

**PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO
FATOR DE AMORTECIMENTO EM ESTRUTURAS**

Fábio Wagner Leão de Carvalho

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO
FATOR DE AMORTECIMENTO EM ESTRUTURAS"**

Fábio Wagner Leão de Carvalho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Fernando Amorim de Paula
Dr. (UFMG - DEES) - (Orientador)

Prof. Estevam Barbosa de Las Casas
Dr. (UFMG - DEES)

Prof. Marco Antônio de Mendonça de Vecci
Mestre (UFMG - DEES) Convidado Especial

Prof. Webe João Mansur
Dr. (COPPE - UFRJ)

Belo Horizonte, 26 de setembro de 2002

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – DINÂMICA DAS ESTRUTURAS E AMORTECIMENTO	
ESTRUTURAL	15
2.1 – Dinâmica das Estruturas	15
2.1.1 – Análise Modal	19
2.1.2 – Método da Superposição Modal	20
2.1.3 – Análise Harmônica	21
2.1.4 – Análise Transiente	21
2.2 – Amortecimento	22
2.2.1 – Amortecimento Viscoso Linear	24
2.2.2 – Amortecimento de Coulomb	28
2.2.3 – Amortecimento Estrutural na Forma Complexa	29
2.2.4 – Amortecimento Viscoso Equivalente	30
2.3 – Formas de Consideração do Amortecimento em Análises Dinâmicas ...	31
2.3.1 – Fator de Amortecimento Único	32
2.3.2 – Amortecimento de Rayleigh	32
2.3.3 - Amortecimento do Modal	33
2.3.4 - Amortecimento do Material	33
3 – ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES	34
3.1 – Introdução	34
3.2 – Simulação de Carregamentos Dinâmicos	34
3.3 – Classificação de Dados	36
3.4 – Captação de Sinais	37
3.5 – Aquisição e Tratamento dos Sinais	38
3.5.1 – Filtros	41

3.6 – Transformação do Domínio do Tempo para o Domínio da Frequência	46
3.7 – Técnicas Experimentais para a Obtenção de Parâmetros de Amortecimento	48
3.7.1 – Método do Decaimento Logarítmico	49
3.7.2 – Método da Meia-Amplitude	50
3.7.3 – Método da Meia-Potência	51
3.7.4 – Ajuste da Curva de Decaimento	52
4 – METODOLOGIA APLICADA	56
4.1 – Descrição das Estruturas Ensaaiadas	56
4.2 – Métodos Experimentais	57
4.2.1 – Descrição	57
4.2.2 – Exemplo Numérico	62
4.3 – Simulação Numérica	70
5 – EXEMPLOS PRÁTICOS	71
5.1 – Estrutura 1	71
5.1.1 – Descrição Geral	71
5.1.2 – Resultados Experimentais	74
5.1.3 – Simulação Numérica e Resultados	87
5.2 – Estrutura 2	93
5.2.1 – Descrição Geral	93
5.2.2 – Resultados Experimentais	95
5.2.3 – Simulação Numérica e Resultados	104
5.3 – Estrutura 3	107
5.3.1 – Descrição Geral	107
5.3.2 – Resultados Experimentais	109
5.3.3 – Simulação Numérica e Resultados	120
6 – CONCLUSÃO	123
7 – BIBLIOGRAFIA	128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Sistema massa-amortecedor-mola com um grau de liberdade	16
FIGURA 2 – Energia dissipada por ciclo no amortecimento viscoso	25
FIGURA 3 – Energia dissipada por ciclo no amortecimento viscoso	26
FIGURA 4 – Curva de decaimento para um sistema com um grau de liberdade Com amortecimento viscoso linear.....	27
FIGURA 5 – Resposta de um sistema de um grau de liberdade com amortecimento viscoso para vários níveis de amortecimento	28
FIGURA 6 – Curva de decaimento para um sistema com um grau de liberdade com amortecimento de Coulomb	29
FIGURA 7 – Esquema de um sistema de aquisição de dados	38
FIGURA 8 – Sinal de 25Hz com frequência de amostragem de 200Hz	39
FIGURA 9 – Sinal de 25Hz com frequência de amostragem de 100Hz	40
FIGURA 10 – Sinal de 25Hz com frequência de amostragem de 20Hz	40
FIGURA 11 – Curva de atenuação de um filtro ideal	42
FIGURA 12 – Curva de atenuação de um filtro real	43
FIGURA 13 – Curva de atenuação típica de um filtro passa-baixa	43
FIGURA 14 – Curva de atenuação típica de um filtro passa-alta	44
FIGURA 15 – Curva de atenuação típica de um filtro passa-banda	45
FIGURA 16 – Curva de atenuação típica de um filtro rejeita-faixa	45
FIGURA 17 – Gráfico de deslocamento vs. tempo	50
FIGURA 18 – Gráfico de deslocamento vs. tempo	51
FIGURA 19 – Curva de resposta com os pontos de meia potência	52
FIGURA 20 – Gráfico de um sinal com decaimento	53
FIGURA 21 – Gráfico dos valores de $\ln y(t)$	54
FIGURA 22 – Esquema do mecanismo utilizado na excitação harmônica	59
FIGURA 23 – Esquema do mecanismo para o ensaio de impacto	60
FIGURA 24 – Gráfico no tempo de $u_1(t)$	63
FIGURA 25 – Gráfico no tempo de $u_2(t)$	64
FIGURA 26 – Gráfico no tempo de $u_3(t)$	64
FIGURA 27 – Gráfico no tempo de $u(t)$	65

FIGURA 28 – Espectro de frequência do gráfico $u(t)$	65
FIGURA 29 – Sinal $u(t)$ filtrado pelo Filtro 1 (3 Hz)	66
FIGURA 30 – Sinal $u(t)$ filtrado pelo Filtro 2 (7 Hz)	67
FIGURA 31 – Sinal $u(t)$ filtrado pelo Filtro 3 (10 Hz)	67
FIGURA 32 – Ajuste da curva exponencial para a componente de 3Hz	68
FIGURA 33 – Ajuste da curva exponencial para a componente de 7Hz	68
FIGURA 34 – Ajuste da curva exponencial para a componente de 10Hz	69
FIGURA 35 - Propriedades geométricas da forma de aço	72
FIGURA 36 – Vista geral de uma laje com forma de aço incorporada (<i>steel deck</i>)	72
FIGURA 37 – Esquema da Estrutura 1	73
FIGURA 38 – Espectro de frequência – Ponto 1 – Caminhar	75
FIGURA 39 – Espectro de frequência – Ponto 1 – <i>Heel Drop</i>	75
FIGURA 40 – Espectro de frequência – Ponto 1 – Impacto	76
FIGURA 41 – Espectro de frequência – Ponto 2 – Caminhar	76
FIGURA 42 – Espectro de frequência – Ponto 2 – <i>Heel Drop</i>	77
FIGURA 43 – Espectro de frequência – Ponto 2 – Impacto	77
FIGURA 44 - Sinal captado no ponto 2 para o ensaio <i>heel drop</i>	78
FIGURA 45 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 1 (7,75Hz)	79
FIGURA 46 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 2 (11,5Hz).....	79
FIGURA 47 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 4 (25,0Hz).....	80
FIGURA 48 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 1 (7,75Hz).....	80
FIGURA 49 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 2 (11,5Hz).....	81
FIGURA 50 – Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 4 (25,0Hz).....	81
FIGURA 51 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 1 (7,75Hz)	83
FIGURA 52 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 2 (11,5Hz)	83
FIGURA 53 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 4 (25,0Hz)	84
FIGURA 54 – Esquema do modelo numérico da Estrutura 1	89
FIGURA 55 - 1º modo de vibração da Estrutura 1 a 6,59Hz	89

FIGURA 56 - 2º modo de vibração da Estrutura 1 a 7,05Hz	90
FIGURA 57 - 3º modo de vibração da Estrutura 1 a 13,39Hz	90
FIGURA 58 - 4º modo de vibração da Estrutura 1 a 16,79Hz	91
FIGURA 59 - 5º modo de vibração da Estrutura 1 a 21,33Hz	91
FIGURA 60 - 6º modo de vibração da Estrutura 1 a 26,71Hz	92
FIGURA 61 – Esquema da Estrutura 2	94
FIGURA 62 – Espectro de frequência – Ponto 1	96
FIGURA 63 – Espectro de frequência – Ponto 2	96
FIGURA 64 - Sinal original captado no ponto 1	98
FIGURA 65 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 1 (9,75Hz)	98
FIGURA 66 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 2 (14,5Hz)	99
FIGURA 67 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 4 (24,5Hz)	99
FIGURA 68 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 1 (9,75Hz)	100
FIGURA 69 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 2 (14,5Hz)	100
FIGURA 70 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 4 (24,5Hz)	101
FIGURA 71 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 1 (9,75Hz)	102
FIGURA 72 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 2 (14,5Hz)	102
FIGURA 73 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 4 (24,5Hz)	103
FIGURA 74 – Modo de vibração da Estrutura 2 associado à frequência de 10,91Hz	105
FIGURA 75 – Modo de vibração da Estrutura 2 associado à frequência de 14,60Hz	105
FIGURA 76 – Modo de vibração da Estrutura 2 associado à frequência de 21,70Hz	106
FIGURA 77 – Detalhe típico da ligação laje-viga metálica do Sistema de piso esbelto	107
FIGURA 78 – Esquema da Estrutura 3	108
FIGURA 79 – Gráfico do ruído captado na Estrutura 3	109
FIGURA 80 – Espectro de frequência do ruído captado na Estrutura 3	110

FIGURA 81 – Espectro de frequência do sinal captado no ponto 1	111
FIGURA 82 – Espectro de frequência do sinal captado no ponto 2	111
FIGURA 83 – Espectro de frequência do sinal captado no ponto 3	112
FIGURA 84 – Gráfico no tempo de uma amostra captada no ponto 1	113
FIGURA 85 – Resposta no tempo do ponto 1 filtrada pelo Filtro 1 (9,75Hz)	113
FIGURA 86 – Resposta no tempo do ponto 1 filtrada pelo Filtro 2 (14,0Hz)	114
FIGURA 87 – Resposta no tempo do ponto 1 filtrada pelo Filtro 3 (26,0Hz)	114
FIGURA 88 – Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 1 (9,75Hz)	115
FIGURA 89 – Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 2 (14,0Hz)	116
FIGURA 90 – Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 1 (9,75Hz)	118
FIGURA 91 – Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 2 (14,0Hz)	118
FIGURA 92 – Esquema do modelo numérico da Estrutura 3	120
FIGURA 93 – Modo de vibração associado à frequência de 10,18Hz	121
FIGURA 94 – Modo de vibração associado à frequência de 10,74Hz	121
FIGURA 95 – Modo de vibração associado à frequência de 13,02Hz	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Parâmetros do sinal $u_i(t)$	62
TABELA 2 – Parâmetros dos filtros	66
TABELA 3 – Dimensões dos perfis metálicos da Estrutura 1	74
TABELA 4 – Propriedades dos filtros digitais projetados para a Estrutura 1	78
TABELA 5 – Amortecimento obtido pelo método do Decaimento Logarítmico	82
TABELA 6 – Amortecimento obtido pelo método da Meia Amplitude	83
TABELA 7 – Fator de amortecimento para o ensaio <i>heel drop</i> no ponto 1	85
TABELA 8 – Fator de amortecimento para o ensaio de Impacto no ponto 1	85
TABELA 9 – Fator de amortecimento para o ensaio <i>heel drop</i> no ponto 2	86
TABELA 10 – Fator de amortecimento para o ensaio de Impacto no ponto 2	87
TABELA 11 – Dimensões dos perfis metálicos da Estrutura 2	93
TABELA 12 – Propriedades dos filtros digitais projetados para a Estrutura 2	97
TABELA 13 – Parâmetros de amortecimento obtidos pelo ajuste da curva exponencial para o sinal captado no ponto 1	103
TABELA 14 – Parâmetros de amortecimento obtidos pelo ajuste da curva exponencial para o sinal captado no ponto 2	104
TABELA 15 - Propriedades dos filtros digitais projetados para a Estrutura 3	112
TABELA 16 - Fator de Amortecimento pelo Decaimento Logarítmico para o ponto 1	117
TABELA 17 - Valores do Fator de Amortecimento para o ponto 2	119
TABELA 18 - Valores do Fator de Amortecimento para o ponto 3	119

RESUMO

A importância da análise dinâmica nas estruturas atuais tem crescido paralelamente ao surgimento de novas tecnologias construtivas. Com o crescente conhecimento a respeito do comportamento dos materiais e com a otimização de sua utilização, estruturas cada vez mais esbeltas têm sido concebidas e, por consequência, suas frequências fundamentais têm diminuído, aproximando-se da frequência de cargas dinâmicas oriundas de atividades rítmicas, motores rotativos, movimento de uma torcida em um ginásio. Desse modo, por estar a estrutura sendo solicitada cada vez mais perto da ressonância, os deslocamentos e acelerações ficam intensificados, podendo ultrapassar os limites recomendados e provocando desconforto no usuário. No controle desses problemas, o amortecimento assume grande importância, pois é responsável pela dissipação da energia associada à vibração de uma estrutura. A perda de energia no sistema amortecido acarreta o decaimento da amplitude de vibração, no caso de uma vibração livre, bem como atenua os picos de aceleração e deslocamento da estrutura quando esta é excitada por um carregamento dinâmico. Portanto, com uma boa estimativa para o fator de amortecimento de uma estrutura, otimiza-se o projeto estrutural e garante-se segurança e conforto aos seus usuários.

Este trabalho tem como objetivo obter experimentalmente valores para o fator de amortecimento de estruturas e avaliar a confiabilidade da metodologia aplicada. Foram captados os sinais da resposta de três estruturas, oriundos de diversos tipos de ensaios dinâmicos realizados sobre os pisos. Para excitá-los foram utilizados: excitador mecânico, impacto de um corpo de aço solto de certa altura, ensaio *heel drop*, e pulo de uma pessoa. Utilizando-se filtros digitais, os sinais foram tratados e obtiveram-se, em função do tempo, os gráficos de decaimento da resposta estrutural relativa às principais componentes de frequência do sinal. Em seguida foram obtidos valores para o fator de amortecimento de cada gráfico, utilizando os métodos do Decaimento Logarítmico, da Meia Amplitude e do Ajuste de Curva. Os mesmos sinais foram representados no domínio da frequência, e as frequências fundamentais das estruturas, uma vez determinadas, foram utilizadas como parâmetro para ajustar os modelos numéricos concebidos em programa computacional de elementos finitos.

ABSTRACT

Nowadays, the importance of dynamic analysis on structures has been increasing parallel to new building technology's development. Growing knowledge on materials' behavior and the optimization of their use has led to the construction of even more slender structures. Therefore, structures' natural frequencies have been decreasing, approaching to the frequency due to rhythmic activities, industry rotative machines or, for example, stadium crowd movement. Once the structure's solicitation is closer to resonance, displacements and acceleration are intensified, which may exceed recommended limits and cause people's discomfort.

Damping has a large importance on controlling this phenomenon, by dissipating the energy associated to structural vibration. Concerning on a free vibration, the energy loss of the damping system causes the vibration amplitude decrease, while attenuates structure's displacement and acceleration peaks on forced vibration. Thus, accurate estimation on structural damping factor provides efficient structural design and offers safety and people's comfort as well.

The aim of this work is to obtain experimental values for structural damping factors and to evaluate the reliability of the applied methodology. Several types of dynamic tests were performed over three structures' floors to obtain the structural response. Measurements were done by accelerometers. In order to excite the floors, following tests and devices were used: a mechanical exciter, the impact of a falling steel block, the heel drop test, and the impact of a jumping person. The structural response graphics at the time domain regarding the main natural frequencies were obtained using suitable bandpass filters. Then, damping factor values were obtained using the Logarithmic Decrement Method, the Half Amplitude Method and the Curve Fitting Method as well. These signals were also presented in the frequency domain. Once the structures' natural frequencies were defined they were used to fit numeric simulation using finite element software.

1

INTRODUÇÃO

A importância da análise dinâmica nas estruturas atuais tem crescido paralelamente ao surgimento de novas tecnologias construtivas. Com o crescente conhecimento a respeito do comportamento dos materiais e com a otimização de sua utilização, estruturas cada vez mais esbeltas têm sido concebidas e, por consequência, suas frequências fundamentais têm diminuído, aproximando-se da frequência de cargas dinâmicas oriundas de atividades rítmicas, motores rotativos de grandes indústrias, movimento de uma torcida em um estádio ou ginásio. Desse modo, por estar a estrutura sendo solicitada cada vez mais perto da ressonância, vários problemas podem ocorrer, tais como, fadiga do material, diminuição da sua vida útil, corrosão, e outros. Outras condições desfavoráveis também são criadas por causa dessa situação, no tocante ao conforto do usuário. Perto da ressonância, os deslocamentos e acelerações ficam intensificados, podendo ultrapassar os limites aceitáveis por norma e provocando certo mal-estar no usuário da edificação.

