



MECANISMOS DE CONTROLE DINÂMICO ESTRUTURAL POR MEIO DE
MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Redescar José Virel Rivero

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Michèle Schubert Pfeil
Ronaldo Carvalho Battista

Rio de Janeiro
Março de 2018

MECANISMOS DE CONTROLE DINÂMICO ESTRUTURAL POR MEIO DE
MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Redescar José Virel Rivero

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof^a. Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D.

Prof^a. Eliane Maria Lopes Carvalho, D.Sc.

Prof. Paulo Batista Gonçalves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Rivero, Redescar José Virel

Mecanismos de controle dinâmico estrutural por meio de modelagem computacional de materiais viscoelásticos / Redescar José Virel Rivero. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XII, 76 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Michèle Shubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 73-76.

1. Controle de vibrações. 2. Análise Dinâmica. 3. Modelagem numérica. I. Pfeil, Michèle Schubert *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Para Venezuela,
una tierra de gente grande y emprendora,
la misma que algún día recuperaremos con esfuerzo y voluntad.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Brasil por abrir as suas portas e permitir que eu, junto a outros colegas latino-americanos, pudéssemos desenvolver nossa pesquisa em uma nação que desde o início, tem demonstrado um clima receptivo conosco.

Aos meus pais, Marisela e Redescar, pelo apoio continuo demonstrado ao longo desses dois anos, distantes fisicamente mas sempre presentes no meu coração. Essa conquista é deles também.

Aos meus orientadores, a professora Michèle e o professor Ronaldo, pelo ensino continuo e a paciência que sempre tiveram comigo.

À minha companheira Yasmim, por fazer da minha estadia no Brasil uma experiência maravilhosa, e por sempre me fazer acreditar na minha modesta capacidade para desenvolver este trabalho.

À minha cuate e camarada Ana Camacho, pela sua amizade e autenticidade, eternamente agradecido.

Aos meus colegas de mestrado, em especial ao Gustavo, Alfredo, João, André e Isis, pelos momentos compartilhados juntos, longe das nossas famílias, criando a nossa própria.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Para finalizar, um agradecimento especial à minha tia Aura Rivero, quem desde o céu continua guiando meus passos, e quem estou seguro comemora junto aos anjos essa nossa vitória.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MECANISMOS DE CONTROLE DINÂMICO ESTRUTURAL POR MEIO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Redescar José Virel Rivero

Março/2018

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil
Ronaldo Carvalho Battista

Programa: Engenharia Civil

Estruturas situadas em regiões de ocorrência de ventos e terremotos com considerável grau de severidade têm um histórico de registros de danos materiais, perda da capacidade de utilização em serviço e perda parcial ou total da estabilidade. Estruturas esbeltas e flexíveis são, em geral, susceptíveis às forças induzidas pela ação do vento, enquanto estruturas de variados tipos são afetadas pela ação sísmica que, quando de grande magnitude, pode até mesmo leva-las ao colapso. Argumenta-se que as causas do mau comportamento e da deficiência da estabilidade estrutural resultam, principalmente, dos lapsos cometidos no projeto em face da complexidade e da dificuldade de entendimento dos fenômenos aerodinâmicos e sísmicos. Essas dificuldades podem ser contornadas com o emprego de dispositivos de controle dinâmico, especialmente desenvolvidos em cada caso, para redução das amplitudes de resposta da estrutura às forças geradas por essas ações da natureza. Neste trabalho a solução para esses problemas é estudada com auxílio da modelagem matemático-numérica de estruturas laminadas e dispositivos amortecedores compostos por camadas de material convencional e viscoelástico. O desempenho dinâmico-estrutural é demonstrado por meio da comparação das amplitudes de resposta dos sistemas controlados e não controlados, enquanto que a validação da ferramenta numérica desenvolvida é feita através da correlação entre os resultados obtidos dos modelos numéricos e de ensaios experimentais para distintos casos exemplo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPUTATIONAL MODELING OF DYNAMIC CONTROL MECHANISMS WITH
VISCOELASTIC MATERIALS

Redescar José Virel Rivero

March/2018

Advisors: Michèle Schubert Pfeil
Ronaldo Carvalho Battista

Department: Civil Engineering

Structures located in regions with a high vulnerability to the occurrence of strong winds and severe earthquakes have history of records of material damages, loss of serviceability and partial or total loss of stability. Slender and flexible structures are, in general, susceptible to wind induced forces, while many types of structures can be affected by seismic action that in some cases may cause structural collapse. It is argued that the main causes of bad behavior and low level of structural stability result mainly from design faults which are related to the complexity and lack of clear understanding of the aerodynamic and seismic phenomena. These difficulties can be overcome with the use of dynamic control devices, specially developed in each case of study, for the reduction of the response amplitudes of structures subjected to the referred environmental actions. In this work, the solution for these problems is studied with the aid of numerical modeling of layered structures and damping mechanisms formed with multilayers of viscoelastic and conventional materials. The structural dynamic performance is demonstrated by comparing the response amplitudes of the controlled and uncontrolled systems, while the validation of the developed numerical tool is made through the correlation between results obtained from the numerical models and experimental tests for several example cases.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	1
1.2 RESUMO HISTÓRICO	3
1.3 APLICAÇÕES.....	6
1.4 OBJETIVOS	13
1.5 ESCOPO DO TRABALHO.....	13
2 DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS	15
2.1 CARATERIZAÇÃO GERAL DE UM MATERIAL VISCOELÁSTICO.....	15
2.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS PARA MODELOS UNIDIMENSIONAIS.....	19
2.3 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS PARA MODELOS BI E TRIDIMENSIONAIS	21
3 MÉTODO DE GOLLA HUGUES PARA MODELAGEM DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS	23
4 PROGRAMA COMPUTACIONAL PEFAMV	26
5 EXEMPLOS DE REFERÊNCIA	34
5.1 ATENUADORES VISCOELÁSTICOS.....	34
5.2 PLACAS SANDUÍCHE	39
5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL VISCOELÁSTICO UTILIZADO....	40
5.2.2 CARACTERÍSTICAS DOS DIFERENTES CASOS ANALISADOS.....	41
5.2.3 METODOLOGIA UTILIZADA NA ANÁLISE DOS TABULEIROS	44
5.2.4 RESULTADOS OBTIDOS NOS DIFERENTES CASOS	46
5.2.5 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAMADA VISCOELÁSTICA NA RESPOSTA ESTRUTURAL.....	68
6 COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS	70
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Componentes principais de uma estrutura sanduíche.....	4
Figura 1-2. Torres do World Trade Center, inauguradas em 1969 (WONG,19-?).	6
Figura 1-3. AVE´s instalados nas torres do WTC (MAHMOODI et al., 1987)	7
Figura 1-4. Localização dos AVE´s nas torres do WTC (MAHMOODI et al., 1987)	7
Figura 1-5. Columbia Center, Seattle, USA (BOAKE, 200-).	8
Figura 1-6. Localização dos amortecedores viscoelásticos no Columbia Center (KEEL e MAHMOODI, 1986).....	9
Figura 1-7. Two Union Square Building, Seattle, USA (BOAKE, 200-).	10
Figura 1-8. Vista geral dos amortecedores instalados no prédio Santa Clara County (BERTERO e WHITTAKER, 1989).	10
Figura 1-9. Amortecedores viscoelásticos acoplados no prédio YC Condos (adaptado de MIRABELLI, 2015).	11
Figura 1-10. Modelo físico do tabuleiro sanduíche testado experimentalmente.	12
Figura 1-11. Densidade espectral da aceleração vertical (BATTISTA e PFEIL, 2000).12	
Figura 2-1. Ângulo de fase entre a tensão e a deformação para um sólido elástico e um fluido viscoso.	16
Figura 2-2. Influência da frequência e temperatura no módulo de armazenamento e módulo de perda para um polímero típico (adaptado de LAZAN, 1968).	19
Figura 3-1. Propriedades mecânico-dinâmicas do material viscoelástico (BARBOSA, 2000).	25
Figura 4-1. Elemento de pórtico espacial (VASCONCELOS, 2003).	26
Figura 4-2. Elemento triangular de placa (VASCONCELOS, 2003).	27
Figura 4-3. Elemento de membrana triangular (VASCONCELOS, 2003).	27
Figura 4-4. Elemento de placa retangular (VASCONCELOS, 2003).	28
Figura 4-5. Amortecimento proporcional de Rayleigh (CLOUGH e PENZIEN,2003). ..	30
Figura 4-6. Esquema de armazenamento da matriz de rigidez do elemento viscoelástico hexaédrico linear.	32
Figura 5-1. Atenuador Viscoelástico (adaptado de MONTGOMERY e CHRISTOPOULOS, 2015).	34
Figura 5-2. Esquema Geral do Atenuador Viscoelástico.	35
Figura 5-3. Variação do módulo de armazenamento e o fator de perda com a frequência.....	36
Figura 5-4. Ciclo de histerese para o AVE (f=0,1Hz).	37
Figura 5-5. Ciclo de histerese para o AVE (f=0,2Hz).	37
Figura 5-6. Ciclo de histerese para o AVE (f=0,3Hz).	38

Figura 5-7. Carregamento de impacto triangular imposto às placas.....	40
Figura 5-8. Propriedades mecânico-dinâmicas do MVE utilizado nas placas sanduíche.	41
Figura 5-9. Geometria da placa simples.....	42
Figura 5-10. Seção Transversal da placa mista. Dimensões em milímetros.	42
Figura 5-11. Seção transversal da placa sanduíche. Dimensões em milímetros.....	43
Figura 5-12. Geometria da placa com duas bordas livres.	43
Figura 5-13. Geometria da placa do quarto caso.	44
Figura 5-14. Geometria da placa do quinto caso.....	45
Figura 5-15. Resposta no domínio do tempo, caso 1.....	47
Figura 5-16. Resposta no domínio da frequência, caso 1.	48
Figura 5-17. Resposta no domínio do tempo, placa mista 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.....	49
Figura 5-18. Resposta no domínio da frequência, placa mista 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.....	50
Figura 5-19. Forma modal associada ao primeiro modo em flexão, caso 2.....	50
Figura 5-20. Comparação da resposta da placa mista e sanduíche, 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.....	51
Figura 5-21. Comparação da resposta no domínio da frequência, 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.....	52
Figura 5-22. Resposta no domínio do tempo, placa mista 6x5m, duas bordas livres, caso 3.....	53
Figura 5-23. Resposta no domínio da frequência, placa mista 6x5m, duas bordas livres, caso 3.....	53
Figura 5-24. Forma modal predominante da placa mista 6x5m, duas bordas livres, caso 3.....	54
Figura 5-25. Comparação da resposta da placa mista e sanduíche, 6x5m, duas bordas livres, caso 3.....	54
Figura 5-26. Comparação da resposta no domínio do tempo no ponto meio da borda livre, caso 3.	55
Figura 5-27. Forma modal em flexo-torção correspondente ao segundo modo (8,5Hz), caso 3.....	56
Figura 5-28. Comparação da resposta no domínio da frequência no centro geométrico da placa, caso 3.....	56
Figura 5-29. Comparação da resposta no domínio da frequência no ponto médio da borda livre, caso 3.	57

Figura 5-30. Representação geral da deformação cisalhante presente nas camadas viscoelásticas.....	57
Figura 5-31. Propriedades mecânico-dinâmicas do MVE alternativo utilizado.....	58
Figura 5-32. Comparação no domínio do tempo da resposta da placa mista e sanduíche, caso 3 com o MVE alternativo.	59
Figura 5-33. Comparação no domínio da frequência da resposta da placa mista e sanduíche, caso 3 com o MVE alternativo.	59
Figura 5-34. Resposta no domínio do tempo da placa mista, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.....	60
Figura 5-35. Formas modais predominantes no caso 4, de esquerda à direita: primeiro, segundo e terceiro modo, respectivamente.	61
Figura 5-36. Resposta no domínio da frequência, Placa mista 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.....	62
Figura 5-37. Comparação da resposta no domínio do tempo da placa mista e sanduíche, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.	62
Figura 5-38. Comparação da resposta no domínio da frequência da placa mista e sanduíche, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.	63
Figura 5-39. Resposta no domínio do tempo da placa mista, 12x5m, duas bordas livres, caso 5.....	64
Figura 5-40. Resposta no domínio da frequência, placa mista 12x5m,	65
Figura 5-41. Formas modais predominantes associadas ao primeiro (esquerda)	65
Figura 5-42. Comparação das respostas da placa mista e sanduíche,	65
Figura 5-43. Propriedades mecânico-dinâmicas do MVE alternativo utilizado, caso 5.....	66
Figura 5-44. Comparação da resposta no domínio do tempo com o uso do MVE alternativo, caso 5.....	67
Figura 5-45. Comparação das respostas no domínio da frequência	67
Figura 5-46. Resposta no domínio do tempo considerando variação de espessuras no tabuleiro de 12x5m com as quatro bordas apoiadas.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Funções de dissipação propostas no domínio de Laplace (adaptada de VASCONCELOS, 2003).	20
Tabela 5-1. Valores experimentais do módulo de armazenamento e fator de perda (Material 3M ISD111).....	35
Tabela 5-2. Parâmetros característicos do material viscoelástico ISD111 via GHM....	36
Tabela 5-3. Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na análise das placas.	39
Tabela 5-4. Parâmetros característicos do MVE via GHM.	40
Tabela 5-5. Frequências naturais de vibração, caso 1.	47
Tabela 5-6. Frequências naturais da placa mista, 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.	49
Tabela 5-7. Frequências naturais da placa mista, 6x5m, duas bordas livres, caso 3. .	52
Tabela 5-8. Parâmetros característicos do MVE alternativo via GHM, caso 3.....	58
Tabela 5-9. Frequências naturais da placa mista, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.....	61
Tabela 5-10. Frequências naturais da placa mista, 12x5m, duas bordas livres, caso 5.	63
Tabela 5-11. Parâmetros característicos do MVE alternativo, caso 5.	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O desenvolvimento tecnológico propiciado pela humanidade permitiu a diversificação industrial e o crescimento das cidades, devido à criação de novas fontes de emprego que foram atraentes para aqueles que moravam em lugares com menor grau de desenvolvimento, e que se mobilizaram na busca de melhores condições de vida.

Esse crescimento, em muitos casos veio acompanhado da construção de novas obras de infraestrutura. Tal o caso de estradas, serviços básicos, vivendas, portos e aeroportos, além das estratégias de inversão comercial na construção de novos prédios para estimular o crescimento económico. A engenharia civil e estrutural na época teve grandes desafios e avanços, devido à construção de prédios cada vez mais altos, com o desenvolvimento de novas técnicas de construção e a utilização de novos materiais ou associações entre os existentes.

O fato de construir prédios mais altos, deixou em evidência dificuldades e problemas que no passado não tinham sido identificados. Prédios altos, esbeltos e flexíveis são, em geral, vulneráveis à ação do vento, a qual pode resultar em amplitudes de oscilações que causam na estrutura esforços adicionais aos esforços devidos a ação da gravidade, além do desconforto causado aos usuários. Para esta classe de edificações, uma outra preocupação dos engenheiros é a resistência estrutural frente a ação de terremotos, particularmente em zonas de grande intensidade sísmica.

Mas, no passado recente havia pouco conhecimento dos engenheiros de estruturas civis urbanas sobre os efeitos das forças aerodinâmicas e sísmicas e, por isso, as premissas de projeto eram um tanto conservadoras e foram focadas na construção de edificações com elementos estruturais robustos e rígidos, resultando em considerável custo de materiais e de mão de obra.

Viu-se assim a necessidade e relevância de estudos aprofundados sobre o comportamento dinâmico e a estabilidade de estruturas submetidas a essas ações ambientais. Com o passar do tempo, o avanço em pesquisas na área de estruturas e materiais permitiu melhor conhecimento desses problemas dinâmicos. Novas ferramentas numérico-computacionais, aliadas a modelos matemáticos para análise

do comportamento e desempenho estrutural, abriram caminho a novas concepções projetivas e soluções alternativas inovadoras, tais como a de mecanismos de controle dinâmico incorporados na estrutura, permitindo uma mudança favorável na resposta do sistema estrutural a forças aerodinâmicas ou sísmicas.

Os resultados desses estudos têm propiciado a melhoria e atualização de códigos normativos para projetar e construir edificações resistentes as forças produzidas por essas ações da natureza e, ao mesmo tempo, garantir um comportamento dinâmico estrutural apropriado e conforto aos usuários em condições de serviço.

Dentre os mecanismos de controle dinâmico estrutural, aqueles que contem materiais viscoelásticos (MVE) resultam atrativos devido à propriedade amortecedora, a qual depende tanto da variação da temperatura quanto da faixa de frequências das forças de excitação. Atenuadores viscoelásticos (AVE) do tipo laminados sanduíche foram primeiramente aplicados na indústria aeronáutica e posteriormente em estruturas da construção civil.

As borrachas naturais ou sintéticas são os materiais visco-elásticos mais comumente utilizados na fabricação de AVE's instalados em edifícios para atenuar as amplitudes de deslocamentos e esforços internos causados pelas ações de vento ou de sismo. Alguns exemplos de aplicação de AVE's são brevemente descritos nas próximas seções deste capítulo.

No presente trabalho o comportamento e o desempenho de AVE's com multicamadas amortecedoras são investigados por meio de modelos matemático-numéricos 3D elaborados com um programa computacional desenvolvido por BARBOSA (2000), sendo ampliado por VASCONCELOS (2003) no Programa de Engenharia Civil (PEC) da COPPE como parte importante de um projeto de pesquisa. A citada ferramenta computacional está limitada à modelagem de apenas uma camada de material viscoelástico entre duas placas de material com comportamento elástico. Portanto, não permite a análise de atenuadores viscoelásticos multicamadas, cuja aplicação tem sido crescente em edificações sujeitas às ações sísmicas. A validação da modelagem de AVE's multicamadas é aqui feita por meio da comparação dos resultados teórico-numéricos com resultados experimentais para um caso exemplo.

A aplicação de material viscoelástico como núcleo amortecedor em placas sanduiche sujeitas a vibrações por flexão tem despertado interesse no caso de

estruturas de lajes de piso submetidas às vibrações induzidas por máquinas ou por atividades humanas, e também no caso de tabuleiros de pontes de pequeno vão submetidos às vibrações induzidas pelo tráfego de veículos. Soluções projetadas para esse tipo de casos são mostradas na próxima Seção. Em face das limitações da ferramenta computacional (citada no parágrafo anterior) originalmente desenvolvida no PEC-COPPE/UFRJ para a análise dinâmica de tabuleiros flexíveis; ressaltam-se o objetivo e contribuição desta dissertação, ampliando o campo de aplicações para abranger o projeto de controle dinâmico de tabuleiros mediante a inclusão de camadas viscoelásticas.

1.2 RESUMO HISTÓRICO

Os primeiros trabalhos associados ao estudo do comportamento dos materiais viscoelásticos foram desenvolvidos nos anos 50, com estudos experimentais feitos por OBERST e FRANKENFELD (1954), apresentando uma metodologia para a medição das propriedades mecânico-dinâmicas de diferentes MVE, e discutindo a influência da frequência de excitação e da temperatura na resposta obtida, mostrando a eficiência em termos do amortecimento experimentado pelos materiais apresentados.

Posteriormente, o estudo feito por ROSS *et al.* (1959) permitiu avaliar o potencial de amortecimento de materiais viscoelásticos em estruturas sanduíche, especificamente em placas bilaminadas, com uma fina camada interna amortecedora de MVE, submetidas à vibração por flexão (Figura 1-1). O modelo teórico analítico utilizado nos estudos realizados por esses autores era expresso por equações diferenciais com coeficientes complexos, as quais regem o problema de vibrações por flexão de elementos estruturais bilaminados com camada de material amortecedor descrito por módulo elástico complexo e fator de perda.

DITARANTO (1965), utilizou as expressões de rigidez a flexão de estruturas com camadas amortecedores, além de resultados experimentais de experiências prévias para desenvolver uma equação diferencial que fosse capaz de fornecer as frequências naturais de vibração e o fator de perda de estruturas que incorporam camadas de material viscoelástico, considerando diferentes condições de contorno.

O trabalho experimental desenvolvido por MAHMOODI (1969) tem uma grande importância, já que permitiu a medição da capacidade de dissipação de energia sobre um protótipo de amortecedor construído com materiais viscoelásticos. Nesse trabalho, os testes foram realizados considerando uma frequência e amplitude de excitação

constante, avaliando a influência da temperatura, assim como os efeitos da fadiga no curto prazo.

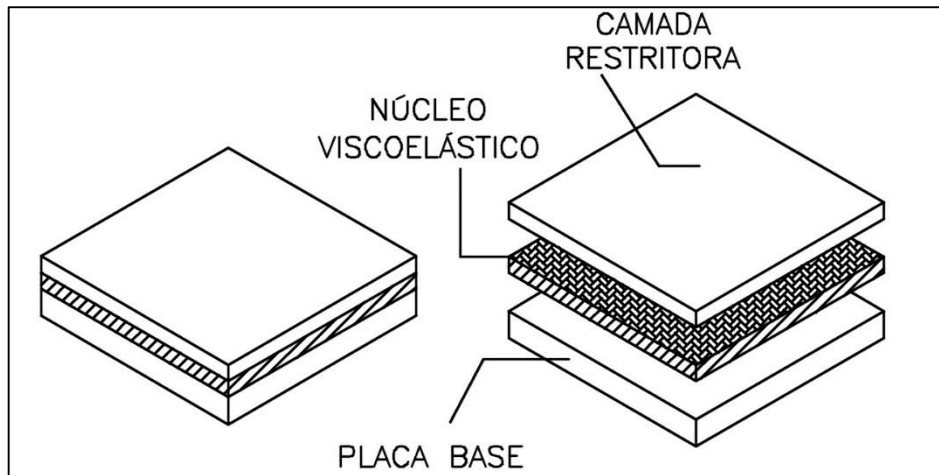


Figura 1-1. Componentes principais de uma estrutura sanduíche.

Com a introdução e difusão da utilização do computador eletrônico em centros de pesquisa e universidades, e o posterior desenvolvimento do método dos elementos finitos (MEF), foi possível a construção de modelos que reproduziram o comportamento de dispositivos de atenuação de vibrações em estruturas compostas com MVE's. O método de Golla-Hughes (GHM) (1985), descrito no Capítulo 3, consiste de uma formulação, orientada para implementação em modelos de elementos finitos (MEF), para análise dinâmica no domínio do tempo de artefatos laminados compostos de camadas restritoras (em geral metálicas) e de material viscoelástico.

Em 1989, QUIAN e DEMAQ, apresentaram um trabalho onde é feita uma análise no domínio do tempo para estruturas sanduíche, obtendo a equação do movimento pelo princípio dos trabalhos virtuais. Posteriormente, GIBSON *et al.* (1995), fizeram uma implementação do GHM nos programas comerciais NASTRAN e MATLAB.

Mais recentemente, o trabalho de YI *et al.* (1998), se baseou em uma formulação em elementos finitos para a análise dinâmica de estruturas sanduíche formadas por materiais piezoelétricos, e com amortecimento proporcionado por camadas viscoelásticas.

O trabalho de GALUCIO *et al.* (2004), mostrou uma formulação em elementos finitos para a análise de vigas sanduíche com um núcleo amortecedor de material viscoelástico, considerando um operador derivativo-fracionário de quatro parâmetros.

Para resolver as equações de movimento, foi utilizado o método de NEWMARK (1959), em conjunto com aproximações numéricas para os derivativos de ordem fracionário das equações constitutivas.

No caso do PEC-COPPE, diversos trabalhos têm sido feitos dentro da linha de pesquisa de Dinâmica Estrutural e Controle de Vibrações com o objetivo de entender o comportamento de materiais viscoelásticos e avaliar a sua factibilidade técnica em diversas aplicações.

FAISCA (1998) realizou trabalho experimental para obtenção das propriedades mecânico-dinâmicas e de amortecimento de um certo MVE, por meio de ensaios de pequenos modelos de vigas sanduíche.

De entre os trabalhos associados à modelagem numérica de MVE, a tese de doutorado apresentada por BARBOSA (2000) é de grande importância, pois utilizou a formulação descrita no GHM (1985) para a construção de um programa de elementos finitos para a análise dinâmica no domínio do tempo de estruturas com MVE, validado por meio de resultados de ensaios experimentais de vigas e placas sanduíche.

