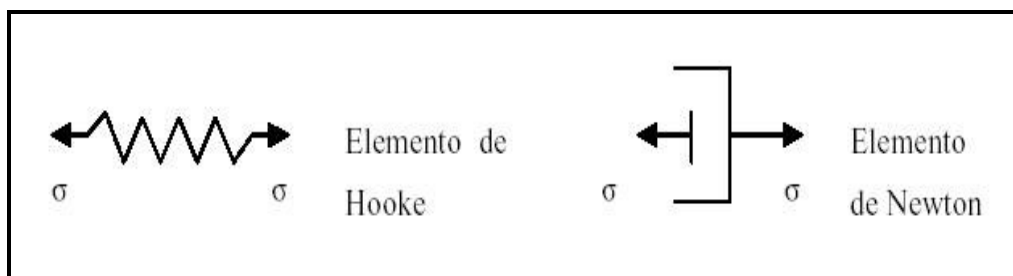


Figura 3.1: Elemento de Hooke e elemento de Newton

Mediante a associação destes elementos básicos em série ou em paralelo, são criados modelos mais complexos que procuram reproduzir a dependência da deformação em relação ao tempo que caracteriza o comportamento viscoelástico.

A rigor, os modelos matemáticos representam os modelos mecânicos em que são enquadradas as idealizações de comportamento fenomenológico e como as leis da elasticidade e viscosidade por simplicidade são lineares, os materiais resultantes de sua associação se encontram enquadrados na visco elasticidade linear.

3.3.1. Modelo de Hooke

O modelo de Hooke define o comportamento elástico do material. Nele as tensões variam linearmente com as deformações o que caracteriza uma curva tensão-deformação linear conforme a seguinte equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.4)$$

onde E = módulo de elasticidade ou módulo de Young para o material

Com isso, obteve-se uma correlação entre os gráficos de tensão e deformação com o tempo da seguinte forma:

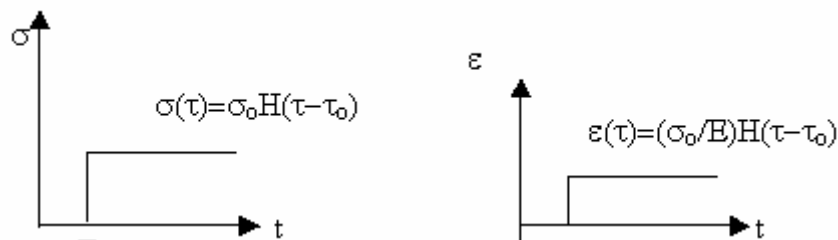


Gráfico 3.2: Comportamento do Modelo de Hooke com relação ao tempo em termos de tensão e deformação

Vemos que no primeiro gráfico, há uma relação entre a tensão e o tempo dado pela aplicação da carga. A tensão permanece constante com a aplicação da carga.

No segundo gráfico, a deformação permanece constante e isso representa o comportamento linear elástico do material.

Neste caso a representação de 'H(t-t₀)' representa o passo unitário do diagrama.

3.3.2. Modelo de Newton

Diferentemente do modelo de Hooke, no modelo de Newton – comum para fluidos viscosos – a relação entre a tensão e deformação se dá através da derivada da deformação em função do tempo, conforme temos abaixo:

$$\sigma = \eta \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (3.5)$$

A relação entre a tensão e o tempo é a mesma para o modelo de Hooke. Para o diagrama deformação x tempo é dada uma correlação linear entre as mesmas conforme o gráfico abaixo:

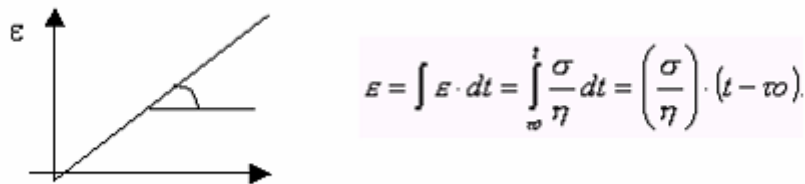


Gráfico 3.3: Comportamento do Elemento de Newton

3.4. MODELOS VISCOELÁSTICOS SIMPLES

Inicialmente se sabe que um elemento de Newton e um elemento de Hooke associados em série constituem um líquido de Maxwell criado para explicar a elasticidade dos líquidos. A associação em paralelo produz o sólido de Kelvin, criada para explicar o fenômeno do amortecimento das oscilações devido ao atrito interno dos sólidos. Usados em novas associações para composição de modelos mais complexos são chamados elemento de Maxwell e Kelvin. Cada um deles possui características que estarão presentes nos modelos mais complexos, tais como fluência e relaxação entre outros...

A seguir apresenta-se o modelo de Maxwell e o modelo de Kelvin. Em série implica-se em admitir que a deformação do material (ϵ) é soma das duas parcelas, a primeira referente à elasticidade e a segunda à viscosidade. Em paralelo a deformação de ambas é igual tendo-se subdividida a tensão na parte elástica e na parte viscosa.

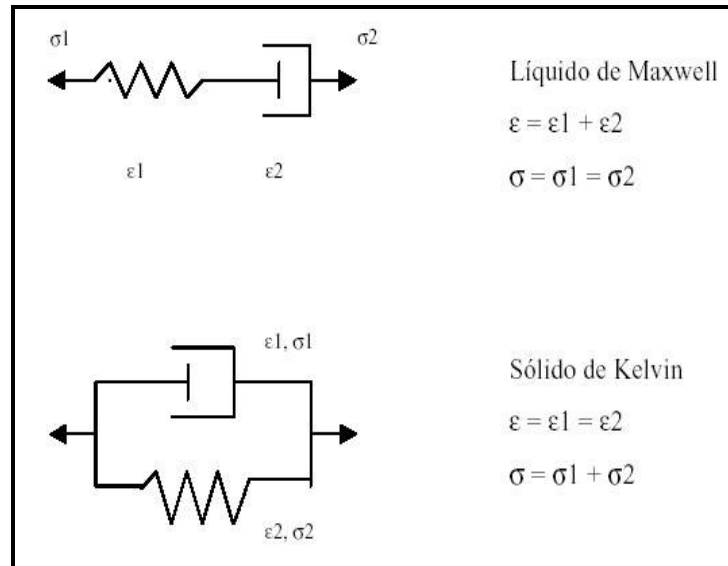


Figura 3.2: Modelos de Maxwell e Kelvin

Existem dois ensaios aplicáveis aos modelos acima denominados *fluência* e *relaxação*. Inicialmente caracterizando a função da fluência aplica-se uma carga constante e observa-se como ocorre o processo de deformação ao transcorrer do tempo. A seguir, retira-se o carregamento e observa-se novamente a variação da deformação. Neste define-se a função de relaxação. Abaixo, temos definidas as curvas dependentes da função de fluência e relaxação para os modelos de Maxwell e Kelvin descritos anteriormente, onde σ é a tensão e ϵ é a deformação.

3.4.1. Modelo de Kelvin

Conforme já mencionado anteriormente, o modelo de Kelvin consiste da associação em paralelo de uma mola e amortecedor. Assim, como a associação do mecanismo é paralela, percebe-se claramente que a tensão aplicada deve ser suportada pelo conjunto de modo que a tensão na mola seja a mesma tensão do amortecedor.

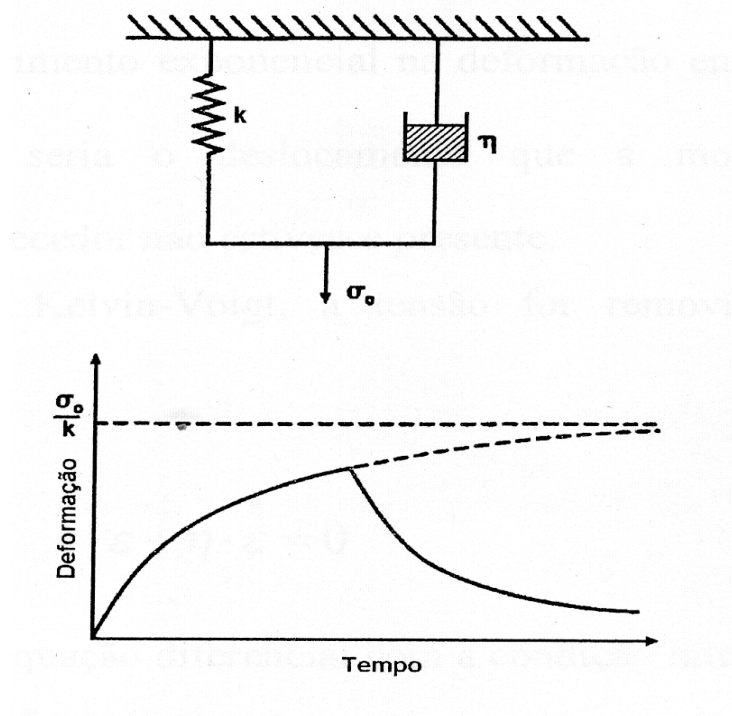


Gráfico 3.4: Modelo de Kelvin representando a fluência viscoelástica

$$\sigma_o = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (3.6)$$

Já, para este modelo, o deslocamento deve ser o mesmo para cada elemento, ou seja,

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (3.7)$$

Assim, a equação diferencial para este modelo é dada a seguir.

$$\sigma_o = k \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Se, no modelo de Kelvin, a tensão for removida para simular a recuperação temos que;

$$k \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} = 0 \quad (3.9)$$

Resolvendo a equação diferencial com a condição inicial $\varepsilon = \varepsilon_o$ temos então

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot e^{-\left(\frac{k}{\eta}\right)t} \quad (3.10)$$

que representa uma recuperação exponencial na deformação.

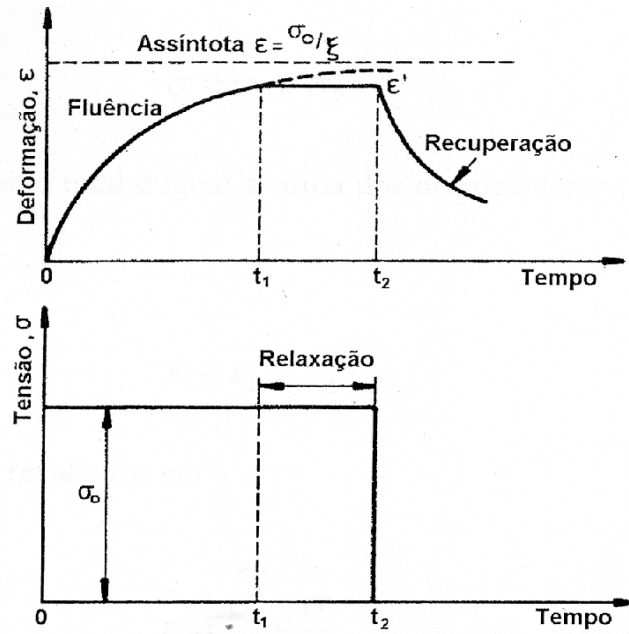


Gráfico 3.5: Resposta do modelo de Kelvin

Para o modelo de Maxwell, a mola e o amortecedor são conectados em série.

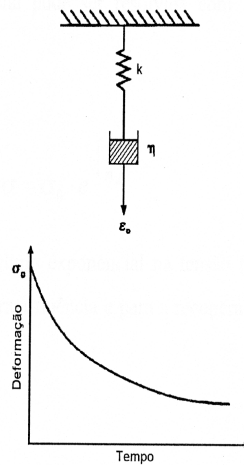


Gráfico 3.6: Modelo de Maxwell representando a relaxação de um termoplástico

Temos então as tensões e deformações dadas como:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (3.11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.12)$$

Substituindo esses resultados em

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma}{k} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.13)$$

e resolva esta equação com ε^* constante temos então

$$\frac{\sigma}{k} + \frac{\sigma}{\eta} = 0 \quad (3.14)$$

e resolvendo esta equação para $t=t_0$ e $\sigma=\sigma_0$ temos

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\left(\frac{k}{\eta}\right) \cdot t} \quad (3.15)$$

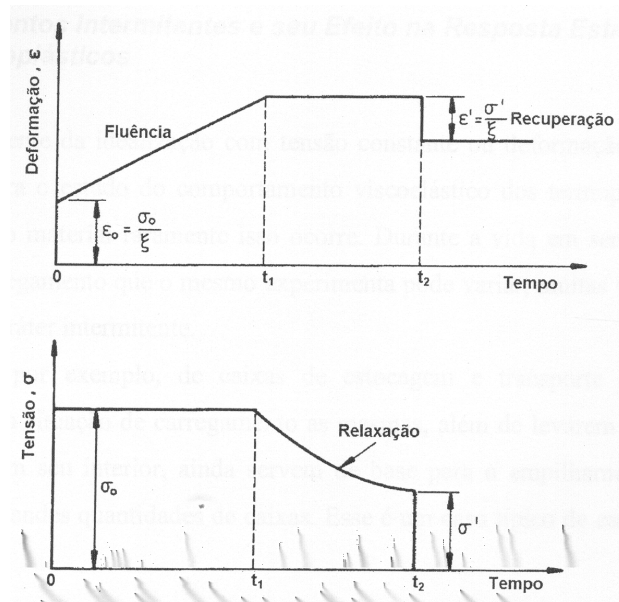


Gráfico 3.7: Resposta do Modelo de Maxwell

Assim, esses modelos simples auxiliam na compreensão do funcionamento dos materiais termoplásticos onde representam o comportamento à fluência (modelo de *Kelvin*) e o comportamento à relaxação (modelo de *Maxwell*).

No entanto, a associação destes modelos em série ou paralelo permite a obtenção de melhores resultados quanto à representatividade do comportamento dos termoplásticos. Porém isso pode representar uma complexidade matemática quando da resolução de suas equações

constitutivas. Porém, neste momento, a intenção era apenas providenciar um entendimento conceitual da deformação dependente do tempo.

4. MODELOS MATEMÁTICOS E PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO ESTUDO DO AMORTECIMENTO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os conceitos para o entendimento do fenômeno do amortecimento na resposta de um sistema dinâmico. Inicialmente trata-se a classificação do amortecimento material, os tipos existentes de amortecimento e a metodologia para a quantificação dos parâmetros do amortecimento em geral. Vale lembrar que isso é de fundamental importância visto que o amortecimento real de uma estrutura pode ser obtido somente através da resposta da estrutura a solicitações dinâmicas aplicadas pois sabe-se que o amortecimento não pode ser aferido diretamente.

4.2. AMORTECIMENTO

O amortecimento é um processo no qual a energia produzida por fenômenos vibratórios é dissipada. Assim, caso não existam componentes capazes de dissipar energia em uma estrutura frente a solicitações dinâmicas este processo vibratório da estrutura não cessará. Logo, esta energia deverá ser dissipada através de mecanismos internos dos materiais que constituem a estrutura, através da interface desta estrutura com o meio ou através do uso de dispositivos, como os amortecedores, para este fim.

Baseado nas informações destacadas anteriormente, concluímos que o fenômeno físico do amortecimento é uma propriedade difícil de ser tratada, pois envolve uma grande diversidade e complexidade dos mecanismos de dissipação de energia. Poderíamos definir como fatores preponderantes na formulação de um problema desta natureza a frequência, a temperatura, a umidade, o envelhecimento do material utilizado, o tipo de material utilizado e a carga aplicada. Para o estudo do fenômeno abordado anteriormente vários modelos matemáticos foram propostos na literatura e uma grande variedade de experimentos desenvolvidos.

4.2.1. Amortecimento devido ao meio

A resposta de uma estrutura a uma dada excitação dinâmica também é dependente do meio, assim a reação do meio irá quantificar a magnitude deste amortecimento. Essa energia dissipada através do meio pode ser fluida, gasosa ou devido às forças de campo. Caso a estrutura esteja em meio gasoso o seu amortecimento será inferior ao meio líquido.

Existem outros tipos de amortecimento. Um deles é o amortecimento gerado pelo deslizamento relativo entre duas superfícies, denominado amortecimento de atrito seco ou amortecimento de Coulomb. Assim, a energia dissipada no movimento depende das características das superfícies envolvidas e da força normal atuante entre elas.