Para esses casos, torna-se evidente a importância de uma análise dinâmica bem feita, com o objetivo de projetar estruturas com segurança e conforto aos usuários.

As ferramentas utilizadas na análise dinâmica dependem da complexidade da estrutura estudada, bem como do tipo de resposta que se deseja obter dessa análise. Pode-se

utilizar formulações diretas simplificadas para medir, por exemplo, a primeira frequência de uma região de um piso, como também se pode elaborar um modelo mais refinado de uma estrutura através de programa computacional e obter os seus modos de vibração e respectivas frequências naturais, realizar uma análise harmônica para uma faixa de frequências de excitação e obter suas amplitudes de deslocamento, velocidade e aceleração. Portanto, a escolha da ferramenta, do modelo e dos respectivos parâmetros de entrada é fator determinante para a qualidade dos resultados.

As soluções das equações diferenciais de movimento que decorrem dessa análise podem ser elaboradas tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Isto se torna possível através da utilização da *transformada de Fourier*, que permite que uma função dependente do tempo, ao ser integrada de $-\infty$ a $+\infty$ e multiplicada por operadores adequados, seja representada no domínio da frequência. Quando, porém, os valores de acelerações, velocidades ou deslocamentos são obtidos de uma forma discreta no tempo, como são, por exemplo, os valores obtidos em uma medição de ensaio dinâmico, o ajuste de uma função que descreva esse comportamento torna-se tarefa difícil e, na maioria das vezes, impossível. Portanto, nesse caso, a *transformada de Fourier* não é mais aplicável e temos que utilizar a *transformada de Fourier Discreta (DFT – Discrete Fourier Transform)*. A análise no domínio da frequência tornou-se mais utilizada somente após o surgimento do algoritmo da *FFT (Fast Fourier Transform)*, desenvolvido por COOLEY e TUKEY (1965), reduzindo consideravelmente o tempo computacional na avaliação da DFT.

Essa flexibilidade em relação à apresentação dos resultados facilita enormemente a interpretação dos mesmos. Na área experimental, os analisadores de frequência, após a excitação de uma estrutura, fornecem instantaneamente seu espectro de frequência, no qual, após uma análise rápida, pode-se identificar suas frequências fundamentais.

Na análise dinâmica, deve-se considerar o efeito do amortecimento no comportamento da estrutura. O amortecimento estrutural refere-se à capacidade de uma estrutura ou componente estrutural dissipar energia associada à sua vibração. Essa energia removida pode ser convertida em calor e transmitida a outros componentes associados à estrutura

ou ao meio externo. A perda de energia no sistema amortecido acarreta o decaimento da amplitude de vibração, no caso de uma vibração livre, bem como atenua os picos de aceleração e deslocamento da estrutura quando esta é excitada por um carregamento dinâmico qualquer.

Existem muitos mecanismos que podem provocar o amortecimento no mesmo sistema: fricção entre superfícies de uma junta e aparelhos de apoio, resistência de um fluido, atrito por escorregamento e, além desses, o próprio amortecimento interno do material. Devido a essa variedade de mecanismos, vários modelos foram concebidos para melhor representar os efeitos do amortecimento. Entre eles pode-se citar o amortecimento viscoso linear, amortecimento de Coulomb e o amortecimento estrutural na forma complexa. Compete ao engenheiro estabelecer qual modelo melhor representa o efeito do amortecimento na estrutura analisada, bem como os valores dos parâmetros de amortecimento que devem ser utilizados.

Na literatura atual encontram-se muitos valores e dados sobre o amortecimento estrutural. Muitas vezes, porém, estes valores aparecem com grande variabilidade, o que dificulta a sua utilização em projetos estruturais nos quais se deseja atingir certo grau de sistematização. Além disso, nos programas de análise numérica encontram-se várias formas de considerar o amortecimento em uma estrutura, as quais, caso sejam erroneamente utilizadas, levam a resultados que não representam a situação real.

Portanto, o número de variáveis que influenciam os resultados de uma análise dinâmica é significativo e, quando possível, pode-se utilizar outros recursos para obter confiabilidade nos resultados dessa análise. Através de uma análise experimental, por exemplo, é possível obter as propriedades dinâmicas de uma estrutura, que poderão ser utilizadas como parâmetros de entrada ou como valores de referência para verificação da adequação do modelo elaborado.

Na obtenção dos parâmetros de amortecimento de uma estrutura, aplicando-se uma metodologia consistente e utilizando técnicas experimentais já desenvolvidas para esse fim, resultados bem confiáveis podem ser conseguidos.

Esta dissertação tem como objetivo apresentar os resultados de fatores de amortecimento obtidos através de ensaios dinâmicos em algumas estruturas, discutindo a metodologia aplicada nessa análise experimental.

Foram captados sinais relativos à resposta dinâmica de estruturas constituídas de pisos mistos em aço-concreto, sujeitos a vários tipos de carregamento dinâmico. Uma vez captados, esses sinais foram tratados e, utilizando técnicas experimentais descritas em várias bibliografias, foram obtidos parâmetros de amortecimento para essas estruturas.

Posteriormente, essas estruturas foram simuladas em um programa computacional utilizando elementos finitos e os resultados obtidos experimentalmente e numericamente foram comparados.

Pesquisas sobre as propriedades de amortecimento dos materiais e seu significado na engenharia começaram há mais de 200 anos. Em 1784, Coulomb, em sua obra “*Memoir on Torsion*”, não só levantou hipóteses considerando amortecimento em mecanismos micro-estruturais como também realizou ensaios provando que o amortecimento em oscilações torsionais não era causado pelo atrito com o ar, mas por perdas internas no material.

Em 1886, Tomlinson realizou um estudo compreensivo do decaimento da vibração torsional em longos fios de cobre, aço, latão e zinco, controlando cada uma das variáveis do teste, como amplitude de tensão, frequência, flutuação da temperatura, deformação permanente, comprimento do fio, entre outros.

Trabalhos sobre o efeito de histerese sob tensão cíclica foram realizados por Ewing em 1889 e, sob flexão cíclica, por Voight em 1892.

Desses trabalhos e, principalmente, do realizado por Coulomb, surgiu o conceito de *amortecimento do material*.

LAZAN (1959) classifica o amortecimento em dois tipos: a) amortecimento do material e b) amortecimento do sistema. O primeiro se relaciona com a dissipação de energia em um meio, por causa do atrito interno nas interfaces das microestruturas que compõem este meio, enquanto o segundo se relaciona com a perda de energia entre partes distintas de um sistema ou em virtude da interação de vários outros fenômenos. Sua obra enfoca o amortecimento do material, apontando diferentes formas para descrever as propriedades de amortecimento de materiais viscoelásticos e estruturais. Apresenta o amortecimento como uma função complexa entre módulos de elasticidade, para materiais viscoelásticos e, em função das energias envolvidas no sistema, para materiais estruturais, nos quais se observa uma variedade de comportamentos e grandes não-linearidades.

Além da classificação acima, existem várias formas de se quantificar o amortecimento e vários modelos matemáticos podem ser utilizados para representar o comportamento desse fenômeno físico.

PLUNKET (1959) relaciona várias formas de descrição do amortecimento para um modelo massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade, tais como, decremento logarítmico, fator de amplificação, fator de amortecimento equivalente, fator de qualidade, módulo complexo, largura de banda; e ainda discute técnicas experimentais para medidas de amortecimento.

SUN *et al.* (1995), em seu livro “*Vibration Damping of Structural Elements*”, explica muito bem os conceitos do modelo de amortecimento na forma complexa e suas aplicações, bem como os erros que decorrem de uma escolha inadequada do modelo de amortecimento para um sistema. Relaciona o fator de perda η , parâmetro que também define o amortecimento de um sistema, com a energia dissipada em um sistema sujeito a uma vibração forçada, e também com as propriedades viscoelásticas dos materiais. Descreve também uma forma de medir esse amortecimento, uma vez obtido o gráfico tensão-deformação de um sistema sujeito a um carregamento cíclico.

FERREIRA (1998), em sua tese de doutorado, propõe uma formulação no domínio da frequência para a análise dinâmica de sistemas estruturais dotados de amortecimento não-proporcional viscoso, histerético ou dependente da frequência, possuindo comportamento físico não-linear. Na solução das equações do movimento utiliza uma formulação matricial compacta das transformadas discretas de Fourier denominada *transformada implícita de Fourier*.

Em um de seus capítulos, FERREIRA discute a construção da matriz de amortecimento proporcional e caracteriza bem sua aplicação para sistemas estruturais em que o mecanismo de perda de energia está uniformemente distribuído em toda a estrutura, podendo-se adotar, nesse caso, uma distribuição das forças de amortecimento proporcional às forças elásticas e de inércia. Com isso, as propriedades de ortogonalidade das matrizes de massa, rigidez, autovetores e matriz diagonal dos quadrados dos autovalores se aplicam também à matriz de amortecimento proporcional.

Somando-se a essa diversidade de formas de quantificação do amortecimento e aos vários modelos matemáticos que podem representar este fenômeno, há também uma dispersão nos valores de amortecimento mencionados em diversas bibliografias.

MURRAY (1997), em um dos volumes da “*Steel Design Guide Series*”, fornece princípios básicos e ferramentas analíticas simples para avaliar vibrações causadas por atividades humanas em pisos sobre estruturas metálicas e sugere valores de amortecimento em função da utilização da estrutura e da excitação a que ela está sujeita.

No capítulo que trata do projeto de pisos onde o estudo da vibração resultante do caminhar de pessoas se torna relevante, são recomendados valores para o fator de amortecimento ζ , que variam de 1 a 5%, dependendo da finalidade de uso da edificação. Para passarelas ou pisos sem elementos não-estruturais ou acessórios e de pequena ocupação, recomenda-se o valor de 1%. Para pisos sem elementos estruturais ou acessórios, mas com uma ocupação mais acentuada, tais como *shoppings*, igrejas e feiras, recomenda-se o valor de 2%. O valor de 3% é sugerido para pisos sem elementos não estruturais ou acessórios, mas com pequenas divisórias desmontáveis

típicas de escritórios modulados. Para escritórios e residências com divisórias que vão do chão ao teto entre os pisos, recomenda-se o valor de 5%.

No capítulo que trata do projeto de pisos sujeitos a atividades rítmicas – aeróbicas, concertos ao vivo, eventos esportivos, pistas de dança – sugere-se a utilização do valor de 6%, valor este maior que os utilizados na análise anteriormente citada devido ao fato dos próprios participantes da atividade contribuírem para o amortecimento.

Para que se possa ter uma certeza maior sobre os valores dos fatores de amortecimento a serem utilizados em uma análise dinâmica, muitos estudos vêm sendo realizados na área experimental para determinação das propriedades dinâmicas das estruturas e dos fatores que influenciam essas propriedades.

Existem muitos métodos para avaliar experimentalmente o amortecimento de uma estrutura. Para uma estrutura sujeita a uma excitação dinâmica e a uma certa amplitude de movimento, tais métodos devem fornecer resultados similares na avaliação dos seus modos de vibração.

Em ELLIS (1996), são relatados dados provenientes de medições de amortecimento que foram realizadas em 16 edifícios situados no Reino Unido, seguindo a metodologia desenvolvida pela BRE (*Buildings Research Establishment*).

A BRE utilizou um sistema de quatro excitadores monitorados por computador, posicionados nos quatro cantos do nível mais alto da edificação ensaiada. Esses excitadores eram compostos de massas excêntricas que, girando em sentidos opostos, produziam uma força senoidal horizontal unidirecional. Esse sistema trabalhava em uma faixa de frequência de 0,3 a 20,0Hz, com incrementos de 0,001Hz, podendo gerar uma força máxima de 4,1kN na frequência de 1Hz.

Nos ensaios de vibração forçada, realizou-se uma varredura de frequências, em que uma força conhecida era aplicada pelos excitadores, e eram dados incrementos na frequência de excitação. Era medida, para cada frequência, a amplitude da resposta permanente da estrutura, utilizando um acelerômetro posicionado na direção adequada. Com isso,

obteve-se o espectro de resposta da estrutura e, através do método da meia-potência, pode-se estimar o valor do amortecimento.

Para ensaios de vibração livre, os excitadores produziam uma força em ressonância com uma das freqüências naturais da estrutura. Atingido o movimento permanente, os excitadores eram desligados simultaneamente e o decaimento da vibração era gravado, realizando, se necessária, uma filtragem analógica dos sinais coletados.

Para as estruturas cujos dados estão relatados no referido artigo, os valores de amortecimento foram, em sua maioria, estimados através da curva de decaimento da vibração, método que, segundo o autor, é o mais confiável para os modos de vibração fundamentais de uma estrutura. Após analisar os resultados, o autor recomenda, para a maioria das edificações, adotar-se o a valor de 1% do amortecimento crítico; e para edificações muito altas, 0,5% do amortecimento crítico. Esses valores foram estimados tendo como referência os valores mínimos medidos em 16 edifícios.

Em FUKUWA *et. al.* (1996), artigo sobre as propriedades dinâmicas em edificações de aço pré-fabricadas, foram descritos ensaios realizados em escala real sobre três edificações desse tipo, em quatro diferentes estágios da construção.

Freqüências naturais e fatores de amortecimento foram estimados através de vários métodos de identificação – testes de vibração livre, método do decremento randômico, “*sweep excitation test*”, função de transferência – e por diferentes formas de excitação: através de excitador eletromagnético e do “*wire cutting method*”, método em que um cabo fixado na estrutura é tracionado causando um deslocamento e, logo depois, é cortado.

Os resultados mostraram que as propriedades dinâmicas da estrutura estão estreitamente relacionadas com a existência de elementos não estruturais, tais como paredes de fechamento, paredes internas, forros, revestimentos e escadas.

No primeiro estágio da construção, o edifício era constituído apenas da estrutura de aço e dos pisos de ALC (concreto leve autoclavado). Não havia elementos não estruturais além das escadas de aço. Nessa etapa, as frequências naturais tinham valores muito próximos nas duas direções estudadas, e o amortecimento estrutural era muito pequeno.

No segundo estágio, foram colocadas paredes externas de ALC. A diferença nas propriedades dinâmicas entre as duas direções se tornou marcante pela presença maior de vazios nas paredes em uma determinada direção. Houve um acréscimo considerável no amortecimento devido ao atrito dos painéis de ALC.

Num último estágio, foram instaladas divisórias internas em uma das direções estudadas. O aumento da frequência natural foi grande na direção das divisórias; o amortecimento, entretanto, não variou muito.

Após a análise dos resultados obtidos nos ensaios, concluiu-se que os elementos não-estruturais contribuíram não apenas para o aumento da rigidez e amortecimento estrutural, como também da dependência entre a amplitude da resposta estrutural e as propriedades dinâmicas, quando o nível da excitação é relativamente baixo.

Outro estudo muito interessante foi realizado por SUDA *et. al.* (1996) com o intuito de estabelecer, estatisticamente, relações entre as propriedades dinâmicas de uma edificação e algumas de suas características, tais como, altura, tipo de fundação, material e finalidade de uso.

Esse estudo foi feito com base nas medições feitas em 123 edifícios de estrutura metálica e em 66 de concreto armado, todos situados no Japão. Quase todos os dados foram avaliados em medições com pequenas amplitudes de vibração.

Primeiramente, foi feita uma caracterização da amostra das edificações ensaiadas através da apresentação de histogramas. A maioria dos prédios em estrutura metálica media em torno de 100 metros, eram apoiados em fundações diretas e utilizados como hotéis ou como edifícios comerciais. Os edifícios em concreto armado, em sua maioria,

mediam entre 60 e 100 metros, eram apoiados em fundações profundas e de uso residencial.

Feita esta caracterização, são apresentados vários gráficos relacionando, período vs. altura, amortecimento vs. altura, amortecimento vs. frequência natural, amortecimento vs. período, amortecimento vs. tipo de fundação, amortecimento vs. utilização e, finalmente, amortecimento vs. direção da vibração.

A partir destes gráficos, algumas relações de proporcionalidade foram detectadas muito claramente. A proporção direta linear entre os períodos naturais referentes aos três primeiros modos de vibração e a altura das edificações, independentemente da direção avaliada, apresentou-se muito bem caracterizada. Em todos os gráficos que relacionam o amortecimento com outra característica da estrutura, foi observada uma razoável dispersão dos dados coletados. Isso se deve, provavelmente, ao fato de não terem sido consideradas, no amortecimento da estrutura, as condições do solo no qual ela se apóia. Apesar dessa dispersão, pôde-se notar que o amortecimento da estrutura aumenta concomitantemente à sua frequência natural.