Logo depois, no trabalho de pesquisa da sua tese de doutorado, VASCONCELOS (2003) implementou elementos finitos planos de casca (além de elementos barra e hexaédricos) e otimizou o código computacional apresentado por BARBOSA (2000). Fez a modelagem e avaliou a resposta de diversos sistemas estruturais providos de mecanismos de controle com MVE para a validação da ferramenta computacional. Alguns dos casos exemplo modelados e analisados foram os de painéis de laje de concreto armado submetida à ação de atividades humanas e a de um tramo do tabuleiro ortotrópico metálico da ponte Rio-Niterói submetida a ação do tráfego de veículos, com soluções para o controle de vibrações baseadas no uso de camadas viscoelásticas amortecedoras.

A dissertação de mestrado de SANTOS (2003) foca na modelagem de atenuadores viscoelásticos para a redução de oscilações em edifícios altos, usando a ferramenta computacional desenvolvida previamente, tomando como exemplo uma das torres do World Trade Center, destruídas em setembro de 2001.

Logo depois, a tese de doutorado de SANTOS (2007) teve como objetivo o estudo dos efeitos danosos em pontes rodoviárias devido à interação entre os veículos, o pavimento e a estrutura, realizando uma contribuição na avaliação numérico-computacional de mecanismos de controle dinâmico para a redução das

vibrações induzidas pelo tráfego, a partir da ferramenta computacional otimizada por VASCONCELOS (2003).

Por último, CORREA (2008) desenvolveu na sua tese de doutorado a análise da interação dinâmica entre trens ou trilhos com os dormentes e a estrutura de pontes ferroviárias em aço, desenvolvendo alternativas para a redução das vibrações induzidas pelo tráfego por meio da utilização de materiais viscoelásticos mediante a modelagem numérico-computacional.

1.3 APLICAÇÕES

Os exemplos práticos de aplicação de mecanismos de controle dinâmico que usam materiais viscoelásticos instalados em estruturas civis são diversos. Uma das primeiras aplicações de sucesso é o emblemático caso das Torres gêmeas do World Trade Center com cerca de 410m de altura e grande esbelteza (Figura 1-2). Em cada uma das duas torres foram instalados, nas extremidades das vigas-treliça dos pavimentos, 10.000 atenuadores viscoelásticos entre o décimo e centésimo décimo pavimento, cuja função principal era atenuar as amplitudes de oscilação por flexão lateral induzidas pela ação do vento.



Figura 1-2. Torres do World Trade Center, inauguradas em 1969 (WONG,19-?).

Esses atenuadores viscoelásticos (AVE's) consistiam em camadas de material viscoelástico coladas entre chapas de aço (Figura 1-3). A ação do vento na estrutura gerava forças axiais nos componentes estruturais e esses esforços, devido à configuração geométrica do atenuador na estrutura, induziam esforços cisalhantes entre as placas de aço e as camadas de MVE, permitindo a dissipação de energia em forma de calor com a conseqüente redução da vibração.

SANTOS (2003) introduziu esses AVE em um modelo em elementos finitos para o estudo do comportamento de uma torre típica do World Trade Center (WTC). Os AVE estavam instalados no prolongamento do banzo inferior das vigas-treliça (*joists*) de sustentação dos painéis de piso, como ilustrado na Figura 1-4.

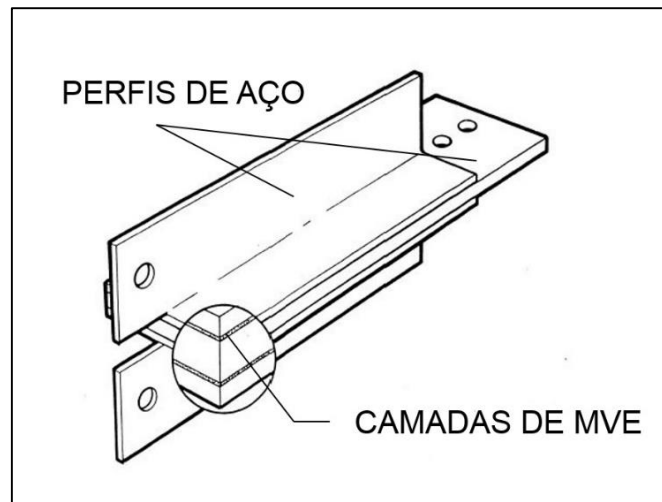


Figura 1-3. AVE's instalados nas torres do WTC (MAHMOODI et al., 1987)

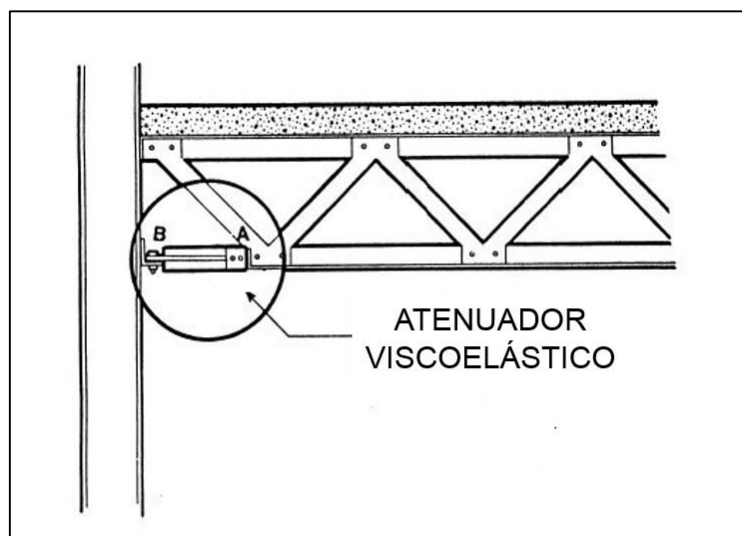


Figura 1-4. Localização dos AVE's nas torres do WTC (MAHMOODI et al., 1987)

Em 1982 foi inaugurado o Columbia Center (Figura 1-5), em Seattle, arranha-céu de 285m e 76 andares com topo de formato triangular, projetado com uma estrutura sustentada por três pilares de concreto interconectados com elementos diagonais de aço.

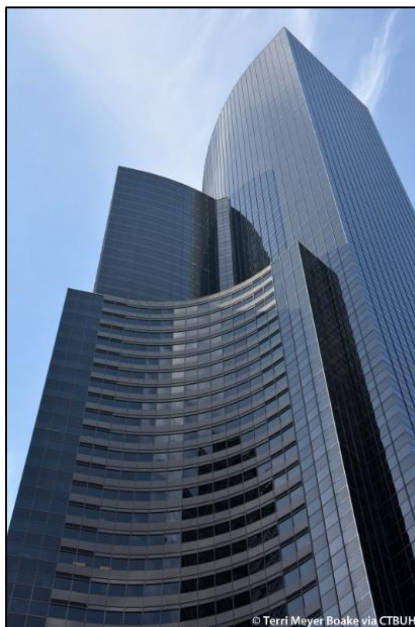


Figura 1-5. Columbia Center, Seattle, USA (BOAKE, 200-).

A realização de testes no túnel de vento evidenciou a necessidade de reduzir os níveis de aceleração da estrutura, pelo que foram projetados e instalados 260 amortecedores viscoelásticos nos elementos diagonais de aço (Figura 1-6). A ação dinâmica que atua sobre a estrutura gera esforços de tração e compressão nas diagonais, que são transferidos em forma de esforços cisalhantes aos amortecedores, de forma similar ao projeto do World Trade Center.

O uso desse tipo de atenuadores, isentos de manutenção, representou uma alternativa eficiente, com um custo representativo de aproximadamente 0,5% do custo total de construção do arranha-céu, sem precisar de manutenção. Do ponto de vista técnico, foi estimado um acréscimo da taxa de amortecimento crítico de 0,8% a 6,4% no caso de tormentas frequentes e até 3,2% no caso da ação de vento de projeto (SAMALI e KWOK, 1995).

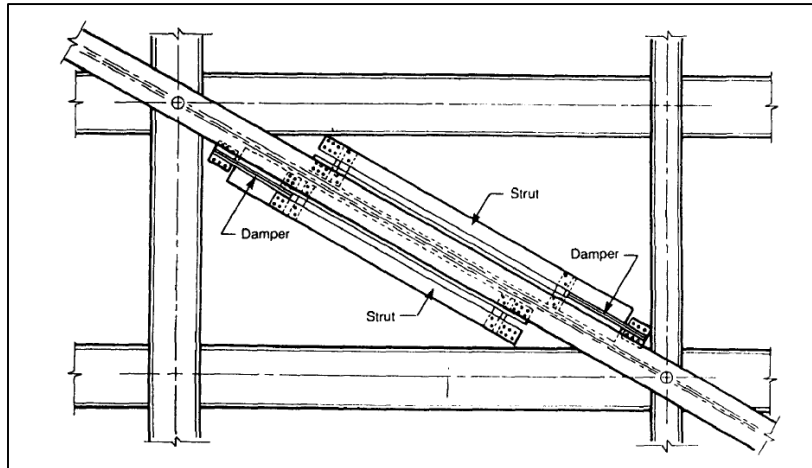


Figura 1-6. Localização dos amortecedores viscoelásticos no Columbia Center (KEEL e MAHMOODI, 1986).

Com uma justificativa similar, foram colocados 16 atenuadores viscoelásticos no arranha-céu Two Union Square de 56 andares, em Seattle, inaugurado em 1988 (Figura 1-7). Neste caso, os atenuadores foram instalados na base do prédio, abaixo das colunas, com o objetivo de reduzir vibrações por causa da ação do vento e eventualmente por causa da ocorrência de sismos.

Em 1994, um projeto de reforço estrutural consistiu na instalação de atenuadores viscoelásticos no prédio governamental Santa Clara County, na Califórnia. Nesse caso, o objetivo é que esses mecanismos de controle dinâmico permitam a dissipação de energia sob condições sísmicas no prédio de 13 andares construído em aço.

O reforço incorporou dois amortecedores viscoelásticos em cada uma das fachadas do prédio, permitindo um acréscimo até 17% do amortecimento crítico no primeiro modo fundamental de vibração (BERTERO e WHITTAKER, 1989). Adicionalmente, foram realizados testes experimentais para demonstrar a capacidade dos amortecedores para desenvolver os níveis de deformação esperados, assim como verificar as propriedades mecânico-dinâmicas do material viscoelástico utilizado (BLONDET, 1993).

Mais recentemente, o prédio residencial YC Condos, com 198m e 60 andares, atualmente em construção no Canadá, incorporou no seu projeto estrutural um conjunto de atenuadores viscoelásticos acoplados, em substituição de algumas vigas. Os atenuadores se encontram localizados no terço central do prédio (Figura 1-9), e corresponde à primeira vez que esse tipo de dispositivo é incorporado em uma

edificação. A finalidade desses atenuadores nessa configuração é oferecer mecanismos de dissipação de energia frente às ações sísmicas que podem afetar o arranha-céu.

Na seção 5.1 são apresentados os resultados da modelagem computacional desse tipo de mecanismos de controle dinâmico, estabelecendo uma comparação com os testes experimentais apresentados por MONTGOMERY e CHRISTOPOULOS (2015).



Figura 1-7. Two Union Square Building, Seattle, USA (BOAKE, 200-).



Figura 1-8. Vista geral dos amortecedores instalados no prédio Santa Clara County (BERTERO e WHITTAKER, 1989).

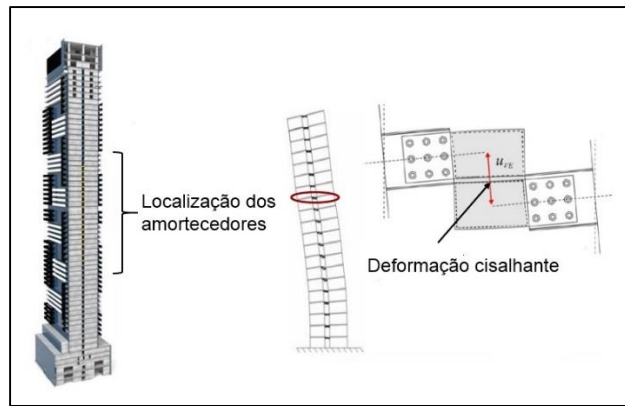


Figura 1-9. Amortecedores viscoelásticos acoplados no prédio YC Condos (adaptado de MIRABELLI, 2015).

Foi visto por meio das aplicações apresentadas que os materiais viscoelásticos representam uma alternativa eficiente quando são usados em mecanismos de controle dinâmico que favorecem a geração de deformações cisalhantes. Porém, eles também permitem a dissipação de energia quando são sujeitos a ações dinâmicas que induzem vibrações por flexão.

As estruturas que constituem *risers* de aço em instalações *offshore* são susceptíveis à ocorrência de vibrações induzidas por vórtices, reduzindo a vida útil das tubulações devido aos ciclos contínuos de deformações por flexão. Em vista disso, o trabalho apresentado por BORGES *et al.* (2014) mostra a aplicação de um núcleo de material viscoelástico em *risers* de aço em catenária. Neste caso, foi feita uma caracterização experimental do material viscoelástico e foi reproduzido um ensaio experimental do *riser* em catenária acompanhado de um modelo numérico-computacional, cujos resultados mostraram uma eficiência importante da redução das vibrações depois da inclusão do núcleo amortecedor.

No caso de estruturas de pontes, vibrações induzidas pelo tráfego de veículos podem gerar problemas de fadiga neste tipo de estruturas. Soluções inovadoras têm sido apresentadas para avaliar a redução de vibrações com o uso de materiais viscoelásticos.

A ponte Rio-Niterói tem uma extensão total em estruturas de 12.900 m (PFEIL, 1975), dos quais 848m correspondem à superestrutura metálica com um tabuleiro enrijecido longitudinal e transversalmente. A variação aleatória no tráfego de veículos com o passo do tempo induziu o surgimento de fissuras nas juntas soldadas, além de ser evidenciada a danificação do pavimento flexível, devido ao efeito danoso da resposta multimodal da estrutura sobre este (BATTISTA *et al.*, 1997).

Em vista disso, uma das soluções propostas por BATTISTA *et al.* (1998), consistiu na colocação de um pavimento sanduíche, constituído por uma fina camada de material viscoelástico de 5mm aderida a chapa de aço da mesa do tabuleiro ortotrópico, e restrita por uma placa de concreto de 10cm de espessura média, de acordo com a Figura 1-10. Foram construídos modelos físicos em escala 1:1 de um trecho do tabuleiro aos efeitos de avaliar a capacidade de amortecimento do MVE, comparando a resposta do tabuleiro sanduíche com aquele sem pavimento, além de outra proposta usando uma placa de concreto ligada a chapa de aço por meio de conectores de aço tipo pino de cabeça.



Figura 1-10. Modelo físico do tabuleiro sanduíche testado experimentalmente.

A Figura 1-11 (BATTISTA e PFEIL, 2000), mostra a densidade espectral de aceleração vertical no ponto meio do tabuleiro, sendo ressaltante a grande atenuação oferecida pela camada viscoelástica entre 0 e 100Hz, o que implica uma grande melhoria no comportamento estrutural do tabuleiro.

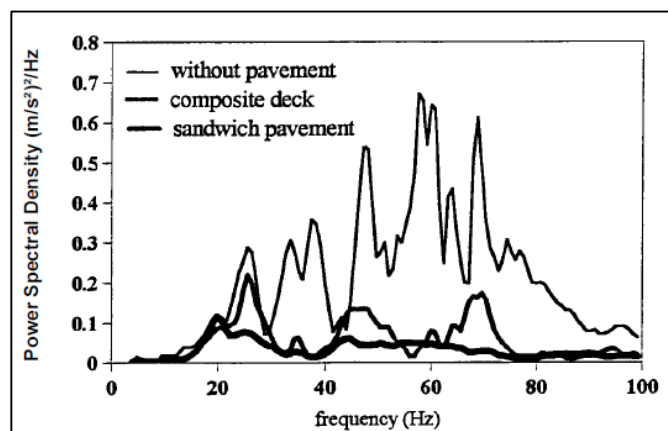


Figura 1-11. Densidade espectral da aceleração vertical (BATTISTA e PFEIL, 2000).

FREITAS (2010) avaliou por meio de ensaios experimentais de modelos físicos em laboratório, a inclusão de uma fina camada viscoelástica restrita por placas de aço na revitalização de tabuleiros de pontes. O estudo experimental mostrou a influência da temperatura na resposta, assim como a das variações da espessura das camadas dos diferentes materiais.

1.4 OBJETIVOS

A realização do presente trabalho de pesquisa está orientada ao cumprimento dos seguintes objetivos:

- 1) Aprimoramento da ferramenta computacional desenvolvida na tese de doutorado dos engenheiros Barbosa (2000) e Vasconcelos (2003) para a modelagem de materiais viscoelásticos (MVE) via Método de Elementos Finitos, com ênfase na aplicação em estruturas laminadas com camadas de MVE características de atenuadores viscoelásticos multicamadas e tabuleiros flexíveis presentes em pontes de vãos curtos.
- 2) Avaliar a resposta de sistemas estruturais providos de mecanismos de controle passivo compostos de materiais viscoelásticos modelados com a ferramenta computacional.
- 3) Validar os resultados obtidos com a ferramenta computacional por meio da correlação com resultados experimentais disponíveis na literatura e utilizados em trabalhos de pesquisa desenvolvidos anteriormente.

1.5 ESCOPO DO TRABALHO

CAPÍTULO 1

Neste capítulo é oferecida a justificativa deste trabalho de pesquisa, ressaltando a sua relevância e fazendo uma breve descrição dos objetivos, em conjunto com um resumo histórico que permite construir um contexto ao redor do estudo de materiais viscoelásticos e as suas aplicações em mecanismos de controle dinâmico estrutural.

CAPÍTULO 2

O segundo capítulo apresenta uma descrição do comportamento mecânico-dinâmico dos materiais viscoelásticos, das suas principais características e das

relações constitutivas que permitem estabelecer uma relação entre esforços e deformações.

CAPÍTULO 3

A partir das relações constitutivas estabelecidas no capítulo anterior, descreve-se nesta seção o Método de Golla Hughes para a análise dinâmica de materiais viscoelásticos orientada ao método dos elementos finitos, utilizado para realizar a implementação do código computacional que sustenta a modelagem numérica que serve de base ao trabalho apresentado.

CAPÍTULO 4

O quarto capítulo descreve o código computacional escrito em linguagem Fortran para a análise dinâmica de estruturas que incorporam camadas de material viscoelástico. São descritos os dois blocos principais que compõem o programa, além dos tipos de elementos estruturais que podem ser parte da análise e a sequência da mesma por meio das diferentes sub-rotinas que caracterizam o programa principal.

CAPÍTULO 5

Nesta seção são mostrados os diferentes exemplos de referência utilizados para a validação da ferramenta computacional. Em primeiro lugar, a validação é feita contra resultados de ensaios experimentais de atenuadores viscoelásticos acoplados utilizados para controlar a ação de vento ou de sismo. Posteriormente, é feita a modelagem de um conjunto de placas sanduíche submetidas à ação de impacto, para avaliar a eficiência desse tipo de materiais para esse tipo de ação nesse caso em particular.

CAPÍTULO 6

O Capítulo 6 apresenta uma breve discussão dos resultados mais relevantes obtidos dos vários exemplos de aplicação analisados e, também algumas conclusões em relação ao comportamento de materiais viscoelásticos sob ações dinâmicas. Por fim, enfatiza-se a boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais, aspecto determinante na validação da ferramenta computacional aprimorada no desenvolvimento deste trabalho.

2 DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Nesse capítulo são descritas as características principais dos materiais viscoelásticos, além da introdução das leis constitutivas que permitem estabelecer relações entre tensões e deformações.

2.1 CARATERIZAÇÃO GERAL DE UM MATERIAL VISCOELÁSTICO

Os mecanismos de controle dinâmico que são abordados nesse trabalho são aqueles de tipo passivo que incorporam materiais viscoelásticos (MVE) como principais responsáveis da atenuação de vibrações induzidas pelas ações dinâmicas.

Um material viscoelástico é aquele onde a relação constitutiva que permite associar esforços com deformações não depende só da magnitude do carregamento que atua sobre o material em um instante específico. Essa relação depende também do histórico do carregamento, pelo que é chamado de material com memória, além da temperatura a que esteja submetido o material, aspectos esses que influem sobremaneira na capacidade de dissipação de energia.

Os materiais viscoelásticos são polímeros, compostos de macromoléculas formadas a partir de moléculas menores. Quando os polímeros são submetidos a uma determinada tensão, podem ser esperados diferentes mecanismos de deformação no nível atômico. Os comprimentos e ângulos das ligações químicas que permitem a união de átomos podem distorcer, sendo movidos a outras posições de maior energia interna em um intervalo de tempo muito curto (ROYLANCE, 2001).

Se o polímero tiver uma mobilidade molecular elevada, é possível esperar arranjos maiores entre os átomos, considerando que em função dessa mobilidade, um polímero pode ser deformado na direção da tensão aplicada, que é o caso típico das borrachas, por exemplo.

A propriedades químicas e físicas das borrachas dependem das cadeias de hidrocarbonetos presentes, onde as uniões Carbono-Carbono podem ser simples, facilitando a rotação entre os diferentes átomos (MOORE, 1950). O processo de vulcanização visa a eliminação de esse tipo de vinculações entre os átomos de

carbono, com o propósito de restringir a rotação relativa e favorecer assim, a obtenção de materiais com maior rigidez.

Para aprofundar um pouco na descrição do comportamento mecânico dos materiais viscoelásticos, o ponto de partida é a reologia, que é um capítulo da mecânica que estuda as deformações e o fluência da matéria. Dentro da faixa de variação do comportamento dos materiais, existem dois extremos, um associado aos sólidos ideais, e outro aos fluidos ideais. A elasticidade é a principal característica de um sólido ideal, onde as tensões são proporcionais às deformações (Lei de Hooke). Analogamente, em um fluido ideal, existe uma relação linear entre a velocidade de deformação e as tensões de cisalhamento, onde a relação representa o coeficiente de viscosidade (Lei de Newton da viscosidade).

Um material viscoelástico reúne as propriedades elásticas dos sólidos e viscosas dos fluidos, com uma resposta em altas frequências similar aos sólidos elásticos, enquanto que a baixas frequências o comportamento é semelhante a fluidos viscosos; por essa razão, é importante conhecer o histórico do carregamento para avaliar o seu comportamento. Outro aspecto característico desses materiais é que as tensões não se encontram em fase com as deformações, com um ângulo de fase entre 0 e 90 graus, lembrando que para sólidos elásticos tensões e deformações se encontram em fase, enquanto que para fluidos viscosos o ângulo de fase é de 90 graus. A Figura 2-1 permite ilustrar esse comportamento.

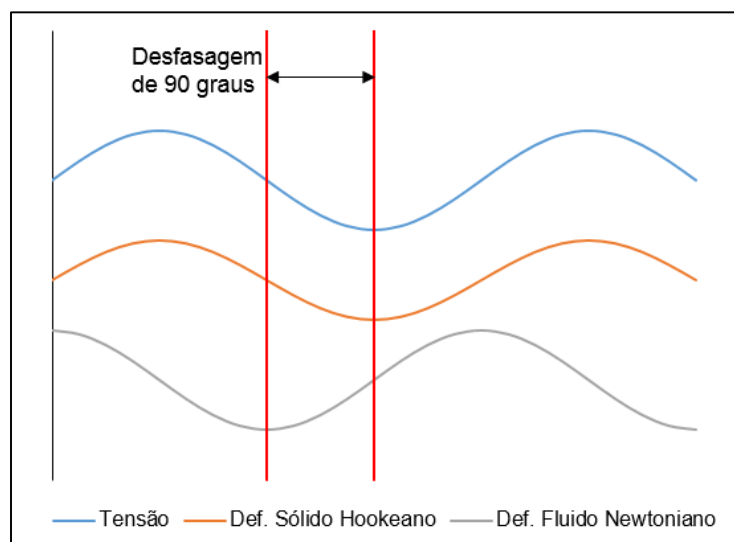


Figura 2-1. Ângulo de fase entre a tensão e a deformação para um sólido elástico e um fluido viscoso.

A equação (2-1) permite mostrar a resposta em termos das deformações por cisalhamento que poderiam ser esperadas em um corpo viscoso ou elástico submetido a uma ação dinâmica periódica.

$$\gamma = \gamma_o * \text{sen}(\omega t) \quad (2-1)$$

onde γ_o representa a máxima amplitude da deformação por cisalhamento, enquanto que ω representa a frequência circular. Se o corpo fosse elástico, tensões e deformações estariam em fase, e assim, a relação entre eles poderia ser associada com a seguinte expressão:

$$\tau = G * \gamma \quad (2-2)$$

$$\tau = G * \gamma_o * \text{sen}(\omega t) \quad (2-3)$$

onde G representa o módulo de elasticidade transversal.

Se o corpo fosse viscoso, tensões e deformações estariam desfasadas 90 graus, sendo representada a relação entre tensão e taxa de deformação pela seguinte expressão:

$$\tau = \mu * \omega * \gamma_o * \text{cos}(\omega t) \quad (2-4)$$

onde μ representa o coeficiente de viscosidade.