Para modelar a resposta de um sistema devido ao meio, usa-se a equação de um sistema de um grau de liberdade submetido a uma força excitadora externa $F(t)$ e uma força dissipativa devida ao meio F_d , e temos então

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = F(t) - F_d \quad (4.1)$$

onde k é a rigidez e m é a massa do sistema.

Para quantificarmos a força devida ao meio F_d é necessário conhecermos propriedades como a densidade do meio, da geometria da estrutura e do regime de escoamento que envolve a estrutura.

A solução da $x(t)$ da equação apresentada anteriormente depende da forma da equação dissipativa devida ao meio e descreve a resposta do sistema de um grau de liberdade excitado por uma força $F(t)$ e amortecida pela força reativa F_d .

4.2.2. Amortecimento devido ao material

Anteriormente discutiu-se o amortecimento devido ao meio. Neste momento introduz-se um novo tipo de amortecimento que pode ocorrer em estruturas devido aos materiais envolvidos na estrutura que dissipam energia através do seu volume.

Os materiais comportam-se de maneira bastante peculiar dependendo de sua estrutura atômica. Ao medirmos a energia dissipada a cada ciclo de deformação observamos que ela é baixa para a maioria dos materiais estruturais, como o aço por exemplo, sendo consideravelmente maior para materiais visco elásticos.

Alguns materiais, como o caso de materiais compósitos que resultam da associação de dois ou mais materiais, pode apresentar um aumento da rigidez com redução do peso da estrutura. No entanto os mesmos apresentam baixa resistência à corrosão e um alto custo para montá-los. Em relação ao amortecimento apresenta baixa eficiência. Por outro lado, os materiais visco elásticos apresentam grande capacidade de atrito interno, o que lhe confere alto amortecimento, resistência, durabilidade e estabilidade térmica conforme já apresentado no capítulo anterior. As características de amortecimento dependem fortemente da temperatura e da frequência de excitação.

4.3. TIPOS DE AMORTECEDORES

4.3.1. Amortecedores de Newton

Neste modelo de amortecimento, a dissipação de energia é dada através do escoamento do fluido por orifícios através de sua viscosidade. Assim, a força reativa será proporcional à velocidade instantânea. Assim, a equação do movimento para um grau de liberdade de um modelo de amortecimento newtoniano é dada por;

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(t) \quad (4.2)$$

onde m é a massa do sistema, c é o coeficiente de amortecimento viscoso, k é a rigidez e $F(t)$ é a força excitadora.

Neste caso, a parcela de força reativa é dada através de um coeficiente de amortecimento viscoso multiplicado por uma parcela referente à velocidade, fato o qual descreve a característica dos fluidos newtonianos. Como já descrito anteriormente, o modelo de Newton é composto pela associação em paralelo entre uma componente elástica com uma componente viscosa dada abaixo.

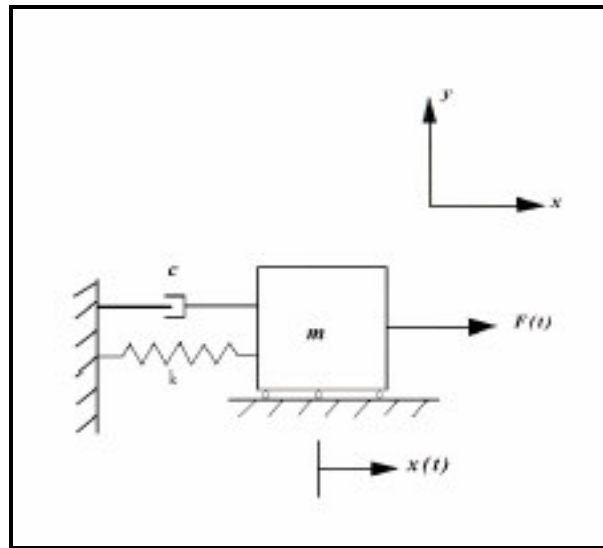


Figura 4.1: Modelo de Amortecimento de Newton

A equação apresentada anteriormente pode ser resolvida obtendo assim a resposta do sistema a uma dada força externa aplicada. Esta solução será subdividida em duas parcelas: a solução homogênea e a solução particular. Na primeira, as oscilações irão reduzindo a sua amplitude à medida que o tempo transcorre.

4.3.2. Amortecedores por Atrito de Coulomb

Nestes tipos de amortecedores, a dissipação de energia ocorre através do atrito entre superfícies de contato. Assim, suas características dependem dos tipos de superfícies em contato e da força de normal de contato que as mantém unidas. Logo, a equação do movimento para um sistema de um grau de liberdade com amortecimento de Coulomb é a seguinte;

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu \cdot N \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{dt}\right) + kx = F(t) \quad (4.3)$$

onde μ é o coeficiente de atrito dinâmico, N é a força normal entre as superfícies e "sgn" é a função sinal.

Algumas características deste tipo de amortecedor são o alcance de uma posição de repouso em um intervalo de tempo finito dada uma perturbação inicial.

4.3.3. Amortecedores Viscoelásticos

Neste modelo de amortecimento, a energia contida no sistema é dissipada através da capacidade de deformação dos materiais viscoelásticos.

Conforme já foi mencionado no capítulo anterior, eles podem possuir estruturas moleculares variadas, caracterizando através delas o seu comportamento mecânico, físico, químico, térmico, ótico, entre outras...

Neste tipo de amortecimento a rigidez e o amortecimento são representados através da rigidez complexa dada por $k^* = k \cdot (1 + i\eta)$, onde i representa a unidade imaginária e η representa o fator de perda. Por fim obtém-se a equação do movimento para este tipo de um sistema submetido a excitação harmônica:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + k(1 + i\eta)x = \text{Re}(F_o \cdot e^{i\omega t}) \quad (4.4)$$

onde "Re" representa a parte real da expressão.

4.4. COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

Conforme já mencionado no capítulo anterior, os materiais viscoelásticos podem ser ajustados segundo os modelos básicos constitutivos dos materiais, como por exemplo o modelo de Newton e o Modelo de Hooke. Assim, podemos dizer que os materiais viscoelásticos podem ser descritos através dos modelos mencionados, como o modelo *Standard Generalizado*, que relaciona a tensão com a deformação em um material visco elástico linear da seguinte forma;

$$\left[a_o + a_1 \frac{\partial}{\partial t} + a_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots \right] \sigma(t) = \left[b_o + b_1 \frac{\partial}{\partial t} + b_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots \right] \varepsilon(t) \quad (4.5)$$

onde os valores de a_i e b_i são constantes que descrevem as propriedades do material viscoelástico. Considerando um modelo uniaxial podemos escrever $\sigma(t) = \frac{F(t)}{A}$ e $\varepsilon(t) = \frac{x(t)}{L}$ e multiplicando ambos os lados da equação acima por L tem-se então

$$\left[a_0 + a_1 \frac{\partial}{\partial t} + a_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots \right] \frac{Lf(t)}{A} = \left[b_0 + b_1 \frac{\partial}{\partial t} + b_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots \right] x(t) \quad (4.6)$$

Considerando as transformadas de Fourier que transformam as expressões $f(t)$ e $x(t)$ do domínio do tempo para o domínio da frequência, como $F(\omega)$ e $X(\omega)$, tem-se

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt \quad (4.7)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} x(t) dt$$

Calculando-se a transformada de Fourier os membros da equação (4.6) obtêm-se aplicando o teorema de transformações de derivadas:

$$\begin{aligned} & \left[(a_0 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots) + i(-a_1\omega + a_3\omega^3 - a_5\omega^5 + \dots) \right] \cdot \frac{LF(\omega)}{A} = \\ & \left[(b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4 - \dots) + i(-b_1\omega + b_3\omega^3 - b_5\omega^5 + \dots) \right] \cdot X(\omega) \end{aligned} \quad (4.8)$$

a qual pode ser escrita na forma:

$$[A_1(\omega) + iA_2(\omega)] \frac{LF(\omega)}{A} = [B_1(\omega) + iB_2(\omega)] X(\omega) \quad (4.9)$$

onde $A_1(\omega)$ e $B_1(\omega)$ representam funções reais e pares da frequência enquanto $A_2(\omega)$ e $B_2(\omega)$ são funções reais e ímpares da frequência. Assim, baseado na equação apresentada acima é possível obter uma expressão explícita:

$$F(\omega) = \frac{AE(\omega)}{L} \cdot (1 + i\mu(\omega)) X(\omega) \quad (4.10)$$

na qual:

$$E(\omega) = \frac{A_1B_1 + A_2B_2}{A_1^2 + A_2^2} \quad (4.11)$$

$$\mu(\omega) = \frac{A_1B_2 - A_2B_1}{A_1B_2 + A_2B_1} \quad (4.12)$$

onde $E(\omega)$ é uma função real par da frequência e $\mu(\omega)$ é uma função ímpar. O produto $E(\omega)(1 + i\mu(\omega))$ é denominado rigidez complexa do elemento. O resultado é válido para

qualquer sistema linear sendo as funções $E(\omega)$ e $\mu(\omega)$ determinadas mediante ensaios com deformação harmônica controlada.

De uma maneira geral, as expressões utilizadas para a rigidez complexa são apresentadas abaixo:

4.4.1. Material elástico perfeito (Hooke)

$$a_o = 1 \quad b_o = E \quad a_i = b_i = 0 \quad \text{para } i \geq 1$$

Segue que:

$$E(\omega) = E_o \quad \mu(\omega) = 0 \quad (4.13)$$

4.4.2. Modelo de Kelvin

$$a_o = 1 \quad b_o = E_o \quad a_1 = 0 \quad b_1 = C \quad a_i = 0 \quad b_i = 0, \quad i \geq 2$$

$$E(\omega) = E_o \quad \mu(\omega) = -\frac{C}{E_o} \omega \quad (4.14)$$

4.4.3. Modelo de Maxwell

$$a_o = \frac{1}{C} \quad b_o = 0 \quad a_1 = \frac{1}{E_o} \quad b_1 = 1 \quad a_i = 0 \quad b_i = 0, \quad i \geq 2$$

$$E(\omega) = \frac{c^2 E_o}{E_o^2 + c^2 \omega^2} \omega^2 \quad \mu(\omega) = -\frac{E_o}{c \omega} \quad (4.15)$$

4.4.4. Modelo Histerético Standard

$$E(\omega) = E_o \quad \mu(\omega) = \mu_o \operatorname{sgn}(\omega) \quad (4.16)$$

Observa-se que neste modelo não existe correspondência com um modelo reológico conhecido.

Assim, é possível estabelecer uma análise de sistemas de um grau de liberdade através da equação do movimento de um sistema simples na qual a força restitutiva é provida por um elemento visco elástico arbitrário, quando submetido a uma excitação externa $mf(t)$:

$$m x^{**}(t) + p(t) = mf(t) \quad (4.17)$$

Segue que:

$$x^{**}(t) + \frac{1}{m} p(t) = f(t) \quad (4.18)$$

onde m representa a massa do sistema e $p(t)$ denota a força no elemento visco elástico de vínculo. Aplicando a transformada de Fourier obtém-se:

$$(-i\omega)^2 X(\omega) + \frac{P(\omega)}{m} = F(\omega) \quad (4.19)$$

na qual $X(\omega)$, $P(\omega)$ e $F(\omega)$ representam as transformadas complexas de Fourier de $x(t)$, $p(t)$ e $f(t)$, respectivamente. Assim, em geral resultará em:

$$P(\omega) = \frac{AE(\omega)}{L} \cdot (1 + i\mu(\omega))X(\omega) \quad (4.20)$$

É conveniente neste ponto introduzir a notação:

$$E(\omega) = E_o \phi(\omega) \quad (4.21)$$

onde E_o é o valor da função da frequência ω_o e $\phi(\omega)$ uma função adimensional tal que $\phi(\omega_o) = 1$. Logo:

$$X(\omega) \left\{ \frac{AE_o}{mL} \phi(\omega) [1 + i\mu(\omega)] - \omega^2 \right\} = F(\omega) \quad (4.22)$$

Adotando a notação $\omega_n^2 = \frac{AE_o}{mL}$ resulta a seguinte expressão para $X(\omega)$:

$$X(\omega) = \frac{\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)}{\phi(\omega)[1 + i\mu(\nu)] - \nu^2} \left[\frac{F(\nu)}{\omega_n^2} \right] \quad (4.23)$$

Equação que pode ser escrita na forma geral:

$$X(\nu) = H(\nu)F_d(\nu) \quad (4.24)$$

Onde esta equação exprime um resultado básico, relacionando a transformada da resposta (saída) do sistema $X(\omega)$ com a transformada da excitação $F_d(\omega)$. A função $H(\omega)$, que depende unicamente das propriedades do sistema é denominada função complexa de resposta em frequência do sistema.

De uma maneira geral, os conceitos abordados acima servem para dar-nos uma visão das equações envolvidas na análise de um material visco elástico frente a solicitações externas. Assim, esta metodologia é válida para materiais visco elásticos onde $F_d(\omega)$ representa a força restitutiva proporcionada pelos mesmos.

Outro ponto importante neste momento é a definição da função de ganho e do ângulo de fase.

É relevante expressar a função complexa de resposta em frequência nos termos de suas partes real e imaginária:

$$\text{Re}(\nu) = \frac{\phi - \nu^2}{(\phi - \nu^2)^2 + \phi^2} \quad (4.25)$$

$$\text{Im}(\nu) = \frac{\phi\mu}{(\phi - \nu^2)^2 + \phi^2\mu^2} \quad (4.26)$$

E verifica-se facilmente que:

$$|H(\nu)|^2 = \frac{1}{(\phi - \nu^2)^2 + \phi^2} \quad (4.27)$$

$$\tan \theta = \frac{\phi\mu}{\phi - \nu^2} \quad (4.28)$$

O módulo $H(\nu)$ é denominado fator de ganho do sistema e representa a amplitude da resposta do sistema a uma excitação harmônica de frequência ν e amplitude unitária. Já θ denota a diferença de fase entre a excitação e a resposta, quando a excitação é harmônica.

Assim, é possível estabelecer os modelos para os diferentes tipos de amortecimentos tais como o de Newton, por exemplo. E deste modo também pode-se modular parâmetros para um sistema submetido à excitação harmônica onde obtém-se a resposta em função dos deslocamentos, velocidades e acelerações (relativas e absolutas).

5. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO AMORTECIMENTO

5.1. INTRODUÇÃO

Apresentam-se neste capítulo alguns dos principais métodos de quantificação do amortecimento existente na literatura.

O amortecimento não pode ser medido diretamente na estrutura, mas sim obtido através da resposta do sistema a uma dada carga excitadora. Se a excitação for transiente, então a resposta da estrutura também será transiente e se a carga for periódica a resposta do sistema será estacionária.

5.2. QUANTIFICAÇÃO DO AMORTECIMENTO A UMA RESPOSTA TRANSIENTE ATRAVÉS DO DECREMENTO LOGARÍTMICO

O decremento logarítmico é um modelo de análise que consiste em relacionar o comportamento da resposta a um parâmetro de amortecimento de interpretação física e matemática bastante simples. Assim, neste método obtém-se o parâmetro de amortecimento da relação que existe entre as amplitudes da resposta em vibrações livres de um sistema de um grau de liberdade dado por:

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} \quad (5.1)$$

onde x_1 e x_2 são as amplitudes adjacentes da resposta, como mostra a figura a seguir, sendo que a linha pontilhada representa a forma exponencial de decaimento logarítmico.

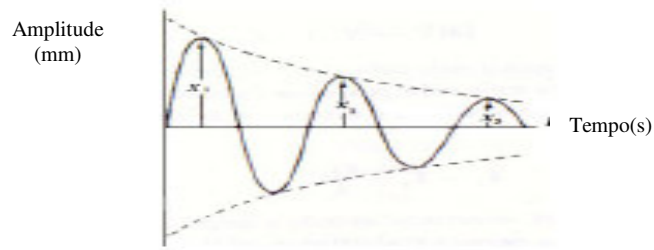


Gráfico 5.1: Forma exponencial do decaimento logarítmico

A seguir, o parâmetro δ , é calculado a partir da solução da equação do movimento para um grau de liberdade dada por:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (5.2)$$

com solução geral:

$$x(t) = X e^{-\zeta \omega_n t} \text{sen}(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \theta) \quad (5.3)$$

onde ζ é a razão de amortecimento crítico, ω_n é a frequência natural e θ é o ângulo de fase e X a amplitude da resposta.