Após uma análise geral dos resultados, pode-se notar que, para a grande maioria dos dados coletados, obtiveram-se valores de até 5% do amortecimento crítico para os edifícios em aço, e de até 3% para os edifícios em concreto armado.

Na visão dos autores, embora tenha sido reunida uma grande amostra de dados relativos às propriedades dinâmicas das estruturas, a quantidade e a qualidade dos dados coletados foi insuficiente para estabelecer, com mais precisão, a relação entre os níveis de amortecimento das edificações e alguns de seus parâmetros.

Outra característica do amortecimento é que este desempenha também uma grande importância na redução da incerteza na estimativa da resposta de uma estrutura quando sujeita a um carregamento de natureza estocástica.

HART (1996) apresenta um estudo sobre a redução desta incerteza em virtude da inserção de dispositivos de amortecimento entre os pisos de edificações. Inicialmente, o autor diferencia o amortecimento da estrutura em dois tipos: o amortecimento natural da estrutura associado aos mecanismos naturais de dissipação de energia em uma edificação e o amortecimento produzido na estrutura dito *manufactured building damping*, associado a dispositivos de amortecimento projetados.

Nesse estudo foi apresentada a resposta estrutural oriunda de uma simulação numérica variando-se os níveis de amortecimento em 2, 5 e 15%. Representando um distúrbio no estado de equilíbrio da estrutura, foi utilizado um conjunto de nove funções representativas de um movimento de base de uma edificação em *San Fernando Valley – EUA* devido ao terremoto *Northridge* em 1994, com o intuito de analisar o comportamento estrutural tanto para terremotos quanto para carregamento de ventos oriundos de tempestades e tornados.

O valor de 2% para o amortecimento representa o valor médio do amortecimento natural da estrutura encontrado para os edifícios modernos de aço. Os valores de 5 e 15% representam o amortecimento produzido na estrutura com a inclusão de mecanismos de amortecimento.

Utilizando-se parâmetros estatísticos quantificou-se a incerteza da resposta em presença do amortecimento e notou-se uma redução significativa nesta para uma pequena variação no fator de amortecimento.

Com isso, concluiu-se que a adição de dispositivos de amortecimento projetados na estrutura tem um efeito muito positivo sobre a certeza da resposta e, associado a esta, sobre a segurança estrutural.

Ao contrário das características de massa e rigidez de um sistema, o amortecimento não se relaciona exclusivamente com um único fenômeno físico. Com isso, a estimativa do amortecimento em sistemas estruturais constitui, talvez, o problema mais difícil na dinâmica estrutural.

Em KAREEM *et al.* (1996), discutem-se os possíveis tipos de fontes de amortecimento e seus modelos matemáticos e o tratamento da incerteza na estimativa do amortecimento para aplicações práticas.

São apresentados os modelos matemáticos possíveis para a representação do amortecimento estrutural, amortecimento aerodinâmico e amortecimento hidrodinâmico.

São também descritos métodos de avaliação de amortecimento através de histórico temporal, que são classificados em duas categorias: técnicas espectrais – métodos do decaimento da auto-correlação, decremento logarítmico, meia-potência, momento espectral, decremento randômico, ajuste da curva espectral e transformada de *wavelet* baseada na estimativa espectral – e métodos de séries no tempo – estimativa da entropia máxima, auto-regressão (AR), ou auto-regressão e média móvel (*ARMA – auto-regressive and moving average*).

O tratamento da incerteza inerente associada com o amortecimento em sistemas estruturais é apresentado para incorporar o efeito desta incerteza sobre a estimativa da resposta estrutural. Por fim, são apresentadas a técnica da perturbação de segunda ordem, a análise do segundo momento e a simulação de Monte Carlo, para examinar os efeitos da variação do amortecimento sobre a resposta dinâmica das estruturas.

Outras teorias, além das que utilizam a *transformada de Fourier*, têm sido utilizadas na resolução de problemas oriundos de vibrações.

MORAES (1996) apresenta algumas aplicações da Teoria *Wavelet* à análise de vibrações. A teoria *wavelet* é capaz de fornecer informações bem localizadas no tempo de um sinal. A técnica consiste na decomposição do sinal em ondículas (*wavelets*) que, além de estarem relacionadas a um conteúdo freqüencial, possuem um caráter localizado na linha do tempo.

Em um dos exemplos descritos, Moraes simulou um sinal composto por três componentes harmônicas e introduz neste um ruído com uma determinada duração em um instante específico. Esse sinal pode exemplificar a vibração mecânica de um sistema rotativo, com as componentes relativas ao desbalanço na velocidade de rotação, a uma ressonância estrutural excitada e a uma frequência de engrenamento. O ruído simulado representaria algum tipo de impacto, como, por exemplo, o toque de uma palheta de turbina na carcaça ou alguma partícula na superfície de engrenamento. Através da utilização da *transformada wavelet ortonormal discreta* e de sua inversa, e através de uma representação gráfica adequada – utilizando-se o mapa de quadrados médios – foi possível localizar com precisão satisfatória o instante em que foi introduzido o ruído, isolá-lo e recuperar o seu sinal original no tempo.

O amortecimento, portanto, se mostra um fenômeno extremamente complexo por causa da quantidade de fatores que influenciam sua quantificação, sendo hoje, objeto de muitos estudos.

No Capítulo 2 desta dissertação, são apresentados os conceitos básicos da dinâmica e seus respectivos modelos matemáticos. Em seguida, são discutidos mais detalhadamente os fatores que influenciam no amortecimento de uma estrutura e as formas pelas quais as propriedades de amortecimento podem ser representadas.

No Capítulo 3 são expostos conceitos básicos para a realização de uma análise experimental de vibrações. São discutidos os possíveis erros que decorrem desta análise, a instrumentação que pode ser utilizada e alguns fundamentos para sua escolha, a manipulação dos dados captados durante os ensaios e técnicas experimentais de obtenção de parâmetros de amortecimento. Os princípios dos Métodos do Decaimento Logarítmico, Meia Amplitude e Meia Potência são apresentados com toda sua formulação matemática para um sistema com um grau de liberdade.

No Capítulo 4 são apresentados os procedimentos adotados em ensaios realizados em algumas edificações. Essas estruturas são estruturas metálicas com lajes de concreto com forma de aço incorporada. Foram simulados sobre os pisos diversos tipos de cargas dinâmicas e, utilizando acelerômetros, foram obtidas as respostas da estrutura às

excitações. Paralelamente a esses procedimentos, os pisos ensaiados foram simulados numericamente através de um programa computacional, utilizando elementos finitos.

O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos pelos métodos descritos no Capítulo 4. Através de um tratamento adequado dos sinais captados e utilizando as técnicas descritas no Capítulo 3, são obtidos níveis de amortecimento das estruturas. No modelo numérico foram feitas análises modais e comparados os resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente.

2

DINÂMICA DAS ESTRUTURAS E AMORTECIMENTO ESTRUTURAL

2.1 – Dinâmica das Estruturas

A realização de uma análise dinâmica envolve a solução de equações diferenciais de segunda ordem, que, no caso, são as equações de equilíbrio dinâmico da estrutura, dadas por

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p, \quad (2.1)$$

onde \dot{u} e \ddot{u} , são respectivamente, vetores das derivadas primeira (velocidade) e segunda (aceleração) do vetor deslocamento u em relação ao tempo. M é a matriz de massa, C é a matriz de amortecimento e K é a matriz de rigidez. O vetor u e suas derivadas são vetores que dependem do número de graus de liberdade do modelo matemático adotado. A parcela $M\ddot{u}$ representa as forças de inércia da estrutura, a parcela $C\dot{u}$ representa as forças de amortecimento, e a parcela Ku representa as forças elásticas da estrutura. O vetor p representa o carregamento externo.

De modo geral, a solução da Eq. 2.1 é a soma de duas partes: a primeira parte corresponde à solução da equação homogênea, onde fazemos $\mathbf{p}(t) = \mathbf{0}$; a segunda corresponde à solução particular, função do carregamento $\mathbf{p}(t)$ aplicado.

Considerando um sistema massa-amortecedor-mola de um grau de liberdade (FIG.1), com amortecimento viscoso, pode-se reescrever a Eq. 2.1 da seguinte forma:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (2.2)$$

e dividindo-se a Eq. 2.2 por m obtém-se:

$$\ddot{u}(t) + 2\omega_n\zeta\dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) = p(t)/m \quad (2.3)$$

onde, $\omega_n = (k/m)^{1/2} \Rightarrow$ frequência natural do sistema (2.4)

$\zeta = c/c_{cr} \Rightarrow$ fator de amortecimento do sistema (2.5)

$c \Rightarrow$ coeficiente de amortecimento

$c_{cr} = 2m\omega_n \Rightarrow$ coeficiente de amortecimento crítico (2.6)

que são valores escalares (Craig Jr., 1981).

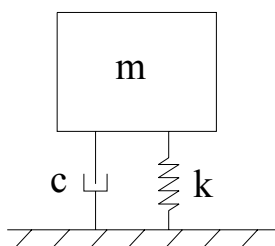


FIGURA 1 – Sistema massa-amortecedor-mola com um grau de liberdade

A frequência natural ω_n é obtida para sistemas sem amortecimento. A frequência natural na presença do amortecimento é dada por

$$\omega_d = \omega_n(1-\zeta^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

Todavia, como na maioria das edificações ζ é menor que 20%, a frequência natural não difere muito da frequência natural amortecida.

Mediante a solução da equação homogênea obtém-se a equação do movimento relativa à vibração livre do sistema. De forma geral, para um sistema não amortecido, pode-se escrever a sua solução como

$$u(t) = A_1 \cos(\omega_n t) + A_2 \sin(\omega_n t), \quad (2.8)$$

onde A_1 e A_2 são constantes reais, que dependem das condições iniciais do movimento (perturbações do seu estado de equilíbrio dinâmico).

Analogamente, para um sistema amortecido, tem-se a seguinte solução homogênea:

$$u(t) = e^{-\zeta \omega_n t} (A_1 \cos(\omega_d t) + A_2 \sin(\omega_d t)). \quad (2.9)$$

Pode-se também representar a Eq. 2.9 pela forma

$$u(t) = U e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_d t - \alpha), \quad (2.10)$$

onde U é a amplitude e α é o ângulo de fase que dependem das condições iniciais.

A solução particular depende do tipo de carregamento dinâmico a que está sujeita a estrutura.

Os carregamentos dinâmicos podem ser definidos como variáveis com o tempo, ou seja, carregamentos cuja magnitude, direção ou posição variam com o tempo, e podem ser divididos em duas categorias básicas: não periódicos e periódicos.

Os carregamentos periódicos são carregamentos que se repetem ao longo do tempo e cujo período de repetição é definido. Podem ser exemplificados por atividades rítmicas como ginástica aeróbica ou dança. O mais simples dos carregamentos periódicos é o

carregamento harmônico, que tem a sua variação no tempo definida por uma função do tipo senoidal; porém, qualquer carregamento dinâmico periódico, baseando-se no teorema de *Fourier*, pode ser decomposto em uma combinação linear de carregamentos harmônicos.

Os carregamentos não-periódicos não possuem um período definido. Podem ser agrupados como carregamentos transientes ou impulsivos. Exemplos de carregamentos transientes ocorrem a partir do movimento de pessoas andando ou correndo, e os de carregamentos impulsivos, resultantes de uma explosão, de um salto ou de efeitos do impacto do calcanhar sobre um piso.

Considerando-se um sistema de 1 grau de liberdade, para carregamentos específicos, como o *carregamento harmônico*, o *pulso ideal*, o *pulso retangular*, o *carregamento em rampa* e o *impulso de curta duração*, têm-se soluções pré-determinadas. Para um carregamento dinâmico qualquer, pode-se usar o recurso da *integração passo a passo*, ou a *integral de Duhamel* (Craig Jr, 1981).

As soluções das equações diferenciais de movimento que decorrem de uma análise dinâmica podem ser elaboradas tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Isto se torna possível através da utilização da *transformada de Fourier*, definida pela equação

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (2.11)$$

onde $X(t)$ é uma função real no tempo e $X(\omega)$ é uma função complexa de frequência. Essa é uma poderosa ferramenta utilizada na análise dinâmica, pois baseado nessa transformada obtém-se um espectro em que se podem visualizar as frequências naturais de um sistema.

Na análise de sistemas com múltiplos graus de liberdade, a resolução é feita de forma similar a de sistemas com um grau de liberdade, buscando-se a solução para um sistema

de equações diferenciais de segunda ordem com n variáveis. Sobre esse sistema com n graus de liberdade pode-se utilizar vários procedimentos para obtenção da resposta dinâmica. Serão descritas a seguir algumas dessas análises.

2.1.1 – Análise Modal

A análise modal é utilizada na determinação dos modos de vibração de uma estrutura e respectivas frequências fundamentais. Para essa análise assume-se uma estrutura com n graus de liberdade, com matriz de massa e rigidez constantes e sem aplicação de nenhum tipo de força, deslocamentos, pressões ou temperaturas, variantes no tempo.

Nessa análise não se considera o amortecimento pois, para os níveis de amortecimento usualmente assumidos nas estruturas, a diferença entre os valores da frequência natural e frequência natural amortecida não é significativa.

A equação do movimento para um sistema com n graus de liberdade, não amortecido e sem nenhum carregamento aplicado, é dada por

$$M\ddot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = \mathbf{0} . \quad (2.12)$$

Para um sistema linear, a solução das equações do movimento referentes às vibrações livres podem ser representadas por

$$\mathbf{u}(t) = \hat{\mathbf{u}} \cos(\omega t) , \quad (2.13)$$

onde $\hat{\mathbf{u}}$ é o vetor que representa a amplitude relativa a cada grau de liberdade para uma determinada frequência ω .

Substituindo-se a Eq. 2.13 na Eq. 2.12, tem-se

$$\left(-\omega^2 M + K \right) \hat{\mathbf{u}} = \mathbf{0} . \quad (2.14)$$

Essa igualdade é satisfeita para $\hat{u} = \mathbf{0}$ ou se o $\det(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})$ for nulo. Tem-se então um problema de autovalor e autovetor, que fornece n resultados para o autovalor (frequências ω_i , $i=1,2,\dots,n$) e n autovetores correspondentes (modos de vibração ϕ_i , $i=1,2,\dots,n$). A Eq. 2.14 pode, então, ser reescrita como

$$(-\omega_i^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\phi_i = \mathbf{0}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.15)$$

Os modos de vibração ϕ_i são ortogonais e constituem uma base para o espaço n -dimensional.

2.1.2 – Método da Superposição Modal

A superposição modal é um método em que, somando-se as contribuições de cada modo de vibração, obtém-se a resposta dinâmica da estrutura.

Para determinar as contribuições de cada modo de vibração de um sistema com n graus de liberdade, cujo comportamento pode ser considerado como elástico linear, é necessária a obtenção das matrizes de massa e rigidez modais. Para tal, é necessário que se efetue uma pré-multiplicação e uma pós-multiplicação dessas matrizes pela matriz modal (cujas colunas correspondem aos modos de vibração) e sua transposta, respectivamente, desacoplando, desse modo, o sistema de equações inicial. Resolvendo-se cada uma dessas equações obtém-se, então, a contribuição de cada modo de vibração para a resposta estrutural.

Para uma estrutura com n graus de liberdade, dependendo do tipo de carregamento dinâmico a que ela está sujeita, alguns modos de vibração são mais excitados que outros. Por meio do método da superposição modal, pode-se representar a resposta estrutural, com boa aproximação, utilizando apenas as contribuições relativas a esses modos, economizando-se, dessa forma, um enorme tempo computacional na resolução de problemas envolvendo sistemas com múltiplos graus de liberdade.

2.1.3 – Análise Harmônica

Para o caso particular de um carregamento harmônico, supondo o comportamento do material como elástico linear, pode-se obter a solução geral na forma complexa, em função da frequência da excitação (Craig Jr,1981), que fornece a amplitude máxima do movimento e ângulo de fase dependente do fator de amortecimento. Essa análise é chamada *análise harmônica*, e fornece apenas a parcela permanente da esposta, supondo que a parcela que depende das condições iniciais desaparece rapidamente em função do amortecimento.

Em um sistema com múltiplos graus de liberdade, caso se apliquem simultaneamente cargas harmônicas em pontos diferentes, elas devem atuar com a mesma frequência para que se consiga realizar essa análise, não sendo necessário, porém, estarem em fase.