A partir das expressões apresentadas, poderia ser estabelecida uma relação entre tensões e deformações em um corpo viscoelástico, assumindo que uma parte da tensão se encontra em fase com as deformações (componente elástica), enquanto que outra parte se encontra 90 graus fora de fase (componente viscosa). Essa expressão pode ser escrita como segue:

$$\tau = \gamma_o * [G' * \text{sen}(\omega t) + G'' * \text{cos}(\omega t)] \quad (2-5)$$

onde G' representa o módulo de armazenamento, e está associado à capacidade do material para recuperar a energia de cada ciclo de carregamento, enquanto que G'' é denominado módulo de perda, e está associado à energia dissipada em forma de calor. Uma forma alternativa de representar a interação entre o módulo de armazenamento e o módulo de perda e por meio do módulo complexo, que pode ser estabelecido como segue:

$$\tau = \gamma_o * G^* \quad (2-6)$$

$$\tau = \gamma_o * [G' + iG''] \quad (2-7)$$

Os módulos de armazenamento e perda longitudinais podem ser definidos a partir dos módulos transversais, de acordo com as equações (2-8) e (2-9):

$$E' = G' * (1 + 2 * \nu) \quad (2-8)$$

$$E'' = G'' * (1 + 2 * \nu) \quad (2-9)$$

onde ν representa o módulo de Poisson, E' é o módulo de armazenamento longitudinal e E'' representa o módulo de perda longitudinal. A relação entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento é conhecida como fator de perda, representado na equação (2-10):

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \frac{G''}{G'} \quad (2-10)$$

Os módulos de armazenamento e o fator de perda constituem duas grandezas de importância para caracterizar as propriedades mecânicas de materiais viscoelásticos, em especial os elastômeros, como no caso das borrachas, quando se encontram submetidas à ação dinâmica.

A Figura 2-2, adaptada de LAZAN (1968), apresenta as variações existentes dessas grandezas, para variações em frequência e temperatura para uma borracha de nitrilo (ou Buna N).

A partir do gráfico, é possível descrever a variação dos diferentes módulos em função de diferentes condições de frequência e temperatura. Inicialmente, em condições de baixa frequência ou alta temperatura, é identificada uma zona emborrachada, na qual os valores dos módulos de armazenamento e perda, além do fator de perda, possuem valores mínimos, produto de um estado de relaxação, sem grandes alterações do estado tensional devido a baixas frequências, onde as deformações acompanham em fase às tensões.

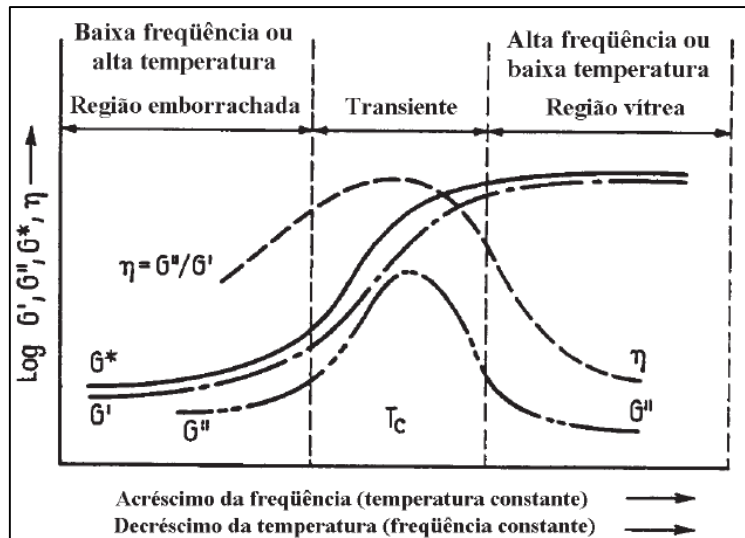


Figura 2-2. Influência da frequência e temperatura no módulo de armazenamento e módulo de perda para um polímero típico (adaptado de LAZAN, 1968).

Posteriormente, com o acréscimo da frequência ou decréscimo da temperatura, começa uma mobilidade molecular dentro do material que permite um incremento do módulo de armazenamento, do módulo de perda e do fator de perda. Essas duas últimas grandezas, nessa zona que é denominada transiente, atingem um valor máximo, motivado pelo fato que as tensões se encontram fora de fase com as deformações, o que favorece mecanismos para dissipar energia.

Por último, existe uma zona denominada vítrea, que poderia estar associada com um acréscimo ainda maior da frequência ou decréscimo da temperatura, e nesse caso, depois da zona crítica anterior, os módulos de perda e o fator de perda decrescem a valores mínimos, enquanto que o módulo de armazenamento é mantido no seu valor máximo, e lembrando que ele é associado à parcela elástica, o comportamento do material nessa fase é bem próximo de um sólido rígido.

2.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS PARA MODELOS UNIDIMENSIONAIS

As relações constitutivas em modelos mecânicos que representam o comportamento de materiais viscoelásticos, podem ser obtidas com a aplicação de uma determinada tensão “ σ ” em uma extremidade, o que dará origem a uma deformação “ ϵ ”. De acordo com a teoria da elasticidade, a proporção entre tensões e deformações está definida com o módulo de elasticidade, considerado como constante, mas no caso de MVE, a dependência da frequência e da temperatura,

como já foi ressaltada, faz com que essa proporcionalidade não seja mantida, precisando de outros mecanismos para definir a relação entre tensões e deformações.

As relações constitutivas expressas no domínio na frequência constituem uma forma mais comum para definir a relação tensão-deformação, usando o módulo complexo como segue:

$$\sigma(\omega) = E^*(\omega) * \varepsilon \quad (2-11)$$

$$\sigma(\omega) = [E'(\omega) + iE''(\omega)] * \varepsilon \quad (2-12)$$

A caracterização dos módulos complexos, e em consequência, dos módulos de armazenamento e perda, deve ser feita para cada material. Com isso, é possível caracterizar o comportamento de MVE no domínio da frequência, sendo necessária a Transformada Inversa de Fourier para realizar uma representação no domínio do tempo.

É possível também expressar o módulo complexo no domínio de Laplace, fazendo a substituição de $i\omega$ por s , dando origem à seguinte expressão:

$$\sigma(s) = E(s) * \varepsilon \quad (2-13)$$

A representação do módulo complexo no domínio de Laplace ganhou muita importância, porque o trabalho computacional associado à modelagem de MVE nesse domínio resultou menos complexo. $E(s)$ representa o módulo de elasticidade no domínio de Laplace, e se constitui de duas parcelas:

$$E(s) = \epsilon + h(s) \quad (2-14)$$

Nesse caso ϵ representa a parcela elástica, e $h(s)$ é chamada de função de dissipação, com diversas formulações propostas por diferentes autores, e que podem ser encontradas na Tabela 2-1, adaptada de VASCONCELOS (2003).

Tabela 2-1. Funções de dissipação propostas no domínio de Laplace (adaptada de VASCONCELOS, 2003).

Função	Autor e Ano
$h(s) = \sum_{i=1}^n \frac{a_i s}{s + b_i}$	M.A. Biot, 1955

$h(s) = \frac{E_1 s^\alpha + E_0 b s^\beta}{1 + b s^\beta}$ $0 < \alpha < 1 \text{ e } 0 < \beta < 1$	<p>R.L. Bagley e P.J. Torvik, 1981</p>
$h(s) = a s \int_0^\infty \frac{\gamma(p)}{s+p} dp$ $\gamma(p) = \frac{1}{\beta - \alpha} \quad \alpha \leq p \leq \beta$ $\gamma(p) = 0 \text{ Fora do intervalo}$	<p>K.J. Buhariwala, 1982</p>

2.3 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS PARA MODELOS BI E TRIDIMENSIONAIS

As relações constitutivas para modelos viscoelásticos bi e tridimensionais podem ser obtidas pela consideração de deformações lineares e angulares nas outras direções. Além do módulo complexo de elasticidade longitudinal, é necessário fazer menção ao módulo complexo de elasticidade transversal, que pode ser definido com a seguinte expressão:

$$G^*(\omega) = G'(\omega) + iG''(\omega) \quad (2-15)$$

A partir disso, é possível escrever as relações tensão-deformação para esforços normais e cisalhantes:

$$\sigma(\omega) = E'(\omega)[1 + i\eta_\varepsilon] * \varepsilon \quad (2-16)$$

$$\tau(\omega) = G'(\omega)[1 + i\eta_\gamma] * \gamma \quad (2-17)$$

Nesse caso, η_ε representa o fator de perda longitudinal e η_γ é o fator de perda transversal. Considerando um material isotrópico, os fatores de perda longitudinal e transversal possuem a mesma magnitude, sendo considerado simplesmente como η . Esse fator junto com o módulo de armazenamento longitudinal ou transversal são as

duas grandezas de maior importância para a caracterização das propriedades mecânicas de um material viscoelástico.

3 MÉTODO DE GOLLA HUGUES PARA MODELAGEM DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Um modelo numérico que permita representar o comportamento de materiais viscoelásticos tem alto nível de complexidade devido à mudança do comportamento com a frequência e a temperatura, o que resulta complicado no domínio do tempo. A partir disso, uma primeira simplificação consiste em desconsiderar as variações por temperatura, e mantendo a frequência variável para o estudo das propriedades dinâmicas. O método proposto por Golla e Hughes (1985) é aplicado na determinação da resposta dinâmica no domínio do tempo, a partir da solução de um sistema expresso a partir de módulos complexos no domínio de Laplace.

No domínio de Laplace, as equações que caracterizam o movimento possuem coeficientes constantes, fato que permite uma maior facilidade dentro do método dos elementos finitos e, além disso, permite a formação de matrizes simétricas. No entanto, no caso das matrizes de massa, amortecimento e rigidez para elementos viscoelásticos, o método estabelece um acréscimo dos graus de liberdade, os quais são conhecidos como graus de dissipação.

Lembrando que as relações constitutivas expressas no domínio de Laplace possuem a seguinte forma:

$$\sigma(s) = [\epsilon + h(s)] * \varepsilon \quad (3-1)$$

$$\tau(s) = [\epsilon + h(s)] * \gamma \quad (3-2)$$

É preciso definir a função de dissipação $h(s)$, para a qual, de acordo com Golla e Hughes (1985), a função proposta por BIOT (1955), representa uma boa aproximação, considerando apenas os dois primeiros termos da série. A partir disso, a função de dissipação adotada tem a seguinte forma:

$$h(s) = \frac{a_1 s}{s + b_1} + \frac{a_2 s}{s + b_2} \quad (3-3)$$

Fazendo as seguintes mudanças de variáveis:

$$\alpha = a_1 + a_2 > 0 \quad (3-4)$$

$$\beta = b_1 + b_2 > 0 \quad (3-5)$$

$$\gamma = a_1 b_2 + a_2 b_1 > 0 \quad (3-6)$$

$$\delta = b_1 b_2 > 0 \quad (3-7)$$

a função de dissipação pode ser escrita da seguinte forma:

$$h(s) = \frac{\alpha s^2 + \gamma s}{s^2 + bs + \delta} \quad (3-8)$$

A expressão que associa tensão com deformação no domínio de Laplace pode ser escrita na forma:

$$\sigma(s) = \left[\epsilon + \frac{\alpha s^2 + \gamma s}{s^2 + bs + \delta} \right] * \epsilon \quad (3-9)$$

Para expressar essa relação no domínio da frequência, é preciso trocar o valor de s por $i\omega$, o que resulta na seguinte expressão:

$$\sigma(\omega) = \left[\epsilon + \frac{\alpha(-\omega^2 + i\beta\omega)}{-\omega^2 + i\beta\omega + \delta} \right] * \epsilon \quad (3-10)$$

A partir disso, o módulo complexo pode ser escrito como:

$$E^* = \epsilon + \frac{\alpha(-\omega^2 + i\beta\omega)}{-\omega^2 + i\beta\omega + \delta} \quad (3-11)$$

O módulo complexo possui uma colaboração do módulo de armazenamento e do módulo de perda; esse último correspondente à parte imaginária, e que pode ser obtido a partir do fator de perda. Fazendo uma reorganização dos termos da expressão de acima, é possível obter as duas grandezas:

$$E'(\omega) = \epsilon + \frac{\alpha\omega^2(\omega^2 - \delta + \beta^2)}{(\delta - \omega^2)^2 + \beta^2\omega^2} \quad (3-12)$$

$$\eta(\omega) = \frac{\alpha\beta\omega\delta}{(\delta - \omega^2)^2 + \beta^2\omega^2} * \frac{1}{E'} \quad (3-13)$$

Considerando $\epsilon= 1\text{MPa}$, $\alpha=5\text{MPa}$, $\beta=6.000\text{s}^{-1}$ e $\delta=1.200.000\text{s}^{-2}$, é possível reproduzir uma curva para o módulo de armazenamento longitudinal e para o fator de

perda, representativa de um material viscoelástico existente, apresentado por BARBOSA (2000), e que são mostradas na Figura 3-1. É importante considerar que a seleção dos parâmetros deve ser tal que permita uma adaptação às curvas experimentais de materiais viscoelásticos, devido a que a seleção arbitrária dos valores não representa uma garantia para uma solução fisicamente factível.

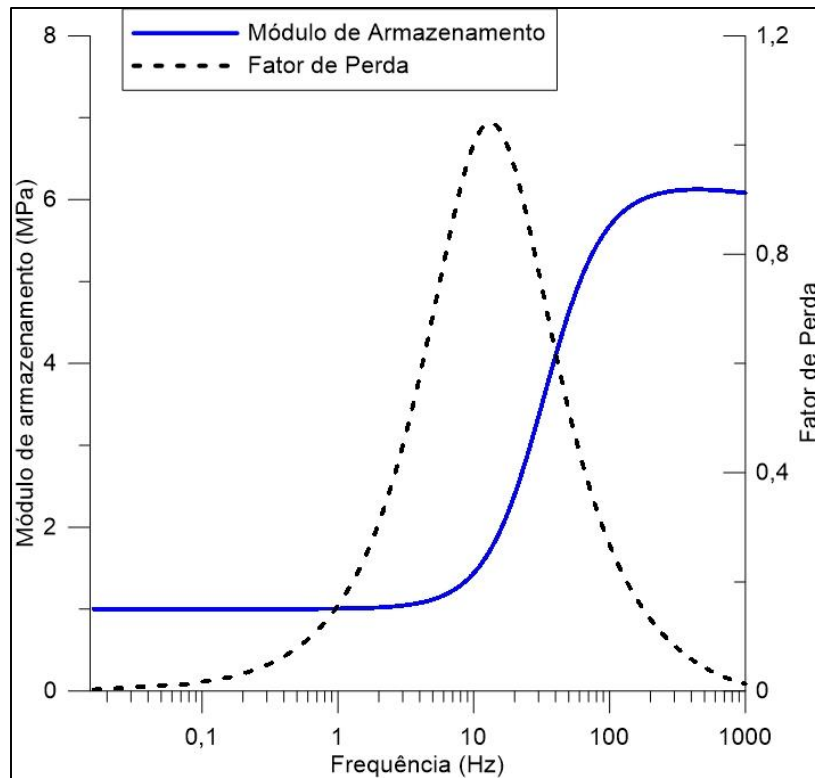


Figura 3-1. Propriedades mecânico-dinâmicas do material viscoelástico (BARBOSA, 2000).

4 PROGRAMA COMPUTACIONAL PEFAMV

Nesta seção é feita uma breve descrição do procedimento utilizado para análise dinâmica de estruturas que incorporam materiais viscoelásticos. As modelagens numéricas são feitas com um código desenvolvido em linguagem Fortran, baseado no método dos elementos finitos (MEF). O código é denominado Programa de Elementos Finitos com Atenuadores de Mecanismos Viscoelásticos (PEFAMV), inicialmente desenvolvido por BARBOSA (2000) e posteriormente expandido e otimizado por VASCONCELOS (2003) para análise de estruturas com componentes laminados com MVE, por meio de modelos 3D discretizados com elementos planos de casca, de barra e hexaédricos.

O procedimento utilizado está baseado na utilização de dois blocos de código computacional. O primeiro deles está relacionado com a geração da malha de elementos finitos, e um segundo bloco que permite a análise no domínio do tempo.

O primeiro bloco é denominado “GERAMALHA.for”, e este arquivo basicamente permite a geração da estrutura a ser analisada em função das diferentes malhas e elementos estruturais considerados. Em seguida são apresentados os tipos de elementos existentes e depois, a associação entre eles para a constituição dos modelos.

O **elemento barra de pórtico espacial** tem dois nós com seis graus de liberdade por nó (três deslocamentos e três rotações), enquanto que a matriz de rigidez tem uma dimensão de 12x12 posições, e a matriz de massa discreta é diagonal com doze posições (Figura 4-1).

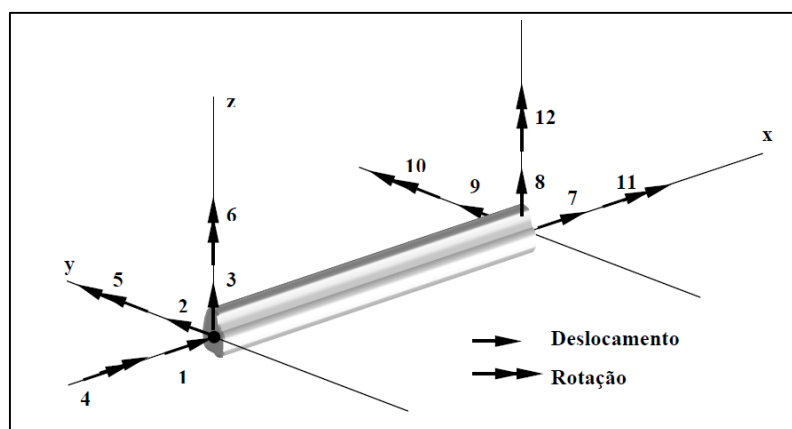


Figura 4-1. Elemento de pórtico espacial (VASCONCELOS, 2003).

O **elemento triangular de placa**, também denominado triângulo discreto de Kirchoff (DKT em inglês), é um elemento usado para a modelagem de placas finas de acordo com a teoria de Kirchoff. Este elemento possui três nós com três graus de liberdade por nó (deslocamento vertical e duas rotações), de acordo com a Figura 4-2.

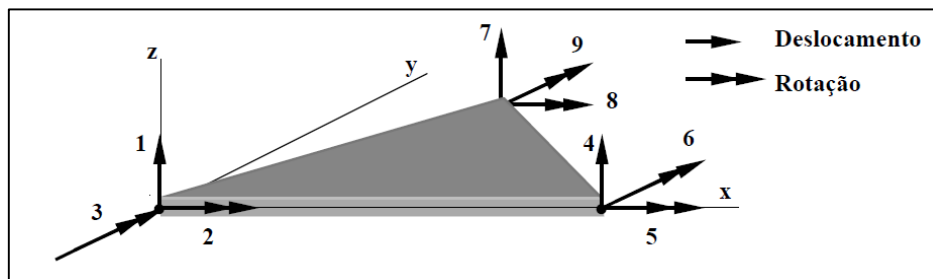


Figura 4-2. Elemento triangular de placa (VASCONCELOS, 2003).

Um elemento triangular de membrana é acoplado ao elemento de placa, integrando os efeitos de um estado plano de tensões com os derivados da flexão. Esse elemento triangular de membrana, tem dois graus de liberdade por nó, associados a deslocamentos no plano da superfície, de acordo com a Figura 4-3.

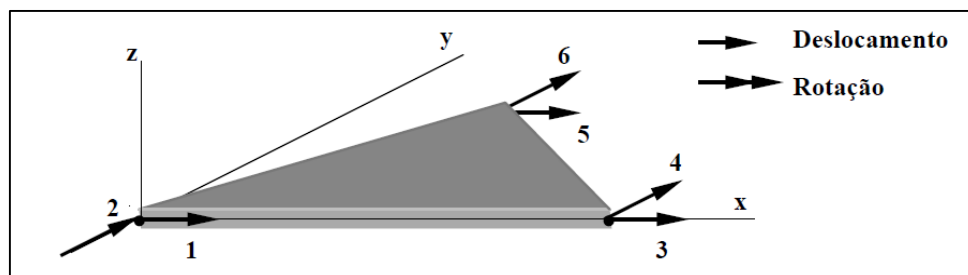


Figura 4-3. Elemento de membrana triangular (VASCONCELOS, 2003).

O elemento triangular resultante do acoplamento é um elemento triangular plano de casca, cuja matriz de rigidez tem dimensão de 18x18 posições e a matriz diagonal de massa contém 18 posições. Para compatibilizar a conexão de elementos de pórtico espacial com elementos de placa triangular, foi adicionado um grau de liberdade fictício associado à rotação em torno do eixo normal à superfície, correspondente a um coeficiente de rigidez com valor de 10^{-10} vezes o menor coeficiente de rigidez da matriz de rigidez do elemento triangular plano com efeitos de flexão e membrana.

O **elemento retangular de placa** considerado no PEFAMV tem a sua formulação no modelo de Reissner-Mindlin, que considera as deformações por cisalhamento; no entanto, no caso de placas finas, o modelo não oferece um bom

resultado devido a rigidez excessiva atribuída ao elemento. Para contornar este problema utiliza-se uma técnica de integração seletiva reduzida, com a que pode ser calculada a energia de deformação por flexão e cisalhamento considerando só alguns pontos de integração dentro do domínio.

O elemento de placa retangular, ilustrado na Figura 4-4, tem quatro nós, com três graus de liberdade por nó: duas rotações ao redor dos eixos que formam o plano da superfície, além do deslocamento vertical.

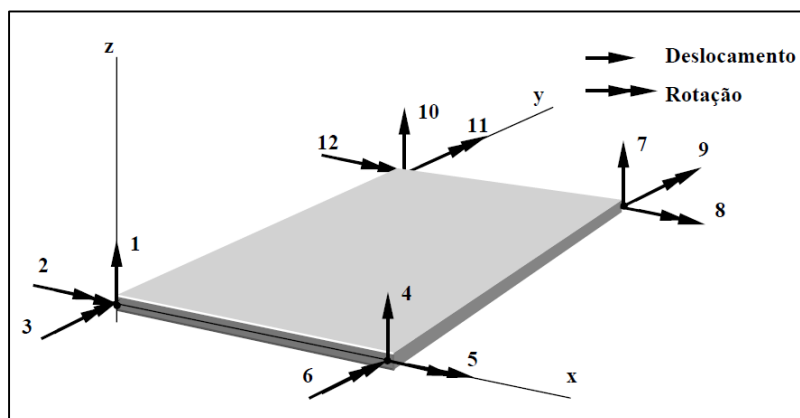


Figura 4-4. Elemento de placa retangular (VASCONCELOS, 2003).

Assim como no caso do elemento **triangular** plano de casca, o elemento **retangular** plano de casca é formado pelo acoplamento de um elemento retangular de membrana com o elemento retangular de placa. O elemento retangular de membrana tem quatro nós e dois graus de liberdade por nó, nas direções dos deslocamentos no plano médio do elemento. Também é incorporada uma rotação fictícia em torno do eixo perpendicular ao plano da superfície, para compatibilizar os graus de liberdade desse elemento com os de um elemento de pórtico espacial, no caso que os dois fossem acoplados. O valor da rigidez associado com essa rotação é 10^{-10} vezes a menor rigidez de todos os graus de liberdade do elemento de placa que combina flexão e o efeito de membrana.

A matriz de rigidez do elemento de placa retangular possui uma dimensão de 18x18 posições, enquanto que a matriz de massa discreta possui 18 espaços alocados na memória.

Em relação ao amortecimento, foi considerado o fato de representar um valor muito pequeno em estruturas civis, e por essa razão, o modelo usado considera amortecimento viscoso, que é proporcional à velocidade. O amortecimento clássico é

uma idealização apropriada se os mecanismos de amortecimento que são distribuídos ao longo da estrutura são similares (CHOPRA, 2012), como por exemplo, um edifício de várias plantas com um sistema estrutural bem definido e materiais similares dentro da estrutura. Essa idealização não considera alguns mecanismos como o amortecimento gerado pelo atrito em conexões de aço, a abertura e fechamento de microfissuras no concreto ou os esforços resistidos pelos elementos não estruturais.

O procedimento utilizado para o cálculo do amortecimento nos elementos elásticos dentro do PEFAMV considera a hipótese de Rayleigh, que estabelece o amortecimento como proporcional à rigidez e a massa. O amortecimento proporcional à rigidez fisicamente é associado à dissipação de energia em função dos deslocamentos gerados nos diferentes níveis de um edifício submetido a uma ação dinâmica. No caso da massa, o amortecimento vai associado ao atrito da estrutura com o ar, mas nesse caso, é um valor pequeno na maioria das estruturas.