A seguir, da equação anterior calculam-se as amplitudes e obtém-se com base na expressão para δ :

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (5.4)$$

onde se sabe que o valor da razão de amortecimento crítico é muito pequeno na grande maioria dos casos e assim temos que:

$$\delta \cong 2\pi\zeta \quad (5.5)$$

E, relacionando as amplitudes não adjacentes x_n e x_{n+N} tem-se a seguinte expressão:

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{x_n}{x_{n+N}} \right) \quad (5.6)$$

onde N é o número de ciclos entre as amplitudes consideradas, δ é o decremento logarítmico, x_n é a amplitude da resposta no ciclo inicial e x_{n+N} é a amplitude da resposta do ciclo subsequente.

5.3. QUANTIFICAÇÃO DO FATOR DE PERDA ATRAVÉS DO CICLO DE HISTERESE

Outra forma de medir o amortecimento é através da utilização do ciclo de histerese, onde se excita o sistema através de uma força de frequência ω , medindo então tensão σ e a deformação ε e traçando o gráfico entre estas duas variáveis.

Segundo *Jones 1978b*, para materiais visco elásticos a forma do ciclo não varia muito com a amplitude dentro de um limite aceitável. A área é proporcional ao quadrado da amplitude de deformação e o amortecimento pode ser considerado linear.

Utilizando a relação tensão-deformação onde a tensão é dada por

$$\sigma = E' \varepsilon_o \sin \omega t + \frac{E''}{|\omega|} \omega \varepsilon_o \cos \omega t \quad (5.7)$$

substituindo na identidade

$$\varepsilon_o \cos \omega t = \pm \varepsilon_o \sqrt{1 - \sin^2 \omega t} = \pm \varepsilon_o \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_o^2}} \quad (5.8)$$

na equação anterior tomando-se a equação da elipse

$$\sigma = E' \varepsilon \pm E'' \sqrt{\varepsilon_o^2 - \varepsilon^2} \quad (5.9)$$

o fator de perda é dado por

$$\eta = \frac{E''}{E'} \quad (5.10)$$

A energia dissipada por cada ciclo por unidade de volume é dada por

$$D = \oint \sigma d\varepsilon = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sigma \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) dt \quad (5.11)$$

substituindo na equação (5.7) com as devidas operações matemáticas obtém-se a energia dissipada por ciclo dada por

$$D = \pi \eta E' \varepsilon_o^2 \quad (5.12)$$

e representando energia de deformação armazenada máxima U por

$$U = \frac{1}{2} E' \varepsilon_o^2 \quad (5.13)$$

e resultará para o fator de perda a seguinte equação

$$\eta = \frac{D}{2\pi U} \quad (5.14)$$

Na relação entre o ciclo de histerese e a equação (5.14), D representa a área do ciclo de histerese e U representa a energia armazenada na deformação elástica. Assim, a variação do fator de perda irá causar variação da área do ciclo de histerese.

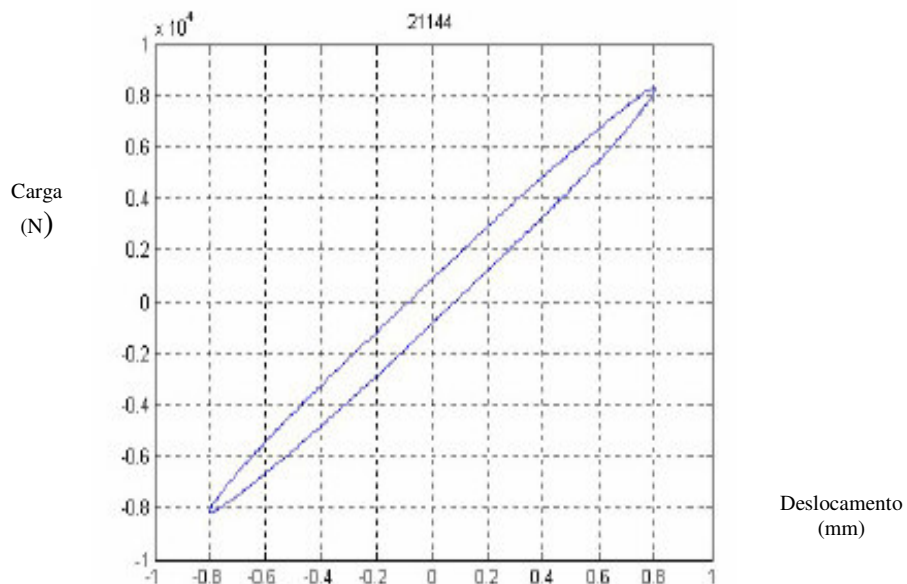


Gráfico 5.2: Ciclo de histerese.

Em geral, apenas dois métodos de quantificação do amortecimento foram abordados anteriormente. No entanto existe uma grande quantidade de métodos que podem ser utilizados para medirem o amortecimento tais como método do cálculo do fator de perda pela medida da fase, método da rigidez dinâmica, método do ajuste de ciclo, entre outros. O importante lembrar é que cada método possui particularidades, o que indica sua aplicação a um determinado caso em especial, ou seja, sua aplicação é indicada para alguns tipos de amortecimento e contra-indicada para outros tipos que pode causar grandes equívocos nos resultados apresentados.

6. PROJETO DOS DISSIPADORES DE ENERGIA

6.1. INTRODUÇÃO

Elementos poliméricos possuem, devido a sua constituição física e química, alta capacidade de dissipar energia. Devido a sua baixa capacidade mecânica e sua alta fluidez e plastificação, eles tem a propriedade de atingir o escoamento a baixas tensões aplicadas. Esta, sem dúvida é uma característica muito importante de sua constituição candidatando-o assim a ser uma alternativa no auxílio à redução de vibrações geradas em estruturas devido a solicitações dinâmicas.

Inicialmente, verificam-se as características principais dos polímeros. Fundamentalmente analisa-se o comportamento dos polímeros frente às propriedades mecânicas, químicas e térmicas. Com base nestas, adota-se o termoplástico com melhor desempenho.

No presente trabalho foi dada ênfase ao projeto do elemento dissipativo (polímero) interligado a um elemento de aço. Assim, dois tipos de amortecedores foram confeccionados. No primeiro deles, busca-se a dissipação de energia através do escoamento do polímero frente a deformações axiais (AXL) enquanto que no segundo tipo busca-se o amortecimento através de deformações de cisalhamento (CIS) do material.

Conforme o andamento será dada atenção especial a cada um deles.

6.2. MATERIAIS POLIMÉRICOS AVALIADOS

Existe uma infinidade de materiais polímeros que poderiam ser adotados com o objetivo proposto neste trabalho. No entanto pesquisas sobre as propriedades mecânicas, químicas e térmicas mostraram que as poliamidas possuem o melhor desempenho para fins de aplicação deste trabalho.

A relação tensão deformação das poliamidas avaliadas apresentaram diferenças bastante significativas entre a tensão de escoamento e tensão de ruptura. O comportamento a tração

destes materiais é muito parecido. De uma maneira geral temos a relação entre tensão deformação conforme foi apresentada no *capítulo 2*. Com relação às propriedades térmicas, não há alterações de comportamento dentro da faixa de temperatura as quais será submetido (15°C – 45° C dados do fabricante). Não há também interferência no seu comportamento frente a tensões eletrostáticas como caso seja usado em torres de transmissão de energia, por exemplo.

Assim, inicialmente avaliou-se a viabilidade de diversas poliamidas denominadas PA 6 e PA 66, totalizando cinco tipos. Elas podem ser encontradas comercialmente com a denominação de TECAMID 6, TECAMID 6.6, TECAST XAU, TECAST T e TECAST TDB. No entanto relações tensões x deformações, capacidade de aderência com outros materiais (aço por exemplo), induziram a adoção do polímero denominado TECAST TDB por este apresentar uma melhor relação entre o comportamento mecânico, químico e térmico para o objetivo que se traça neste trabalho. Resumidamente, com relação ao comportamento mecânico, pode-se caracterizar que o mesmo apresenta um expressivo comportamento viscoelástico bem como um módulo de elasticidade superior ao apresentado pelas outras poliamidas, o que caracteriza uma maior capacidade de suporte de cargas externas. O comportamento deste polímero frente a ações químicas e climáticas, como ações de agentes atmosféricos diversificados não é importante visto que os níveis de absorção de água deste material são insignificantes. Conforme já introduzido anteriormente, segundo informações cedidas pelo fabricante, não há alteração do seu comportamento frente à temperaturas as quais será submetido, ou seja, temperaturas que não ultrapassem os 100° C. Há, no entanto, certos problemas no comportamento mecânico do material em temperaturas muito baixas pois o mesmo poderá romper fragilmente, efeito indesejado para a proposta apresentada de utilização deste material. A curva apresentada abaixo retrata o ensaio realizado no LEME – Laboratório de Ensaio de Modelos Estruturais- sobre a curva tensão deformação do polímero TECAST TDB

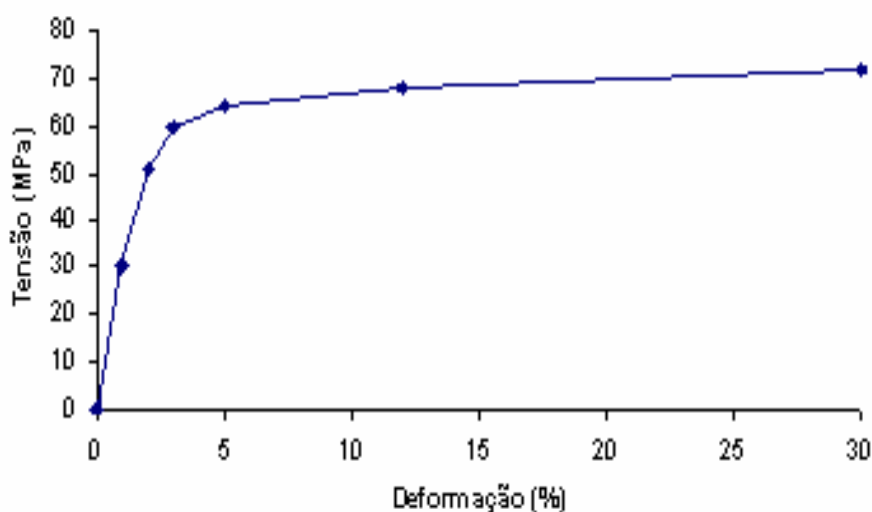


Tabela 6.1: Propriedades Mecânicas TECAST TDB

PROPRIEDADES MECÂNICAS				
TECAST	Densidade (g/cm ³)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão Ruptura (MPa)	Módulo Elasticidade (MPa)
TDB	1,15	42	46	1780

6.3. DISSIPACÃO DE ENERGIA

6.3.1. Dissipação de Energia Através de Esforços de Cisalhamento (CIS)

De acordo com as leis da elasticidade, com os diagramas de *Mohr*,...pode-se afirmar que, esforços gerados por cisalhamento alcançam metade da tensão a qual o material pode suportar axialmente. Deste modo, pode-se gerar um elemento (tipo rebite) na união entre barras que dissipe energia a medida que esforços axiais sejam aplicados nas mesmas. Tal elemento pode ser um parafuso termoplástico em que as tensões de cisalhamento ultrapassem seu regime elástico sem que causem sua ruptura.

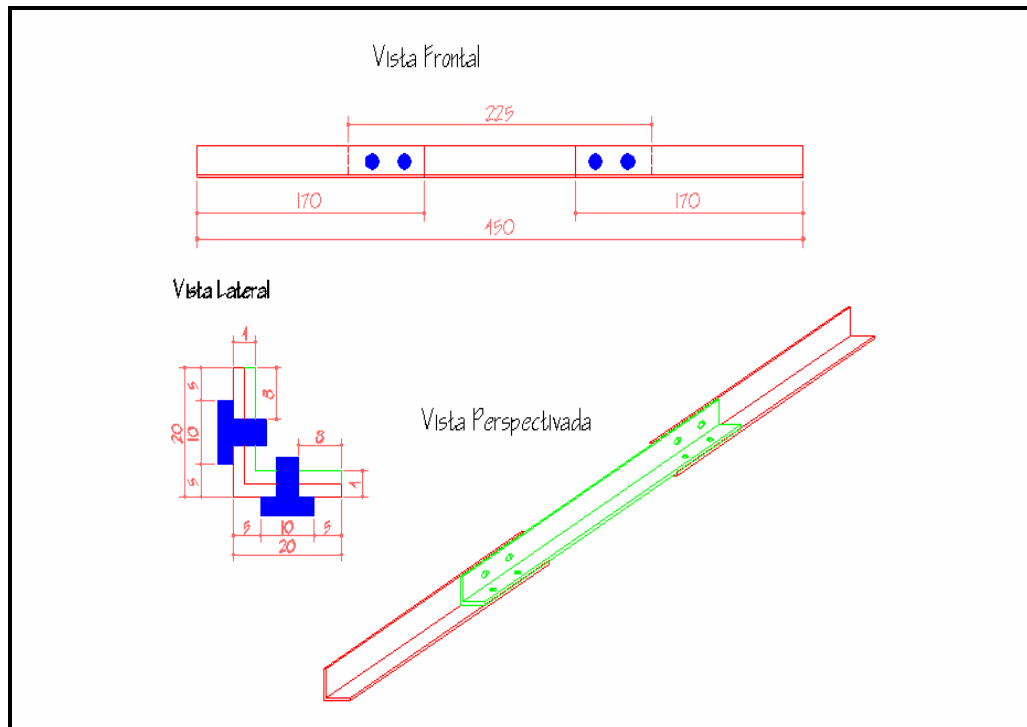


Figura 6.1: Detalhe Dissipador por Cisalhamento.

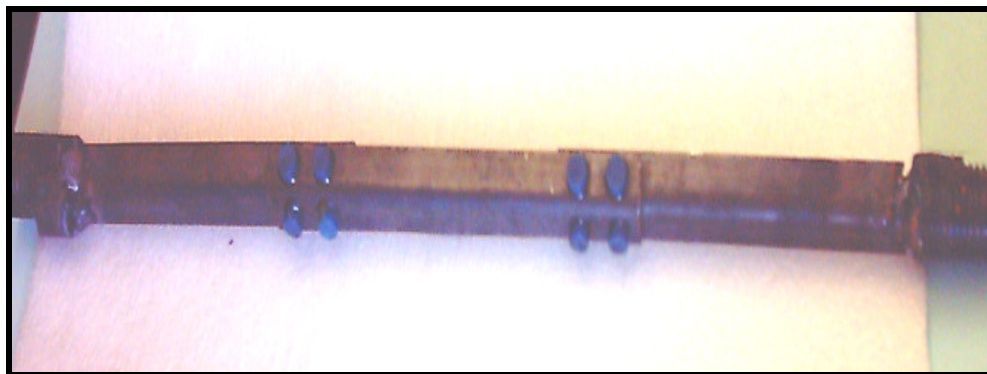


Figura 6.2: Imagem do Amortecedor Por Cisalhamento

6.3.2. Dissipação de Energia Através de Esforços Axiais (AXL)

Neste caso será criada uma barra composta por três elementos. O primeiro e o terceiro será confeccionado em aço enquanto que o elemento intermediário será polimérico. A necessidade desta solução parte da premissa de que os plásticos apresentam um módulo de elasticidade

extremamente baixo com relação ao aço. Com isso, a baixos valores de tensão de compressão, o material, caso fosse uma barra polimérica única, já teria atingido sua carga de flambagem. Uma alternativa possível seria um aumento das dimensões da seção transversal do elemento. No entanto, esta consideração além de aumentar o momento de inércia à flexão também aumentaria a área transversal do elemento dificultando assim o escoamento do mesmo para a gama de solicitações as quais o amortecimento se mostraria efetivo.

Assim, foi confeccionada uma barra prismática do polímero TDB e avaliadas suas características mecânicas conforme os dados fornecidos pelo fabricante descrito anteriormente. Tem-se a seguir o modelo do amortecedor a ser implantado.