Através da análise harmônica pode-se determinar frequências naturais do sistema. Calculando-se a resposta estrutural para várias frequências de excitação e mantendo-se a amplitude da força constante, obtém-se um gráfico quantitativo dessa resposta em função da frequência, no qual identificam-se picos de resposta (usualmente, aceleração ou deslocamento), caso a faixa de frequências de excitação contenha alguma das frequências naturais da estrutura. Estes picos coincidem com as frequências naturais do sistema avaliado.

2.1.4 – Análise Transiente

A análise transiente é utilizada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura que esteja sob ação de um carregamento qualquer variante no tempo ou que tenha condições iniciais diferentes de zero.

Um dos métodos utilizados para a realização desta análise é o método de *integração numérica passo a passo*. Conhecidos os valores da carga aplicada em função do tempo, são feitas integrações numéricas sucessivas, considerando um incremento de tempo Δt , e obtém-se o histórico das respostas no tempo, tomando como condições iniciais para cada passo as respostas oriundas do passo imediatamente anterior. Através de matrizes

constitutivas pode-se obter, também, as deformações e tensões para cada instante de tempo t (Craig, 1981).

Nessa análise pode-se considerar comportamento não-linear para o sistema.

2.2 – Amortecimento

O amortecimento é uma propriedade dinâmica das estruturas cujo efeito sobre a resposta de uma estrutura é facilmente observado quando associado a sua vibração livre. Suponha-se que uma barra engastada tenha sido deformada perpendicularmente em relação ao seu eixo, retirando-a, assim, de sua posição de equilíbrio. Ela começaria a oscilar regularmente, e sua amplitude diminuiria a cada oscilação sucessiva. Caso não houvesse amortecimento nesse sistema, a oscilação, uma vez provocada, continuaria indefinidamente.

No caso de estruturas excitadas por um carregamento dinâmico qualquer, o principal efeito do amortecimento é a atenuação dos picos de aceleração e deslocamento da estrutura. Porém, esse efeito é mais significativo quando a estrutura trabalha em ressonância, pois, caso não houvesse amortecimento, os valores de aceleração e deslocamento da estrutura tenderiam a infinito, ao passo que, na presença dele, estes valores são limitados.

O amortecimento se relaciona com a mensuração da dissipação de energia de uma estrutura em vibração que resulta em trazê-la a um estado de equilíbrio. A capacidade de amortecimento de um sistema estrutural é definida como a razão entre a energia dissipada em um ciclo de oscilação pela máxima quantidade de energia acumulada na estrutura, naquele ciclo.

A importância da estimativa do amortecimento vem se tornando mais significativa à medida que as estruturas têm-se tornado mais flexíveis. Nessas estruturas, os níveis de oscilação podem não ser significantes o bastante para causar danos na estrutura, mas podem causar desconforto para os ocupantes da edificação. Por isso é importante uma

boa estimativa para o amortecimento ou mesmo a inserção de dispositivos de amortecimento nessas estruturas, com o intuito de evitar tais situações.

Ao contrário das características de massa e rigidez de uma estrutura, o amortecimento não pode ser relacionado com um fenômeno físico único, pois existem muitos mecanismos que podem provocar o amortecimento em um sistema. Os mais importantes entre esses mecanismos são o amortecimento do material e o amortecimento interfacial.

O amortecimento do material vem de uma complexa interação intramolecular do material e depende do tipo do material. A complexidade de caracterizar este tipo de amortecimento se torna maior uma vez que as propriedades de um material geralmente diferem de uma amostra para outra, resultando em uma significativa diferença na perda de energia entre diferentes partes de um sistema estrutural. As equações de movimento na dinâmica estrutural geralmente descrevem um comportamento macroscópico, enquanto o amortecimento do material se processa em função de um fenômeno microscópico. Esse conflito de escalas leva à pesquisa de teorias que descrevam e quantifiquem os fenômenos acerca do amortecimento do material.

Já o mecanismo de amortecimento interfacial resulta da fricção entre os elementos e as ligações de um sistema estrutural.

Outro tipo de amortecimento é provocado pelo meio fluido em que o elemento está submerso e é proporcional às propriedades desse meio e à velocidade do movimento . Esse tipo de amortecimento é chamado de *viscoso* (Craig Jr,1981). Como exemplos dele podem ser citados o amortecimento aerodinâmico e hidrodinâmico, que ocorrem com estruturas vibrando no ar ou na água.

Além desses, existem muitos outros mecanismos pelos quais a energia de um sistema é dissipada. Com isso, a estimativa do amortecimento em sistemas estruturais é uma das tarefas mais difíceis na dinâmica estrutural.

Devido a essa variedade de mecanismos, vários modelos foram concebidos para melhor representar os efeitos do amortecimento.

Entre eles pode-se citar o amortecimento viscoso linear, o amortecimento de Coulomb e o amortecimento estrutural na forma complexa.

2.2.1 – Amortecimento Viscoso Linear

A força de amortecimento viscoso é uma função da velocidade e da resistência causada pelo fluido no qual o sistema está imerso durante uma oscilação. Geralmente, a sua descrição matemática é muito complicada e, portanto, não é aplicável a análise de vibrações. Felizmente, uma forma simplificada desse modelo foi desenvolvida de modo que soluções matemáticas manuseáveis pudessem ser utilizadas para as propostas da engenharia. Contudo, qualquer tipo de não linearidade no sistema estrutural é desconsiderada nessa simplificação.

Tipicamente, na prática da engenharia estrutural, o modelo do amortecimento viscoso é o mais utilizado pelo fato de levar à formulação de uma equação do movimento linear.

A força de amortecimento viscoso pode ser representada pela equação

$$F_d = c\dot{u} . \quad (2.16)$$

Para sistemas com força de amortecimento viscoso F_d , a energia dissipada por ciclo de vibração W_d é igual a

$$W_d = \oint F_d du . \quad (2.17)$$

Em geral W_d é uma função de muitos fatores, tais como frequência, amplitude e temperatura do ambiente.

Para um sistema massa-mola de 1 grau de liberdade com amortecimento viscoso sujeita a uma força senoidal do tipo $F=F_0.\text{sen}\Omega t$, a resposta relativa ao movimento permanente é dada pela equação

$$u(t) = U\text{sen}(\Omega t - \alpha), \quad (2.18)$$

onde Ω é a frequência de excitação. Substituindo as Eqs. 2.16 e 2.18 na Eq. 2.17, considerando um ciclo da excitação, temos W_d na seguinte forma

$$W_d = \pi c \Omega U^2. \quad (2.19)$$

A Eq. 2.19 implica que a energia dissipada por ciclo de vibração de um sistema com amortecimento viscoso sob excitação periódica seja proporcional à frequência de excitação e ao quadrado da amplitude de resposta. Remanejando as Eqs. 2.16 e 2.18 obtem-se

$$\left(\frac{F_d}{c\Omega U} \right)^2 + \left(\frac{u}{U} \right)^2 = 1, \quad (2.20)$$

que representa uma elipse no plano F_d-u , como mostrado na FIG. 2. A área dentro da elipse é igual a $\pi c \Omega U^2$, que é a energia dissipada por ciclo de vibração W_d .

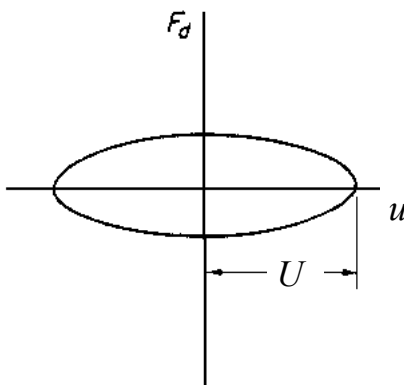


FIGURA 2 - Energia dissipada por ciclo no amortecimento viscoso

Entretanto, se considerarmos a força total como a adição da força elástica $k.u$ e da força de amortecimento F_d e representarmos graficamente o resultado no plano (F_d+ku) e u , o gráfico é uma elipse rotacionada como mostra a FIG. 3. Porém, a área da elipse continua sendo $\pi c\Omega U^2$. Esta curva é usualmente chamada de *ciclo de histeresis*.

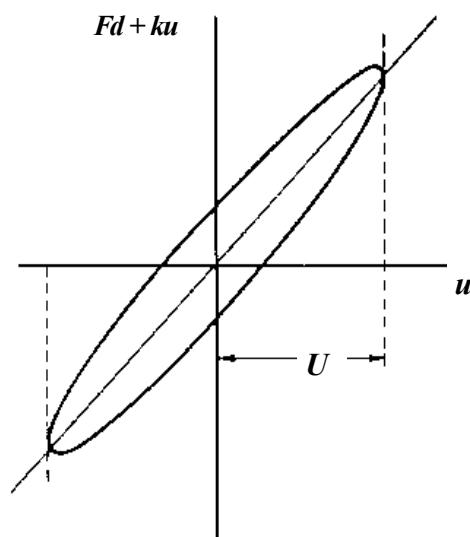


FIGURA 3 - Energia dissipada por ciclo no amortecimento viscoso

O amortecimento pode também ser definido em termos de energia de dissipação e do pico de energia potencial, como

$$\eta = \frac{W_d}{2\pi W} , \quad (2.21)$$

onde W é o pico de energia potencial e η é chamado de *fator de perda* (SUN,1995).

Para o caso de uma vibração livre, utilizando o modelo do amortecimento viscoso, verifica-se que a amplitude decai exponencialmente com o tempo, como se pode ver na FIG.4 .

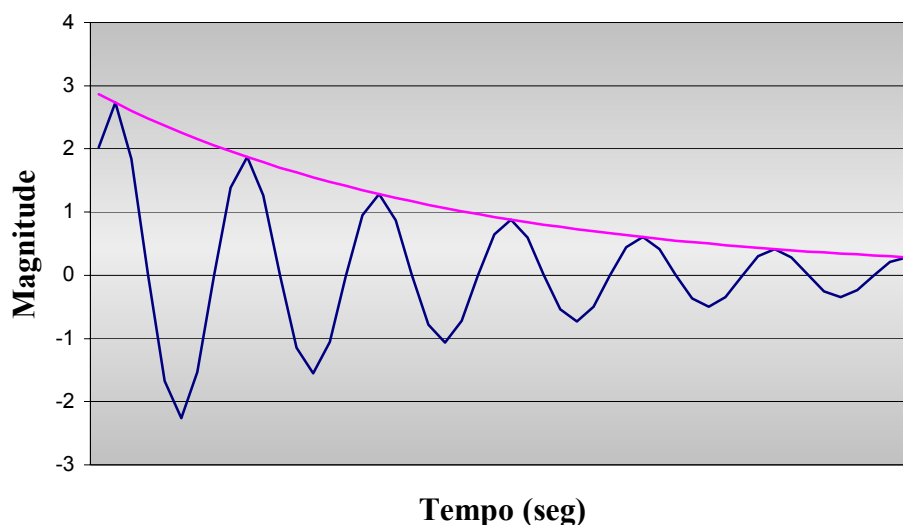


FIGURA 4 - Curva de decaimento para um sistema com um grau de liberdade com amortecimento viscoso linear

Da Eq. 2.3, observa-se que o amortecimento, para este modelo, pode ser representado através do fator de amortecimento ζ .

O fator de amortecimento ζ é dado como uma porcentagem do amortecimento crítico c_{cr} . Pode-se classificar o amortecimento de uma estrutura em três tipos: crítico, subcrítico e supercrítico.

No amortecimento crítico, a perda de energia pela estrutura se processa da maneira mais abrupta possível. Para este amortecimento, tem-se $\zeta = 1$. Esse valor de amortecimento é o limite para o qual a estrutura oscila ou não, caso seja imposta uma perturbação inicial. Quando $\zeta < 1$, tem-se o amortecimento *subcrítico*, em que a estrutura oscila, com o decaimento da sua amplitude de vibração tendendo a zero no caso de uma vibração livre, e tendendo a um valor finito, no caso de uma vibração forçada. Quando $\zeta > 1$, tem-se o amortecimento *supercrítico*, em que a estrutura não oscila, perdendo sua energia de forma mais lenta que no amortecimento crítico.

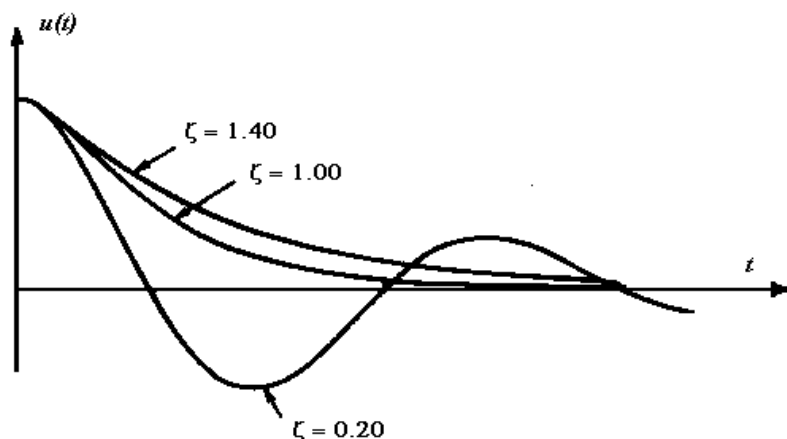


FIGURA 5 - Resposta de um sistema de um grau de liberdade com amortecimento viscoso com vários níveis de amortecimento

2.2.2 – Amortecimento de Coulomb (*dry-friction*)

Nas estruturas usuais, em muitos casos, a maior dissipação de energia ocorre nas juntas e conexões estruturais. Essa dissipação ocorre devido ao escorregamento entre superfícies vizinhas e depende apenas da força normal que existe na interface e do coeficiente de atrito entre as superfícies. Para esse caso, o amortecimento de *Coulomb* ou *atrito de Coulomb*, proporciona um mecanismo para dissipação de energia sob um deslocamento cisalhante cíclico, ou seja, para cada ciclo de deslocamento há uma perda constante de energia, independentemente da velocidade com a qual este deslocamento se realiza (Lazan,1960). A força de amortecimento produzida por este tipo de mecanismo sempre se opõe ao movimento, ou seja, o sentido do vetor força é sempre oposto ao do vetor velocidade, e é dada por

$$F_d = \mu N, \quad (2.22)$$

onde μ é o coeficiente de atrito entre as superfícies e N é a força normal existente entre elas.

Para o caso de uma vibração livre, utilizando o modelo do amortecimento de *Coulomb*, observa-se que a amplitude decai linearmente com o tempo, como se pode ver na FIG. 6.

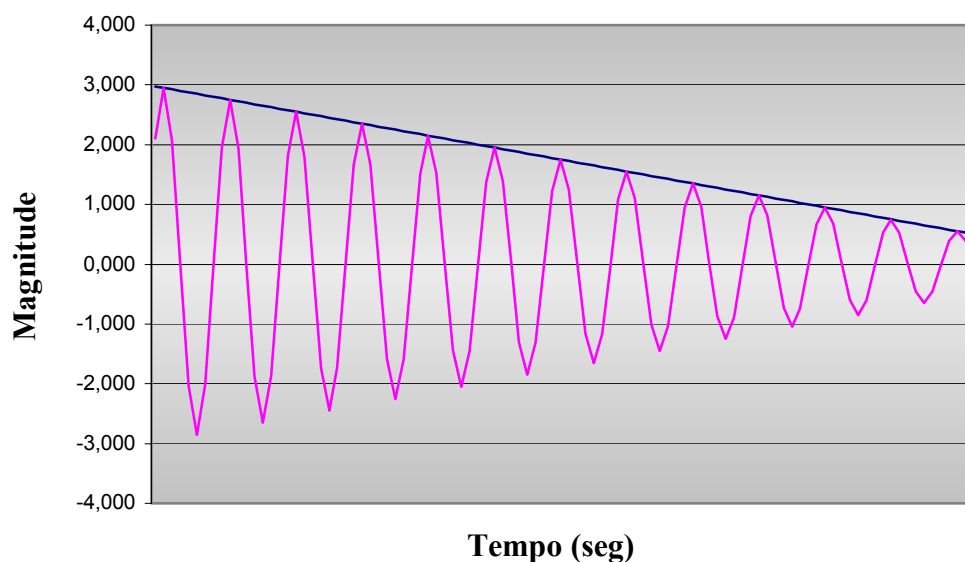


FIGURA 6 - Curva de decaimento para um sistema com um grau de liberdade com amortecimento de Coulomb

Portanto, vê-se que esse é um mecanismo de amortecimento muito eficaz, que acarreta, porém, vários problemas para a vida da estrutura. Os efeitos de corrosão e deterioração na região onde ocorre o escorregamento, adicionados aos problemas de fadiga do material quando a estrutura trabalha próxima da ressonância, são fatores que devem ser muito bem estudados e mitigados através de soluções construtivas adequadas.