A utilização do amortecimento proporcional só com a rigidez, ou com a massa, resulta inapropriado para sistemas de vários graus de liberdade, devido a que as variações que representam com as frequências naturais não são compatíveis com os dados experimentais coletados em estruturas reais (CHOPRA, 2012). O método de Rayleigh considera uma colaboração da rigidez e a massa no amortecimento de acordo com a seguinte expressão:

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \quad (4-1)$$

Para estruturas com frequências de vibração baixas, o amortecimento proporcional à massa tem uma maior preponderância, o que poderia estar associado à menor existência de grandes deslocamentos na estrutura devido a uma maior flexibilidade, onde o atrito superficial com ar ou algum fluxo poderia ter uma maior responsabilidade no amortecimento geral. Analogamente, para frequências maiores, o amortecimento proporcional à rigidez é predominante, esperando nesse caso uma dissipação de energia motivada pelos deslocamentos na estrutura, que poderiam vencer facilmente o atrito com ar ou algum fluxo. A Figura 4-5 apresenta a função de amortecimento proporcional dependendo da frequência de vibração (CHOUGH e PENZIEN, 2003).

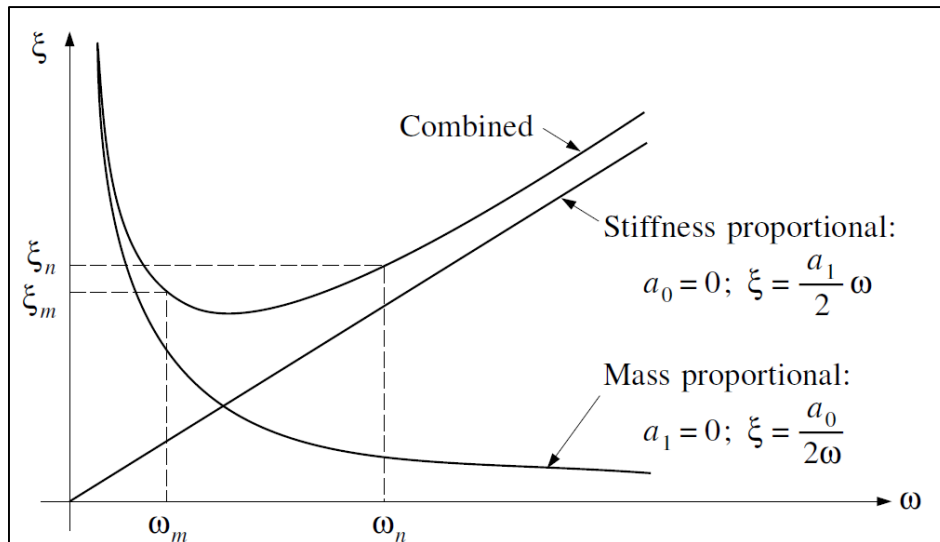


Figura 4-5. Amortecimento proporcional de Rayleigh (CLOUGH e PENZIEN,2003).

Em relação aos elementos viscoelásticos, o tipo de elemento adotado é um **hexaedro retangular linear** de oito nós, com três graus de liberdade por nó. Lembrando que na descrição do Método de Golla Hughes foi comentado que os graus de liberdade físicos são acrescentados com graus de dissipação, as matrizes de massa, rigidez e amortecimento vão apresentar um grau de liberdade de dissipação por cada grau de liberdade físico, devido a que a função de dissipação adotada, considera só os primeiros dois termos.

Para derivar as matrizes de rigidez, massa e amortecimento dos elementos viscoelásticos, o método de Golla Hughes consiste na verificação de um sistema matricial que envolve as equações de movimento no domínio de Laplace, realizando depois a transformação inversa para achar uma expressão no domínio do tempo. Em seguida são mostradas as expressões que definem as matrizes de massa (4-2), amortecimento (4-3) e rigidez (4-4) para o elemento hexaédrico linear de oito nós.

$$[M^V] = \text{Diagonal} \left[M^E, \frac{\alpha_1}{\delta_1}, \dots, \frac{\alpha_m}{\delta_m} \right] \quad (4-2)$$

onde $[M^E]$ representa a matriz de massa elástica

$$[C^V] = \text{Diagonal} \left[0, \frac{\alpha_1 \beta_1}{\delta_1}, \dots, \frac{\alpha_m \beta_m}{\delta_m} \right] \quad (4-3)$$

$$[K^V] = \begin{bmatrix} (\epsilon + \sum_{i=1}^m \alpha_i) K^E & \alpha_1 R_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha_m R_m \\ \alpha_1 R_1^T & \alpha_1 & 0 & & & 0 \\ \cdot & 0 & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & 0 \\ \alpha_m R_m^T & 0 & \cdot & \cdot & 0 & \alpha_m \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$[K^E]$ representa a matriz de rigidez elástica e a sua decomposição espectral é definida como segue:

$$[K^E] = [R_E] [\Lambda] [R_E]^T \quad (4-5)$$

$$[R_E] = [R_r \quad R_f] \quad (4-6)$$

onde $[R_E]$ é uma matriz cujas colunas vão associadas com os autovetores de $[K^E]$, sendo $[R_r]$ os autovetores de modos de corpo rígido, e $[R_f]$ os autovetores associados com os modos de corpo flexível.

$[\Lambda]$ é uma matriz diagonal com os autovalores de $[K^E]$, sendo Λ_f os autovalores de corpo flexível. A matriz $[R]$ que forma parte da matriz de rigidez viscoelástica, é definida de acordo com a seguinte expressão:

$$[R] = [R_f] [\Lambda_f]^{1/2} \quad (4-7)$$

De acordo com a informação apresentada, a matriz de rigidez do elemento viscoelástico tem um conjunto de termos associados à parcela elástica, caracterizada por 24 graus de liberdade do elemento hexaédrico linear. Além disso, uma parte importante dos termos da matriz caracteriza a parcela viscosa, mediante a combinação entre autovetores e autovalores dos modos de corpo flexível em conjunto com o parâmetro que forma parte da caracterização do MVE via GHM. A Figura 4-6 mostra em forma esquemática esse armazenamento, destacando em azul os termos da parcela elástica, enquanto que a zona representada em verde e amarelo é associada aos termos da parcela viscosa.

Para o desenvolvimento dos exemplos apresentados na seção 5.2 associados à análise dinâmica de tabuleiros flexíveis, foi necessária a correção de alguns termos da parcela viscoelástica da matriz de rigidez do elemento hexaédrico linear, visando a

aplicação da ferramenta computacional em exemplos onde existe uma excitação maior de vibrações por flexão.

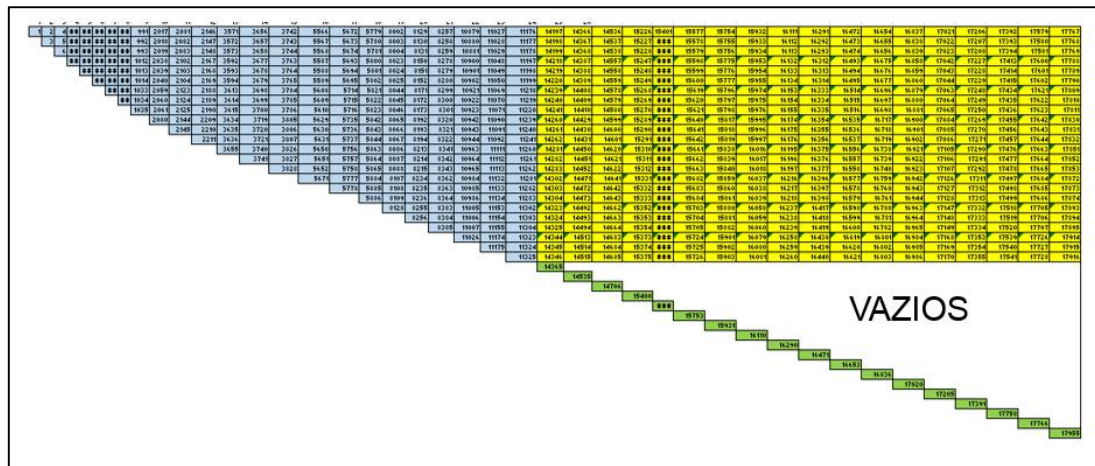


Figura 4-6. Esquema de armazenamento da matriz de rigidez do elemento viscoelástico hexaédrico linear.

O arquivo “GERAMALHA.for” permite a associação entre os diferentes tipos de elementos descritos para a construção da malha de elementos finitos. Em seguida são descritas brevemente as associações disponíveis:

- 1) *Placa/Placa*, utilizada para a associação de elementos de placa de diferentes materiais, como por exemplo na modelagem de placas mistas aço-concreto.
- 2) *Placa/Brick/Placa*, que permite a associação de elementos elásticos de placa com elementos viscoelásticos hexaédricos lineares, utilizado por exemplo na modelagem de placas sanduíche.
- 3) *Casca*, que basicamente toma os mesmos fundamentos de modelagem de elementos planos de casca, mas com uma superfície curva orientada no espaço.
- 4) *Casca/Brick/Casca*, que permite a geração de uma estrutura sanduíche com superfície curva.
- 5) *Bricks*, que estabelece a geração de malhas com elementos viscoelásticos; no entanto, representa um fato pouco comum devido a que geralmente o MVE é analisado interagindo com mais alguma camada restritora de outro material.

O arquivo “GERAMALHA.for” foi modificado nessa nova versão do PEFAMV para permitir a inclusão de mais de uma camada de material viscoelástico nos

exemplos que sejam desenvolvidos, fato que permitiu a realização do exemplo de referência na seção 5.1, associado aos atenuadores viscoelásticos (AVE).

O segundo bloco que forma parte do PEFAMV, e o arquivo “PEFAMV.for”, o qual permite obter uma resposta em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações no domínio do tempo para os graus de liberdade dos quais tenham-se interesse.

A primeira ação realizada pelo bloco corresponde à leitura das diferentes variáveis, a partir do arquivo de dados de entrada gerado pelo bloco “GERAMALHA.for”. Em seguida, são calculados o número de elementos elásticos e viscoelásticos, em função do caso que foi escolhido, e a partir das condições de contorno prescritas, é feito o cálculo do número de equações a serem resolvidas, em função dos graus de liberdade existentes na malha.

Posteriormente, é construído o perfil Skyline da matriz de rigidez, caracterizado por um armazenamento das colunas da matriz de rigidez em um único vetor, descartando aqueles valores associados aos graus de liberdade cujas condições cinemáticas são prescritas.

A partir disso, e em função do tipo de elemento existente na malha, são gerados os termos das matrizes elementares de massa, rigidez e amortecimento. O procedimento começa com o cálculo das matrizes nos eixos locais, e com o uso da matriz de rotação, a transformação aos eixos globais, permitindo um sistema de referência comum para todos os elementos. Posteriormente, a contribuição de cada elemento é adicionada em uma matriz global.

Os dados associados ao carregamento são introduzidos pelo usuário, e essa informação é utilizada para a construção do vetor de forças nodais. Toda vez que as matrizes globais já estão completamente definidas, o procedimento de solução segue com o cálculo dos coeficientes de integração de NEWMARK (1959), em relação com o método numérico utilizado para a solução dos vetores de deslocamentos, velocidades e acelerações, para cada passo de tempo definido.

5 EXEMPLOS DE REFERÊNCIA

5.1 ATENUADORES VISCOELÁSTICOS

O exemplo que é apresentado em seguida corresponde a uma validação numérica utilizando a ferramenta computacional PEFAMV, associada com um conjunto de testes experimentais feitos sobre atenuadores viscoelásticos (AVE), denominados originalmente como VCD (Viscoelastic Coupled Dampers) por MONTGOMERY e CHRISTOPOULOS (2015).

Esse tipo de atenuadores (Figura 5-1) é utilizado como mecanismos de controle dinâmico para a dissipação de energia frente às forças sísmicas ou à ação do vento, pelo que é de interesse o conhecimento dos ciclos de histerese, os quais oferecem em forma qualitativa e quantitativa, uma medida da energia dissipada pelo sistema.

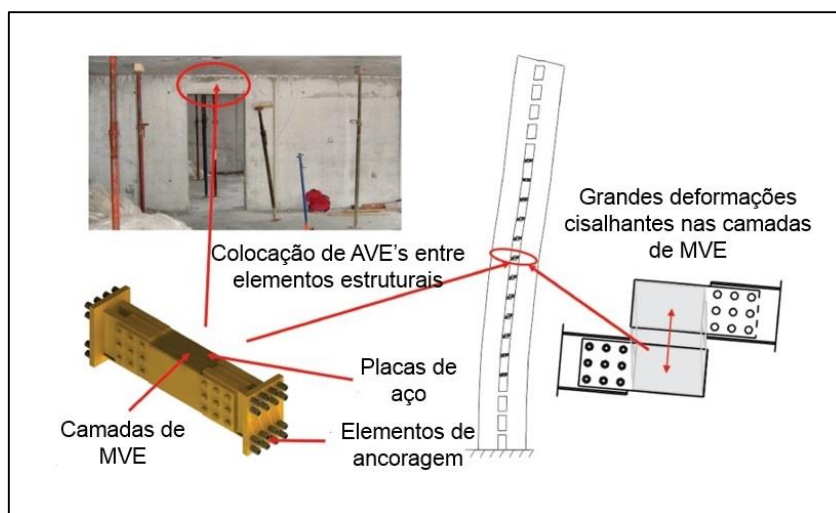


Figura 5-1. Atenuador Viscoelástico (adaptado de MONTGOMERY e CHRISTOPOULOS, 2015).

MONTGOMERY e CHRISTOPOULOS (2015) realizaram um conjunto de testes experimentais sobre atenuadores viscoelásticos para a obtenção dos ciclos de histerese. O esquema geral, mostrado na Figura 5-2, consiste em quatro (4) camadas de material viscoelástico de tipo ISD111, fabricado pela empresa Sumitomo 3M, com uma espessura de 5mm, e que foram aderidas em placas de aço de 12mm.

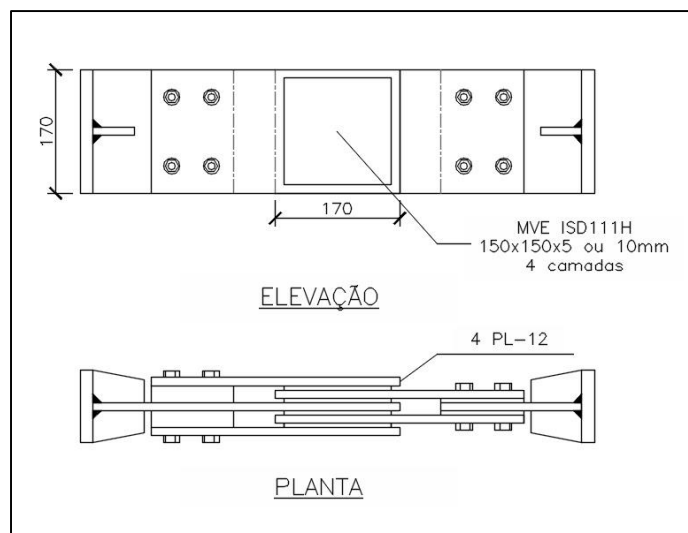


Figura 5-2. Esquema Geral do Atenuador Viscoelástico.

O trabalho experimental também permitiu a caracterização das propriedades mecânico-dinâmicas do material viscoelástico utilizado, sendo fornecidos na Tabela 5-1, os valores do módulo de armazenamento e fator de perda para uma faixa de frequências entre 0,10Hz e 0,30Hz.

Tabela 5-1. Valores experimentais do módulo de armazenamento e fator de perda (Material 3M ISD111)

f (Hz)	E' (MPa)	η
0,10	0,110	0,79
0,15	0,137	0,88
0,20	0,134	0,91
0,25	0,170	0,99
0,30	0,162	0,96

A partir desses valores experimentais, foi possível ajustar os parâmetros que caracterizam as propriedades mecânicas-dinâmicas do material viscoelástico via GHM, apresentados na

Tabela 5-2, e que permitem a construção das curvas representativas do módulo de armazenamento e o fator de perda no domínio da frequência (Figura 5-3).

Tabela 5-2. Parâmetros característicos do material viscoelástico ISD111 via GHM.

Parâmetro	Valor
ϵ (MPa)	0,14
α (MPa)	0,65
β (s ⁻¹)	950.000
δ (s ⁻²)	4.300.000

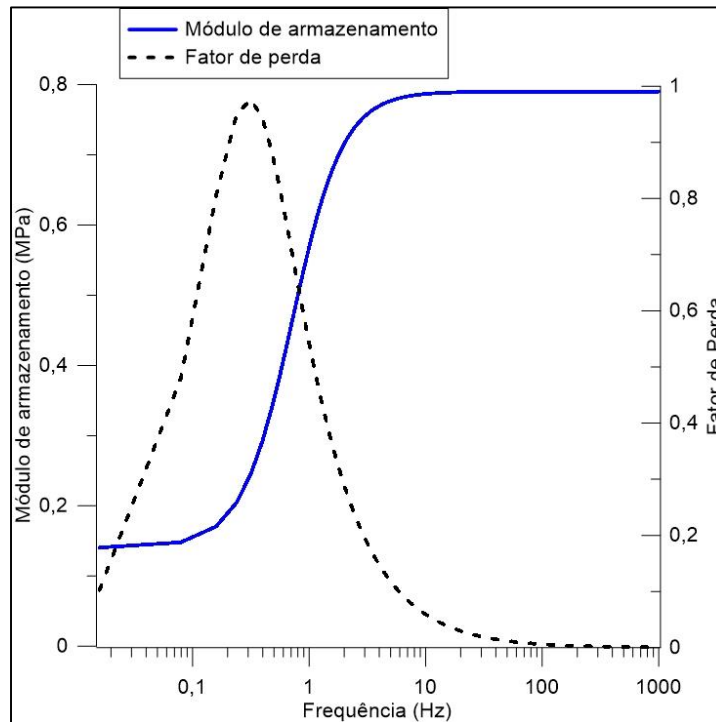


Figura 5-3. Variação do módulo de armazenamento e o fator de perda com a frequência.

Para a avaliação experimental dos amortecedores viscoelásticos acoplados, foi aplicado um carregamento axial com controle de deslocamentos ao longo do eixo longitudinal do amortecedor. O carregamento, de tipo harmônico, teve uma variação de frequências entre 0,1Hz e 0,3Hz, considerando uma deformação cisalhante máxima de 50%, o que corresponde a um deslocamento relativo de 2,5mm entre as superfícies das camadas viscoelásticas de 5mm de espessura.

As seguintes figuras mostram os ciclos de histerese experimentais apresentados por MONTGOMERY e CHRISTOPOULOS (2015), em conjunto com uma comparação com os valores obtidos com a ferramenta computacional.

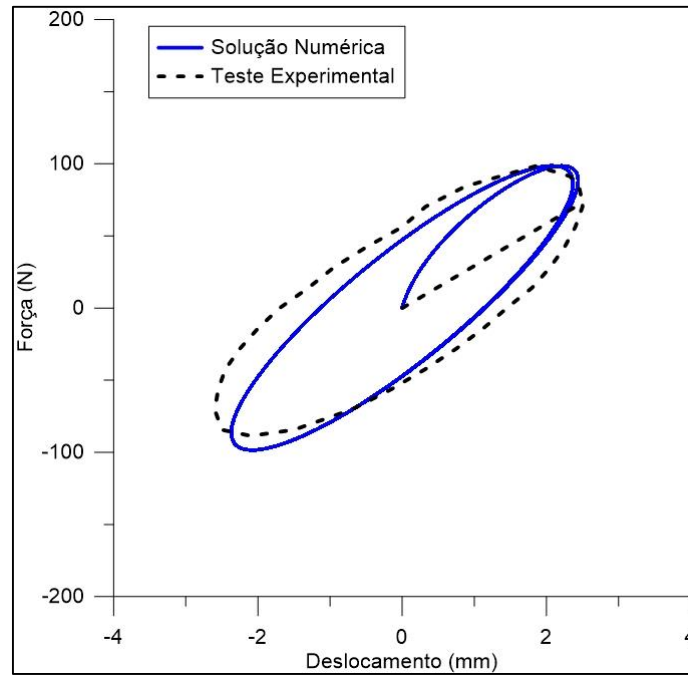


Figura 5-4. Ciclo de histerese para o AVE ($f=0,1\text{Hz}$).

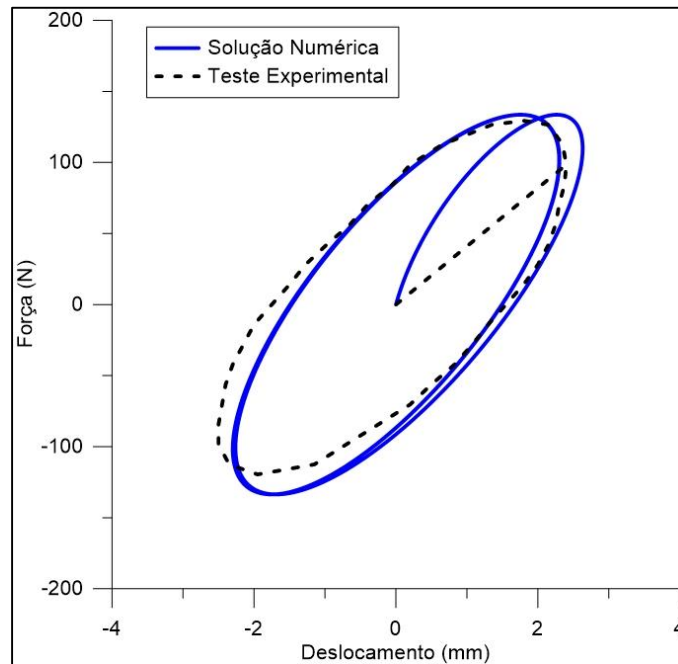


Figura 5-5. Ciclo de histerese para o AVE ($f=0,2\text{Hz}$).

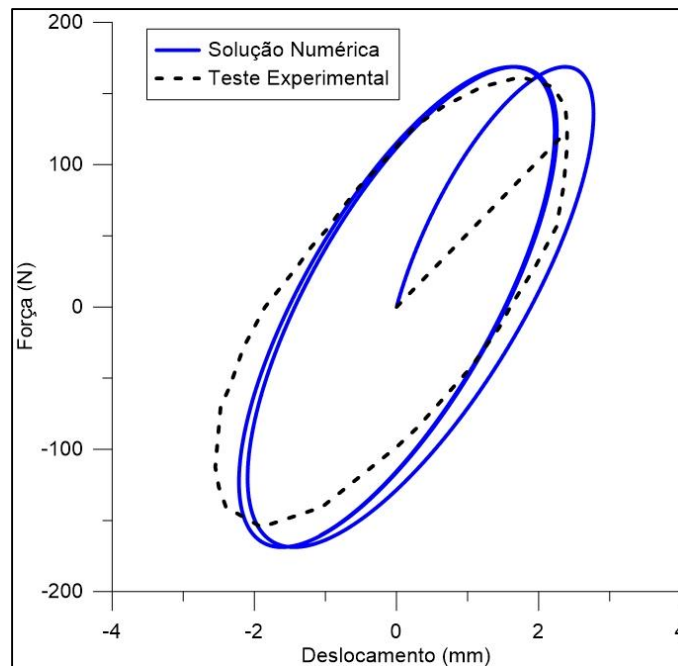


Figura 5-6. Ciclo de histerese para o AVE ($f=0,3\text{Hz}$).

A partir dos resultados apresentados é possível notar que existe uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais em cada ciclo de histerese. Além disso, a resposta do sistema é coerente com o comportamento dos materiais viscoelásticos de acordo com o exposto na Figura 5-3, estabelecendo dois aspectos que justificam esse comportamento.

O primeiro aspecto que deve ser salientado é que quando as frequências são maiores, o fator de perda cresce, pelo que o potencial de dissipação é maior. Nesse sentido, a área do ciclo de histerese correspondente a uma frequência de $0,3\text{Hz}$ é maior que aquela associada com uma frequência de $0,2\text{Hz}$, e essa última é maior que a associada com uma frequência de $0,1\text{Hz}$.

Em segundo lugar, pode ser notado que um acréscimo na frequência demanda uma magnitude de força maior para produzir o mesmo nível de deslocamentos, e isso também está associado com o incremento do fator de perda quando as frequências são maiores. Se o fator de perda cresce, a dissipação será maior, precisando de forças maiores para produzir os mesmos deslocamentos relativos.