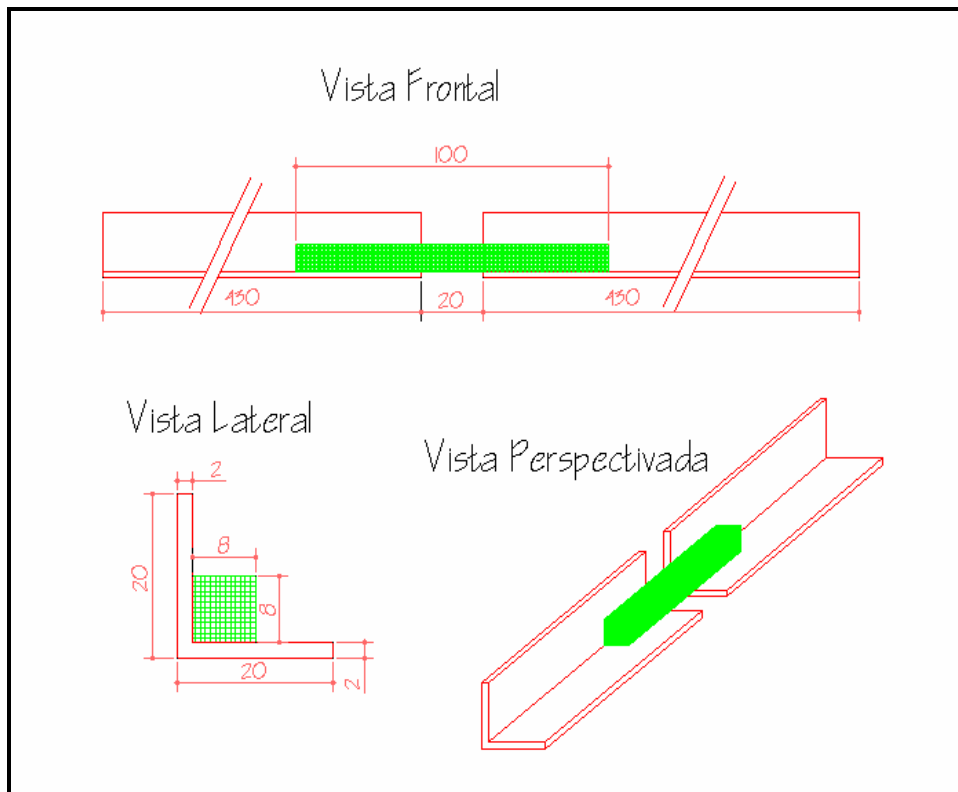


Figura 6.3: Detalhe do Amortecedor por Esforços Axiais (AXL)



Figura 6.4: Vista do Amortecedor Por Esforços Axiais (AXL)

Inicialmente, é possível verificar que o trecho central constituído pelo polímero, com comprimento bem inferior ao comprimento total da barra, não apresentará flambagem. Outro aspecto bastante importante é o fato de que os perfis geométricos envolvidos na barra composta devem possuir o seu centro de gravidade no mesmo ponto.

Com relação à questão da flambagem existem estudos, onde se propôs otimizar a dissipação de energia através do uso de estruturas secundárias que impossibilitem flambagem dos amortecedores. Existem algumas soluções propostas que obtiveram resultados bem interessantes na aplicação de amortecedores em edifícios compostos por estruturas de aço onde se utilizaram “braços” com função de redução do comprimento de flambagem.

6.4. PROJETO DO ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste item descrevem-se as condicionantes as quais os modelos serão submetidos bem como o tipo de solicitações empregadas e os equipamentos envolvidos.

Para a aplicação de solicitações será utilizado o atuador MTS-810 do LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física, equipamento que gera excitações periódicas de força ou deformação e registra por meio eletrônico cargas, deslocamentos e tempos.



Figura 6.5: Modelo Atuador MTS-810

Ambos os dissipadores serão testados individualmente através de ensaio axial frente a uma carga cíclica do tipo harmônica. Desta maneira será possível avaliar as propriedades do ciclo de histerese.

$$X = a \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (6.1)$$

onde a equação acima representa a forma da solicitação aplicada nos amortecedores individualmente sendo que a = amplitude de carga, ω = frequência angular, t = tempo.

6.4.1. Metodologia do Ensaio

O ensaio objetiva determinar a variação da razão de amortecimento e rigidez dos amortecedores frente a variação de frequência e carga aplicada. O fator de perda será calculado conforme apresentado em 5.3. As variáveis testadas foram carga e frequência. Os amortecedores foram ensaiados segundo as frequências na faixa de grandes estruturas e as cargas segundo o seu limite de tensões fornecido pelo fabricante do polímero. Haverá variação do número de ciclos excitados em função da frequência aplicada de modo que se possa melhor avaliar os resultados para frequências mais altas. Em média o amortecedor será submetido a 25 ciclos.

Tabela 6.2: Variáveis dos Modelos Ensaiaados

Amortecedor Cisalhamento			Amortecedor Axial			
<u>Frequência (Hz)</u>	<u>Carga (N)</u>	<u>Ciclos</u>	<u>Frequência (Hz)</u>	<u>Carga (N)</u>	<u>Ciclos</u>	
0,5	2185	20	0,5	2000	25	
	3260			2750		
2,5	2185			3000		
	3260			3250		
5,0	2185		2,0	2,0	2000	25
	3260				2750	
		3000				
		3250				
		5,0	5,0	2000	50	
				2750		
				3000		
				3250		

Deste modo totalizam-se 6 arquivos de dados para o amortecedor por cisalhamento (CIS) e 12 para o amortecedor por esforços axiais (AXL). As diferenciações entre os valores adotados para os modelos pode ser justificado da seguinte maneira: as premissas envolvidas nos ensaios foram baseadas em informações do fabricante que algumas vezes não corresponderam com a realidade, visto que as propriedades destes polímeros podem ser facilmente variadas em função do processo de fabricação, da existência de deformações iniciais, além de outros fatores envolvidos nestes processos. De uma maneira bastante resumida pode-se dizer que para o amortecedor por cisalhamento o projeto do mesmo foi baseado nas propriedades mecânicas obtidas por dados fornecidos pelo fabricante enquanto que para o amortecedor

axial foram realizados ensaios de tração e compressão no Laboratório de Modelos Estruturais – LEME – afim de se obter dados confiáveis necessários para.o projeto.

A seguir serão procedidos os ensaios de modo que se verifique a aplicabilidade dos modelos projetados.

7. RESULTADOS

7.1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste tópico, os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Neste consta os ciclos de histerese obtidos bem como o cálculo da energia dissipada nos mesmos. Também será avaliada a rigidez do amortecedor dada através da inclinação do ciclo e calculada o fator de perda do amortecedor o qual será demonstrado a seguir. Assim, neste item compreende-se dois dissipadores conforme já mencionado no capítulo anterior.

7.2. CICLOS DE HISTERESE DO AMORTECEDOR

7.2.1. Ciclos de Histerese do Modelo CIS

Dada a aplicação de solicitações pelo atuador MTS-810, o qual indeferiu uma carga senoidal onde se limitaram os valores de carga e mediram-se os deslocamentos a diversas frequências e amplitudes de cargas. A saída de dados do atuador deu-se via arquivos de dados onde se obtinham três colunas: a primeira delas informando o tempo, a segunda o valor das cargas aplicadas e por fim, a terceira, informando os deslocamentos do dissipador. A seguir apresentam-se os ciclos obtidos.

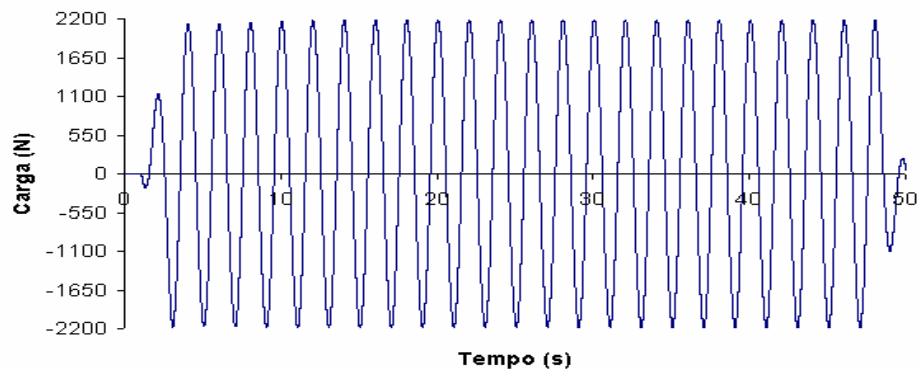


Gráfico 7.1: Excitação Harmônica Atuador MTS-810

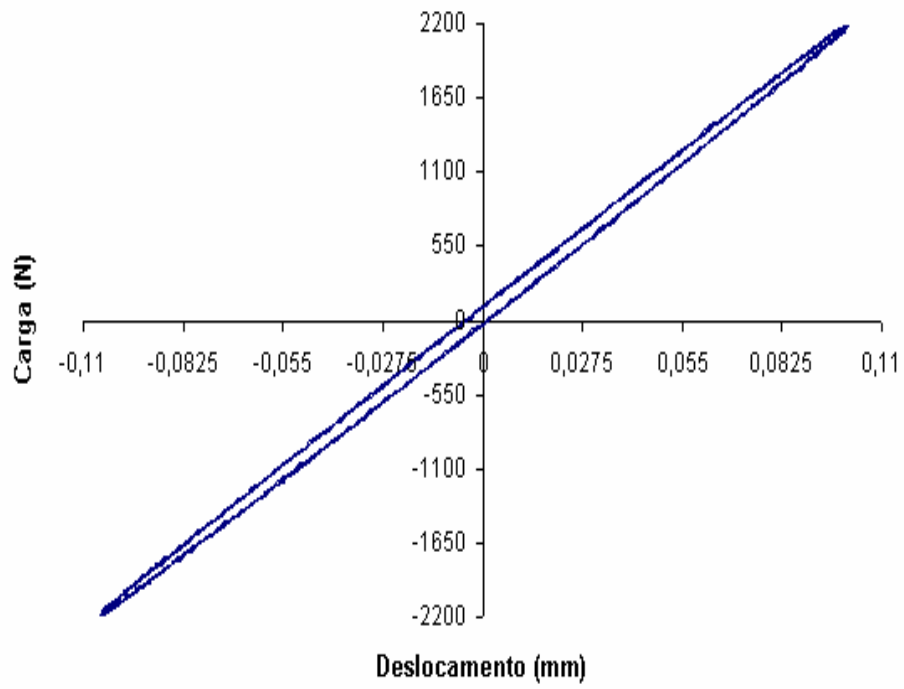


Gráfico 7.2: Ciclos de Histerese do Modelo CIS para 2185N 0,5Hz

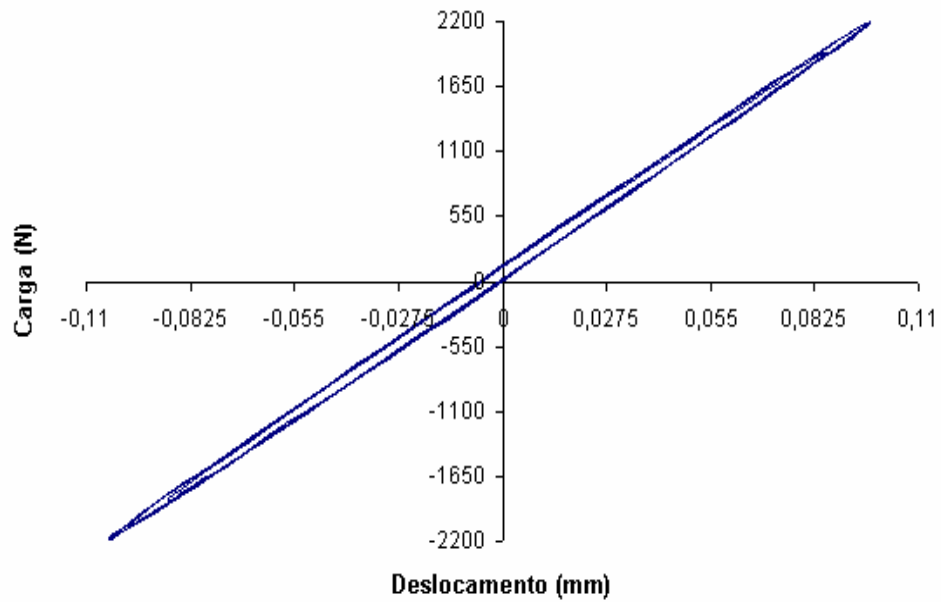


Gráfico 7.3: Ciclos de Histerese do Modelo CIS para 2185N 5,0Hz

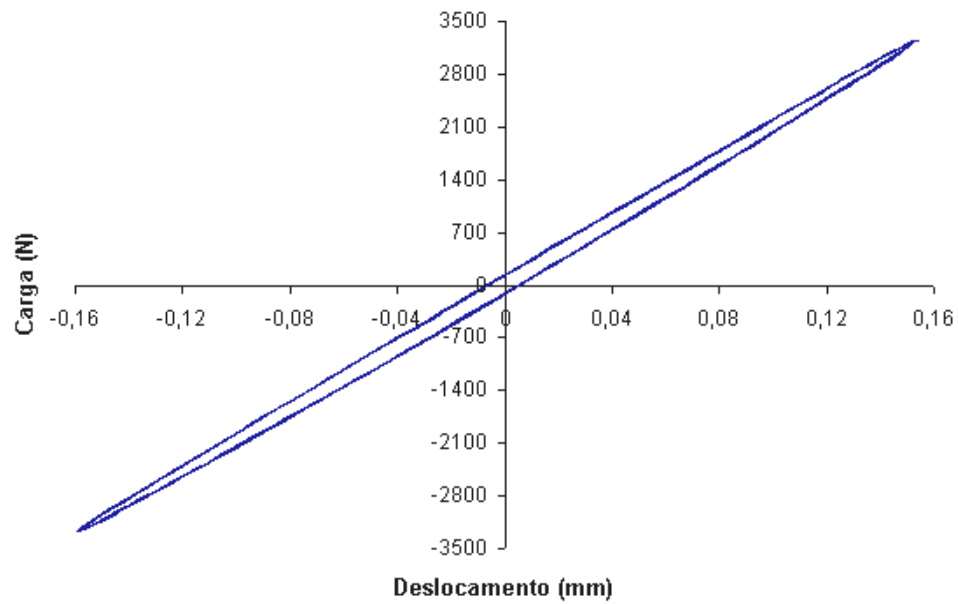


Gráfico 7.4: Ciclos de Histerese do Modelo CIS para 3260N 2,5Hz

deformação e a inclinação da elipse em relação ao eixo principal define-se a rigidez do amortecedor.

Visualiza-se também que, para a solicitação em questão, o modelo por cisalhamento respondeu linearmente embora tendo dissipação pouco significativa. Na seqüência submete-se a superposição dos diagramas de histerese deste dissipador.

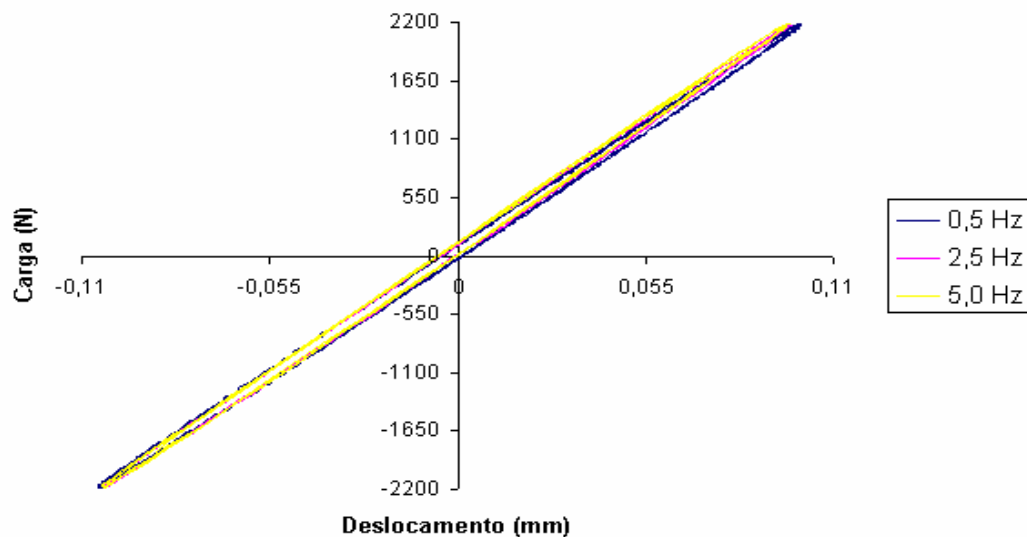


Gráfico 7.5: Superposição Ciclos de Histerese do Modelo CIS para 2185 N.