2.2.3 – Amortecimento Estrutural na Forma Complexa

Pode-se ainda representar o amortecimento estrutural utilizando a notação complexa. Este tipo de amortecimento é proporcional ao deslocamento e em fase com a velocidade de um sistema que oscila harmonicamente. Para um sistema de um grau de liberdade pode-se escrever:

$$m\ddot{u} + k(1 + i\eta)u = p_0 e^{i\Omega t}, \quad (2.23)$$

onde η é o *fator de amortecimento estrutural* ou *fator de perda*. A parcela $k(1 + i\eta)$ é chamada *rigidez complexa*.

A rigidez expressa na forma complexa é derivada do modelo linear de materiais viscoelásticos com a relação tensão–deformação (ou carga-deflexão) na forma

$$\sigma + a \frac{d\sigma}{dt} = E\left(\varepsilon + b \frac{d\varepsilon}{dt}\right), \quad (2.24)$$

onde σ é a tensão, ε a deformação, E é o módulo de Elasticidade, a e b são constantes do material viscoelástico (SUN,1995).

Visto que, quando os fatores de amortecimento são pequenos – como, geralmente, no caso das estruturas – e o amortecimento é mais efetivo quando a estrutura trabalha em frequências próximas da ressonância, sob condições de excitação harmônica, o amortecimento estrutural é essencialmente equivalente ao amortecimento viscoso, com

$$\zeta = \frac{\eta}{2r} \cong \frac{\eta}{2}, \quad (2.25)$$

pois, nessas condições, o valor de r , que é a razão entre a frequência de excitação e a frequência fundamental, é muito próximo da unidade (CRAIG,1981).

2.2.4 – Amortecimento Viscoso Equivalente

O amortecimento viscoso é o que fornece um modelo matemático mais simples, no qual se assume a força de amortecimento como diretamente proporcional à velocidade. Porém, nos sistemas oscilatórios reais, mesmo quando o amortecimento real é mais

complexo que este, ainda sim é possível recair na simplicidade do modelo de amortecimento viscoso, introduzindo a idéia de um *amortecimento viscoso equivalente*.

Como dito anteriormente, um dos principais efeitos do amortecimento é remover energia do sistema. Daí o conceito de amortecimento viscoso equivalente ser baseado na equivalência da energia removida por um mecanismo de amortecimento viscoso e da de um não viscoso.

Para um sistema de um grau de liberdade, cujo amortecimento não seja do tipo viscoso linear, pode-se definir um *coeficiente de amortecimento viscoso equivalente* dado por

$$c_{eq} = -\frac{W_D}{\pi\Omega U^2}, \quad (2.26)$$

onde W_D é a energia dissipada pelo mecanismo de amortecimento não viscoso para um ciclo do movimento harmônico com frequência de excitação Ω .

Conseqüentemente, podemos também definir um *fator de amortecimento equivalente* dado por

$$\zeta_{eq} = \frac{c_{eq}}{c_{cr}}. \quad (2.27)$$

2.3 – Formas de Consideração do Amortecimento em Análises Dinâmicas

O passo mais importante na realização de uma análise dinâmica em uma estrutura é o da concepção do modelo pelo qual a estrutura será representada. Nessa fase, definidas as propriedades físicas e geométricas da estrutura, é possível estabelecer as características discretas de rigidez, amortecimento e massa do sistema. Assumindo-se o modelo de amortecimento, para as estruturas usuais, como sendo linear viscoso, existem várias formas de considerar o amortecimento em uma análise dinâmica.

2.3.1 – Fator de Amortecimento Único

A forma mais simples de considerar o amortecimento em uma análise dinâmica é definir um único fator de amortecimento para toda a estrutura e independentemente da frequência de resposta.

Essa forma pode ser utilizada, por exemplo, no estudo de uma laje de concreto sujeita a um carregamento harmônico, cuja frequência de excitação esteja próxima a uma das frequências naturais da estrutura, da qual se deseja obter a amplitude máxima da resposta. A frequência natural, cujo valor estiver próximo ao da frequência do carregamento, é a mais excitada. Dessa forma, não é necessário considerar diferentes valores de fator de amortecimento para os demais modos de vibração, já que esses influenciam pouco na resposta estrutural.

2.3.2 – Amortecimento de Rayleigh

O amortecimento de *Rayleigh* é uma outra forma de considerar o amortecimento, em que se obtém a matriz de amortecimento C como sendo uma combinação linear das matrizes de rigidez e massa dada por

$$C = \alpha M + \beta K . \quad (2.28)$$

Em sistemas estruturais onde o mecanismo de perda de energia está uniformemente distribuído em toda a estrutura, pode-se adotar uma distribuição das forças de amortecimento proporcional às forças elásticas e de inércia. Com isso, as propriedades de ortogonalidade das matrizes de massa e rigidez se aplicam também à matriz de amortecimento.

Esta matriz assim definida é chamada de matriz proporcional, ortogonal ou modal, e se reduz a uma matriz diagonal mediante uma transformação modal (Clough, 1975). Com um manuseio algébrico, na equação acima, obtém-se a expressão

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}, \quad (2.29)$$

onde ζ_i é o fator de amortecimento associado a cada frequência ω_i .

Com a utilização da matriz de amortecimento de Rayleigh pode-se associar fatores de amortecimento distintos para dois modos de vibração.

2.3.3 - Amortecimento Modal

Considerando-se uma estrutura com múltiplos graus de liberdade, pode-se associar parâmetros de amortecimento distintos para cada um dos seus modos de vibração. Essa forma de consideração do amortecimento em uma análise dinâmica caracteriza o amortecimento modal. Baseando-se nas propriedades de ortogonalidade da matriz de amortecimento proporcional, obtém-se a matriz de amortecimento modal generalizada pela equação

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\zeta_i\omega_i}{M_i} \right) (\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i)(\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i)^T, \quad (2.30)$$

onde ζ_i e ω_i são respectivamente o fator de amortecimento e frequência natural associados a cada modo de vibração, M_i é a massa modal, \mathbf{M} é matriz de massa do sistema e $\boldsymbol{\phi}_i$ é o modo de vibração (CLOUGH,1975).

2.3.4 - Amortecimento do Material

Outra forma de considerar o amortecimento em um sistema é a definição de parâmetros de amortecimento para cada material. Esse tipo de amortecimento depende, principalmente, do atrito interno entre as moléculas, variando de acordo com o material. Esse tipo de consideração, porém, é mais adequado ao estudo de mecanismos de dissipação de energia que utilizam materiais compostos.

3

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES

3.1 - Introdução

Muitos estudos vêm sendo realizados na área experimental para determinação das propriedades dinâmicas das estruturas e dos fatores que influenciam nessas propriedades. Esses estudos têm como intuito fornecer soluções que garantam a segurança e a durabilidade das estruturas bem como o conforto de seus usuários, para problemas de vibrações causados por tráfego de automóveis, presença de máquinas desbalanceadas, rajadas de ventos, e mesmo para terremotos. Entre as propriedades a serem determinadas, o fator de amortecimento tem sido objeto de estudos dispendiosos em função de sua complexidade.

Neste capítulo, será feita uma descrição da metodologia aplicada em uma análise experimental de vibrações, da instrumentação utilizada e de algumas técnicas experimentais aplicadas na obtenção de parâmetros de amortecimento.

3.2 – Simulação de Carregamentos Dinâmicos

Para a obtenção experimental das características dinâmicas de uma estrutura, é necessário, obrigatoriamente, que aja sobre ela uma força variável no tempo. Muitas vezes essa força é produzida pelo próprio carregamento ao qual a estrutura está sujeita,

e a resposta estrutural pode ser captada durante a sua ação. Entretanto, em outras situações isso não é possível, seja pelas dificuldades na instalação da aparelhagem a ser utilizada seja pela imprevisibilidade da ocorrência do evento, como acontece, por exemplo, com terremotos e rajadas de vento. Com isso, faz-se necessário induzir o carregamento dinâmico de forma similar ao que acontece na situação real. Essa simulação acontece, na maioria das vezes, através de um carregamento periódico ou de uma força de impacto.

No caso do carregamento harmônico, para simulá-lo, pode-se utilizar, por exemplo, um mecanismo composto de massas excêntricas que girando em sentidos opostos produzem uma força senoidal unidirecional. A escolha da frequência de giro desse mecanismo e da magnitude das massas excêntricas utilizadas dependem das características da estrutura a ser ensaiada.

Outra maneira bem simples de simular um carregamento periódico é colocar um grupo de pessoas dançando embalados por algum ritmo musical sobre um piso. Essa simulação é muito utilizada no estudo de pisos sujeitos a atividades rítmicas, tais como, ginástica aeróbica, concertos musicais e eventos esportivos, entre outros.

Na simulação de forças impulsivas, dois tipos de teste são bem comuns. O primeiro, denominado *“heel-drop”*, consiste em uma pessoa colocar-se nas pontas dos pés e, subitamente, com os calcanhares, impactar o piso. Esse tipo de simulação é comum no estudo dos efeitos dinâmicos do caminhar de pessoas sobre um piso. O segundo, denominado *“impact hammer test”*, consiste no choque de um martelo, especialmente desenvolvido para este tipo de ensaio, sobre a estrutura a ser estudada. Esse martelo, cujas dimensões, peso e material dependem da estrutura ensaiada, é conectado a um analisador dinâmico e tem seu sinal monitorado. Esse tipo de simulação é comum na realização de análises modais.

Outro método interessante de produzir um carregamento dinâmico, citado no Capítulo 1, é o *“wire cutting method”*, em que, através de um cabo, a estrutura é deslocada de sua posição de equilíbrio; esse cabo é subitamente cortado, provocando uma vibração

livre na estrutura. Esse método pode simular, por exemplo, um movimento de base oriundo de um terremoto.

É de extrema importância que se escolha um método de simulação de carregamento dinâmico adequado tanto ao tipo de sinal que se quer coletar quanto ao uso ao qual a edificação se destina.

3.3 – Classificação de Dados

Para efeito de análise, os dados captados em uma medição podem ser classificados em dados determinísticos e dados aleatórios.

Dados determinísticos são aqueles obtidos de um ensaio que, se realizado novamente nas mesmas condições apresenta os mesmos resultados, podendo ser representados por uma única relação matemática explícita. Estes podem, ainda, ser classificados em periódicos e não periódicos. Os dados periódicos se dividem em periódicos simples, em que o fenômeno pode ser descrito matematicamente por uma senóide, e periódicos compostos, em que os dados podem ser representados matematicamente como uma soma de senóides cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental. Os dados não periódicos se dividem em quase-periódicos e transitórios. Os dados quase-periódicos podem ser descritos por uma soma de senóides de frequências não múltiplas. Os dados transitórios descrevem um fenômeno que tem início e fim em um tempo determinado, ao passo que os demais citados são definidos no intervalo de tempo de $-\infty$ a $+\infty$. Como exemplo de dados determinísticos, podem-se citar os sinais captados de uma vibração induzida por uma máquina rotativa ou aqueles oriundos de um deslocamento inicial imposto a uma estrutura.

Dados aleatórios ou randômicos, ao contrário dos determinísticos, não podem ser representados por uma única relação matemática explícita. Para caracterizá-los é necessária uma quantidade de históricos temporais ou amostras do sinal capaz de fornecer resultados estatisticamente confiáveis. São exemplos de dados aleatórios os

sinais captados de uma vibração oriunda de um abalo sísmico ou de uma rajada de vento incidindo sobre um edifício.

3.4 – Captação dos Sinais

A captação dos sinais originados de um ensaio dinâmico é feita através de transdutores, dispositivos que convertem um movimento de choque ou vibratório em um sinal elétrico. Entre eles podem-se citar os transdutores massa-mola, que consistem de uma massa suspensa por uma mola com ou sem amortecimento, em um caixa transdutora, cujas respostas são obtidas, basicamente, pelo deslocamento relativo entre o sistema massa-mola e a caixa. Entretanto os transdutores de mais ampla utilização em ensaios dinâmicos são os acelerômetros.

O acelerômetro é um dispositivo que produz um sinal elétrico de saída proporcional a sua aceleração. Para selecionar o acelerômetro mais adequado para a realização de um ensaio dinâmico, devem-se considerar três fatores de extrema importância: massa, sensibilidade e faixa de frequência de captação dos sinais.

Preferencialmente, um acelerômetro deve ter uma massa pequena em relação à estrutura ensaiada, de modo que não interfira nas propriedades de massa desta, e conseqüentemente nas respostas obtidas. Um acelerômetro ideal também deve ter sensibilidade suficiente para detectar a variação na resposta da estrutura. Paradoxalmente, quanto maior a sensibilidade de um acelerômetro, maior é sua massa. Entretanto, felizmente, as estruturas de menor peso têm seus modos de vibração em frequências mais altas com níveis de aceleração mais altos. Portanto, não se faz necessária a utilização de acelerômetros tão sensíveis e pode-se, então, utilizar acelerômetros de pequena massa, que não interferem na resposta da estrutura. Já as estruturas mais pesadas têm seus modos de vibração em frequências mais baixas com níveis de aceleração mais baixos. Portanto, não se faz necessária a utilização de acelerômetros tão leves; com isso consegue-se utilizar acelerômetros de maior sensibilidade. Quanto à faixa de frequência de captação dos sinais, deve-se escolher o acelerômetro com base na frequência das forças que agem sobre a estrutura ou através

de uma estimativa da faixa de frequência na qual deverão acontecer os modos de vibração de interesse.

3.5 – Aquisição e Tratamento de Sinais

Pode-se representar genericamente um sistema de aquisição de dados através do seguinte esquema:

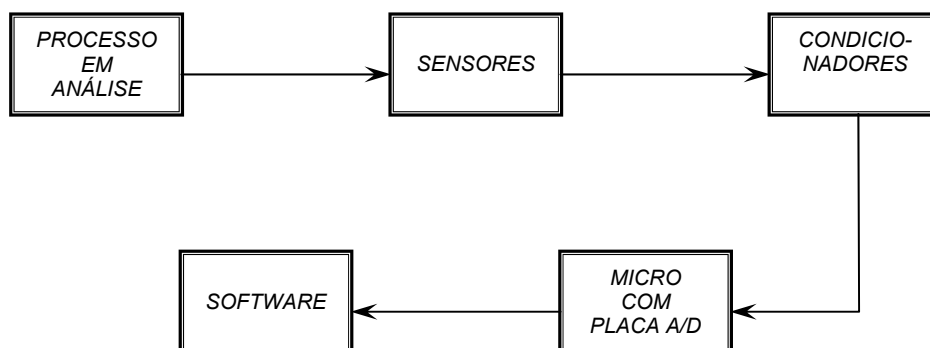


FIGURA 7 - Esquema de um sistema de aquisição de dados

O processo em análise é o fenômeno físico que se deseja estudar. No caso de um ensaio dinâmico, o processo em análise é o deslocamento ou aceleração de um ponto em uma estrutura. Estes dados são coletados por sensores, que neste caso são os acelerômetros descritos anteriormente. Através de condicionadores, que são dispositivos eletrônicos, os sinais de entrada podem sofrer algum tipo de alteração para que possam, posteriormente, ser manuseados e analisados de maneira menos dispendiosa, obtendo-se resultados mais confiáveis. São exemplos de condicionadores de sinais amplificadores, atenuadores, filtros, conversores de corrente para tensão, entre outros. Após o condicionamento, os sinais de entrada são enviados para um sistema, geralmente um microcomputador, contendo uma placa conversora A/D. Com essa placa, o sinal analógico é convertido em sinal digital, que pode, então, ser manipulado pelo microcomputador. Através de *softwares* específicos, os dados obtidos são visualizados instantaneamente e, após uma análise crítica, pode-se validar ou não a medição.

No caso de ensaios dinâmicos, alguns cuidados especiais devem ser tomados para que não se incorra em resultados equivocados.

Um erro de suma importância no processamento e análise de sinais de vibrações que deve ser anulado é o efeito “*aliasing*”. Este erro ocorre pela má escolha da frequência de amostragem sob a qual o sinal foi captado. Ilustram bem este efeito as FIG. 8, 9 e 10, em que se podem representar várias funções senoidais de um único sinal a partir de dados coletados, em taxas de amostragem diferentes, pelo sistema de aquisição. Nesse caso são mostrados gráficos obtidos de um sinal teórico na frequência de 25Hz, captados com taxas de amostragem de 200, 100 e 20Hz.