Em relação ao módulo de armazenamento elástico, existe correspondência com o comportamento esperado em materiais viscoelásticos, já que representa a inclinação da elipse característica do ciclo de histerese, sendo maior na medida em que a frequência é incrementada.

5.2 PLACAS SANDUÍCHE

O segundo grupo de testes para avaliar a ferramenta computacional PEFAMV consistiu em um conjunto de placas caracterizadas por uma seção transversal de aço e concreto, e incorporando uma camada de material viscoelástico que tem como objetivo a atenuação das vibrações por flexão induzidas nas placas por um carregamento dinâmico.

Foram feitas várias análises, modificando a geometria da placa e as condições de contorno, com a intenção de modificar a rigidez estrutural do conjunto e avaliar a resposta amortecedora do material viscoelástico. A Tabela 5-3 resume as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos nas análises.

Tabela 5-3. Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na análise das placas.

CARACTERÍSTICAS	AÇO	CONCRETO	VISCOELÁSTICO
Módulo de Elasticidade (GPa)	200	25	*
Massa Específica (kg/m ³)	7.827	2.400	1.100
Coefficiente de Poisson	0,3	0,2	0,25

As análises feitas não consideraram o peso próprio dos materiais na resposta, e no caso no amortecimento dos materiais elásticos, foi considerado nulo, com o objetivo de visualizar com maior facilidade a capacidade de amortecimento do material viscoelástico. O carregamento dinâmico foi de tipo triangular, com um intervalo de tempo curto, próprio de uma ação de impacto, permitindo uma excitação forçada inicial e obtendo logo uma resposta em vibração livre. A excitação foi feita na direção vertical, observando a resposta no domínio do tempo nessa mesma direção. A amplitude do carregamento foi de 10kN, e o tempo de carregamento foi de 0,05s. A Figura 5-7 apresenta a forma do carregamento.

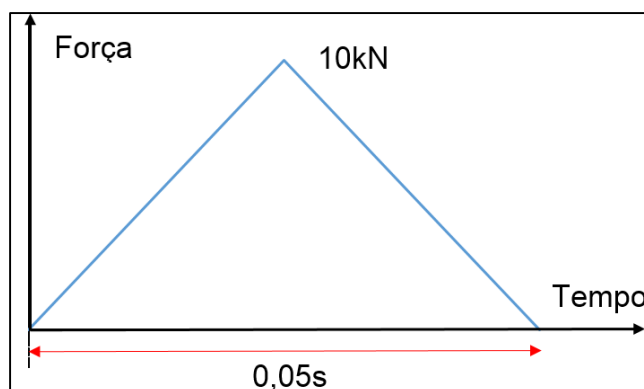


Figura 5-7. Carregamento de impacto triangular imposto às placas.

5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL VISCOELÁSTICO UTILIZADO

O material utilizado para as avaliações da placa sanduíche possui propriedades mecânico-dinâmicas similares às encontradas no polímero ISD112, fabricado pela 3M, e descrito como um material com propriedades amortecedoras útil na indústria aeronáutica, eletrônica, automobilística e outras. A Tabela 5-4 mostra os parâmetros utilizados via GHM para a caracterização do material no PEFAMV, utilizados por BARBOSA (2000).

Tabela 5-4. Parâmetros característicos do MVE via GHM.

Parâmetro	Valor
ε (MPa)	1,00
α (MPa)	5,00
β (s ⁻¹)	6.000
δ (s ⁻²)	1.200.000

A Figura 5-8 mostra as curvas representativas do módulo de armazenamento e fator de perda para o material utilizado.

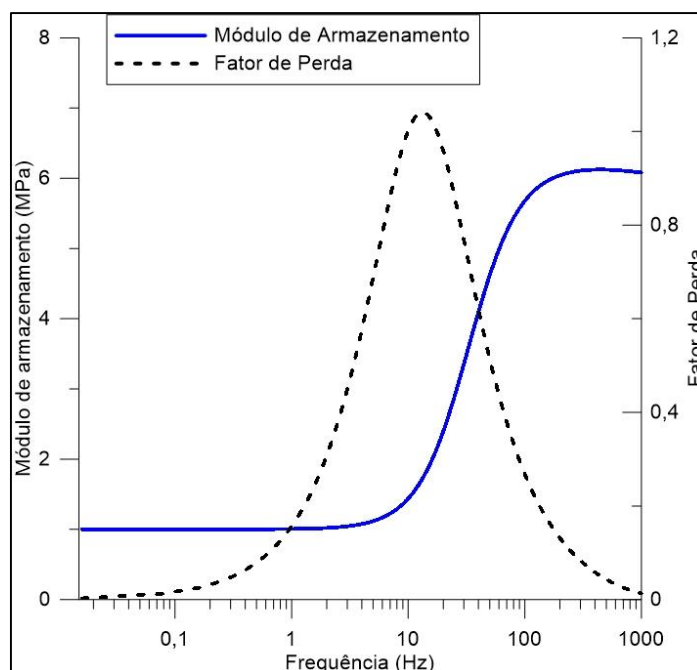


Figura 5-8. Propriedades mecânico-dinâmicas do MVE utilizado nas placas sanduíche.

A partir do gráfico é possível perceber que a capacidade de amortecimento do material viscoelástico utilizado nas placas sanduíche será maior em uma faixa de frequência próxima aos 10Hz, pelo que aqueles tabuleiros com frequências naturais excitadas próximas desse valor, provavelmente podem experimentar uma redução maior da vibração induzida pela ação dinâmica.

5.2.2 CARACTERÍSTICAS DOS DIFERENTES CASOS ANALISADOS

O procedimento de modelagem foi iniciado com um exemplo de placa simples, sem a incorporação de uma camada viscoelástica, para comparar a resposta do PEFAMV só com elementos elásticos, com um exemplo equivalente desenvolvido em um software comercial de análise estrutural.

Nesse sentido, o exemplo simples consistiu em uma placa de aço, de 10mm de espessura, com dimensões 6x5m, considerando as quatro bordas simplesmente apoiadas. A Figura 5-9 apresenta a geometria da placa considerada, onde o ponto “F” corresponde ao ponto de aplicação do carregamento dinâmico, e o ponto “O” representa o ponto de observação, coincidindo com o centro de gravidade da placa.

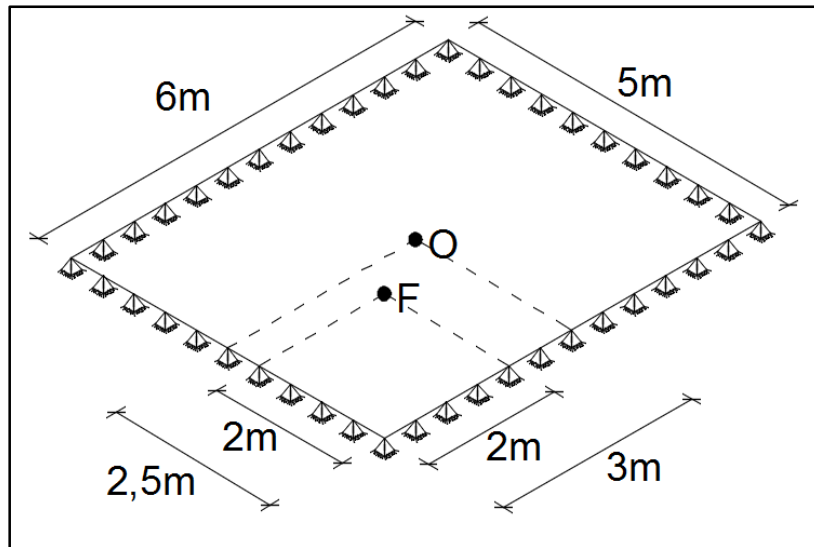


Figura 5-9. Geometria da placa simples.

Um segundo caso constituiu em uma placa com a mesma geometria anterior. O ponto de aplicação do carregamento dinâmico “F”, e o ponto de observação “O” foram mantidos na mesma locação usada no caso anterior. A condição de contorno adotada foi com as quatro bordas simplesmente apoiadas, e em relação aos materiais constitutivos, foram feitas duas avaliações diferentes.

A primeira avaliação foi feita com uma placa de tipo mista, chamada assim devido à existência de uma seção material composta. A camada inferior, de 10mm de espessura, foi de aço, enquanto que a camada superior foi de concreto, e com 120mm de espessura, acrescentando uma rigidez considerável à flexão em relação com o primeiro caso. A Figura 5-10 apresenta a seção transversal para a primeira avaliação.

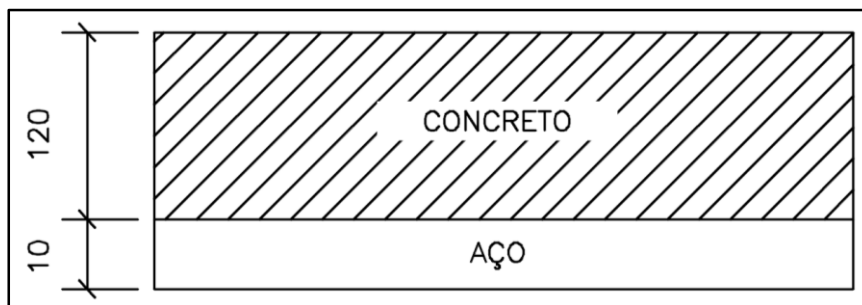


Figura 5-10. Seção Transversal da placa mista. Dimensões em milímetros.

A segunda avaliação considerou a existência de uma terceira camada de material viscoelástico de 5mm de espessura, entre as camadas de aço e concreto. Nesse caso, a placa é denominada sanduíche, onde a camada viscoelástica constitui

o núcleo da seção, enquanto que a zona de concreto representa a camada restritora. A figura seguinte apresenta uma seção transversal da placa sanduíche.

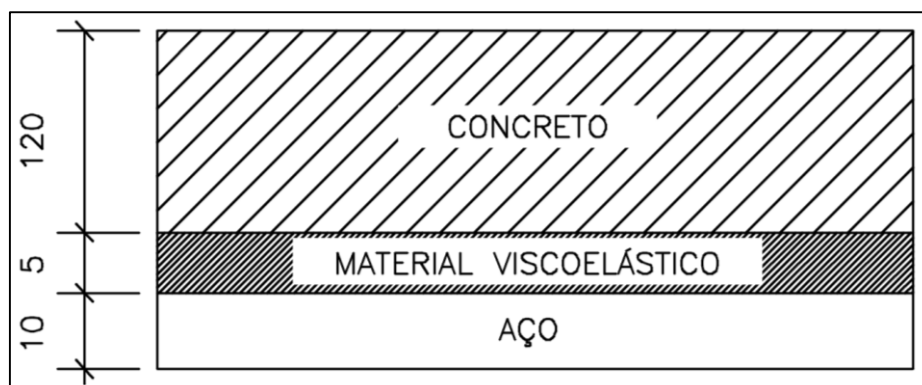


Figura 5-11. Seção transversal da placa sanduíche. Dimensões em milímetros.

Foi desenvolvido um terceiro caso, considerando a mesma geometria dos casos anteriores, mas com uma condição de contorno diferente, adotando duas bordas livres, correspondentes àquelas de comprimento maior (6m), enquanto que as outras duas bordas foram consideradas como simplesmente apoiadas. A Figura 5-12 apresenta a geometria dessa placa, mantendo a locação do ponto “F” e “O” sem variação nenhuma.

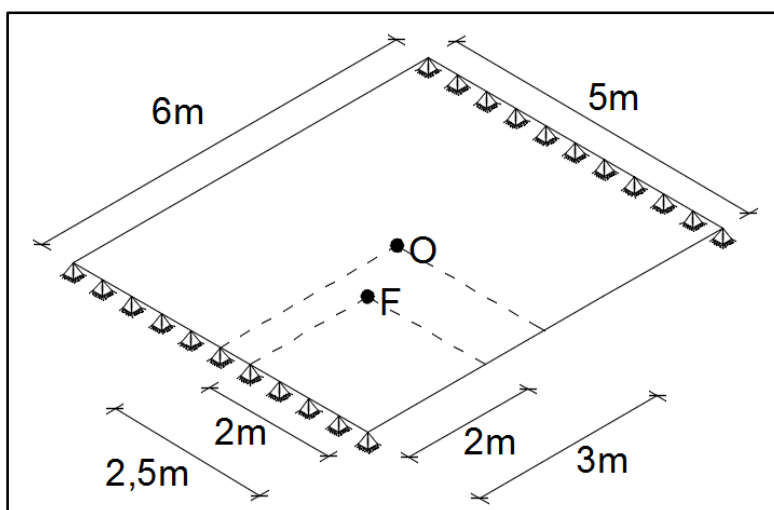


Figura 5-12. Geometria da placa com duas bordas livres.

Para estabelecer uma comparação entre as respostas com e sem material viscoelástico, foram feitas duas avaliações, da mesma forma que foi feito no caso anterior. Uma primeira avaliação considerou uma placa mista de aço-concreto, com a camada inferior de aço de 10mm de espessura, enquanto que a camada superior de concreto teve uma espessura de 120mm. Por último, uma avaliação com a inclusão de

uma camada viscoelástica de 5mm de espessura foi feita para comparar a resposta entre ambas as duas avaliações.

O quarto caso correspondeu a uma placa de dimensões 12x5m, com as quatro bordas apoiadas, onde foram realizadas duas avaliações, uma delas considerando uma seção mista de aço-concreto, com as mesmas espessuras usadas nos outros casos, mantendo o aço na camada inferior. Uma segunda avaliação consistiu em uma seção de tipo sanduíche, com uma camada de material viscoelástico de 5mm de espessura no núcleo da seção. Os pontos “F” e “O” são apresentados na figura seguinte que descreve o exemplo.

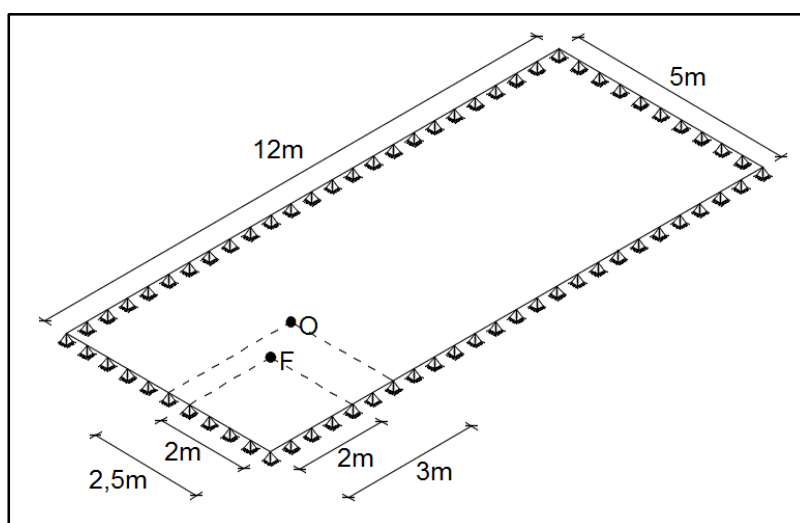


Figura 5-13. Geometria da placa do quarto caso.

Por último, o quinto caso foi de uma placa de 12x5m, e com duas das suas bordas apoiadas, correspondentes àquelas de comprimento menor (5m), enquanto que as bordas de 12m foram consideradas livres. Uma avaliação com uma seção mista de aço-concreto, e outra com uma seção sanduíche, constituíram a análise.

5.2.3 METODOLOGIA UTILIZADA NA ANÁLISE DOS TABULEIROS

Para a avaliação da ferramenta computacional PEFAMV na análise dinâmica das placas ou tabuleiros, foi adotado um procedimento que permitiu comparar inicialmente as respostas obtidas no SAP2000 e no PEFAMV, associadas às placas mistas (sem núcleo viscoelástico amortecedor), com o objetivo de validar a modelagem de materiais com comportamento elástico.

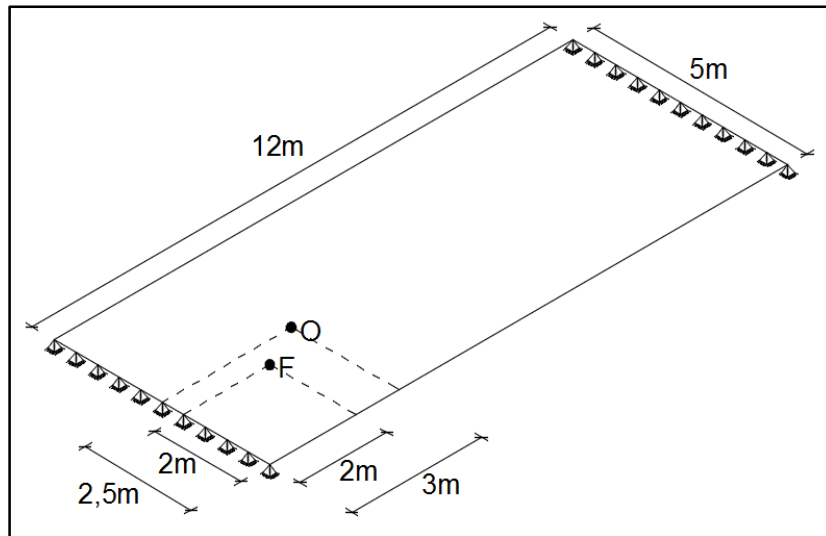


Figura 5-14. Geometria da placa do quinto caso

Posteriormente, foi feita a modelagem das placas sanduíche, estabelecendo uma comparação com o exemplo equivalente sem núcleo de MVE, e analisando a capacidade amortecedora do material.

Com base na informação apresentada nos parágrafos anteriores, no programa SAP2000 foi feita a modelagem da placa mista correspondente em cada caso, considerando elementos elásticos tipo *shell* de 25x25cm para formar a malha, com as dimensões e condições de contorno próprias de cada caso.

A partir das análises feitas no SAP2000, foi possível obter as frequências naturais correspondentes aos primeiros dez modos de vibração, além de uma visualização das formas modais. No caso da resposta em vibração forçada, devido ao carregamento dinâmico, foi possível obter o histórico dos deslocamentos no tempo, sem considerar amortecimento do material.

Posteriormente, em uma segunda fase, foi feita a modelagem da placa mista usando o programa PEFAMV, atendendo as condições de contorno, geometria e carregamento dinâmico correspondentes. A resposta no domínio do tempo foi comparada com aquela obtida no SAP2000.

Devido à boa correlação encontrada entre as respostas dos dois modelos, foi possível avançar na seguinte fase, que consistiu na definição de um passo de integração adequado para o modelo da placa sanduíche. Uma regra prática para definir o passo de integração consiste na divisão por 100, do menor período de vibração (T_{menor}) evidenciado na resposta em vibração forçada.

$$\Delta t = \frac{T_{menor}}{100} \quad (5-1)$$

Para identificar com maior facilidade as frequências de vibração, e os correspondentes períodos, foi feita uma transformação ao domínio da frequência da resposta obtida no domínio do tempo, permitindo assim a identificação da maior frequência, correspondente ao menor período de vibração, e assim definir o passo de integração para a modelagem da placa sanduíche.

Uma última fase consistiu na modelagem da placa sanduíche, com as condições de contorno, geométricas e de carregamento estabelecidas. O passo de integração obtido na fase anterior foi utilizado na análise, e a resposta no domínio do tempo foi comparada com a resposta obtida na placa mista (sem MVE). Também foram avaliadas as mudanças na flexibilidade das placas, devido às variações das frequências naturais de vibração quando o material viscoelástico é incorporado. Uma transformação ao domínio da frequência da resposta no domínio do tempo das placas sanduíche permitiu observar com maior clareza essas mudanças.

5.2.4 RESULTADOS OBTIDOS NOS DIFERENTES CASOS

Em seguida são apresentados os resultados obtidos nos modelos adotados, estabelecendo comparações entre as respostas obtidas.

CASO 1

O caso mais simples foi de uma placa de aço de 10mm de espessura, que foi modelada no SAP2000 e no PEFAMV. A Tabela 5-5 apresenta as frequências naturais correspondentes aos primeiros dez modos de vibração.

Posteriormente, a placa foi submetida a um carregamento de impacto triangular com uma amplitude de 10kN em um intervalo de tempo de 0,05s. O gráfico seguinte apresenta a resposta em vibração forçada não amortecida, estabelecendo uma comparação entre o PEFAMV e o SAP2000.

Tabela 5-5. Frequências naturais de vibração, caso 1.

Modo	Frequência (Hz)
1	1,63
2	3,62
3	4,51
4	6,49
5	6,95
6	9,30
7	9,79
8	11,26
9	11,61
10	14,42

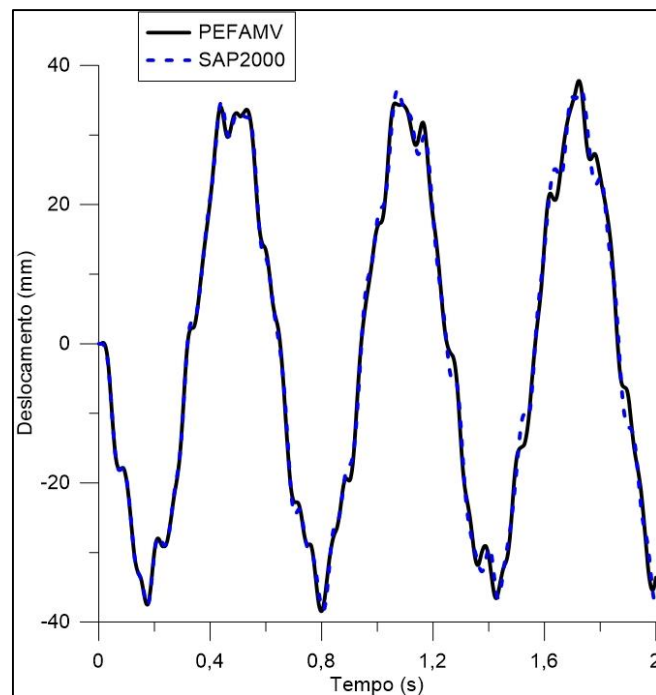


Figura 5-15. Resposta no domínio do tempo, caso 1.

Existem duas informações que podem ser ressaltadas do gráfico. Em primeiro lugar, existe uma boa correlação entre as respostas das duas ferramentas computacionais, com um deslocamento máximo de aproximadamente 38mm, e muito similar entre um e outro. Além disso, é identificada uma resposta periódica mais ou menos senoidal, que resulta dominante e que poderia estar associado à excitação de um modo com maior preponderância. A realização da transformada rápida de Fourier permitiu observar as frequências dominantes na resposta.

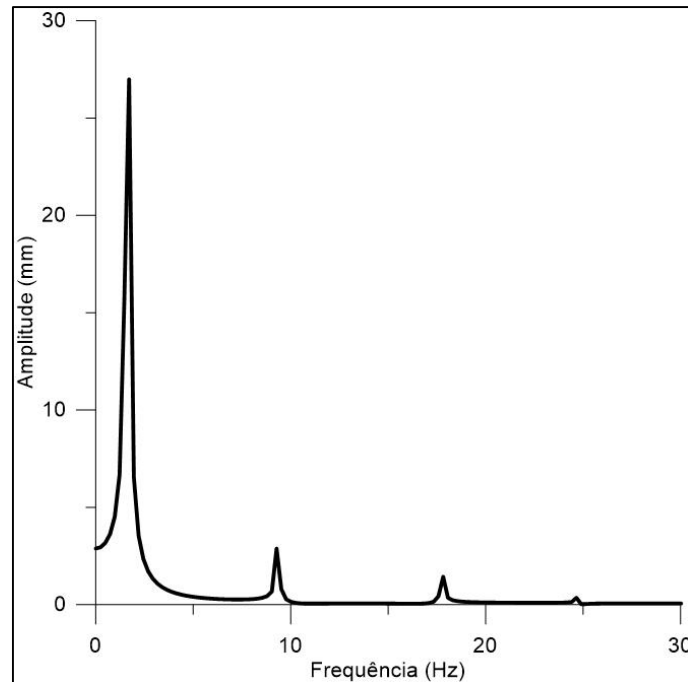


Figura 5-16. Resposta no domínio da frequência, caso 1.

A partir da Figura 5-16, é possível notar que o primeiro modo de vibração apresenta uma amplitude maior, o que fisicamente implica em uma preponderância maior na resposta. Modos superiores, ainda que tenham uma participação, não possuem uma grande proporção da energia do gráfico, que se encontra concentrada em frequências próximas do primeiro modo de vibração. Isso explica o fato da resposta no tempo ter um comportamento mais ou menos marcante em relação a uma onda periódica bem definida, lembrando que a não consideração de amortecimento, permite que a amplitude de resposta seja mantida mais ou menos constante no tempo.