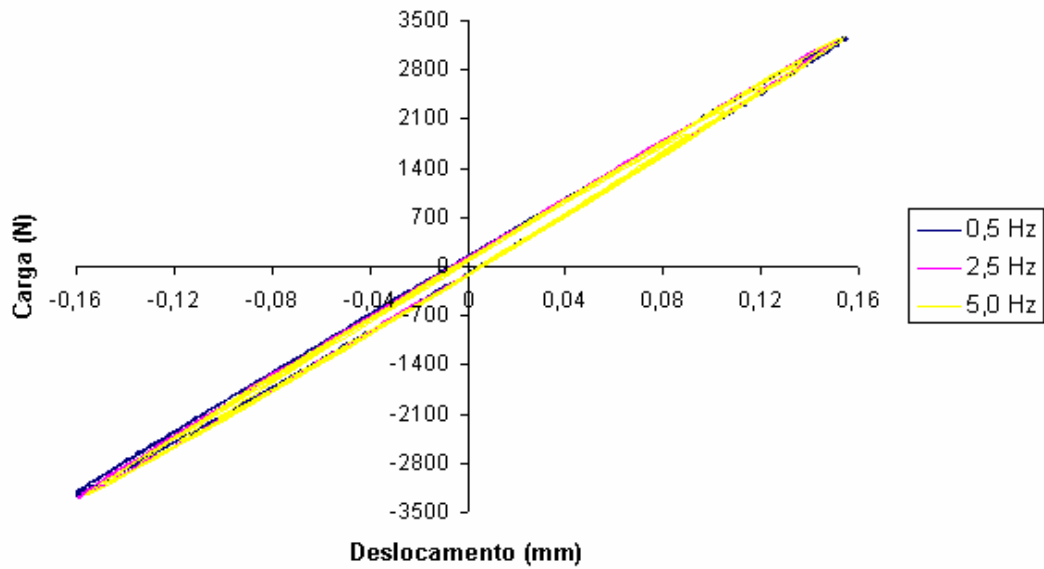


Gráfico 7.6: Superposição Ciclos de Histerese Do Modelo CIS para 3260N

Os ciclos obtidos no gráfico 7.5 foram obtidos para os valores de menor carga aplicada no ensaio enquanto que no gráfico 7.6 apresentam-se os ciclos obtidos para a maior solicitação do ensaio. Observa-se que há pouca influência da frequência na resposta dos dissipadores, onde a diferença entre os valores de deslocamento se tornam pouco perceptíveis.

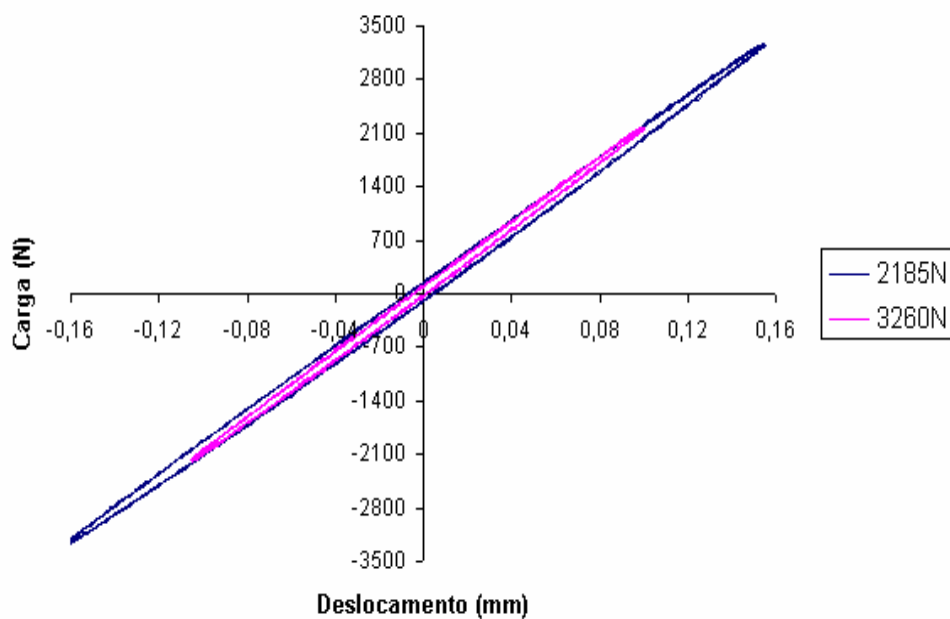


Gráfico 7.7: Superposição de Ciclos de Histerese Do Modelo CIS para 0,5Hz

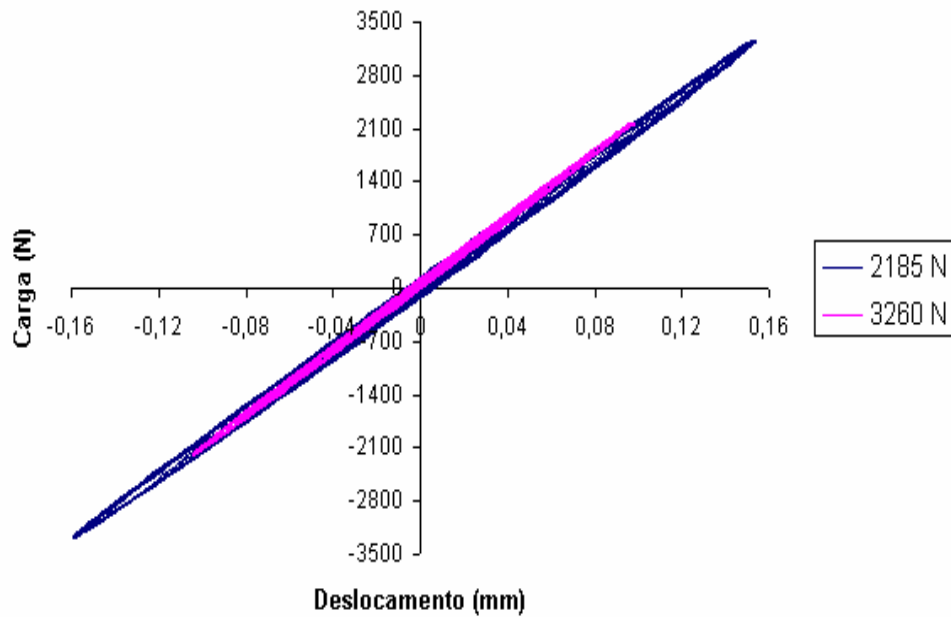


Gráfico 7.8: Superposição de Ciclos de Histerese Do Modelo CIS para 2,5H

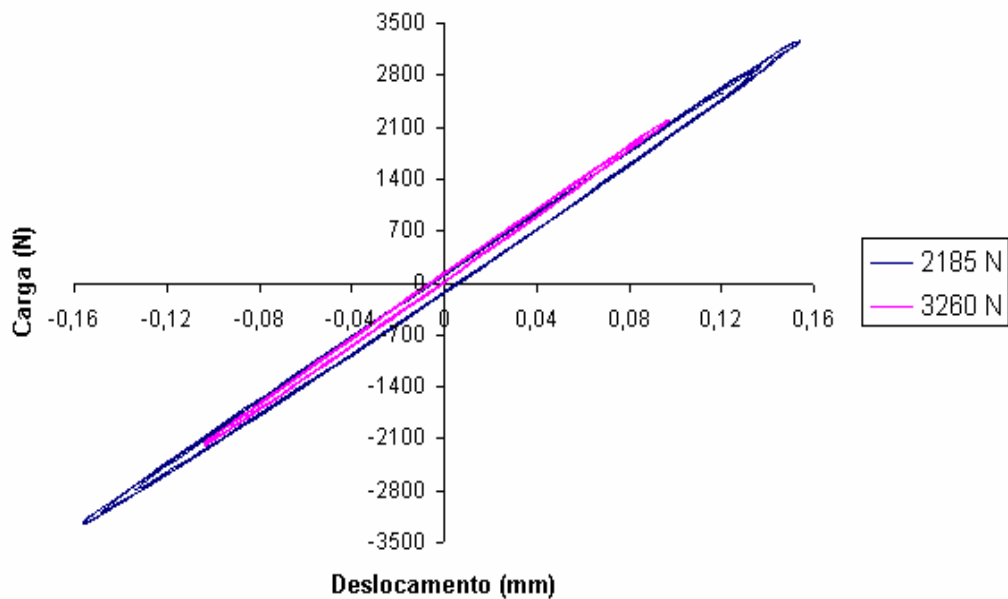


Gráfico 7.9: Superposição de Ciclos de Histerese Do Modelo CIS para 5,0Hz

Dos gráficos 7.7, 7.8 e 7.9 se observa a variação da resposta do sistema a diferentes frequências aplicadas. Denota-se também que há uma suave variação da rigidez para a faixa de solicitações aplicadas em questão, embora não tão significativa. Outro ponto importante

provém do fato de que há um aumento da área do ciclo (energia dissipada) com o aumento das cargas aplicadas. De uma maneira geral nota-se que há uma diminuição da inclinação do ciclo com relação ao eixo principal conforme se aumenta a solitação. Este efeito, de certa forma, evidencia a característica viscoelástica do material polimérico em questão.

A superposição dos ciclos mostra de forma qualitativa o comportamento do amortecedor ao variar-se as condições de operação. Posteriormente avaliar-se-á o fator de perda e a rigidez em função da frequência e carga aplicada.

- **Fator de Perda e Rigidez do Amortecedor**

Dos ciclos abordados anteriormente, calcula-se a área individualmente através do método dos trapézios de integração e da rigidez obtida a partir da reta ajustada à elipse pelo método dos mínimos quadrados. O fator de perda é dado por

$$\eta = \frac{D}{2\pi U} \quad (7.1)$$

$$U = \frac{\kappa x_o^2}{2} \quad (7.2)$$

onde κ é a constante da mola do amortecedor obtida da inclinação do ciclo de histerese e x_o é a amplitude do deslocamento. A seguir apresenta a variação do fator de perda em função da frequência e da carga aplicada.

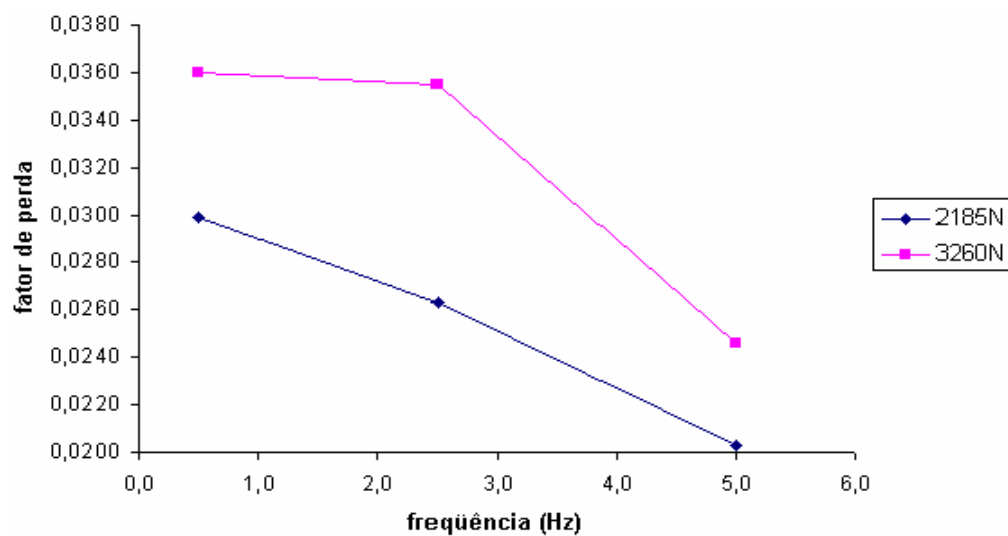


Gráfico 7.10: Variação do fator de perda em função da frequência

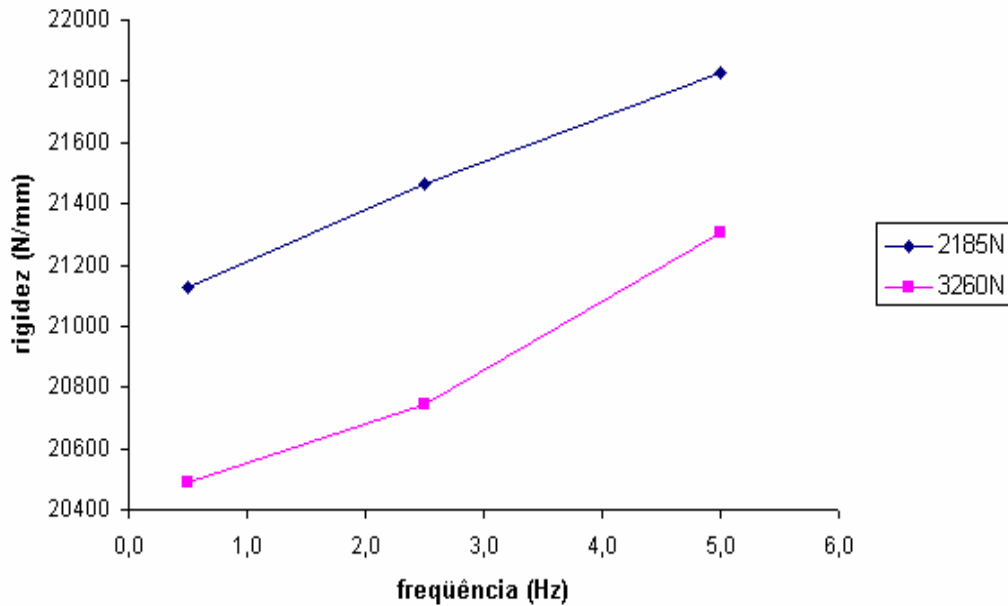


Gráfico 7.11: Variação da rigidez em função da frequência

Da análise do gráfico 7.10 percebe-se uma diminuição do fator de perda a medida que aumenta a frequência para cargas de aplicação situadas no regime linear do polímero. Para cargas superiores ao limite elástico, percebe-se também uma diminuição do mesmo, porém menos significativa que a anterior para frequências mais baixas, não modificando seu resultado para frequências mais elevadas. Outro aspecto importante desta análise parte do princípio que a medida que aumenta-se a carga aplicada no ensaio ocorre um aumento significativo do fator de perda. Neste caso avalia-se um aumento da ordem de 20 %. Com relação à rigidez, observa-se um aumento da mesma em função do aumento da frequência em uma relação aproximadamente linear. A relação entre este comportamento para cargas aplicadas mais elevadas em relação a cargas mais baixas não difere substancialmente.