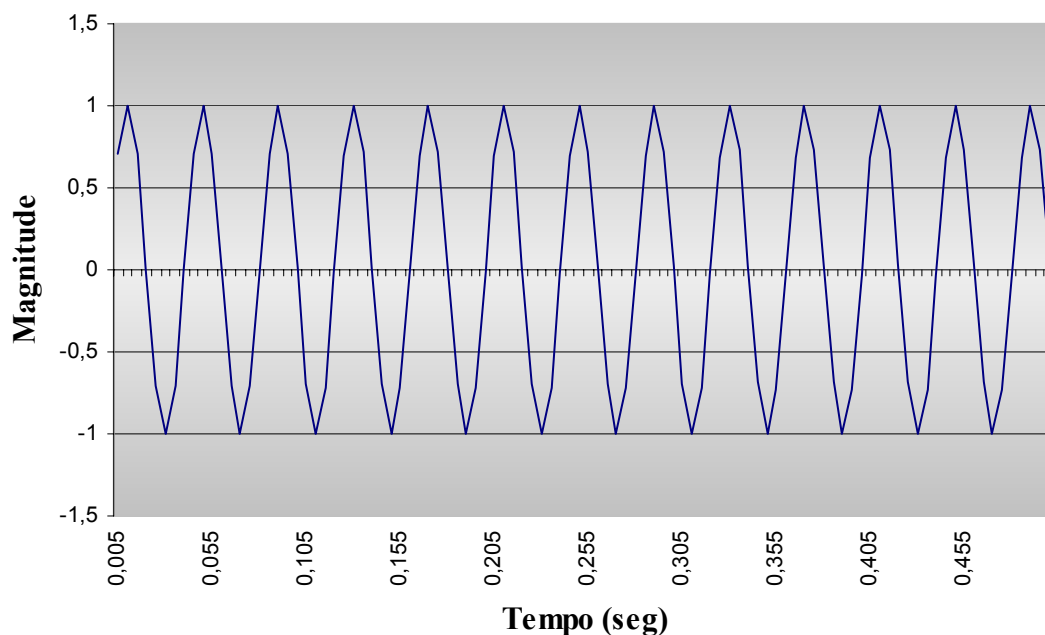


FIGURA 8 – Sinal de 25Hz com frequência de amostragem de 200Hz

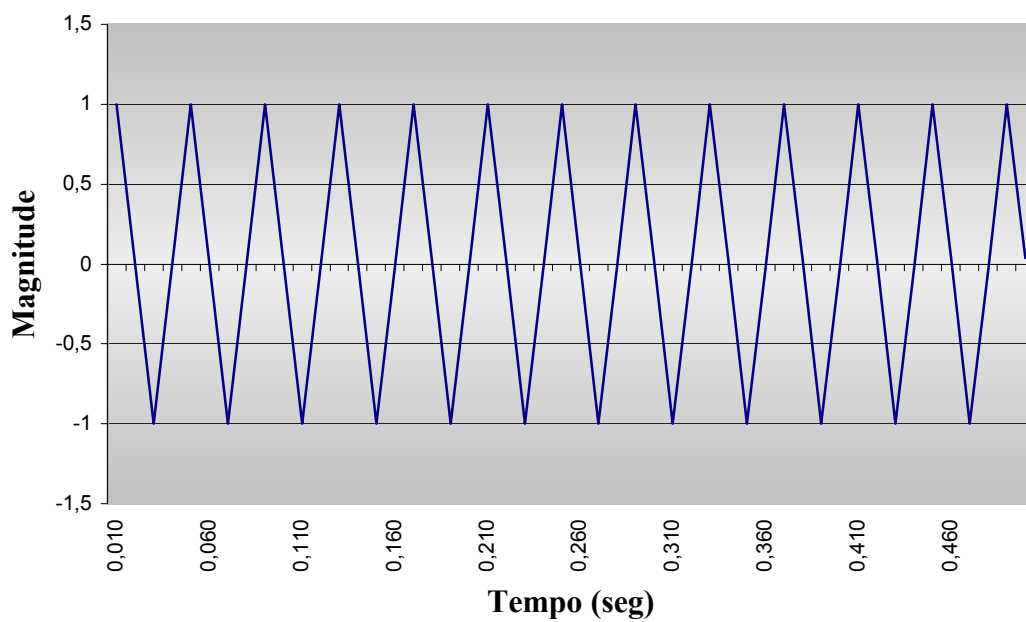


FIGURA 9 – Sinal de 25Hz com freqüência de amostragem de 100Hz

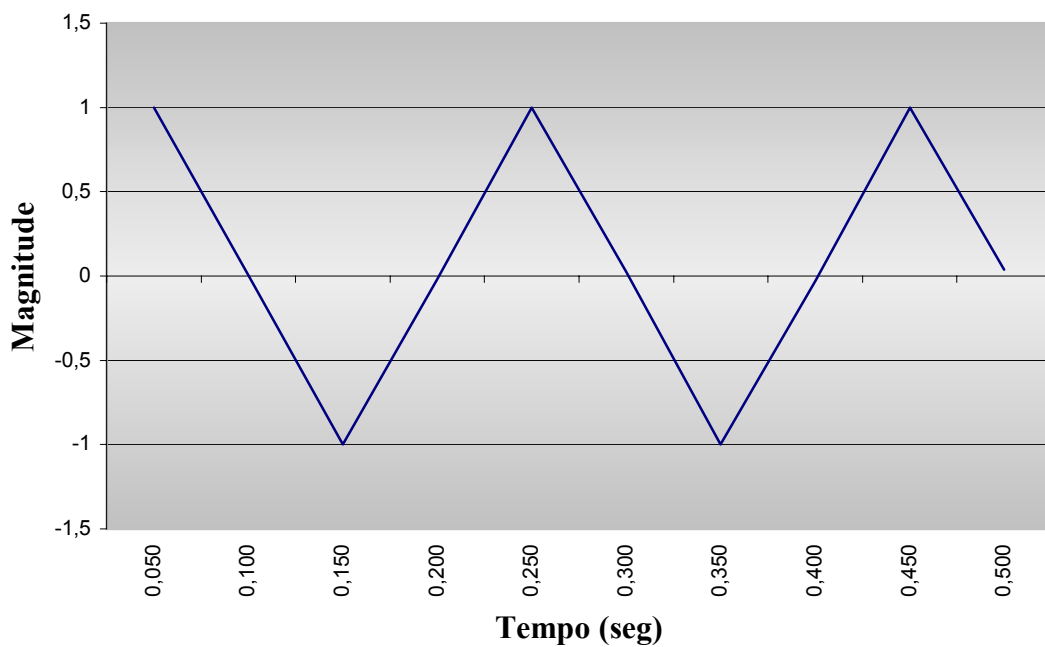


FIGURA 10 – Sinal de 25Hz com freqüência de amostragem de 20Hz

Para resolver esse problema, as bibliografias recomendam que a coleta de dados seja feita com uma taxa de amostragem no mínimo duas vezes maior que a frequência de interesse mais alta contida no sinal, chamada frequência de *Nyquist*.

Na prática, para a obtenção de gráficos de melhor visualização, recomenda-se utilizar uma frequência de amostragem de no mínimo quatro vezes a frequência de interesse mais alta contida no sinal.

Mesmo após a aquisição de dados, o sinal obtido pode sofrer algum condicionamento, dito digital. Pode-se tomar como exemplo a utilização de filtros digitais, que é uma ferramenta poderosa muito utilizada em análises experimentais de vibrações.

3.5.1 – Filtros

Por definição, filtros são dispositivos cuja finalidade principal é permitir a passagem de componentes de um sinal na faixa selecionada de frequências, rejeitando ou atenuando os componentes indesejados.

Os filtros podem ser classificados em analógicos e digitais. Os filtros analógicos são dispositivos elétricos utilizados durante a captação do sinal; os filtros digitais são algoritmos que contêm funções especiais, aplicadas à amostra do sinal coletado após a sua captação.

A caracterização de um filtro pode ser feita através da determinação de sua “curva de atenuação”, que se torna de mais fácil compreensão quando representada no domínio da frequência.

Para um filtro passa-baixa ideal, a curva de atenuação (FIG.11) possui uma frequência de corte f_c mediante a qual os sinais referentes às frequências acima desse valor são rejeitados (atenuação infinita), ao passo que os demais não sofrem nenhuma alteração (atenuação nula).

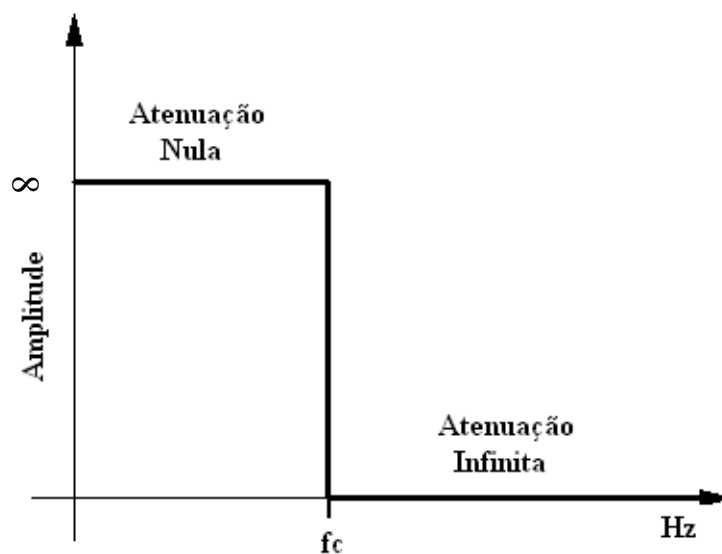


FIGURA 11 - Curva de atenuação de um filtro ideal

Contudo, o modelo ideal descrito por suas características é inconcebível. Na prática, os filtros apresentam uma atenuação finita nas frequências da faixa de rejeição e uma atenuação pequena, embora não nula, nas frequências da faixa passante. Os filtros reais apresentam ainda uma faixa de transição entre o fim da faixa de rejeição assinalada pela frequência *Fstop* e o início da faixa passante determinada pela frequência *Fpass*. A FIG.12 mostra os parâmetros que caracterizam a curva de atenuação de um filtro real, seguindo a nomenclatura utilizada no programa *MATLAB*, versão 6.1.

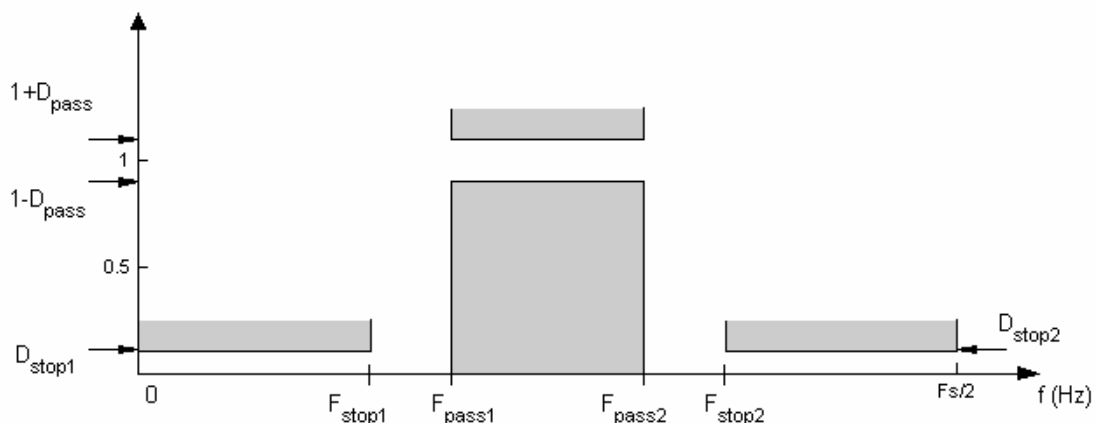


FIGURA 12 - Curva de atenuação de um filtro real

A diferenciação mais usual entre as diversas categorias de filtros ocorre em função da posição da faixa de frequências que o filtro deverá permitir passar, denominada *faixa passante*. São observadas as seguintes categorias:

a) Filtro Passa-Baixa ou “*Lowpass*”

São filtros que deixam passar as frequências desde 0Hz até certo limite, rejeitando as frequências que se situam daí para cima. Segue abaixo a curva de atenuação representativa de um filtro passa-baixa.

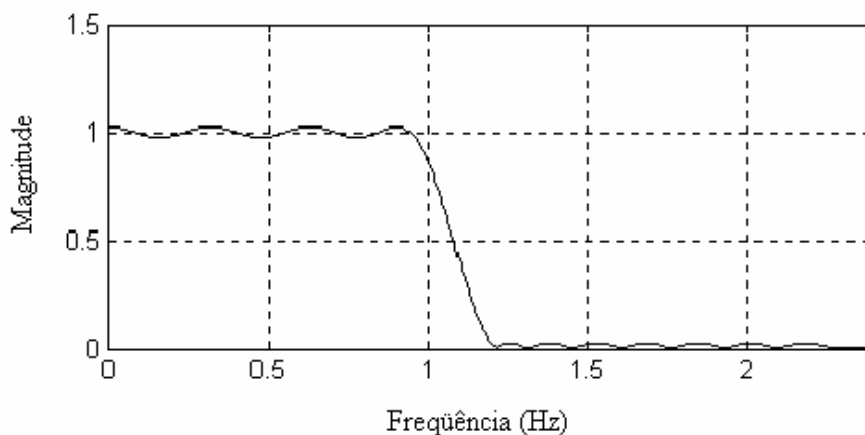


FIGURA 13 - Curva de atenuação típica de um filtro passa-baixa

b) Filtro Passa-Alta ou “*Highpass*”

Possuem característica oposta à dos filtros passa-baixa, permitindo a passagem das frequências acima de certo limite e impedindo a passagem das que se situam abaixo do mesmo. Segue abaixo a curva de atenuação típica de um filtro passa-alta.

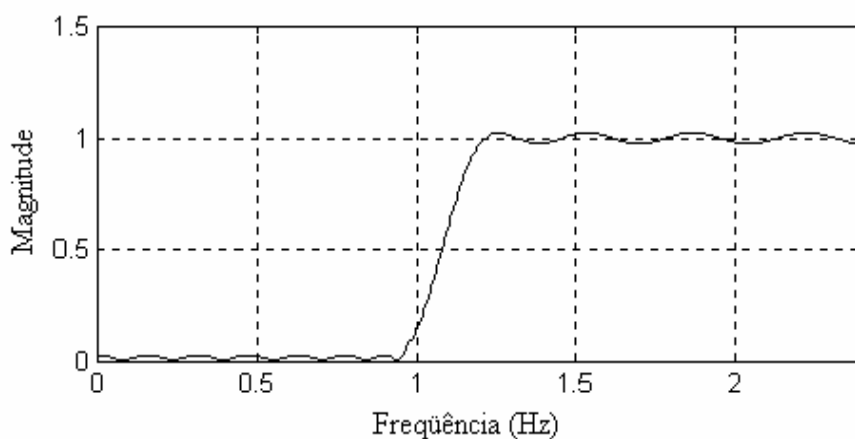


FIGURA 14 - Curva de atenuação típica de um filtro passa-alta

c) Filtro Passa-Banda, Passa-Faixa ou “*Bandpass*”

Os filtros passa-banda permitem a passagem das frequências compreendidas em uma faixa delimitada por uma frequência inferior e uma superior, rejeitando as frequências situadas fora desses limites. Segue abaixo um espectro representativo de um filtro passa-banda.

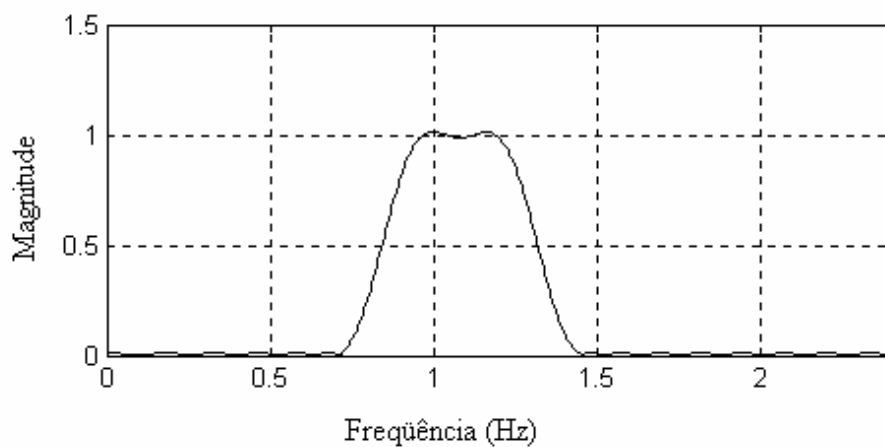


FIGURA 15 - Curva de atenuação típica de um filtro passa-banda

d) Filtro Rejeita-Faixa ou “*Bandstop*”

Destinam-se a bloquear as frequências compreendidas entre um limite inferior e um superior, permitindo a passagem das demais frequências do espectro. Segue abaixo um espectro representativo de um filtro rejeita-faixa.