CASO 2

O caso seguinte basicamente manteve a mesma geometria e condições de contorno, mas adicionou uma camada de concreto de 120mm de espessura à camada de aço. Da resposta em vibração livre foi possível obter as frequências associadas com os primeiros dez modos de vibração.

De acordo com o previsto, o concreto, aumenta notavelmente a rigidez da seção, obtendo frequências muito maiores em relação ao primeiro caso de estudo; em consequência, essa rigidez permite uma redução dos deslocamentos. A Figura 5-17 apresenta a resposta em vibração forçada da placa mista no domínio do tempo.

Tabela 5-6. Frequências naturais da placa mista, 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.

Modo	Frequência (Hz)
1	10,78
2	23,97
3	29,78
4	42,70
5	45,77
6	60,89
7	63,87
8	73,07
9	75,34
10	91,81

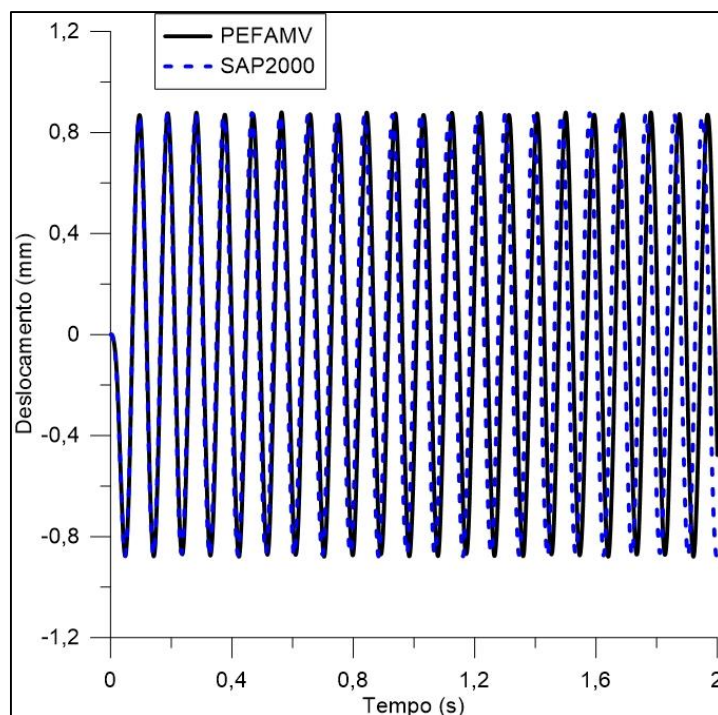


Figura 5-17. Resposta no domínio do tempo, placa mista 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.

Novamente existe bastante similitude entre as duas respostas, com um deslocamento máximo muito mais baixo, de aproximadamente 0,8mm, e com uma predominância aparente de um dos modos de vibração na resposta. A transformação

ao domínio da frequência permitiu identificar os modos excitados pelo carregamento dinâmico.

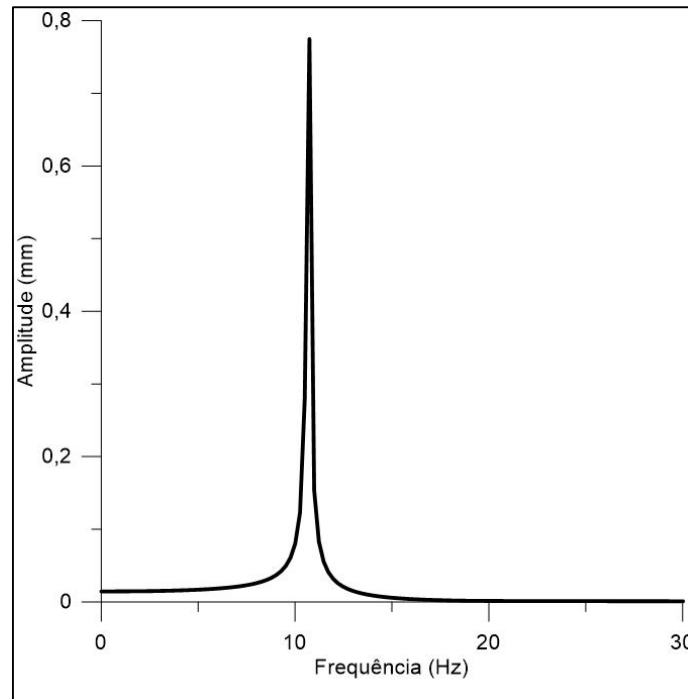


Figura 5-18. Resposta no domínio da frequência, placa mista 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.

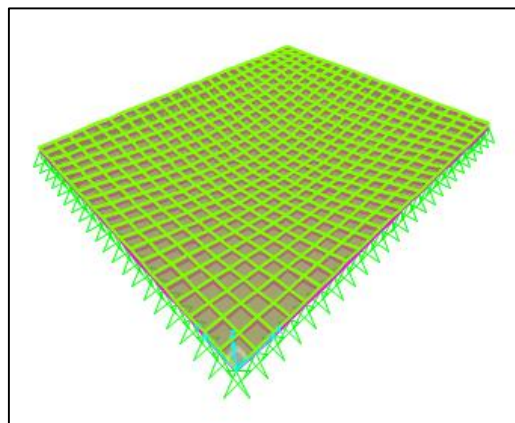


Figura 5-19. Forma modal associada ao primeiro modo em flexão, caso 2.

Nesse caso, é possível observar que a frequência dominante na resposta fica bem próxima daquela representativa do primeiro modo de vibração (10,8Hz). Considerando esse valor, foi possível estimar o passo de integração usado na placa sanduíche para obter uma boa representatividade em termos da qualidade da resposta.

A modelagem da placa sanduíche partiu da base da placa mista, incorporando entre a camada de aço e a camada de concreto, um núcleo de 5mm de espessura de material viscoelástico. A imagem que é apresentada em seguida compara a resposta em vibração forçada da placa mista e a placa sanduíche obtidas com o PEFAMV.

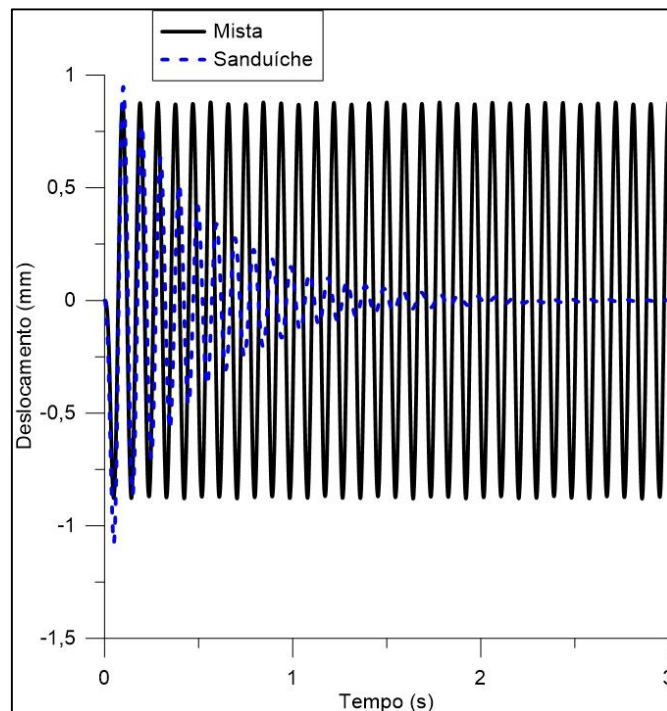


Figura 5-20. Comparação da resposta da placa mista e sanduíche, 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.

A partir da Figura 5-20, é possível notar que no instante inicial, a resposta da placa sanduíche acompanha a resposta da placa mista, característica própria de um mecanismo de controle passivo. Em seguida, o efeito do material viscoelástico permite um amortecimento das vibrações atuantes na placa, além de uma flexibilidade maior, que é marcada pelo decréscimo do número de ciclos, quer dizer, diminuição da frequência. A transformação ao domínio da frequência permite notar na figura seguinte as mudanças em relação à placa mista.

A partir da Figura 5-21, é possível concluir que existe uma pequena diminuição na frequência dominante na resposta da placa sanduíche, além de uma atenuação do modo fundamental em vibração.

CASO 3

O caso que é apresentado em seguida corresponde a uma variação do anterior, adotando duas bordas livres (as de 6m de comprimento). Esse fato gera uma

placa mais flexível em relação ao caso que possui quatro bordas apoiadas. A Tabela 5-7 apresenta as frequências associadas aos primeiros dez modos de vibração, em uma configuração de placa mista.

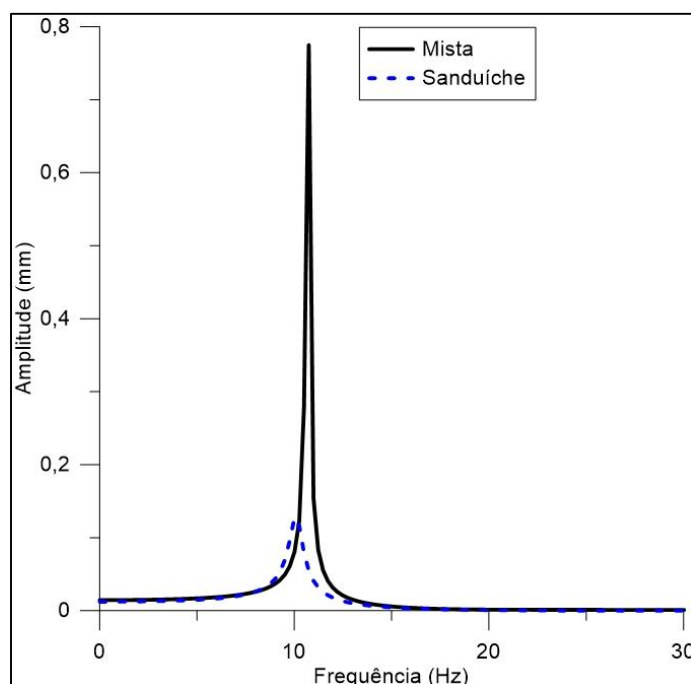


Figura 5-21. Comparação da resposta no domínio da frequência, 6x5m, quatro bordas apoiadas, caso 2.

Tabela 5-7. Frequências naturais da placa mista, 6x5m, duas bordas livres, caso 3.

Modo	Frequência (Hz)
1	4,37
2	8,55
3	17,58
4	21,38
5	22,79
6	37,58
7	39,49
8	44,90
9	45,51
10	60,68

É possível notar que as frequências são menores em comparação com o caso anterior. A resposta no tempo em vibração forçada permite estabelecer uma comparação entre a curva obtida no SAP2000 e PEFAMV.

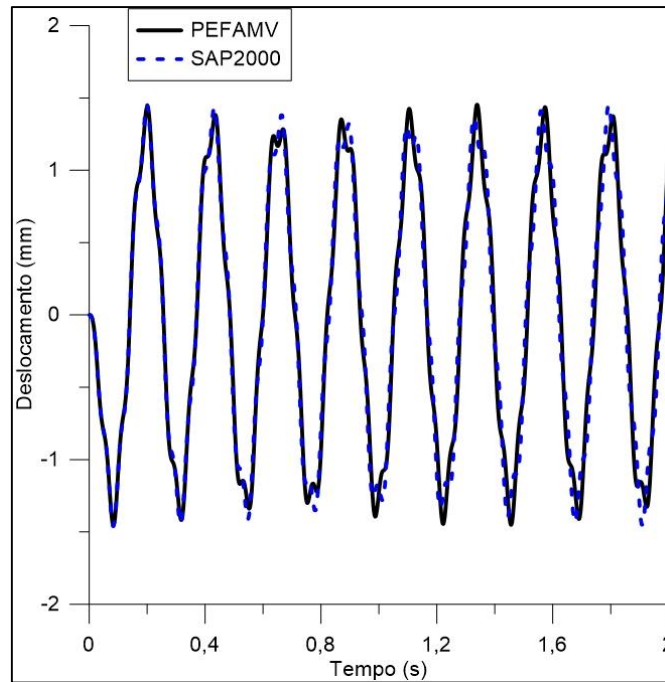


Figura 5-22. Resposta no domínio do tempo, placa mista 6x5m, duas bordas livres, caso 3.

Nesse caso, a resposta novamente é muito próxima entre as duas ferramentas computacionais, com deslocamentos máximos de aproximadamente 1,5mm, identificando por meio do gráfico o período de vibração que caracteriza a resposta. Em seguida é apresentada a transformação ao domínio da frequência da resposta no tempo.

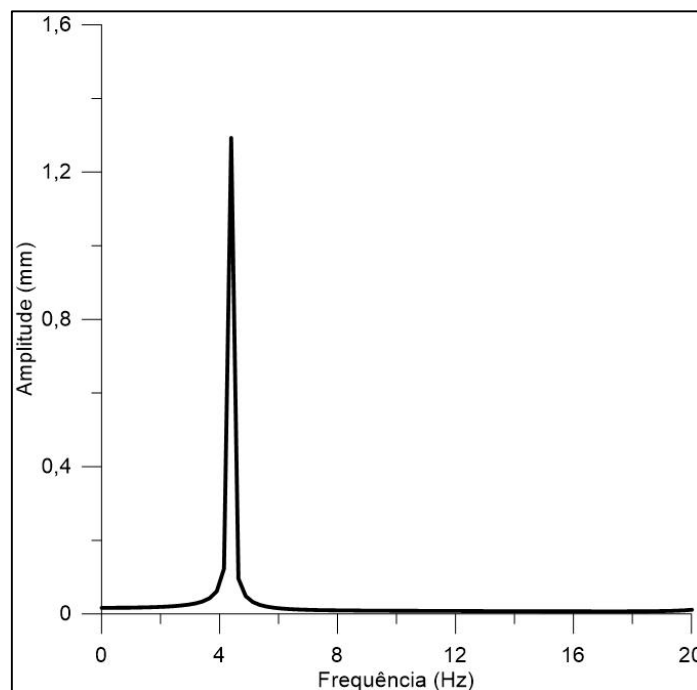


Figura 5-23. Resposta no domínio da frequência, placa mista 6x5m, duas bordas livres, caso 3.

Nesse caso, a transformação ao domínio da frequência confirma que o primeiro modo é fundamentalmente excitado nessa posição da placa, basicamente em flexão simples, de acordo com a Figura 5-24.

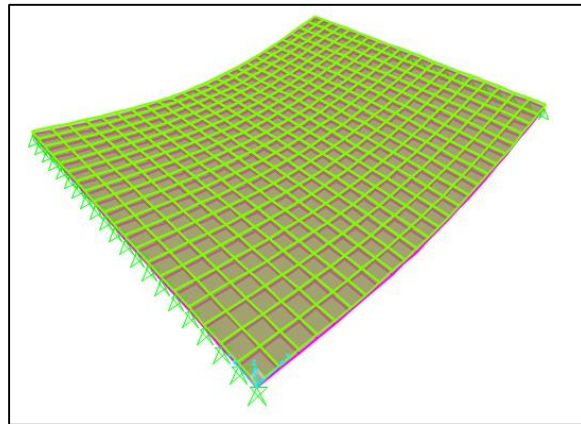


Figura 5-24. Forma modal predominante da placa mista 6x5m, duas bordas livres, caso 3.

A frequência associada ao primeiro modo foi usada para a escolha do passo de integração no exemplo que incorpora um núcleo de material viscoelástico de 5mm de espessura. Em seguida é apresentada a resposta no tempo para esse modelo.

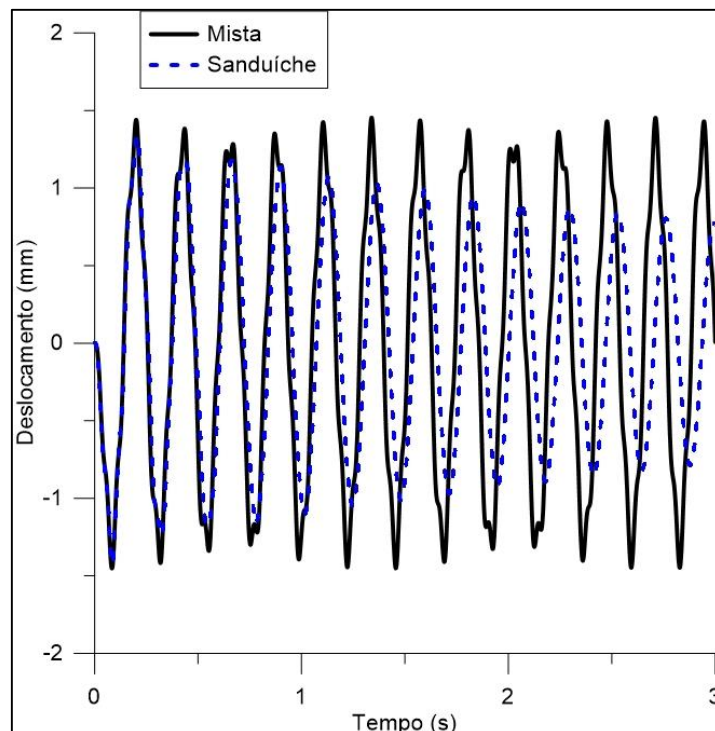


Figura 5-25. Comparação da resposta da placa mista e sanduíche, 6x5m, duas bordas livres, caso 3.

A partir da Figura 5-25 é possível notar que a resposta da placa sanduíche mostra um baixo amortecimento da vibração no ponto de observação, fato que é confirmado na comparação da resposta no domínio da frequência (Figura 5-28). O ponto de observação, que corresponde ao centro geométrico da placa, é excitado por um modo em flexão com uma frequência aproximada de 4,4Hz, muito menor em relação à faixa ótima de frequências do material viscoelástico, perto de 10Hz, onde o fator de perda atinge o seu valor máximo (Figura 5-8).

Isto explica a razão pela qual a camada viscoelástica induz um baixo amortecimento na resposta. Mudando o ponto de observação para uma localização no meio de uma das bordas livres, é mostrada em seguida a resposta no domínio do tempo (Figura 5-26).

Nesse ponto, além do primeiro modo em flexão (4,4Hz), é excitado um modo em flexo-torção com uma frequência de aproximadamente 8,5Hz, cuja forma modal é mostrada na Figura 5-27, com um valor próximo da faixa ótima de frequências do MVE utilizado.

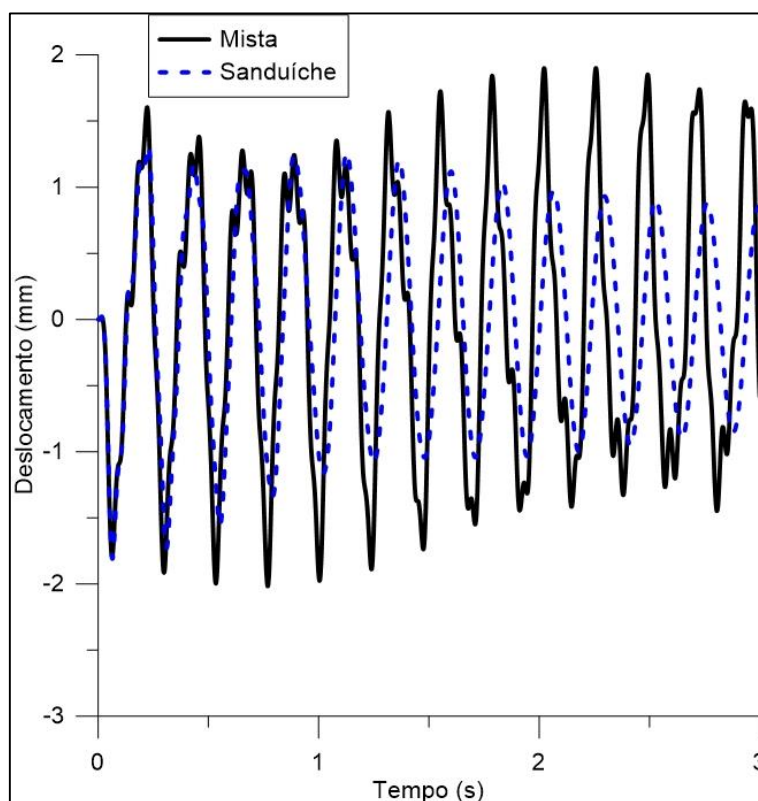


Figura 5-26. Comparação da resposta no domínio do tempo no ponto meio da borda livre, caso 3.

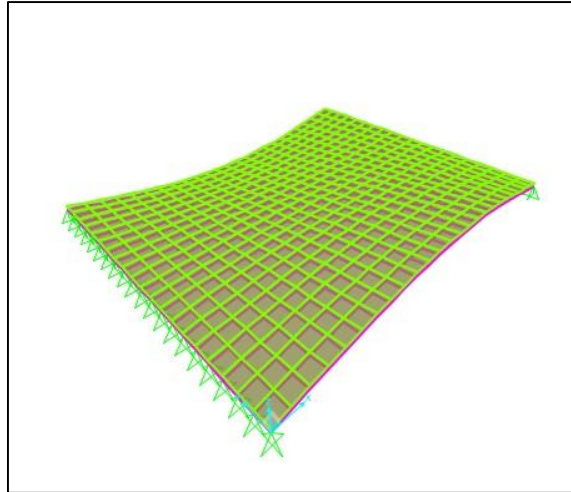


Figura 5-27. Forma modal em flexo-torção correspondente ao segundo modo (8,5Hz), caso 3.

A Figura 5-29 mostra uma comparação dos espectros de frequência no ponto médio da borda livre, entre a placa mista e sanduíche, evidenciando que o primeiro modo de vibração tem uma baixa atenuação, enquanto que o segundo modo, próximo da faixa ótima do fator de perda, foi atenuado pela camada viscoelástica. A deformação cisalhante induzida na camada viscoelástica devido à flexo-torção, permite a dissipação de energia.

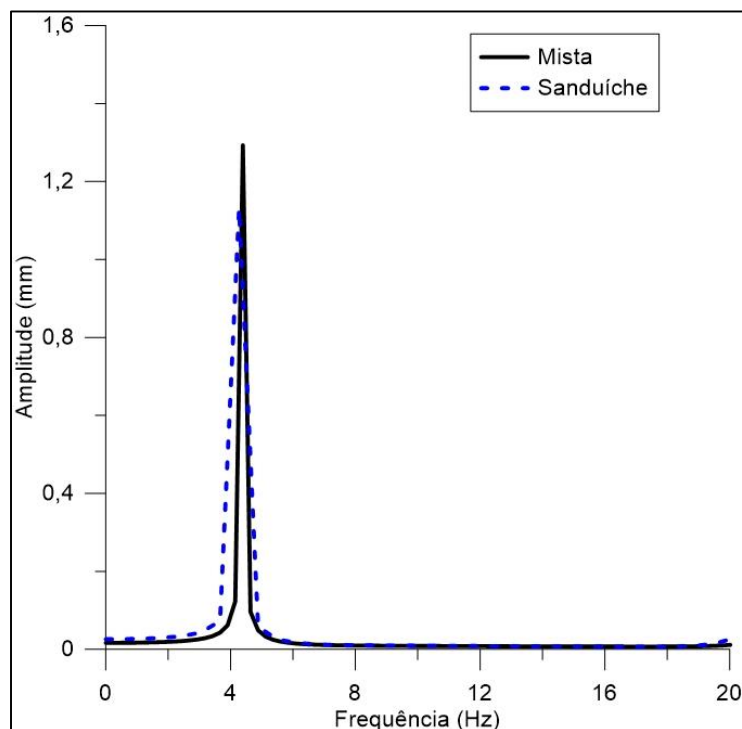


Figura 5-28. Comparação da resposta no domínio da frequência no centro geométrico da placa, caso 3.

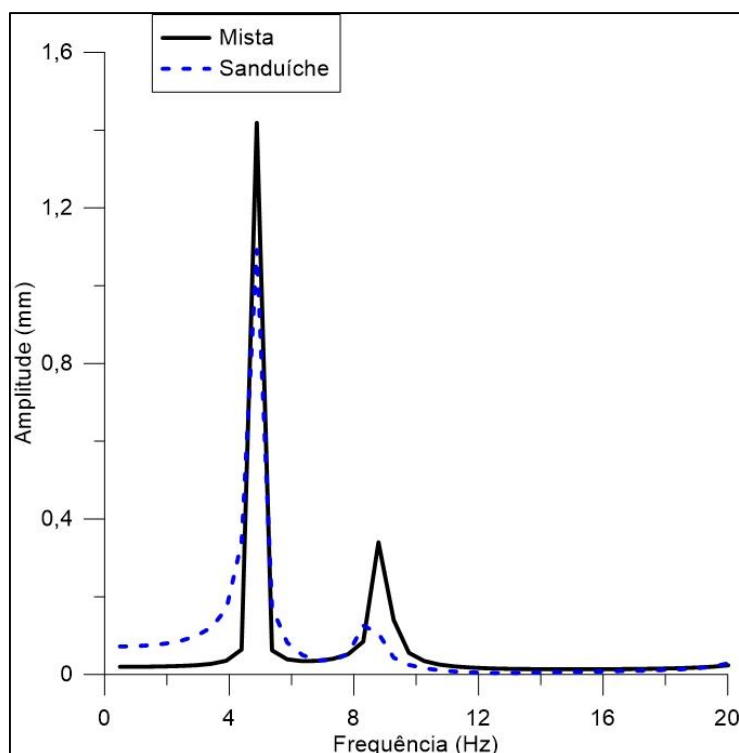


Figura 5-29. Comparação da resposta no domínio da frequência no ponto médio da borda livre, caso 3.