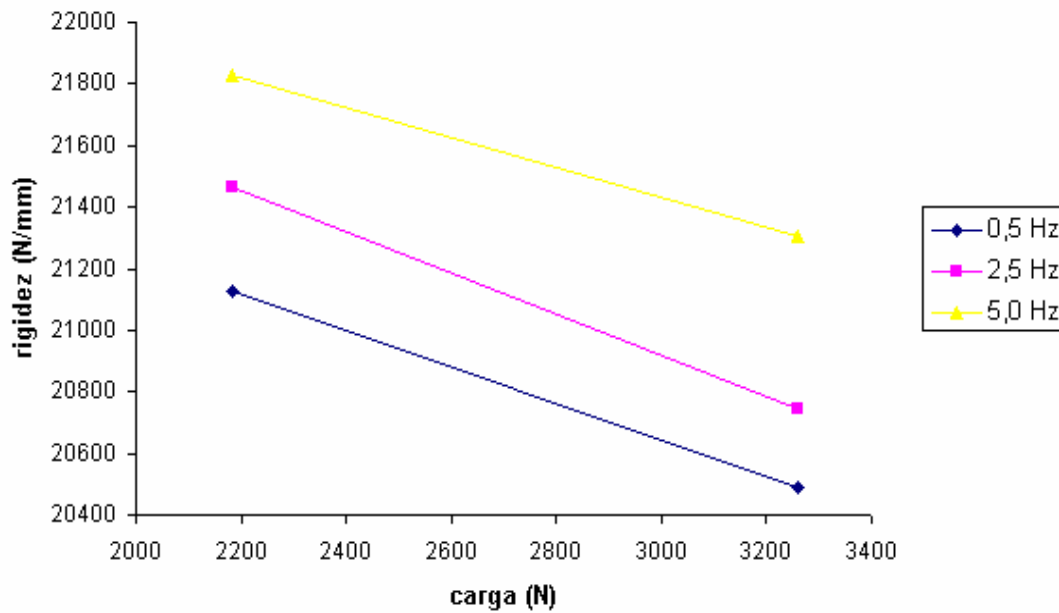


Gráfico 7.12: Variação da rigidez em função da carga aplicada

Do gráfico 7.12, percebe-se uma diminuição da rigidez em função de um aumento de carga. Esta conclusão é bastante importante visto que no trecho correspondente às solicitações mais elevadas já existente uma visual plastificação do elemento plástico. Desta forma o resultado apresentando condiz com o esperado.

Tabela 7.1: Dados do Ensaio do Modelo CIS

Carga (N)	Frequência (Hz)	P (N)	xo (mm)	K (N/mm)	W (N.mm)	D (N.mm)	η	η (%)
2185	0,5	2184,559	0,103	21126,388	112,946	21,205	0,030	2,99
2185	2,5	2174,320	0,101	21464,672	110,127	18,169	0,026	2,63
2185	5,0	2194,469	0,101	21829,103	110,304	14,104	0,020	2,03
3260	0,5	3259,874	0,159	20489,081	259,328	58,610	0,036	3,60
3260	2,5	3251,849	0,157	20745,671	254,861	56,928	0,036	3,55
3260	5,0	3325,414	0,156	21302,680	259,554	40,174	0,025	2,46

Resumidamente pode-se dizer que, para este modelo, houve um decréscimo da rigidez com um aumento da carga aplicada. Com relação ao fator de perda, o mesmo decresce com o aumento da frequência e aumentou com valores de solicitações mais elevados. Isso nos leva a concluir que há uma maior dissipação de energia no trecho plástico do diagrama tensão x deformação do polímero. Deste modo, evidencia-se que a variação da rigidez foi maior que a variação da área do ciclo de histerese.

Tabela 7.2: Fator de Perda e Rigidez em função da frequência para o Modelo CIS

Fator de Perda e Rigidez (N/mm)					
Frequência (Hz)		0,5	2,5	5,0	
Carga (N)	2185	η	0,0299	0,0263	0,0203
		K	21126	21465	21829
	3260	η	0,0360	0,0355	0,0246
		K	20489	20746	21303

7.2.2. Ciclos de Histerese Do Modelo AXL

De uma maneira análoga ao que fora executado ao Modelo CIS, neste item far-se-á uma análise das propriedades deste modelo frente às solicitações aplicadas.

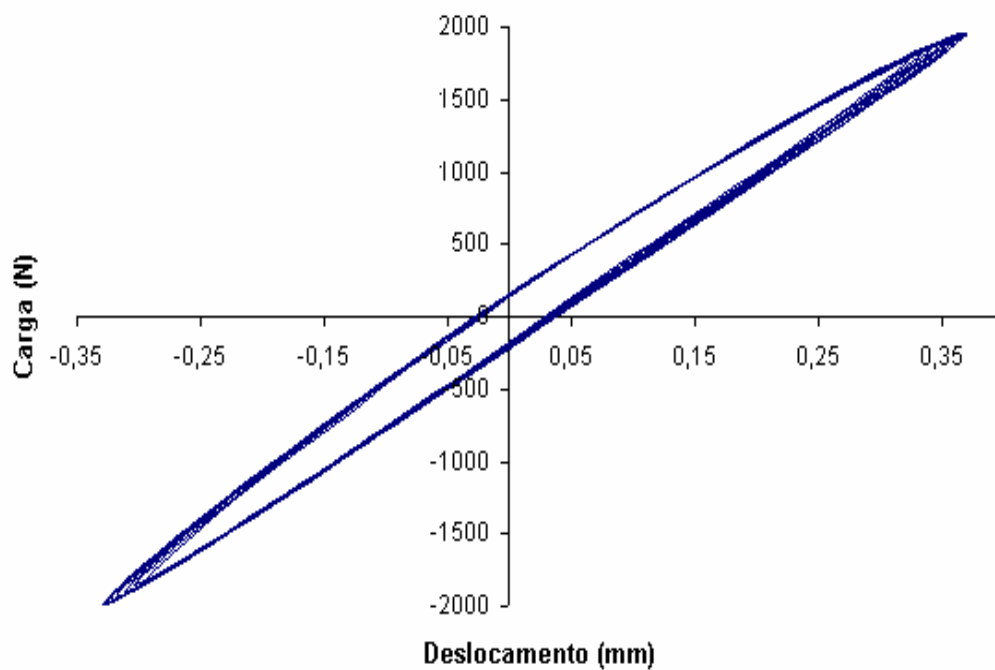


Gráfico 7.13: Ciclos de Histerese Do Modelo AXL para 2000N 5,0 Hz

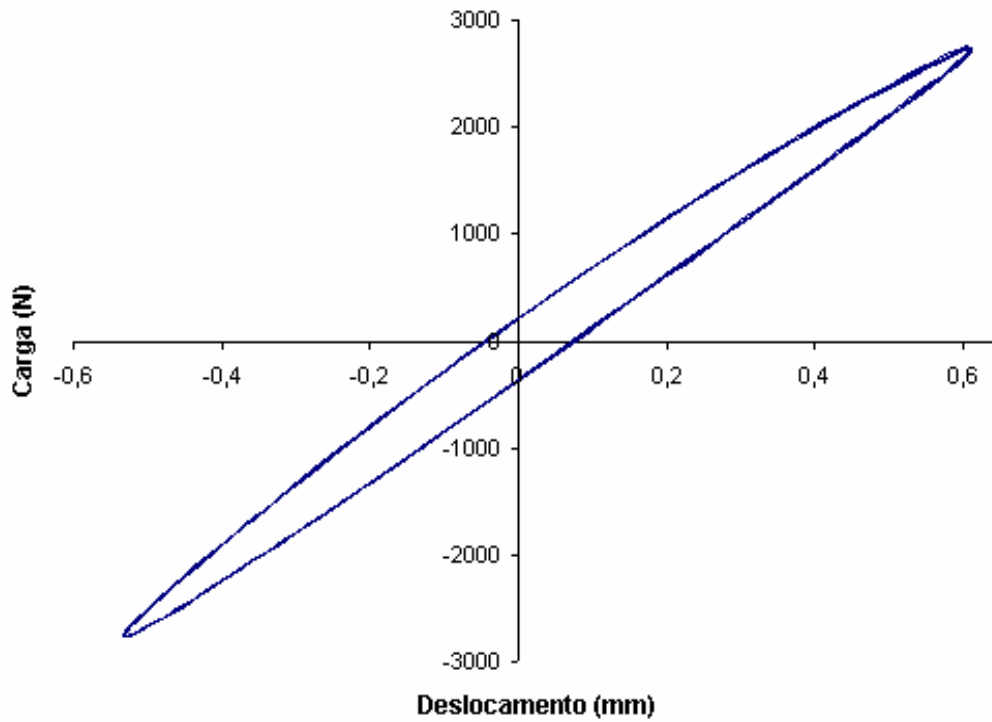


Gráfico 7.14: Ciclos de Histerese Do Modelo AXL para 2750N 2,0 Hz

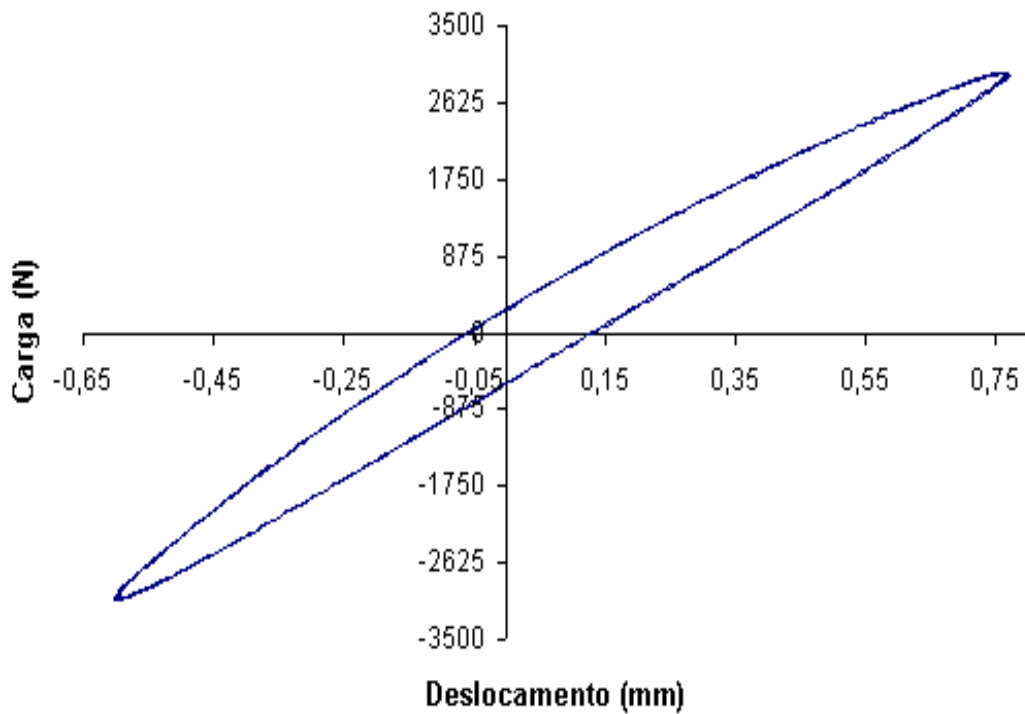


Gráfico 7.15: Grupo Ciclos de Histerese do Modelo AXL para 3000N 0,5 Hz

De acordo com os resultados dos gráficos 7.13, 7.14 e 7.15, pode-se verificar que o comportamento do ciclo é bastante similar ao apresentado pelo dissipador por cisalhamento.

No entanto, a área do diagrama de histerese é bem mais significativa que a anterior é sem dúvida deve conferir uma maior energia dissipada.

A seguir procede-se a análise da superposição dos ciclos do dissipador em questão.

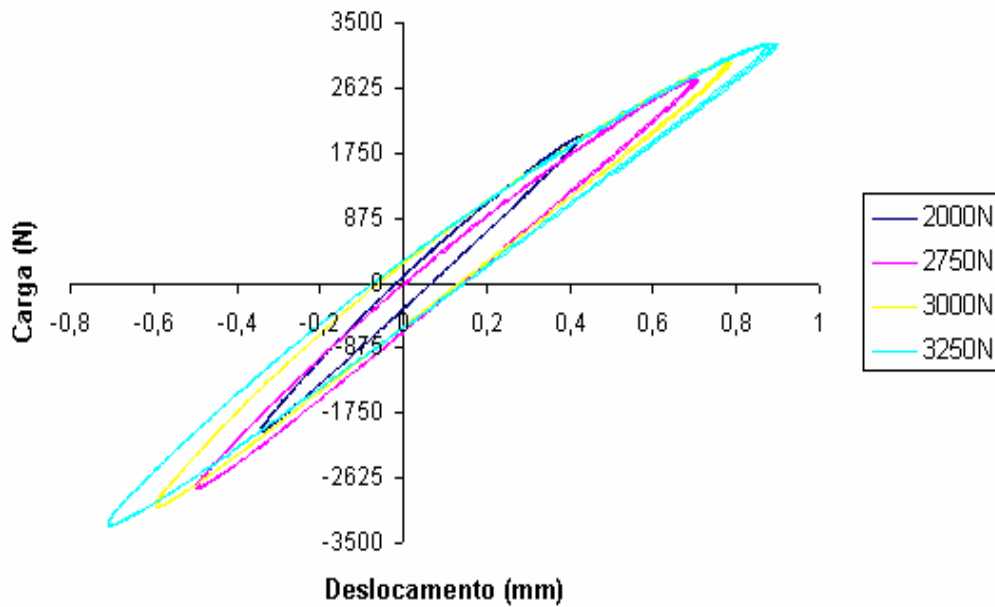


Gráfico 7.16: Superposição de Ciclos de Histerese Do Modelo AXL para 0,5Hz

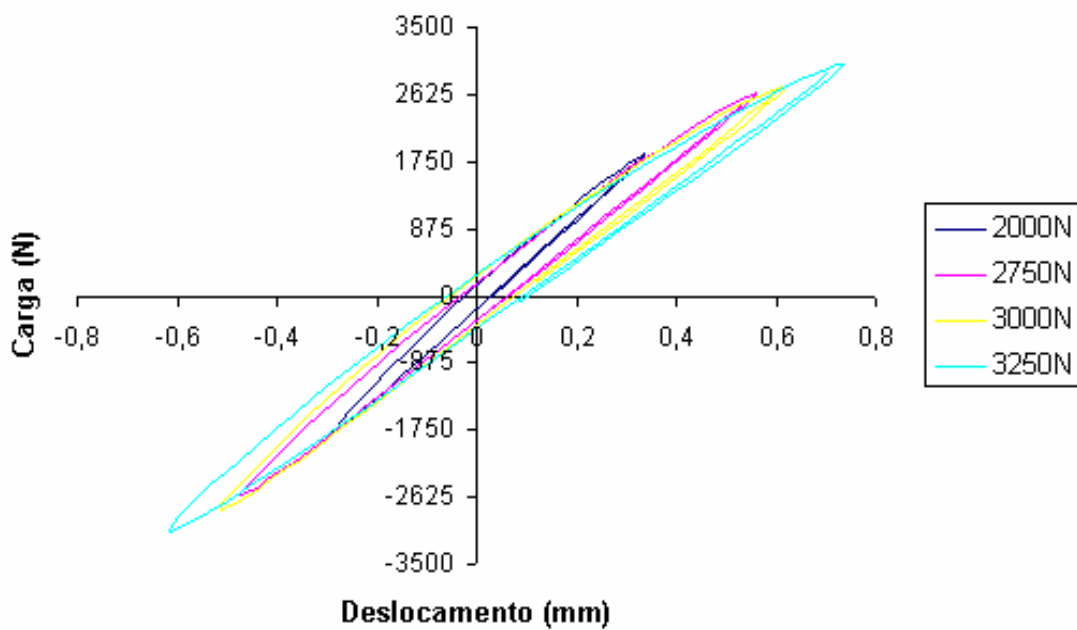


Gráfico 7.17: Superposição dos Ciclos de Histerese Do Modelo AXL para 5,0 Hz

Diferentemente do ocorrido no dissipador por cisalhamento, neste modelo percebe-se uma variação considerável na rigidez em função do aumento das solicitações conforme os gráficos 7.16 e 7.17. Há de se salientar que de um modo geral, as características apresentadas no modelo anterior também são verificadas neste. Há um aumento da área do ciclo com uma variação positiva da carga aplicada e uma conseqüente diminuição da rigidez. No entanto neste modelo, observam-se resultados bem mais significativos em termos de deslocamentos e rigidezes em relação ao modelo anterior. Assim, acredita-se que este modelo possua melhor aplicabilidade.

• 9.2.2.1 Fator de Perda e Rigidez do Amortecedor

Analogamente ao modelo anterior tem-se a resposta deste modelo em termos de fator de perda e rigidez.