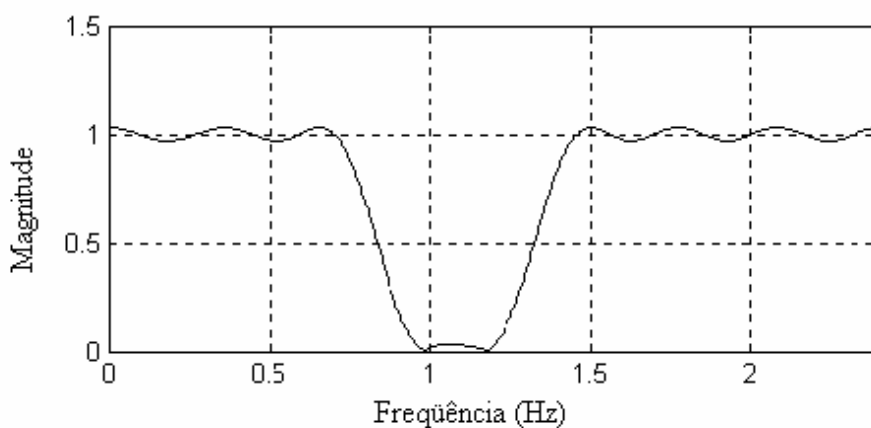


FIGURA 16 - Curva de atenuação típica de um filtro rejeita-faixa

A utilização de filtros é muito eficaz na eliminação de ruídos do sinal captado, bem como na restauração do sinal no tempo de suas componentes.

3.6 – Transformação do Domínio do Tempo para o Domínio da Freqüência

O sinal elétrico obtido em um ensaio contém todas as informações sobre o fenômeno físico medido. Contudo, a representação de sua magnitude instantânea raramente permite chegar a conclusões aplicáveis à solução do problema, sem que antes este sinal seja submetido a um tratamento digital. A representação do espectro de freqüência do sinal é a maneira mais usual de representar suas características. Através dele determinam-se as componentes de freqüência do sinal captado e tem-se uma idéia da magnitude que essas componentes apresentam.

É sabido que, através da transformada de Fourier dada pela Eq. 2.11, é possível explicitar uma função periódica dependente do tempo, no domínio da freqüência, obtendo-se dessa forma o espectro de freqüência dessa função.

Em um ensaio dinâmico, a resposta de uma estrutura a uma excitação, que é um sinal analógico, é digitalizada, sendo, portanto, representada por um conjunto de pontos discretos no tempo. Com isso, a obtenção de uma função que defina o seu comportamento se torna uma tarefa muito dispendiosa ou, às vezes, impossível. Portanto, a utilização direta da transformada de Fourier não é aplicável.

Para obter o espectro de freqüência, porém, pode-se substituir a integração, na Eq. 2.11, pelo seguinte somatório

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{\frac{-2\pi i k n}{N}} ; \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.1)$$

onde $x(n)$ é o conjunto de pontos digitais que representa o sinal no tempo e N é o número de pontos da amostra. Esse somatório é chamado de *Transformada de Fourier*

Discreta (DFT - Discrete Fourier Transform). Quanto maior o número de pontos da amostra, melhor a resolução do espectro obtido. Em contrapartida, com o aumento do número de pontos, o tempo computacional gasto aumenta consideravelmente, uma vez que para se computar a Eq. 3.1 são necessárias $2N^2$ multiplicações reais.

Em 1965, Cooley e Tuky desenvolveram um algoritmo, que tornou a análise no domínio da frequência amplamente utilizada. Tal algoritmo denominou-se *Trasformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform)*. Utilizando-se esse algoritmo para computar a Eq. 3.1, gastam-se $4N(\log_2 N)$ multiplicações reais. Com isso, o tempo computacional gasto ficou significativamente reduzido.

Por exemplo, para uma amostra de 100 pontos, o número de multiplicações para se resolver a *DFT* é 20000. Para se resolver a *FFT* devem ser realizadas 2657 multiplicações, portanto, aproximadamente 8 vezes menos tempo que na resolução da *DFT*.

O algoritmo *FFT* divide a seqüência $x(n)$ em um número de seqüências menores, calculando a *DFT* para cada uma das seqüências menores, que depois são combinadas de maneira a chegar à *DFT* da seqüência original.

Outro problema inerente ao processo de um ensaio dinâmico é o fato da amostra coletada ter um tempo finito, ao passo que, no cálculo que envolve tanto a transformada de Fourier quanto suas derivadas – *DFT* e *FFT*, supõe-se um sinal definido em todo o domínio do tempo. Para efeito de análise, o sinal é truncado num tempo finito T , através de uma janela temporal retangular, e a amostra contida dentro dessa janela é tomada como o período do sinal coletado. Assim, repetindo-se essa amostra inúmeras vezes, simula-se o intervalo de tempo de $-\infty$ a $+\infty$. Se a amostra, porém, não contém um número inteiro de períodos, ao se estender esse sinal no domínio do tempo, aparecerão descontinuidades no gráfico do tempo, o que implica o aparecimento de freqüências adicionais ou lóbulos laterais nas componentes espectrais e um conseqüente vazamento ou perda de energia de umas freqüências para as outras (GERGES,1999).

A maneira mais simples de resolver este problema é obter uma amostra com um número inteiro de períodos do sinal coletado. Esse processo, porém, muitas vezes não é exequível dada a complexidade do sinal obtido através de técnicas experimentais.

Para resolver esse problema, foram criadas janelas espectrais, funções pré-definidas que são convoluídas com a função resposta da estrutura, visando a minimizar os efeitos causados pelo truncamento do sinal. Existem vários tipos de janelas, entre as quais podemos citar a de *hanning*, *hamming*, *kaiser*, *boxcar* e *barlet*. Todas essas janelas são constituídas de funções muito parecidas e têm como característica principal tenderem suavemente a zero na parte inicial e final do intervalo de tempo em que estão definidas.

Com isso, após estas funções serem convoluídas com o sinal original, este também tenderá a zero no início e no final da amostra. Apesar de se modificar o sinal original no começo e fim da amostragem, a sua parte central não é afetada. Resolve-se, assim, o problema oriundo do truncamento do sinal, ganhando-se em precisão na determinação das componentes de frequência do sinal, mas perdendo, em contrapartida, na determinação da amplitude dessas componentes.

3.7 – Técnicas Experimentais para a Obtenção de Parâmetros de Amortecimento

Devido à complexidade do fenômeno físico associado aos efeitos de dissipação de energia, muitos parâmetros são utilizados para mensurar o amortecimento efetivo de um sistema. Esses parâmetros são, geralmente, definidos pelos parâmetros de amortecimento de um sistema simples massa-mola-amortecedor, com um grau de liberdade, e observados a partir de movimentos de vibração livre e forçada.

As técnicas experimentais mais citadas nas bibliografias específicas de engenharia estrutural são: o método do decaimento logarítmico, o método da meia amplitude e o método da meia potência. Através de gráficos dos deslocamentos no tempo e no domínio da frequência, pode-se obter o fator de amortecimento ζ por meio desses

métodos. Serão descritas aqui as formulações para alguns métodos, considerando um sistema de um grau de liberdade.

3.7.1 – Método do Decaimento Logarítmico

No método do decaimento logarítmico, através do gráfico de deslocamentos no tempo elaborado experimentalmente, obtém-se o fator de amortecimento remanejando a equação resultante da divisão dos valores de dois picos de deslocamentos consecutivos e de mesmo sinal (FIG.17), que correspondem aos valores da amplitude no início e no fim de um período de oscilação. Considerem-se os valores de amplitude u_P para o instante t_P e u_Q para o instante t_Q e que $t_P - t_Q$ seja igual ao período natural amortecido T_d do movimento, dado por

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (3.2)$$

Para valores de $\zeta < 0,2$, $\sqrt{1 - \zeta^2}$ é um valor muito próximo da unidade e por simplificação, pode-se reescrever a Eq. 3.2 como

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (3.3)$$

Os valores de amplitude u_P e u_Q podem ser obtidos isoladamente através da Eq. 2.10. Dividindo os valores de u_P e u_Q obtidos pela Eq. 2.10, usando a simplificação da Eq. 3.2 e extraíndo o logaritmo neperiano em ambos os lados da divisão, obtém-se o valor do fator de amortecimento ζ dado por

$$\zeta = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \ln \left(\frac{u_P}{u_Q} \right) \quad (3.4)$$

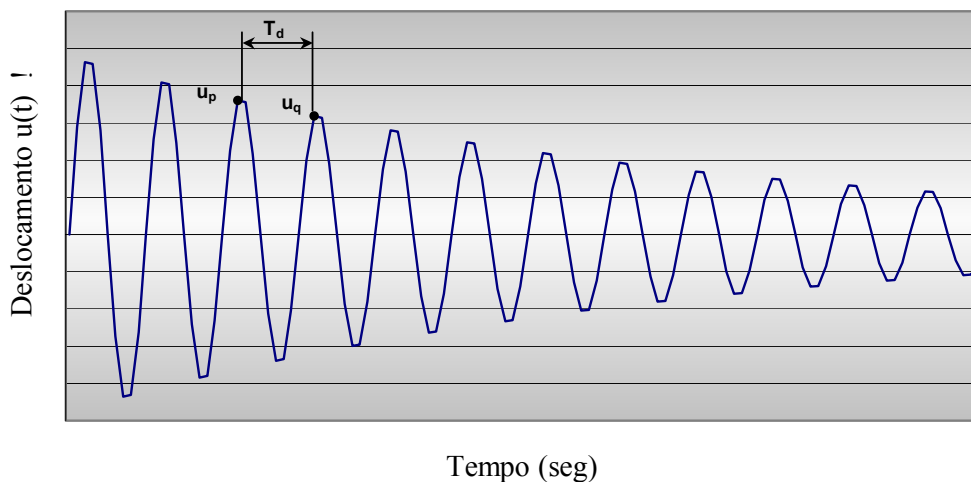


FIGURA 17 – Gráfico de deslocamento vs. tempo

3.7.2 – Método da Meia-Amplitude

O método da meia-amplitude utiliza o mesmo gráfico, porém, os valores são resultantes da curva envelope do gráfico, dada pela equação

$$\hat{u}(t) = Ue^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot t} \quad (3.5)$$

O fator de amortecimento é calculado manipulando a equação obtida da divisão dos valores de dois pontos desta curva, sendo que o valor de uma das amplitudes deve ser a metade da outra (FIG. 18).

Considere, novamente, os valores de amplitude u_P para o instante t_P e u_Q para o instante t_Q tal que u_P seja o dobro de u_Q e que N seja a fração do intervalo de tempo entre estes dois pontos pelo período amortecido T_d dado por

$$N = \frac{t}{T_d} \quad (3.6)$$

Escrevendo-se a Eq. 3.4 para os valores de u_p e u_q , dividindo-as uma pela outra e extraindo o logaritmo neperiano em ambos os lados da equação, obtém-se o fator de amortecimento pela seguinte fórmula:

$$\zeta = \frac{0,11}{N}. \quad (3.7)$$

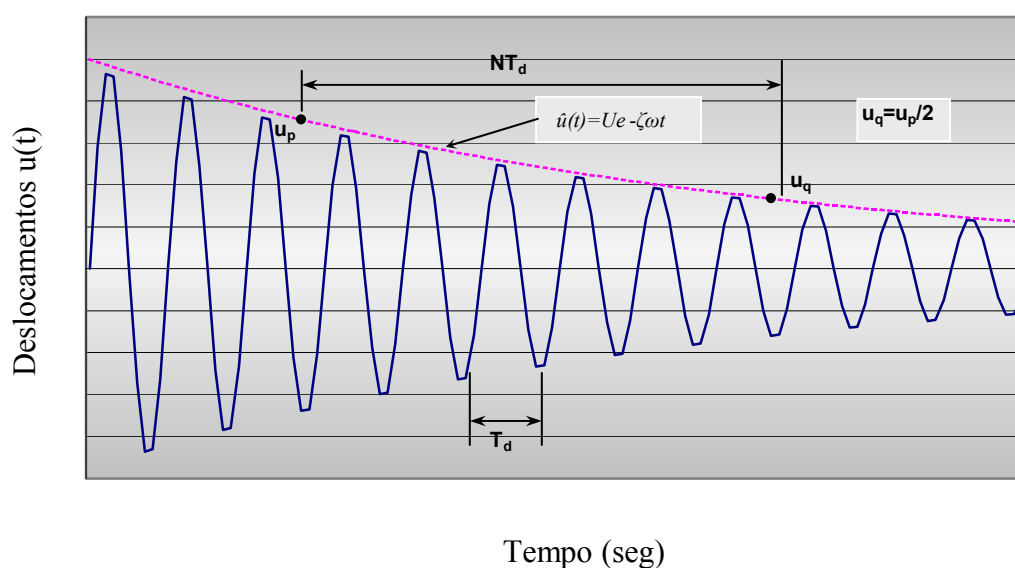


FIGURA 18 - Gráfico de deslocamento vs. tempo

3.7.3 – Método da Meia-Potência

Para esse método, é necessária a obtenção do espectro da amplitude em função da frequência de excitação. Desse espectro obtém-se os valores das frequências de excitação correspondentes às amplitudes iguais a 0,707 da amplitude na ressonância. Esses pontos são chamados de *pontos de meia-potência*.

Com os valores destas frequências e da frequência natural, pode-se calcular o fator de amortecimento pela fórmula

$$\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{\Omega_2 - \Omega_1}{\omega_n} \right) \quad \text{ou} \quad \zeta = \left(\frac{r_2 - r_1}{2} \right), \quad (3.8)$$

onde Ω_1 e Ω_2 são as frequências de excitação, ω_n é a frequência natural, e r_1 e r_2 são, respectivamente, a divisão de Ω_1 e Ω_2 por ω_n (FIG.19).

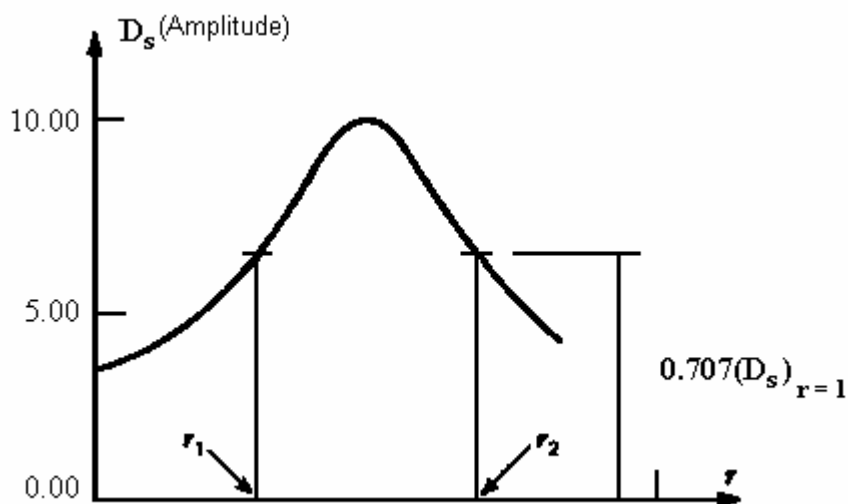


FIGURA 19 - Curva de resposta com os pontos de meia potência

3.7.4 – Ajuste da Curva de Decaimento

Pode-se obter o fator de amortecimento de uma estrutura através do ajuste da curva de decaimento a partir do histórico no tempo. Após representar os picos máximos em uma escala logarítmica, faz-se uma regressão linear para ajustar uma reta a esses pontos e obtém-se uma estimativa do fator de amortecimento.