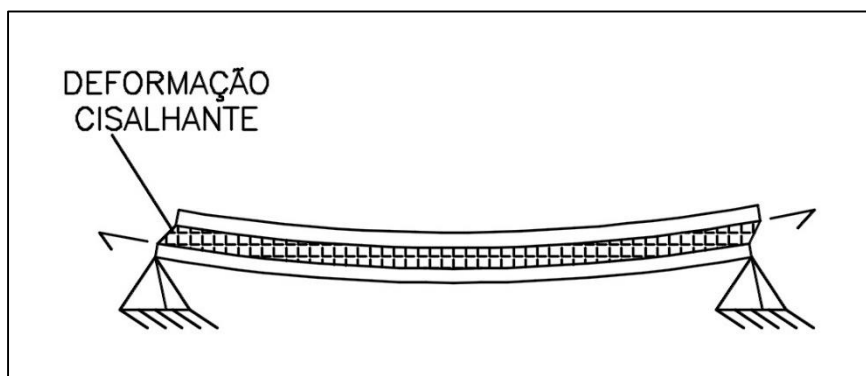


Figura 5-30. Representação geral da deformação cisalhante presente nas camadas viscoelásticas.

Para oferecer uma solução mais eficiente, é mostrado em seguida um teste feito com uma mudança nas propriedades do material viscoelástico, usando os parâmetros descritos na Tabela 5-8, que permitem representar as propriedades mecânico-dinâmicas na Figura 5-31. Considerando o ponto de observação inicialmente definido, a Figura 5-32 mostra a comparação das respostas no domínio do tempo, enquanto que a Figura 5-33 representa uma transformação ao domínio da frequência dessas respostas.

Nesse caso, é evidente que existe uma eficiência considerável no uso da camada viscoelástica em relação com a proposta inicial, ressaltando também que as

condições de flexibilidade do tabuleiro fazem com que a escolha do material seja mais rigorosa, visando um fator de perda maior para garantir um maior nível de dissipação de energia.

Tabela 5-8. Parâmetros característicos do MVE alternativo via GHM, caso 3.

Parâmetro	Valor
ε (MPa)	0,03
α (MPa)	5,00
β (s ⁻¹)	4.000
δ (s ⁻²)	1.200.000

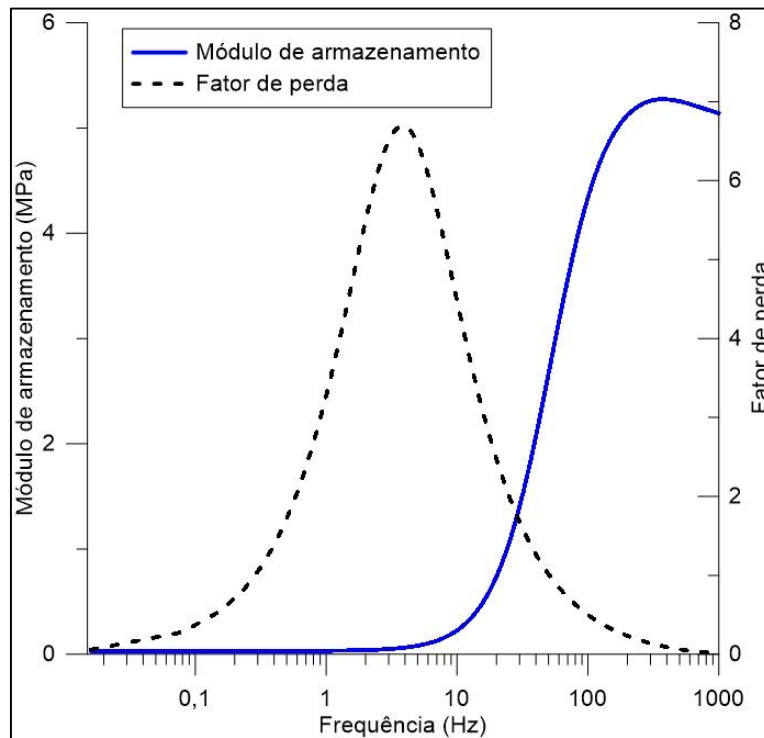


Figura 5-31. Propriedades mecânico-dinâmicas do MVE alternativo utilizado

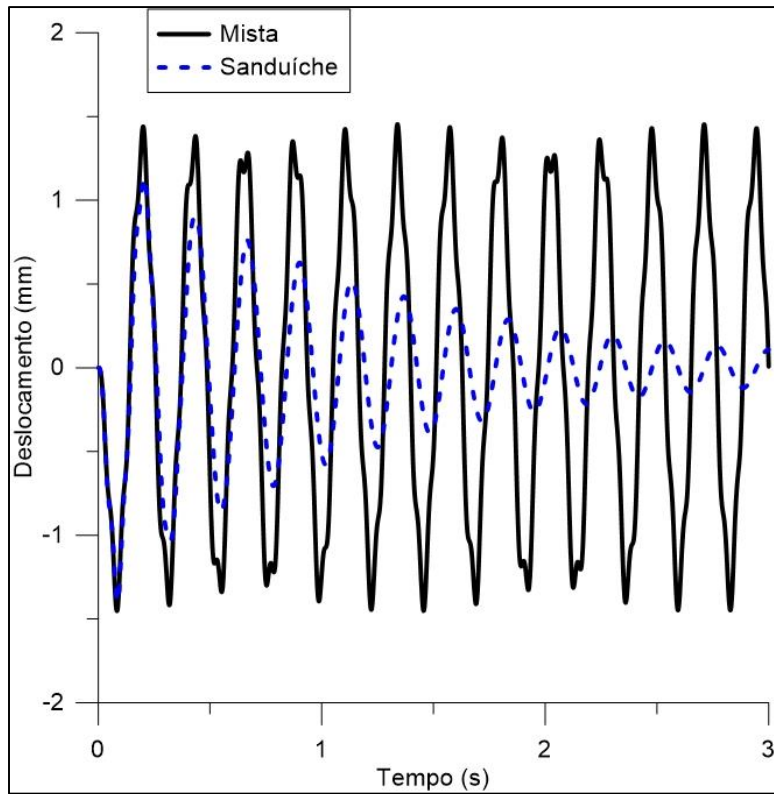


Figura 5-32. Comparação no domínio do tempo da resposta da placa mista e sanduíche, caso 3 com o MVE alternativo.

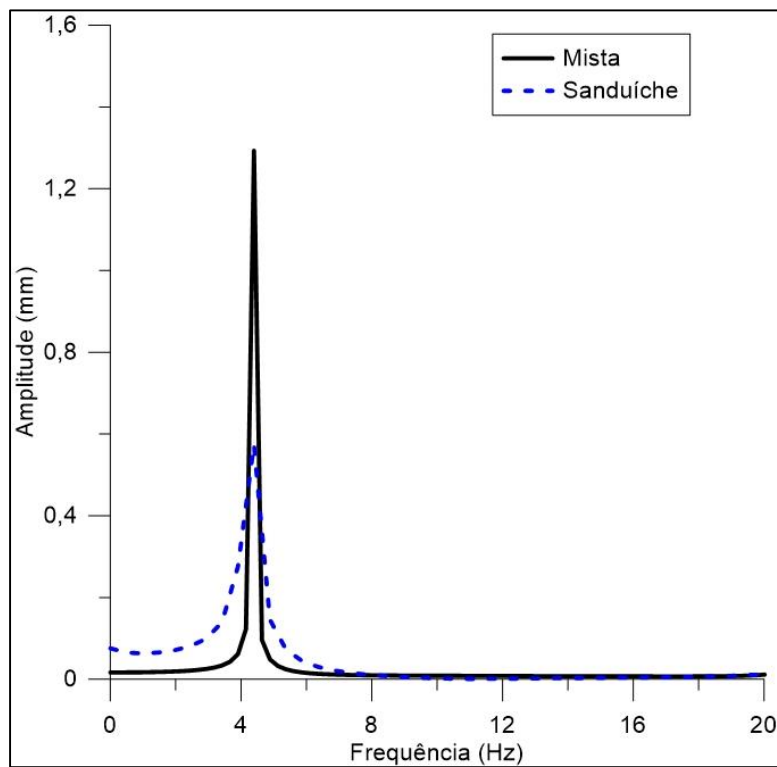


Figura 5-33. Comparação no domínio da frequência da resposta da placa mista e sanduíche, caso 3 com o MVE alternativo.

CASO 4

Em seguida são apresentados os resultados obtidos para a placa de 12x5m, mantendo as posições do ponto de aplicação de carga e de observação, com uma condição de contorno que adotou as quatro bordas como simplesmente apoiadas, de acordo com a Figura 5-13.

A primeira parte da análise, seguindo o procedimento descrito nos casos anteriores, correspondeu a uma avaliação da resposta no domínio do tempo para a placa mista em vibração forçada (Figura 5-34), além da determinação das frequências naturais de vibração (Tabela 5-9) e formas modais de vibração (Figura 5-35).

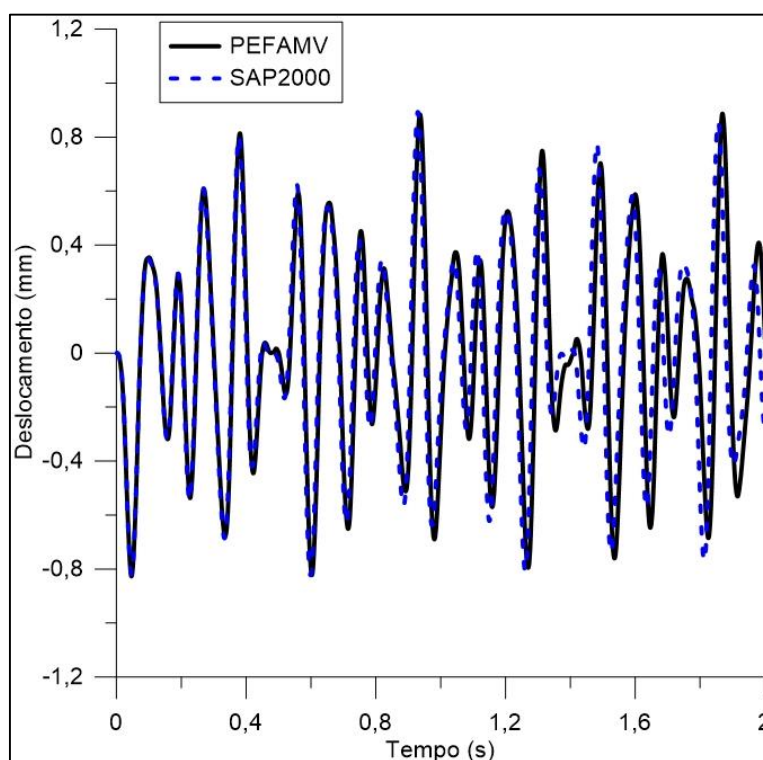


Figura 5-34. Resposta no domínio do tempo da placa mista, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.

As frequências naturais obtidas para essa avaliação são menores em relação com a placa de 6x5m com todas as bordas apoiadas, fato que faz sentido, devido a que é uma placa mais flexível em comparação com aquela de menor comprimento. Os deslocamentos obtidos no tempo permitem notar uma resposta com a interação aparente de vários modos, onde não é perceptível claramente a preponderância de uma forma modal ou outra. Existe uma boa correlação novamente entre o PEFAMV e SAP2000, considerando esses dados para realizar uma transformação ao domínio da frequência e assim observar quais são os modos em flexão dominantes.

Tabela 5-9. Frequências naturais da placa mista, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.

Modo	Frequência (Hz)
1	7,47
2	10,78
3	16,29
4	23,99
5	26,56
6	29,82
7	33,88
8	35,24
9	42,82
10	45,91

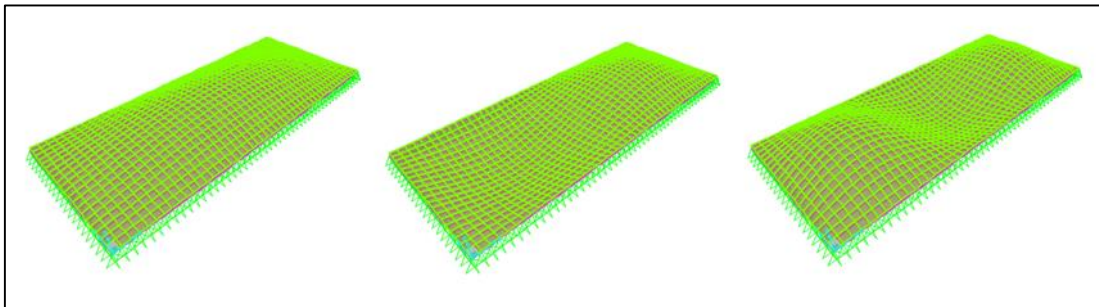


Figura 5-35. Formas modais predominantes no caso 4, de esquerda à direita: primeiro, segundo e terceiro modo, respectivamente.

A localização do ponto “F” na placa (Figura 5-13) com relação as formas modais, permite observar, nesse ponto, a excitação de vários modos de vibração, com uma preponderância do segundo modo (Figura 5-36), o que explica as variações apresentadas na resposta no domínio do tempo. O período associado ao terceiro modo de vibração, foi usado para o cálculo do tempo de integração utilizado na análise da resposta da placa sanduíche, representada na Figura 5-37 em comparação direta com a placa mista.

O comportamento da placa sanduíche reproduz as características observadas nos outros casos, com uma resposta inicial que acompanha à placa mista e que representa um pequeno retardo na ativação do mecanismo de controle, mas com uma diminuição progressiva da resposta, descrita por uma curva um pouco mais suave, que provavelmente é associada à atenuação dos modos de vibração. A resposta no domínio da frequência (Figura 5-38) permite estabelecer uma comparação com a placa mista, deixando em evidencia que a camada viscoelástica permite que a placa

seja um pouco mais flexível, com frequências menores, e além disso, com uma importante atenuação dos modos de vibração.

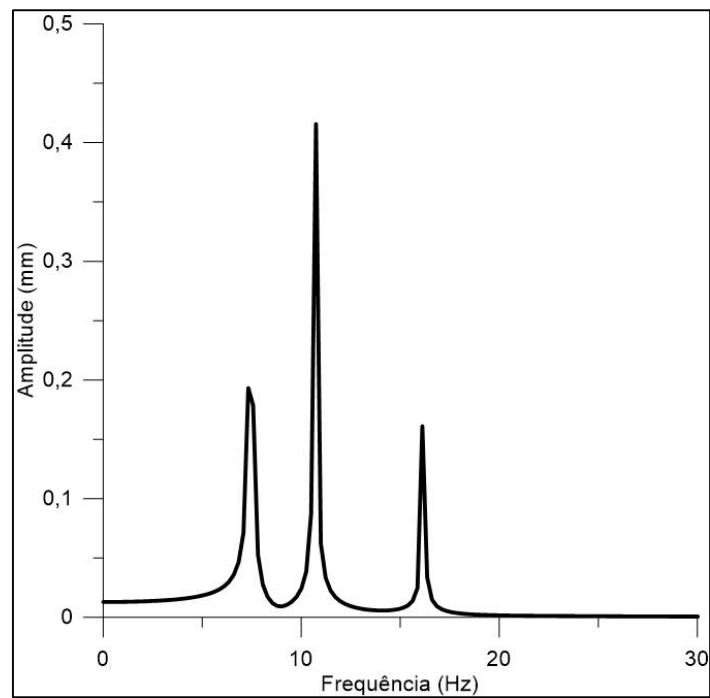


Figura 5-36. Resposta no domínio da frequência, Placa mista 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.

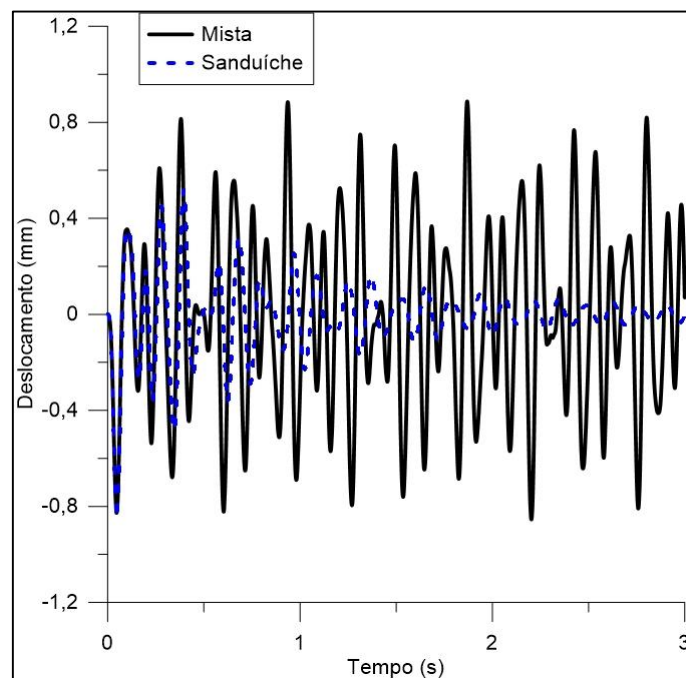


Figura 5-37. Comparação da resposta no domínio do tempo da placa mista e sanduíche, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.

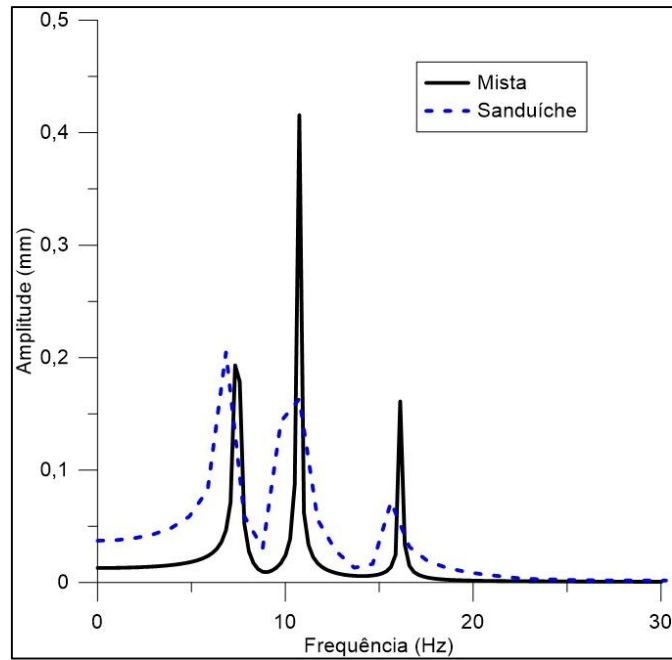


Figura 5-38. Comparação da resposta no domínio da frequência da placa mista e sanduíche, 12x5m, quatro bordas apoiadas, caso 4.

CASO 5

Um último caso foi desenvolvido, considerando a mesma geometria, mas com duas bordas livres, de acordo com a Figura 5-14. Nesse caso, são apresentadas em seguida as frequências naturais de vibração na Tabela 5-10, e a resposta no domínio do tempo em vibração forçada (Figura 5-39).

Tabela 5-10. Frequências naturais da placa mista, 12x5m, duas bordas livres, caso 5.

Modo	Frequência (Hz)
1	1,09
2	3,85
3	4,37
4	8,55
5	9,87
6	14,75
7	16,29
8	17,58
9	21,39
10	22,80

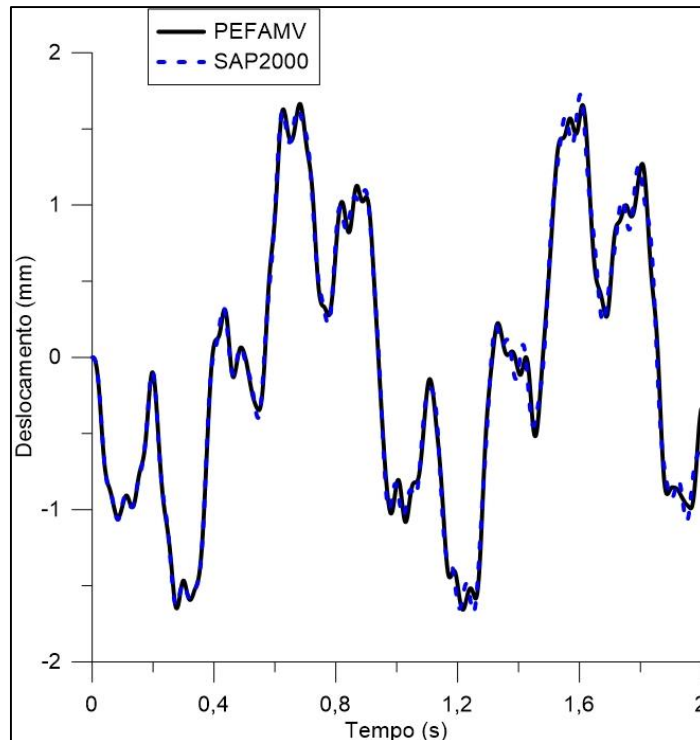


Figura 5-39. Resposta no domínio do tempo da placa mista, 12x5m, duas bordas livres, caso 5.

Os picos de deslocamentos observados na resposta no domínio do tempo para esse caso são maiores que os do caso anterior, pois as duas bordas livres conferem maior flexibilidade. Além disso, a resposta do SAP2000 novamente é muito próxima àquela obtida com o PEFAMV, o que permite validar a ferramenta computacional para os casos apresentados. A resposta no domínio da frequência é apresentada na Figura 5-40 e as formas de dois dos modos de vibração na Figura 5-41.

Considerando a frequência próxima a nono modo de vibração, foi calculado o valor do passo de tempo de integração para o modelo da placa sanduíche no PEFAMV, cuja resposta é mostrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** onde é comparada com a resposta da placa mista.

A partir das figuras apresentadas, é possível notar que o amortecimento produzido pela camada viscoelástica é muito baixo. De maneira similar ao que aconteceu no caso 3, neste tabuleiro, as frequências que são fundamentalmente excitadas têm um valor abaixo de 5Hz, longe da faixa de frequência ótima do material viscoelástico, pelo que é possível inferir que esse material não tem características apropriadas para esse tabuleiro.

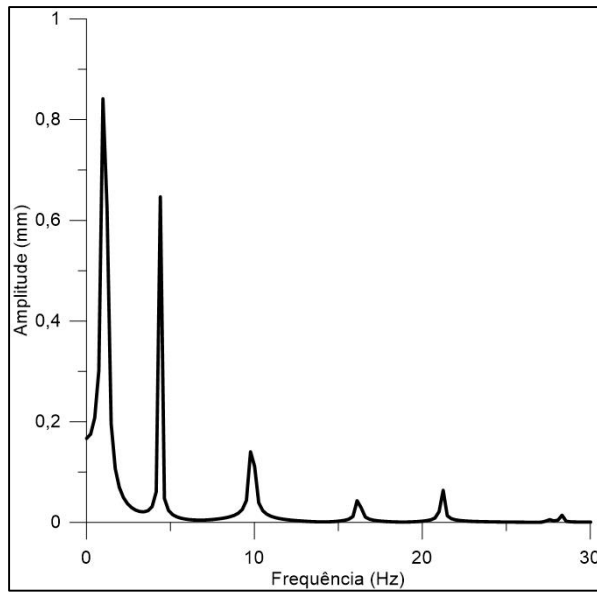


Figura 5-40. Resposta no domínio da frequência, placa mista 12x5m, duas bordas livres, caso 5.

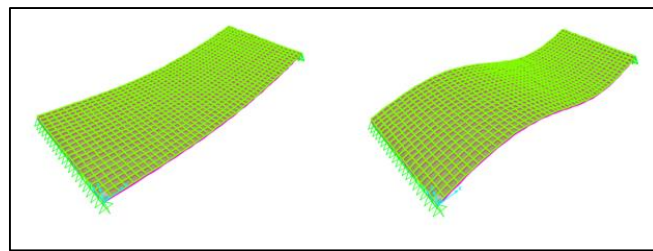


Figura 5-41. Formas modais predominantes associadas ao primeiro (esquerda) e terceiro modo (direita), caso 5.