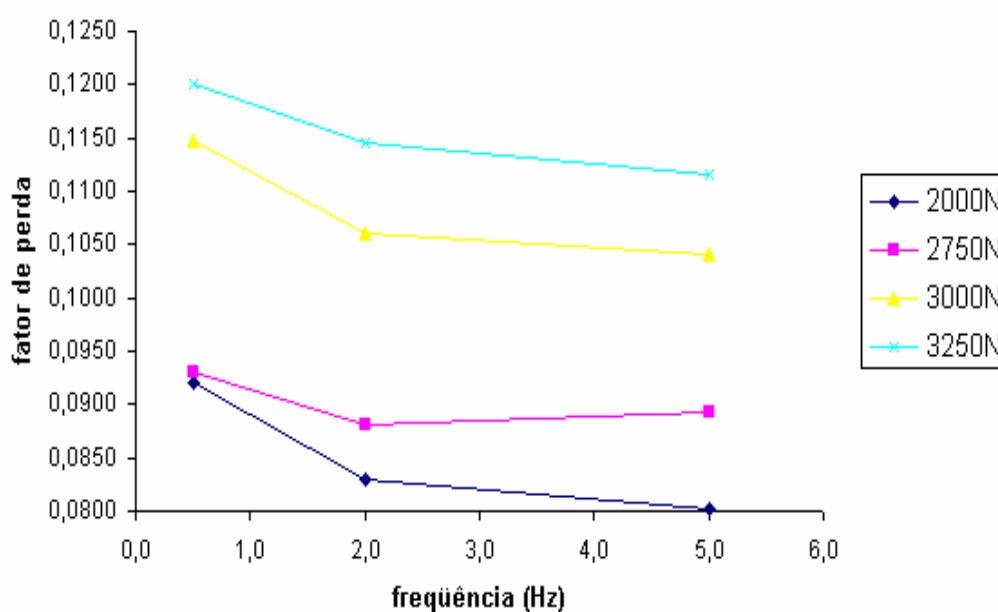


Gráfico 7.18: Variação do Fator de Perda em função da frequência para o Modelo AXL

Pode-se observar baseado no gráfico 7.18 que, há uma diminuição do fator de perda com o aumento da frequência.

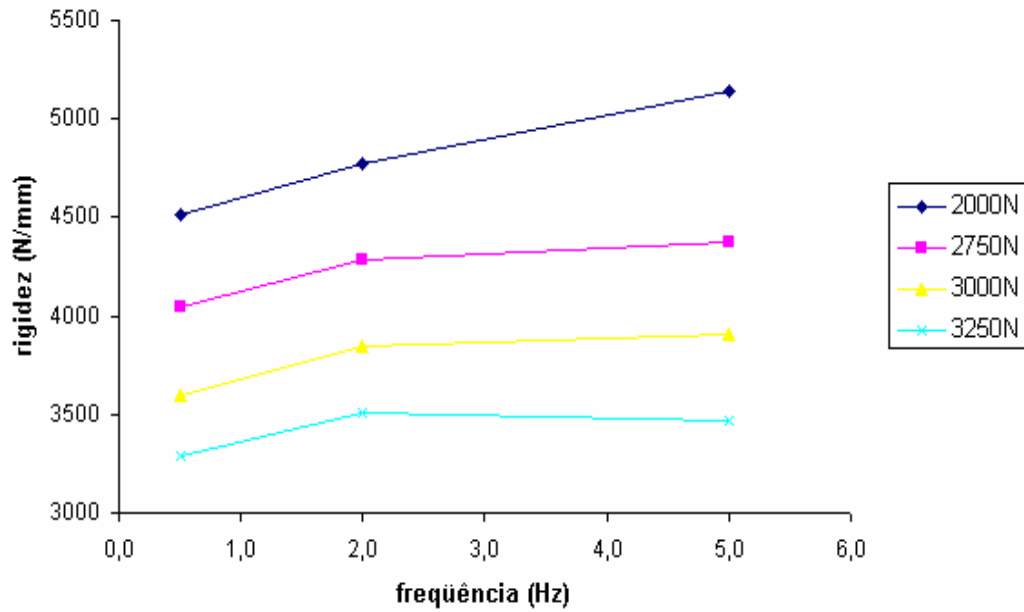


Gráfico 7.19: Variação Rigidez em função da frequência para o Modelo AXL

O gráfico 7.19 é bastante similar ao 7.11 onde se observa o aumento da rigidez em função da frequência. Há um aumento mais significativa pra valores menores da frequência, diminuindo sua inclinação para valores mais elevados.

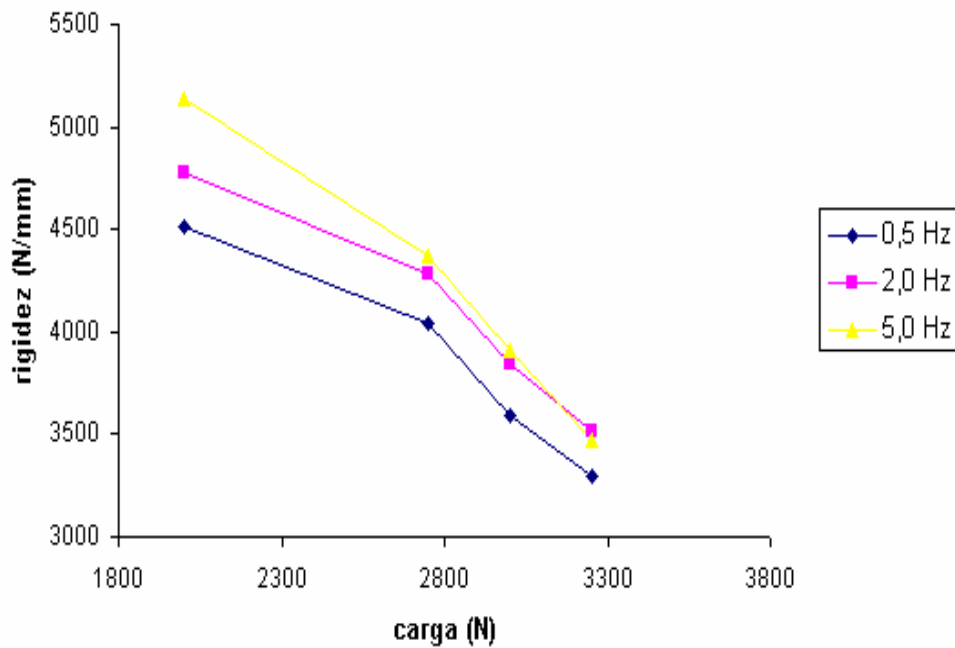


Gráfico 7.20: Variação da Rigidez em função da carga aplicada para o Modelo AXL

Os dados fornecidos pelo gráfico 7.20 são muito importantes, visto que avaliam a variação da rigidez frente à carga aplicada. Baseado nele pode-se verificar que há uma redução da rigidez para todas as frequências analisadas nos ensaios, sendo mais significativa para solicitações superiores a 2800N. Este último representa o trecho onde se verifica o início do comportamento não linear do material, o que seria definido como viscoelasticidade não linear.

Tabela 7.3: Fator de Perda e Rigidez em função da frequência para o Modelo AXL

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

Logo, após a análise dos dados apresentados acima para ambos os dissipadores, pode-se concluir que o amortecedor por esforços axiais apresenta resultados bem melhores que o modelo que dissipa energia por cisalhamento. Verifica-se que o fator de perda é bem superior neste segundo modelo, o que representa uma melhor aplicabilidade para dissipação de energia em estruturas (aproximadamente 400% superior) apresentando ciclos de histerese mais efetivos.

A seguir apresentar-se-á uma análise de uma estrutura real com a incorporação destes elementos dissipadores e verificar-se-á numericamente sua influência na redução de efeitos vibratórios da estrutura.

8. ANÁLISE DE UMA TORRE TRELIÇADA

8.1. INTRODUÇÃO

Torres de transmissão de energia de grande capacidade são estruturas esbeltas e portanto susceptíveis de sofrer efeitos dinâmicos. Entre as alternativas de dissipação de energia encontram-se aquelas que controlam a resposta dinâmica mediante a instalação de dissipadores de energia externos ao sistema, tais como os amortecedores apresentados neste trabalho.

Neste capítulo realiza-se uma análise dinâmica de uma torre metálica de linha de transmissão de 82 m de altura danificada no Japão durante um tufão em 1991. Primeiramente analisa-se a torre de acordo com seu amortecimento próprio. Neste caso, será considerada a estrutura sem amortecimento externo e com 0,5% próprio e por fim com 1,0%. A seguir serão incorporados a estrutura os dissipadores por tensões axiais e verificar-se-á sua influência nos resultados em termos de deslocamentos no topo da estrutura. O fato de considerar-se apenas este modelo provém do fato que o mesmo apresenta melhores resultados frente ao modelo por cisalhamento.

8.2. TORRE METÁLICA

Conforme já mencionado anteriormente apresenta-se a seguir algumas das propriedades inerentes da estrutura em questão. As demais características da mesma pode ser obtida através de Murotsu *et al.* Na figura 8.1 apresenta-se o perfil da torre e na tabela 8.1 são dadas as propriedades dinâmicas da mesma.

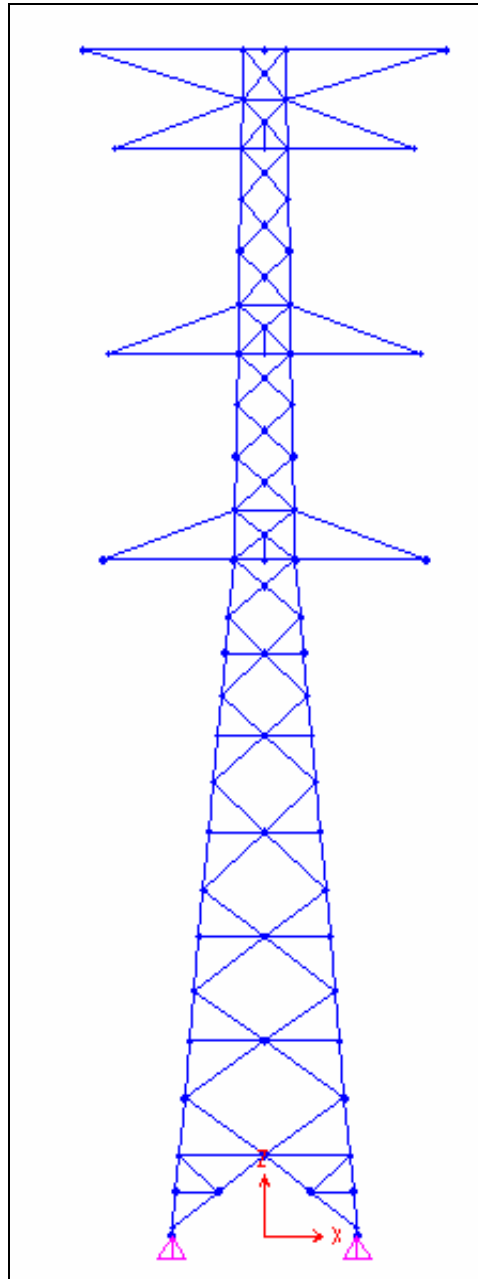


Figura 8.1: Perfil da Torre Danificada no Japão em 1991

Tabela 8.1: Freqüências Naturais da Estrutura

Freqüências Naturais (Hz)	1º modo	2º modo	3º modo	4º modo	5º modo
	1,034	2,724	4,376	7,022	8,681

8.3. AMORTECIMENTO NATURAL E CARGA APLICADA

De modo a aumentar o número de informações referentes ao desempenho do dissipador a ser instalado na torre, serão considerados diversos valores de amortecimento natural da estrutura. Normalmente para uma torre deste tipo considera-se aproximadamente 1% para este amortecimento natural. No entanto será avaliada a influência do dissipador considerando outros valores para este amortecimento que são 0%, 0,5% e 1,0%.

Avaliando a carga a ser aplicada na análise numérica, será avaliada conforme é normalmente feito em ensaios de torres de acordo com Riera *et al* e Kemper *et al*. As solicitações serão aplicadas no topo da estrutura.

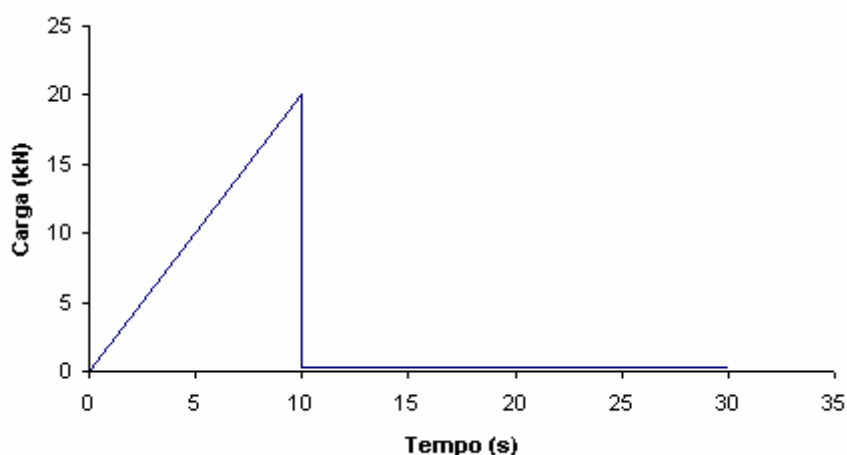


Gráfico 8.1: Carga Aplicada no Topo da Torre

8.4. DISCRETIZAÇÃO DO AMORTECEDOR

Para a incorporação dos resultados obtidos nos ensaios deve-se neste momento realizar o projeto do dissipador, o que compreende seções transversais entre outras condicionantes envolvidas no mesmo. Deste modo necessita-se conhecer os valores das solicitações nas diagonais onde serão incorporados os dissipadores. Com isso projetar-se-á um dissipador para o maior valor de carga das diagonais para as solicitações empregadas no gráfico 8.1.

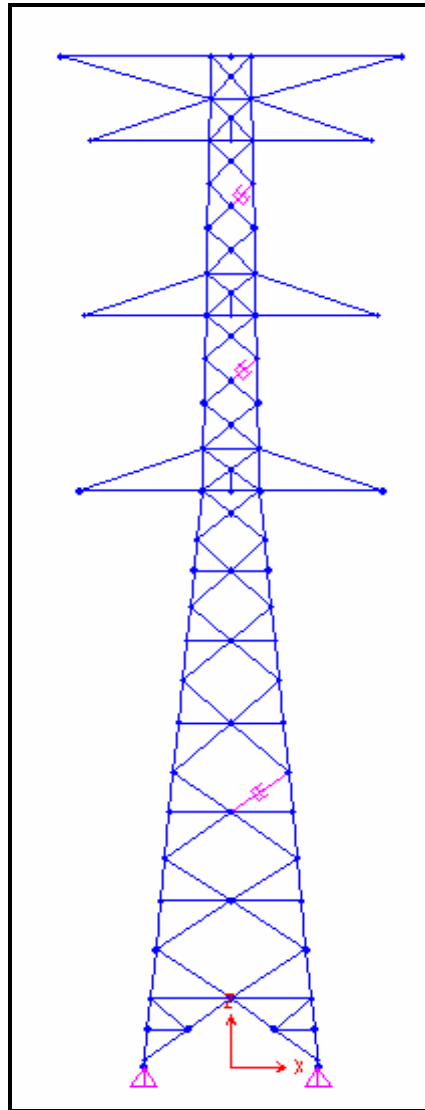


Figura 8.2: Posição de Incorporação dos Dissipadores

A posição dos dissipadores foi realizada conforme Miguel *et al.*

Tabela 8.2: Cargas Nas Diagonais

Diagonal	Carga A (N)
Inferior	3482
Intermediária	11200
Superior	12566

Baseado nas informações providas dos ensaios e de acordo com o valor da frequência natural da estrutura (em torno de 1%) dimensionam-se as seções transversais dos elementos poliméricos para a faixa de frequências em torno da apresentada pelo modo fundamental da

estrutura analisada. Dessa forma, tem-se $75,6 \text{ mm}^2$ para a seção transversal da diagonal inferior, $243,5 \text{ mm}^2$ para a diagonal intermediária e $273,2 \text{ mm}^2$ para a diagonal superior. Para a entrada de dados no software específico para análise da estrutura introduziu-se a relação tensão deformação do material sem a necessidade de especificação de amortecimento e rigidez equivalente.

8.5. RESULTADOS

Conforme já apresentado, inicialmente será analisada a influência dos dissipadores na estrutura considerando nulo o amortecimento natural da mesma, de acordo com o gráfico 8.2.