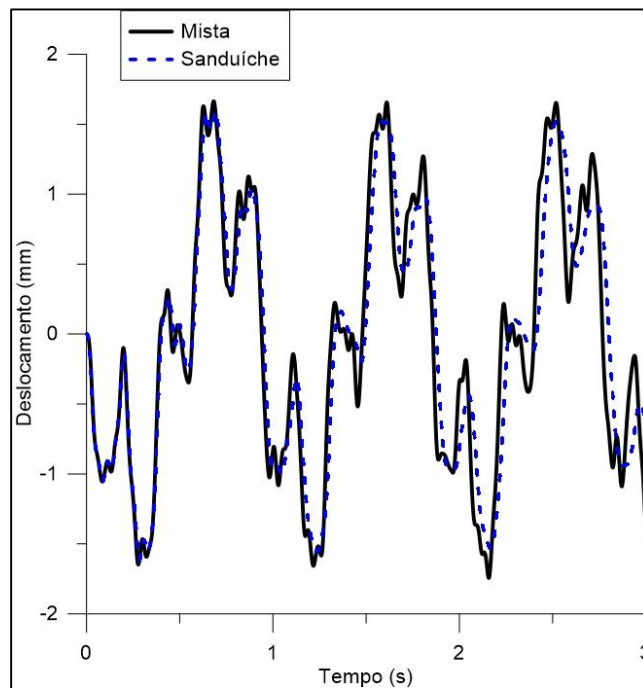


Figura 5-42. Comparação das respostas da placa mista e sanduíche, 12x5m, duas bordas livres, caso 5.

Em vista disso, foi feito um teste adicional para um material viscoelástico com propriedades adequadas numa faixa de frequências entre 1Hz e 5Hz. Além disso, a espessura da camada viscoelástica foi aumentada até 25mm. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os parâmetros característicos deste material via GHM, enquanto que a Figura 5-43 reproduz as propriedades mecânico-dinâmicas deste material.

A comparação das respostas no domínio do tempo (Figura 5-44) permite evidenciar que existe uma boa atenuação das vibrações induzidas na placa, já que o material selecionado apresenta um bom desempenho nesta situação. Além disso, a resposta no domínio da frequência, mostrada na Figura 5-45 confirma a dissipação de energia oferecida pelo material viscoelástico alternativo.

Tabela 5-11. Parâmetros característicos do MVE alternativo, caso 5.

Parâmetro	Valor
ϵ (MPa)	6,00
α (MPa)	80,00
β (s ⁻¹)	35.000
δ (s ⁻²)	1.200.000

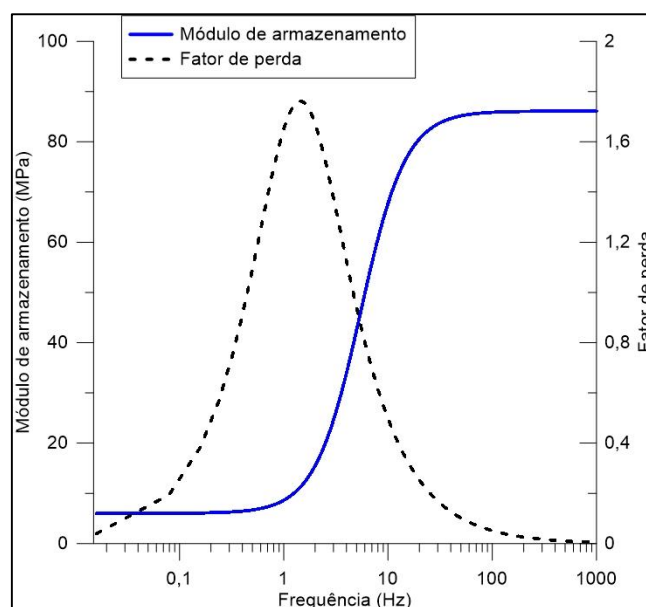


Figura 5-43. Propriedades mecânico-dinâmicas do MVE alternativo utilizado, caso 5.

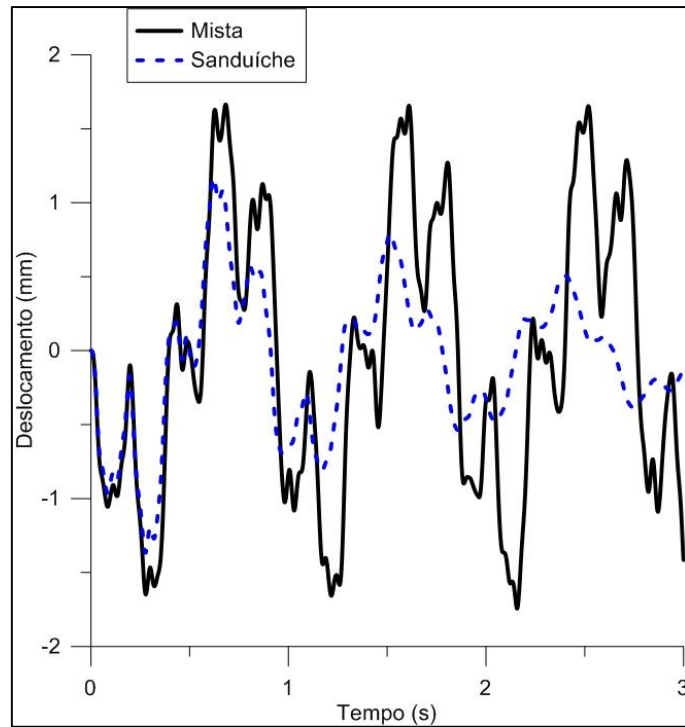


Figura 5-44. Comparação da resposta no domínio do tempo com o uso do MVE alternativo, caso 5.

A través dos diferentes casos apresentados foi visto que a eficiência da camada viscoelástica é fortemente influenciada pela geometria e condições de contorno de cada problema. Nesse sentido, a análise na prática deve ser particular em cada problema para escolher o material mais apropriado às propriedades dinâmicas da estrutura, assim como às características do carregamento dinâmico atuante.

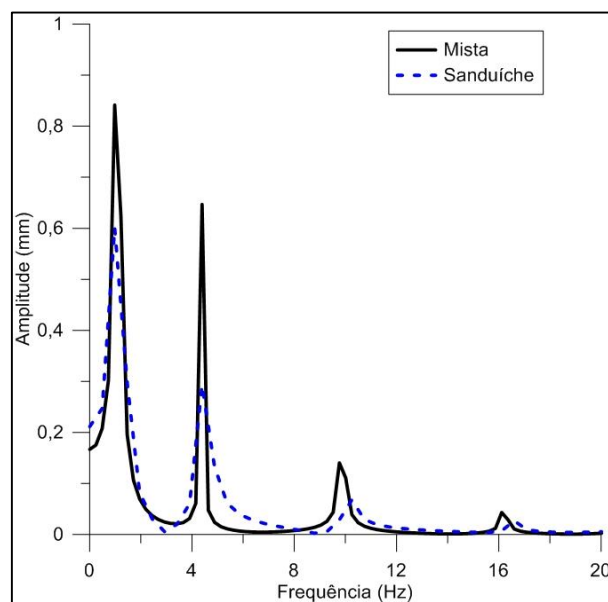


Figura 5-45. Comparação das respostas no domínio da frequência Para placa sanduíche como MVE alternativo, caso 5.

5.2.5 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAMADA VISCOELÁSTICA NA RESPOSTA ESTRUTURAL

Em seguida é descrita uma avaliação feita sobre um dos tabuleiros apresentados na seção anterior, onde foi alterada a espessura da camada viscoelástica para observar a influência desse parâmetro sobre a atenuação das vibrações no tabuleiro.

O tabuleiro selecionado corresponde àquele apresentado na Figura 5-13, de dimensões 12x5m com as quatro bordas apoiadas, submetido ao carregamento dinâmico mostrado na Figura 5-7 e que possui uma resposta multimodal em vibração livre no ponto de observação escolhido, de acordo com a Figura 5-36. Em seguida é mostrada a resposta no domínio do tempo para três espessuras diferentes da camada viscoelástica (1mm, 5mm e 10mm).

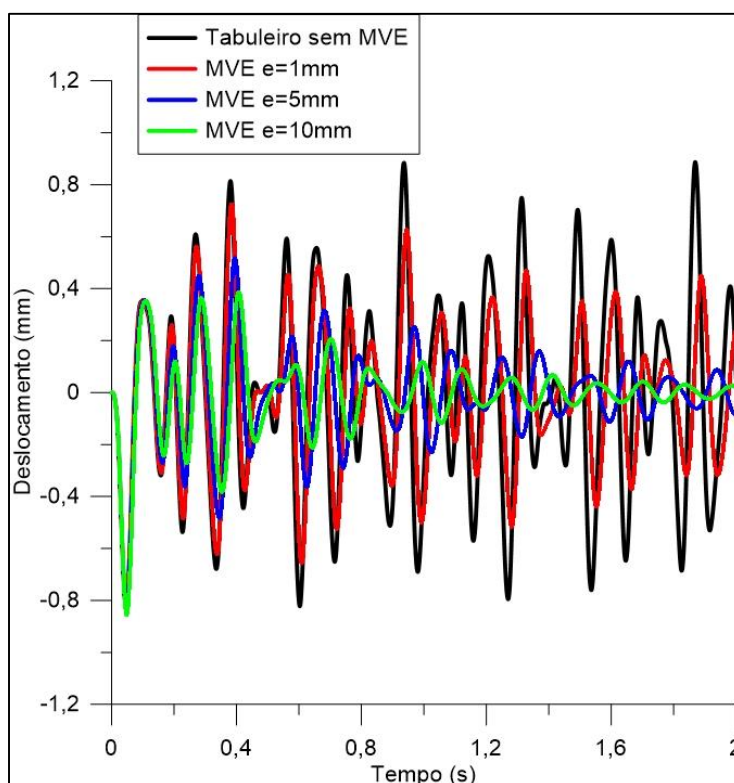


Figura 5-46. Resposta no domínio do tempo considerando variação de espessuras no tabuleiro de 12x5m com as quatro bordas apoiadas.

A partir do gráfico é possível perceber que no instante inicial de tempo, a resposta é praticamente igual em todos os tabuleiros, sem influência nenhuma do

material viscoelástico, característica própria de mecanismos de controle dinâmico passivo.

Posteriormente, é possível perceber o efeito da camada viscoelástica no amortecimento nas vibrações do tabuleiro, destacando no caso apresentado que um acréscimo da espessura permite uma diminuição dos deslocamentos quando são comparados com o sistema não controlado (Tabuleiro sem MVE). Nesse sentido, uma camada de MVE de 1mm de espessura fornece uma atenuação importante, mas a segunda avaliação com 5mm de espessura permite uma atenuação mais rápida e eficiente em relação com a anterior. Por último, é possível notar que uma espessura de 10mm não introduz uma atenuação muito maior em relação à obtida com a segunda avaliação (5mm), pelo que dobrar a espessura da camada não necessariamente implica a solução técnica com maior viabilidade.

Para o caso apresentado, o uso de uma espessura de camada viscoelástica de 5mm corresponde com uma solução satisfatória, pois permite uma redução importante dos deslocamentos, ainda quando existe uma interação de três modos de vibração no ponto escolhido. Acréscimos na espessura não necessariamente permitem um ganho proporcional na redução dos deslocamentos, pelo que não representa uma relação linear, sendo importante em cada caso um tratamento em forma individual para achar o melhor ajuste.

6 COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS

A realização deste trabalho permitiu realizar uma contribuição na modelagem de dispositivos de controle dinâmico que usam materiais viscoelásticos na forma de camadas amortecedoras, já que no caso dos dispositivos atenuadores viscoelásticos (AVE), foi incorporada a possibilidade de projetar dispositivos com mais de uma camada viscoelástica, tal como foi o caso desenvolvido na seção 5.1.

Em relação às estruturas laminadas de tipo sanduíche, esta nova versão do PEFAMV permite uma avaliação de estruturas que têm uma maior flexibilidade, como no caso dos tabuleiros apresentados na seção 5.2 com relações comprimento/largura superiores à unidade, ampliando a faixa de aplicação da ferramenta computacional nesse tipo de sistemas estruturais.

A partir dos resultados obtidos dos casos exemplo apresentados neste trabalho, ressaltam-se alguns aspectos relevantes que representam uma contribuição para a modelagem de mecanismos de controle dinâmico de estruturas contendo laminados de materiais convencionais e viscoelásticos, assim como para avaliação da efetividade desses mecanismos na melhoria do comportamento dinâmico-estrutural.

A forte sensibilidade do fator de amortecimento dos materiais viscoelásticos (MVE) aos parâmetros que caracterizam as propriedades mecânico-dinâmicas desses materiais, se constitui na maior dificuldade do emprego de MVE na busca de soluções dos problemas de vibrações em estruturas, por meio de modelagem matemático-numérica, como aqui construída com base no método de Golla-Hughes. Pequenas alterações dos valores desses parâmetros são capazes de gerar alterações na resposta dinâmica, mascarando o real comportamento de uma estrutura.

Nesse sentido, é importante que se faça uma boa caracterização do material viscoelástico que se pretenda utilizar, por meio de ensaios experimentais para determinação do módulo de armazenamento e do fator de perda, para a faixa de frequências considerada. Dependendo da qualidade dos dados experimentais, o ajuste dos parâmetros para a modelagem computacional garantirá uma boa aproximação, tal como demonstrado com os exemplos apresentados neste trabalho.

No entanto, é também possível ajustar os parâmetros de maneira ótima à uma situação de projeto específica, visando a fabricação de um material viscoelástico que

possua as propriedades dinâmicas necessárias, ao invés de usar algum outro existente, produzido industrialmente para outros fins. Nesse caso, a decisão dependerá do tipo de projeto e das características próprias que justifiquem essa escolha.

Em relação à eficiência dos MVE em mecanismos de controle dinâmico, foi demonstrado por meio dos exemplos apresentados que oferecem uma boa capacidade para atenuar deslocamentos, velocidades e acelerações em estruturas submetidas às ações dinâmicas, sempre que sejam apropriadamente projetados, fabricados e instalados. As condições do projeto devem considerar inicialmente a caracterização das propriedades dinâmicas do sistema não controlado, e a partir dessa caracterização, será possível escolher um material que possua propriedades mecânico-dinâmicas ótimas na faixa de frequências onde o sistema não controlado é excitado. As diferentes configurações geométricas e de condições de contorno nos exemplos dos tabuleiros sanduíche, constituem um claro exemplo onde o mesmo material viscoelástico responde em forma diferente em função das características intrínsecas do sistema estrutural.

Além disso, foi visto em um dos casos que com o acréscimo da espessura da camada viscoelástica, foi possível atenuar em maior medida a resposta do tabuleiro. Porém, deve ser salientado que essa tendência não constitui um padrão de comportamento, nem representa sempre a melhor opção, visto que cada caso deve ser analisado em forma singular, considerando que exista uma garantia da estabilidade no sistema controlado.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As contribuições feitas com o desenvolvimento deste trabalho deixam abertas várias possibilidades para continuar a linha de pesquisa associada ao uso de materiais viscoelásticos em dispositivos de controle dinâmico. A ampliação da modelagem de estruturas multicamadas compostas de MVE permitiria o desenvolvimento de isoladores de base em edificações submetidas às ações sísmicas, constituídos por placas de aço alternadas com camadas MVE com um alto módulo elástico, em combinação com um núcleo interno de chumbo que dissipa energia.

Tanto no caso da análise de atenuadores viscoelásticos (AVE) quanto na análise de isoladores de base, o PEFAMV está orientado à modelagem isolada deste tipo de dispositivos, pelo que pesquisas futuras devem visar a integração conjunta aos

sistemas estruturais, permitindo analisar em forma tridimensional uma estrutura em aço ou concreto armado, incorporando em forma localizada mecanismos de controle dinâmico estrutural, sendo possível avançar consideravelmente na análise da resposta de sistemas estruturais em termos da redução de deslocamentos ou as variações na ductilidade em relação a exemplos de sistemas não controlados.

Nas conclusões deste trabalho foi ressaltado que existe uma forte dependência das características dos MVE nas respostas obtidas na análise, pelo que deve ser considerada uma boa caracterização experimental das propriedades mecânico-dinâmicas. Considerando que na literatura disponível existe informação limitada em relação às curvas experimentais do módulo de armazenamento e fator de perda em materiais viscoelásticos, é de grande interesse a possibilidade de desenvolver uma pesquisa que permita realizar a caracterização experimental de diversos materiais viscoelásticos com aplicações em mecanismos de controle dinâmico, aos efeitos de poder estimar as curvas experimentais e garantir um bom ajuste com os parâmetros que caracterizam a modelagem computacional. Além disso, para estabelecer uma correlação entre resultados numéricos e experimentais, a reprodução experimental dos exemplos numéricos associados aos tabuleiros sanduíche constitui uma necessidade para a validação da ferramenta computacional nesses exemplos, com a inclusão de outros tipos de carregamento para demonstrar a sua eficiência em diversas situações.

Por outra parte, visando a possibilidade de projetar mecanismos isoladores de base ou outros mecanismos de isolamento em edificações, é de grande interesse em pesquisas futuras a possibilidade de construir modelos físicos em escala reduzida de sistemas estruturais providos dos mecanismos anteriormente citados, para a avaliação do seu desempenho frente às ações dinâmicas, explorando os fundamentos da teoria da semelhança e aproveitando os recursos físicos existentes no Laboratório de Estruturas e Materiais do PEC-COPPE.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGLEY, R. L., TORVIK, P.J. "Fractional Calculus – A Different Approach to the Finite Element Analysis of Viscoelastically Damped Structures". *AIAA Journal*, Vol. 21, Nº 5, pp. 741-748, 1983.

BATTISTA, R. C., ALCOFORADO, J. M., ALMEIDA, L. 1997, Análise das Causas da ocorrência frequente de Fraturas nas conexões soldadas da *Superestrutura Metálica da Ponte Rio-Niterói*. In: Relatório Técnico COPPETEC ET-150747, Rio de Janeiro.

BATTISTA, R. C., *et al.*, 1998, *Ensaio Experimentais da Estrutura Sanduíche do Tabuleiro Ortotrópico da Superestrutura Metálica da Ponte Rio-Niterói*. In: Relatório Técnico COPPETEC ET-150747, Rio de Janeiro.

BATTISTA, R. C., PFEIL, M. S. "Strengthening Fatigue Cracked Orthotropic Decks with Composite Layers". In: *Structural Stability Research Council, Annual Technical, Session & Meeting, 24-26, July 2000*.

BARBOSA, F. S., *Modelagem Computacional de Estruturas com Camadas Viscoelásticas Amortecedoras*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

BERTERO, V. V., WHITTAKER A. "Seismic Upgrading of existing buildings". *5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, Agosto de 1989.

BIOT, M. A., "Variational Principles in Irreversible Thermodynamics with applications in viscoelasticity". *Physical Review*, Vol. 97, Nº 6, pp. 1463-1469, 1955.

BLONDET, M. "Dynamic response of two viscoelastic dampers". *Report to County of Santa Clara Construction Service Division*, University of California at Berkeley, Department of Civil Engineering, 1993.

BOAKE, T. M. The Skyscraper Center, 200-. Disponível em: <<http://www.skyscrapercenter.com/building/columbia-center/611>>. Acesso em: 10 jan. 2018, 15:00:00.

BOAKE, T. M. The Skyscraper Center, 200-. Disponível em: <<http://www.skyscrapercenter.com/building/two-union-square/1176>>. Acesso em: 10 jan. 2018, 15:30:00.

BORGES, F. C.L., ROITMAN, N., MAGLUTA, C., *et al.*, “A concept to reduce vibrations in steel catenary risers by the use of viscoelastic materials”. *Ocean Engineering*, Vol. 77, N° 1, pp. 1-11, 2014.

BUHARIWALA, K. J., *Dynamic Response of Viscoelastic Fibre Reinforced Composite Structures*. M.Sc. Thesis, University of Toronto, Canadá, 1982.

CHOPRA, A. K., *Dinámica de Estructuras*. Cuarta Edición. USA, Pearson, 2014.

CLOUGH, R. W., PENZIEN J., *Dynamics of Structures*. 3rd Edition. California, Computers and Structures, 2003.

CORREA, W., *Controle das vibrações induzidas pela interação dinâmica entre trens-trilhos-dormentes estrutura de aço de pontes ferroviárias*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

DITARANTO, R.A., “Theory of Vibratory Bending for Elastic and Viscoelastic Layered Finite-Length Beams”. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 32, N°4, pp. 881-886, 1965.

FAISCA, R.G., *Caraterização de materiais viscoelásticos como amortecedores de vibrações*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.

FREITAS, S. T., KOLSTEIN, H., BIJLAARD, F., “Composite bonded systems for renovations of orthotropic steel bridge decks”. *Composite Structures*, Vol. 92, N°4, pp. 853-862, 2010.

GALUCIO, A. C., DEÜ, J. F., OHAYON, D. “Finite element formulation of viscoelastic sandwich beams using fractional derivative operators”. *Computational Mechanics*, Vol. 33, N°4, pp. 282-291, 2004.

GIBSON, W. C., SMITH, C. A., MCTAVISH, D. J. “Implementation of the GHM Method for Viscoelastic Materials using MATLAB and NASTRAN”. *Proceedings of SPIE 2445, Smart Structures and Materials 1995: Passive Damping*, pp. 312-323, San Diego, California, USA, May 5th 1995.

GOLLA, D. F., HUGHES, P. C. “Dynamic of viscoelastic structures – A time domain, finite element formulation”. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, N°4, pp. 897-906, 1985.

KEEL, C. J., MAHMOODI, P. "Design of viscoelastic dampers for the Columbia Center Building". In: Isyumov, N., Tschanz, T. (eds.). *Building Motion in Wind*, ASCE, pp. 66-82, 1986.

LAZAN, B. J., *Damping of materials and members in structural mechanics*. 1st Edition. USA, Pergamon Press, 1968.

MAHMOODI, P. "Structural Dampers". *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 95, N° 8, pp. 1661-1672, 1969.

MAHMOODI, P., ROBERTSON, L. E., YONTAR, M. *et al.*, "Performance of viscoelastic structural dampers in World Trade Center Twin Towers". Dynamics of structures, Structures Congress 87'. Orlando, Florida, USA, 1987.

MONTGOMERY, M., CHRISTOPOULOS, C. "Experimental Validation of Viscoelastic Coupled Dampers for Enhance Dynamic Performance of High-Rise Buildings". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, N° 5. 2015.

MIRABELLI, J., 2015. Damping Technology Revolutionizing Tall Building Construction. Disponível em: <http://urbantoronto.ca/news/2015/11/damping-technology-revolutionizing-tall-building-construction>>. Acesso em: 15 jan. 2018, 10:00:00.

MOORE, J. "Some chemical and physical properties of rubber". *British Journal of Applied Physics*, Vol.1, N° 1, pp. 1-9, 1950.

NEWMARK, N. M. "A method of computation for structural dynamics". *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.85, N° 3, pp. 67-94, 1959.

OBERST, H., FRANKENFELD, K. "Über die Dämpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch fest haftende Beläge". *Acustica*, Vol.2, N° 4, pp. 181-194, 1952.

PFEIL, W., *Ponte Presidente Costa e Silva – Métodos Construtivos*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1975.

ROYLANCE, D., *Engineering Viscoelasticity*. Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.

QIAN, C., DEMAO, Z. "Vibrational analysis theory and application to elastic-viscoelastic composite structures". *Computer & Structures*, Vol. 37, N° 4, pp. 585-595, 1990.

ROSS, D., UNGAR, E., KERWIN Jr., E.M. "Damping of plate flexural vibrations by means of viscoelastic laminate". *Structural Damping, ASME*, pp. 49-88, 1959.

SAMALI, B., KWOK, K. C. S. "Use of viscoelastic dampers in reducing Wind- and earthquake-induced motion of building structures". *Engineering Structures*, Vol. 17, N° 9, pp. 639-654, 1995.

SANTOS, E.F., *Atenuadores visco-elásticos para a redução de oscilações aeroelásticas de edifícios altos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

SANTOS, E.F., *Análise e Redução de Vibrações em Pontes Rodoviárias*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

VASCONCELOS, R. P. *Controle Dinâmico Estrutural via Mecanismos Viscoelásticos*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

WONG, G. The Twins Towers of the World Trade Center, 19-?. Disponível em: <<https://www.tripsavvy.com/world-trade-center-photos-2287248>>. Acesso em: 10 jan. 2018, 16:00:00.

YI, S., LING, F. S., YING, M. "Finite element analysis of composite structures with smart constrained damping layers". *Advances in Engineering Software*, Vol. 29, N°3-6, pp. 265-271, 1998.