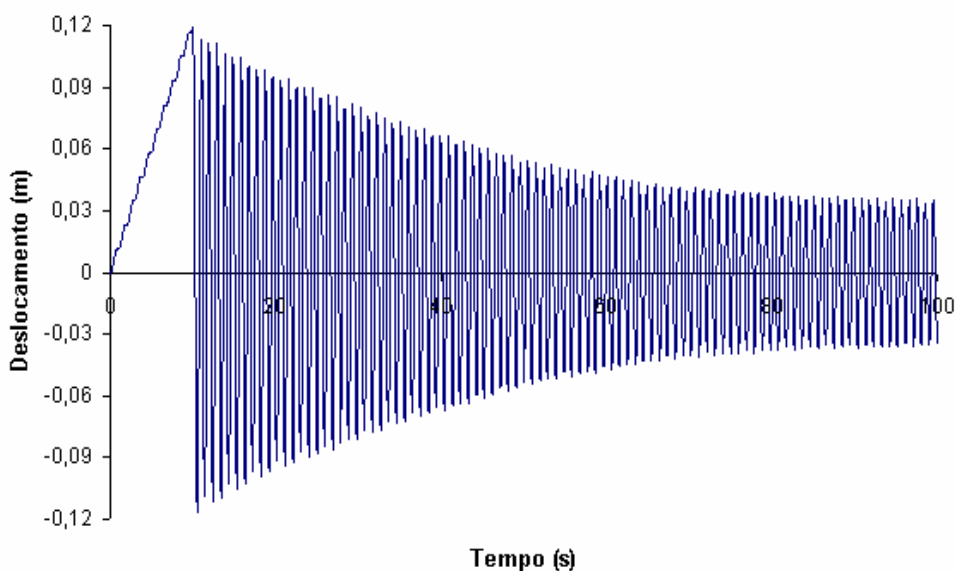


Gráfico 8.2: Resposta no Topo Com Uso dos Dissipadores Para Amortecimento Natural Inexistente.

Pode-se verificar que, para o trecho inicial ocorre a maior dissipação de energia devido ao comportamento viscoelástico não linear do dissipador. Após este a resposta passa a ser constante visto que para a solicitação em questão passa a produzir efeitos de linearidade no material. Assim, a energia deixa de ser dissipada a partir de aproximadamente 80 segundos. Segundo o método do decremento logarítmico foi possível avaliar a razão de amortecimento

crítico em 0,82%. Prosseguindo com a análise, considera-se um amortecimento natural de 0,50% para a torre.

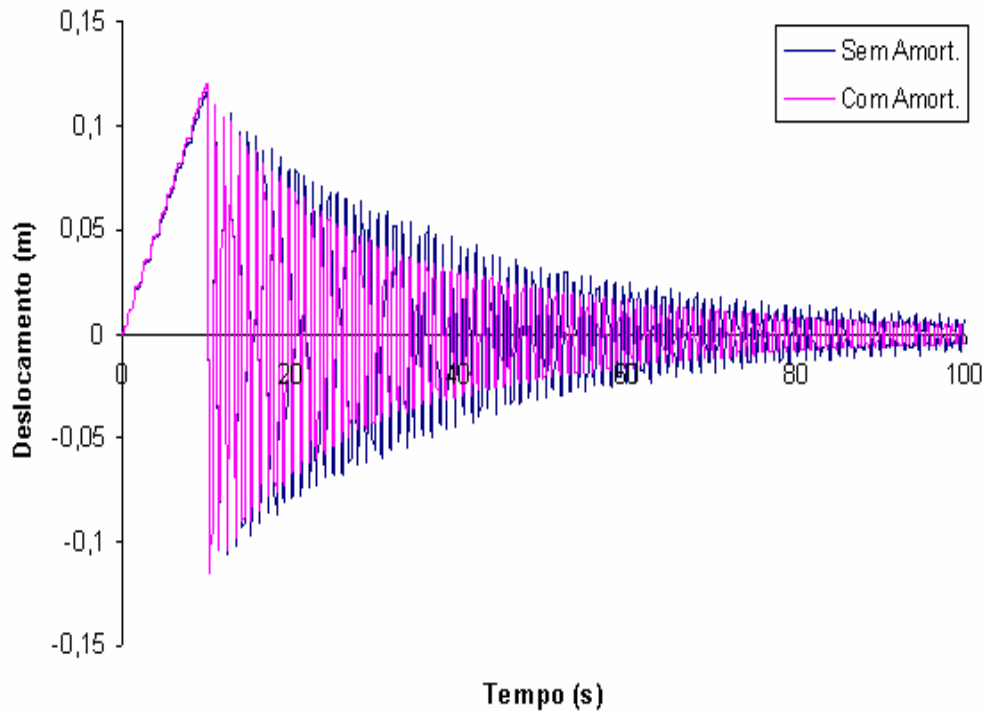


Gráfico 8.3: Resposta no Topo Com Uso dos Dissipadores Para Amortecimento Natural 0,50%.

Neste caso pode-se observar uma forte influência dos dissipadores no trecho inicial onde as cargas aplicadas são maiores. Para valores de solicitações inferiores observa-se o “encaminhamento” da resposta bastante similar ao modelo sem a incorporação dos dissipadores. Avalia-se uma razão de amortecimento crítico de 1,33%, um acréscimo de 0,83 % com relação ao amortecimento natural de 0,50%, o que resulta em um aumento percentual de 166% na razão de amortecimento da estrutura.

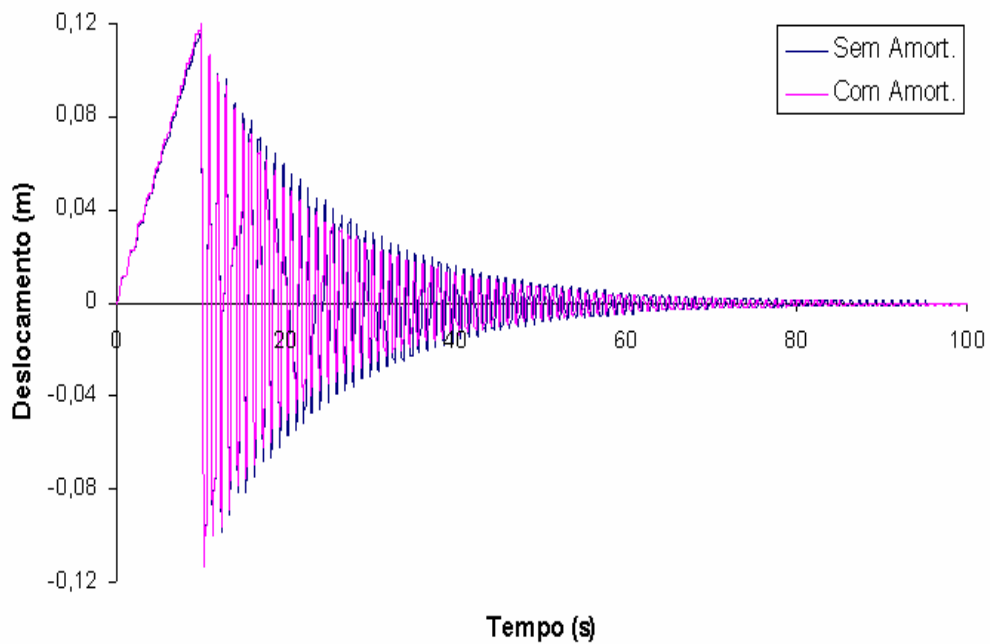


Gráfico 8.4: Resposta no Topo Com Uso dos Dissipadores Para Amortecimento Natural 1,00%.

O comportamento apresentado no gráfico 8.4 é bastante similar ao demonstrado no gráfico 8.2 e 8.3. A razão de amortecimento crítico é de 1,84%. Isso representa um aumento percentual de 84 %. De uma forma representativa tem-se a tabela 8.3.

Tabela 8.3: Ganhos na razão de amortecimento em função da incorporação dos dissipadores poliméricos

Amortecimento Próprio (%)	Amortecimento Suplementar (%)	Aumento Percentual (%)
0,00	0,82	*
0,50	1,33	166
1,00	1,84	84

9. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se experimentalmente o comportamento de amortecedores construídos com materiais viscoelásticos sob uma oscilação harmônica cíclica, de onde se obtiveram informações referentes a eficiência do mesmo. Estes parâmetros podem ser definidas como o fator de perda e a alteração da rigidez dos dissipadores confeccionados com termoplásticos. Alterações de frequência e carregamento aplicado foram preferidas e de modo a obter-se o melhor desempenho do amortecedor. O comportamento do material relativo a tensões e deformações foi uma das condicionantes que apresentaram maior dificuldade visto que o mesmo apresenta uma variabilidade grande no seu módulo de elasticidade entre as amostras coletadas o que induziu a necessidade da realização de um ensaio para determinar confiavelmente suas propriedades.

Outro ponto importante a salientar é a construção de um modelo rígido para concentrar a dissipação de energia no polímero unicamente, a qual pode ser afirmativamente comprovada nos modelos construídos. Efeitos de flambagem foram considerados e isto induziu a adoção de medidas que impedissem o aparecimento do mesmo, condizentes com os resultados obtidos.

Uma vantagem na adoção dos polímeros termoplásticos para a finalidade de dissipação de energia provém do fato de que o custo de construção dos mesmos é relativamente baixo se comparado aos dissipadores metálicos e por atrito. O processo de fabricação é bastante simples e rápido e o custo dos materiais é bastante baixo, não necessitando de mão de obra especializada e a produção dos mesmos pode ser feita em larga escala.

Nos amortecedores testados, para o modelo CIS onde a dissipação de energia foi supostamente definida a partir de esforços de cisalhamento no material, primeiramente houve uma redução da rigidez em aproximadamente 3% e aumento do fator de perda de em média 20% quando se aumentou a carga de 2185N para 3260N. Assim a alteração do comportamento do mesmo com relação à rigidez, para as cargas definidas nos ensaios, não foi significativa. Já com relação ao fator de perda, houve uma alteração bem mais significativa visto que seu índice aumentou substancialmente. Mesmo assim, como o fator de perda já

apresentava valores baixos, este aumento adicional não apresenta grande contribuição à dissipação de energia em estruturas visto à grande alteração da carga aplicada para isto. Já para o modelo AXL, onde o amortecimento era dado através dos esforços axiais no material, houve uma redução de rigidez de aproximadamente 25% e aumento do fator de perda em média de 30%. Diferentemente do modelo CIS, neste caso as alterações nos índices de fator de perda e rigidez são bem mais significativas visto que os valores das áreas dos ciclos de histerese são bem superiores. Com isso, o fator de perda se altera de aproximadamente 0,009, para faixas de solicitações mais baixas, para 0,012 para as mais altas. Por outro lado, a rigidez diminui de 5000 N/mm para 3500 N/mm. Esta conclusão é muito importante logo que confirma o estado do comportamento do material que nestes valores últimos de rigidez define-se como viscoelástico não linear. De uma maneira geral, pode-se dizer que a alteração na frequência para ambos os modelos, CIS e AXL, não apresentaram distorções. Isso significa dizer que, dentro das faixas de frequências analisadas a sua resposta foi homogênea, (com relação a fator de perda e rigidez) logicamente que, variando seus índices em função das magnitudes das frequências.

Na análise da estrutura treliçada incorporada do modelo de dissipação de energia AXL, em geral houve um aumento adicional de 0,0082 na razão amortecimento crítico da mesma indiferente do valor adotado para o amortecimento próprio da estrutura. Com isso se pode concluir que, caso haja estruturas aparentemente sem amortecimento, a incorporação dos dissipadores propostos neste trabalho ocasionaria um adicional de 0,82% nesta grandeza. Por exemplo, para torres treliçadas com amortecimento de 0,5%, este passaria a 1,33% o que denota um aumento de 166%. No entanto, para estruturas com amortecimento natural mais elevado, a eficiência do dissipador proposto cairia de modo a tornar-se cada vez menos efetiva com o aumento do amortecimento próprio da mesma. Retomando a relação entre estes dissipadores com os metálicos ou por atrito, um ponto negativo dos amortecedores viscoelásticos seria uma menor eficiência se comparados aos anteriores. Enquanto que amortecedores por atrito conferem razões de amortecimento crítico em torno de 5,0%, e amortecedores metálicos conferem em torno de 3,5%, amortecedores viscoelásticos, em particular os poliméricos termoplásticos apresentados neste trabalho, conferem um aumento de 0,82%. As vantagens no uso dos polímeros com função de amortecimento estrutural advém da facilidade de sua montagem e emprego nas estruturas conforme já descrito anteriormente.

Em termos de sugestões futuras, se poderia testar a incorporação dos diferentes dissipadores aqui analisados em modelos reduzidos. Com isso se avaliaria experimentalmente a influência dos mesmos em contato com as particularidades do modelo reduzido, fato que neste trabalho não foi considerado. Para finalizar, o conhecimento do comportamento da estrutura e do dissipador são de fundamental importância no eficaz controle vibrações e isso é imprescindível na confecção de um eficiente projeto e construção do dissipador.

10.BIBLIOGRAFIA

Aseka, E. H., “*Projeto, Construção e Determinação de Propriedades de Amortecedor Visco elástico para Uso em Estruturas*”, Porto Alegre, 94 pág. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS

Aseka E. H., Riera, J. D. “*Sobre as Propriedades de Amortecedores Viscoelásticos*”, In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, maio,2002.

Crawford, R. J., “*Plastics Engineering*”, 2^a ed. Pergamon Press, 1989.

Curadelli, R. O., “*Dissipação de Energia Através de Dispositivos Metálicos*”, Tese de Doutorado, PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.2003.

Hendrix, Ch. F., “*Durable and sustainable construction materials*” ,Aeneas, The Netherlands, 2000.

Jones, D., “*A Reduced-Temperature Nomogram Characterization of Damping Materials Behavior*”, Shock And Vibrating Bull., vol. 48(2), pp 13-22.

Kervin Jr.,E.M. “*Damping of Flexural Waves by a Constrained Viscoelastic Layer*”, Jornal Of Acoustical Society Of America, vol.31, n° 7, pp. 952-962,1959.

Mano, E. B., “*Polímeros Como Materiais de Engenharia*”, 2^a ed. Editora Edgard Blücher, 1991.

Mahmoodi, P. “*Structural Dampers*”, ASCE – Journal of Structural Division, vol. 95, n°. ST8, pp. 1661-1672, Aug.1969.

Mahmoodi, P., Keel, C. J. “*Method od Damped Energy Calculation for a Multilayer Viscoelastic (V. E.) Damper*”, Wind Engineering Industry Aerodynamic, n°.36, pp. 749-756,1990.

Miguel, L. F.,“*Estudo Teórico e Experimental de Amortecedores de Vibração Por Atrito*”, Dissertação de Mestrado, CPGEC – 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.

Mills, N. J., “*Plastics: Microstructure, Properties and Applications*”, 2^a-ed. Halsted Press, 1993.

Murotsu, Y.; Okada, H.; Shao, S., “*Reliability- Based Design of Transmission Line Structures Under Extreme Wind Loads*”, Structura Safe & Reliability, Balkema, Rotterdam, pp.1675-1681, 1994.

Ross, D., Ungar, E. E., Kerin Jr., E. M. “*Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of a Viscoelastic Layer*”, Structural Damping, ASME, pp.49-99, New York, USA, 1959.

SAP2000-*Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*. Versão 7.0 e 8.3.3. Berkeley, California, USA.

Squenel, E. C., “*Sobre o Comportamento Estrutural dos Termoplásticos*”. São Carlos, 84 pág. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos.

Soong, T. T.; Darguch, G. F., “*Passive Energy Dissipation Systems In Structural Engineering*”, John Wiley & Sons, Chichester, Great Britain, 1997.

Tezcan, S. S.; Uluca. O., “*Reduction of Earthquake Response of Plane Frame Buildings by Viscoelastic Dampers*”, Engineering Structures, 25, pp. 1755-1761, 2003.

Trantina, G. G. Nimmer, R., “*Structural Analysis of Thermoplastic Components*”, 1^a ed. Mc Graw-Hill, 1994.

Vasconcellos, R. P. de, “*Controle Dinâmico Estrutural via Mecanismos Viscoelásticos*”. Rio de Janeiro, 253 pág. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ.2003.