Para um melhor entendimento, suponha uma amostra tomada no intervalo t $[0 ; 0,25]$ segundos, dado pela equação

$$u(t) = U \cdot e^{-\zeta \omega t} \cdot \cos(\omega t), \quad (3.9)$$

com os seguintes parâmetros: $\omega = 25\text{Hz}$ ou $\omega = 50\pi \text{ rad/s}$; $U = 3$; $\zeta = 6\%$. Para tal amostra tem-se o gráfico a seguir:

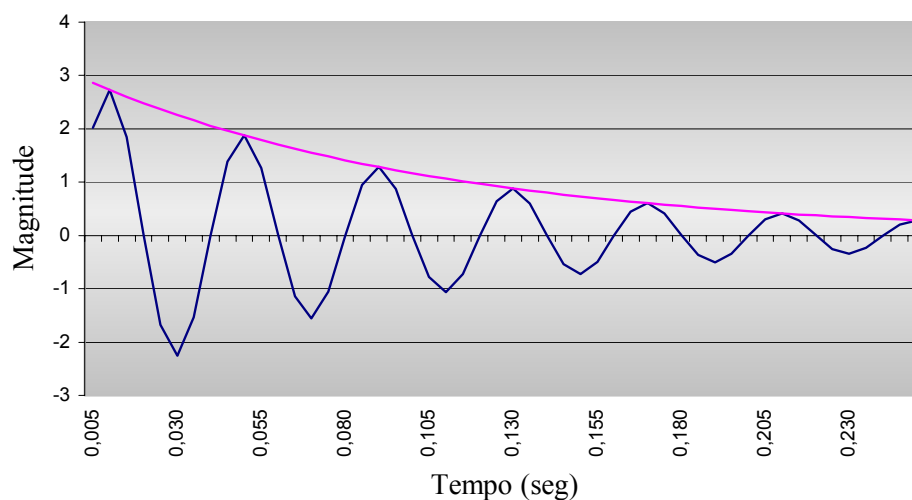


FIGURA 20 - Gráfico de um sinal com decaimento

A curva envoltória do gráfico é representada pela seguinte equação:

$$y(t) = U \cdot e^{-\zeta \omega t} \quad (3.10)$$

Extraindo-se o logaritmo neperiano dos dois lados da Eq. 3.10, têm-se

$$\ln y(t) = \ln U - \zeta \omega \cdot t \quad (3.11)$$

Representando, em função do tempo, os valores de $\ln y(t)$, obtém-se o gráfico representado na FIG. 21.

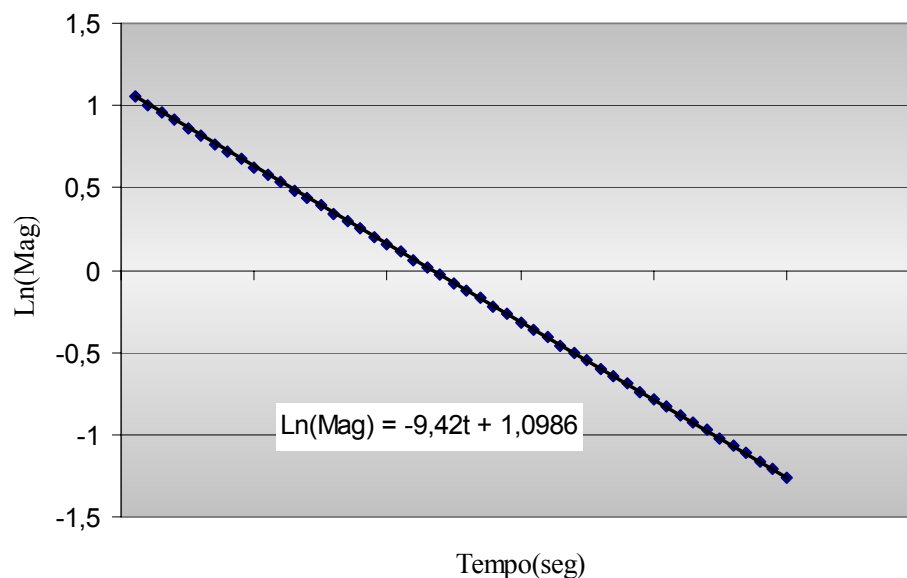


FIGURA 21 - Gráfico dos valores de $\ln y(t)$

Após a realização de uma regressão linear, ajusta-se uma reta para os pontos, obtendo-se a equação

$$\ln y(t) = -9,42t + 1,0986. \quad (3.12)$$

Comparando a Eq.3.12 com a Eq. 3.11, para $\omega = 5\pi \text{ rad/s}$, tem-se

$$-\omega.\zeta = -9,42 \Rightarrow \zeta = 0,06 \text{ ou } 6\% \quad (3.13)$$

Alguns programas computacionais já possuem o recurso de ajustar uma curva exponencial aos picos máximos do gráfico no tempo, obtendo-se o fator de amortecimento mediante a aplicação direta da analogia usada na Eq. 3.13 .

Outros métodos também são citados em algumas bibliografias, tais como o método do decremento randômico, método da função de transferência, entre outros.

4

METODOLOGIA APLICADA

Para o desenvolvimento deste estudo, foram realizados ensaios dinâmicos em três estruturas formadas por lajes de concreto armado com forma de aço incorporada (*steel deck*), objetivando obter suas propriedades dinâmicas, em especial, as suas propriedades de amortecimento. Posteriormente, essas estruturas foram modeladas em um programa computacional em elementos finitos, para análise dos resultados. A seguir, são descritas resumidamente as estruturas ensaiadas e, mais detalhadamente, os métodos utilizados nesses ensaios com as respectivas simulações numéricas.

4.1 – Descrição das Estruturas Ensiadas

As três estruturas ensaiadas serão aqui designadas como Estrutura 1, 2 e 3, e serão descritas resumidamente a seguir, e mais detalhadamente no Capítulo 5.

Estrutura 1 – Consta de um edifício comercial de andares múltiplos em estrutura metálica com laje em concreto armado com forma de aço incorporada (*steel deck*), no qual foi considerada a ação mista entre vigas e laje de concreto. O ensaio foi realizado sobre um dos pisos dessa estrutura, o qual será utilizado como garagem.

Estrutura 2 – Consiste em um ginásio, que será utilizado para eventos esportivos e culturais. A edificação foi feita em concreto armado em quase sua totalidade; o piso, porém, sobre o qual se realizarão os eventos é composto de uma laje de concreto, em que foi utilizado, também, forma de aço sobre perfis metálicos apoiados em consolos de concreto da estrutura restante.

Estrutura 3 – Esta edificação é formada apenas de um pavimento apoiado sobre vigas e colunas de estrutura metálica. A laje foi concebida com sistema de piso esbelto (*slim-floor*), que fica embutida na alma do perfil metálico.

4.2 – Métodos Experimentais

4.2.1 – Descrição

Para obter experimentalmente as características dinâmicas de uma estrutura, é necessário que esta seja excitada, mediante a aplicação de um carregamento dinâmico, e que sua resposta seja captada e armazenada por um sistema de aquisição de dados.

Durante os ensaios realizados nas três estruturas citadas, foram utilizados dois sistemas de aquisição independentes para coleta dos sinais. Um é composto de um analisador de frequência da *Hewlett-Packard*, modelo HP3569A específico para ensaios dinâmicos e de acústica, conectado a um acelerômetro do tipo *Quartz Shear Accelerometer*, marca PCB, modelo 353B34, com faixa de frequência de 1 a 4000Hz, precisão de 5% e faixa de amplitude de resposta de $\pm 50g$ (g – aceleração da gravidade). Com esse sistema, durante as medições, foram armazenados, de cada evento, o gráfico do sinal no tempo e seu respectivo espectro de frequência. Com isso, no momento do ensaio, através dos espectros de frequência produzidos, foi possível determinar as componentes de frequência da resposta estrutural às excitações dinâmicas realizadas.

O outro sistema é composto de uma placa de aquisição de dados de 32 canais, modelo CAD 10-26, fabricada pela *Lynx Eletrônica*, e conectado a um acelerômetro uniaxial fabricado pela *Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltda.*, modelo AR-1F, com faixa de frequência

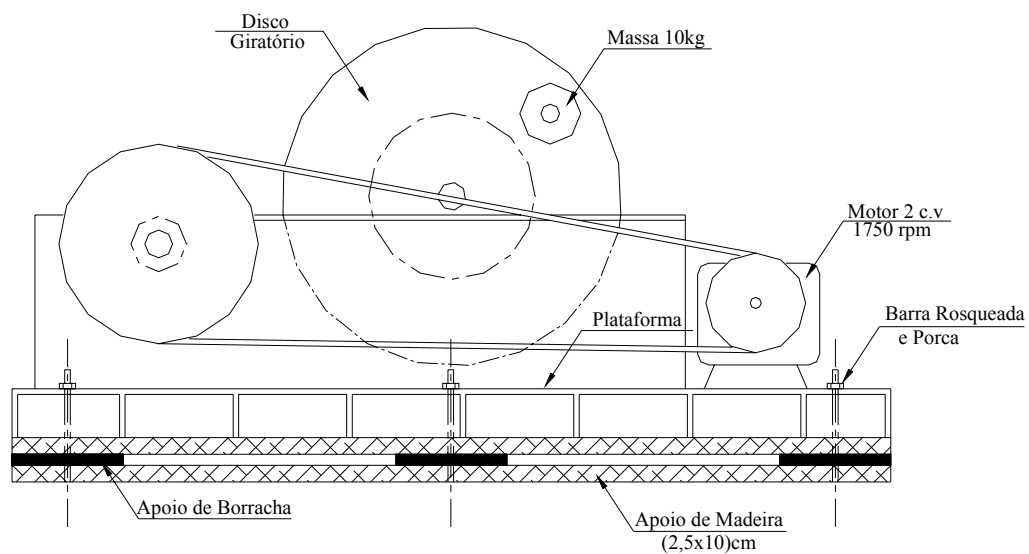
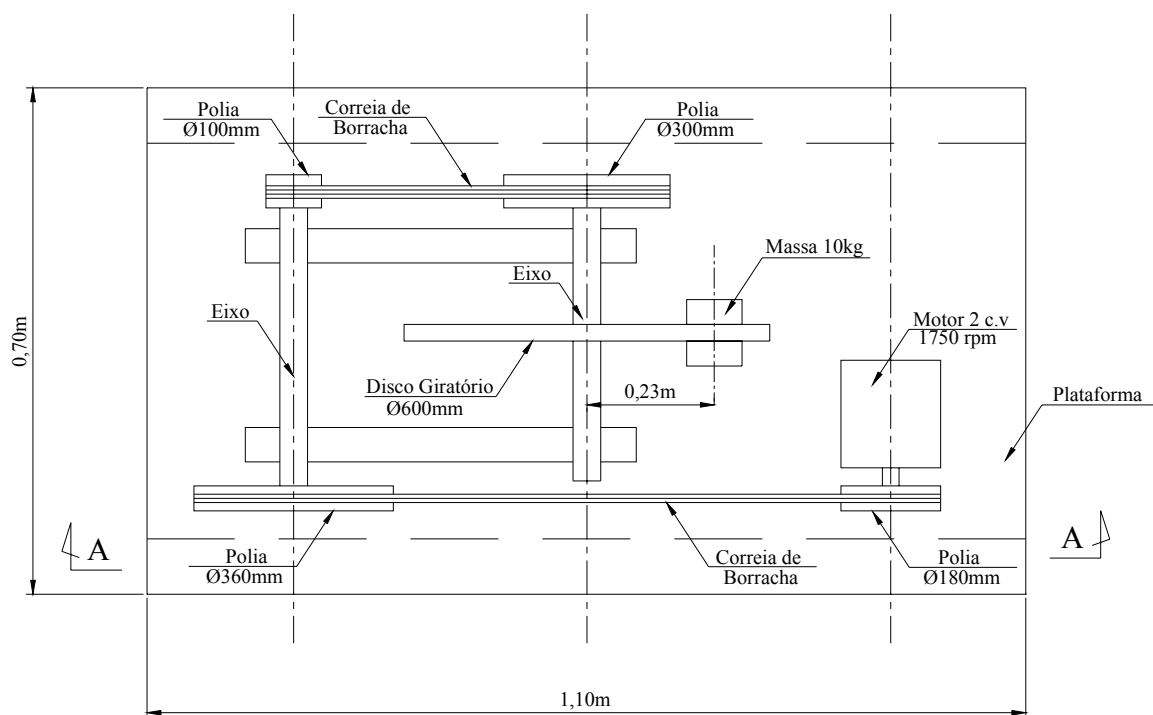
de 0 a 30Hz, e a um microcomputador ou *notebook* dotado de *software* para o monitoramento dos ensaios. A calibração desse acelerômetro foi feita no local dos ensaios por meio de uma calibração por passos, conforme orientações do fabricante. Com esse sistema, durante as medições, foi armazenado o gráfico do sinal correspondente à resposta da estrutura no tempo de cada evento.

Visando anular o efeito *aliasing*, nos ensaios realizados, os sistemas de aquisição foram configurados para captar os sinais utilizando uma frequência de amostragem de 128Hz, para o primeiro sistema, e de 200 e 500Hz, para o segundo sistema citado, pois estimou-se que as frequências de interesse do sinal captado não excederiam 40Hz.

Em relação à fixação dos acelerômetros sobre os pisos ensaiados, para garantir a aderência entre o acelerômetro e a superfície do piso, o excesso de poeira foi retirado, com escova ou vassoura, uma vez que as obras ensaiadas ainda estavam em fase de construção. A seguir os acelerômetros foram fixados ou com colas superadesivas ou com massa plástica.

Para produzir uma excitação dinâmica nos pisos, além do ensaio de *heel-drop* descrito no Capítulo 3 e da excitação produzida pelo caminhar de uma pessoa sobre o piso, foram utilizados dois mecanismos construídos para esse fim.

O primeiro mecanismo é composto de um motor com rotação de 1750rpm, acoplado a um sistema de polias ligadas através de correias a um disco metálico central. No perímetro da superfície desse disco metálico foi fixada uma massa de 10kg que, por causa da redução da rotação gerada pelo sistema de polias, gira a uma frequência aproximada de 4,75Hz. As características geométricas desse equipamento são mostradas na FIG. 22. A massa total do equipamento era de aproximadamente 200kg. Através de suas características geométricas e adotando sua frequência de rotação igual a 4,75Hz, estimou-se que o disco metálico com a massa excêntrica fixada produz uma força centrífuga de 2000N. Esse mecanismo foi fixado, por meio de parafusos, a quatro tábuas de madeira, separadas duas a duas por tiras de borracha, que amortecem a transferência de esforços horizontais do mecanismo para o piso.



CORTE A-A

FIGURA 22 - Esquema do mecanismo utilizado na excitação harmônica

Como o mecanismo não foi fixado ao piso ensaiado e, portanto, estava simplesmente apoiado sobre ele, considera-se que a carga dinâmica produzida por esse mecanismo e transferida para o piso variava de 0 a 4000N.

As medições foram iniciadas com a estrutura em repouso. Após alguns segundos a máquina foi ligada até atingir a sua frequência de rotação máxima, estimada em 4,75Hz. Esperou-se o tempo suficiente para que a estrutura oscilasse uniformemente e algum tempo depois a máquina foi desligada. A captação do sinal foi interrompida quando se julgou que a estrutura havia retomado o repouso.

O segundo mecanismo provoca uma força de impacto sobre o piso ensaiado e consiste em um dispositivo no qual uma massa de aço de 13,5kgf, solta-se de uma altura de 0,50m e desce por uma guia, impactando uma base de madeira apoiada sobre o piso. A FIG.23 mostra as características geométricas desse mecanismo.

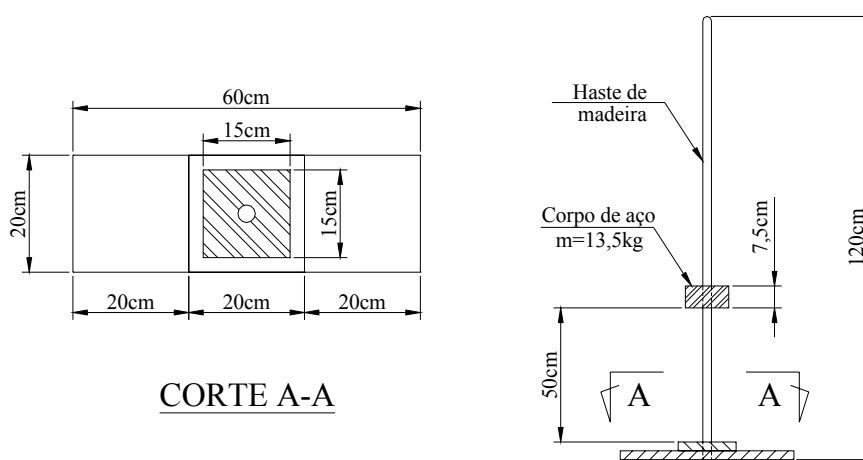


FIGURA 23 - Esquema do mecanismo para o ensaio de impacto

As medições foram iniciadas com a estrutura em repouso. Após alguns segundos a massa era solta, atingindo abruptamente o piso. A captação do sinal foi interrompida quando se julgou que a estrutura havia retomado o repouso.

Todos as cargas dinâmicas aplicadas sobre as estruturas ensaiadas produziram níveis de aceleração adequados à captação por meio dos acelerômetros empregados.

Para determinar as propriedades dinâmicas das estruturas ensaiadas utilizando os sinais coletados, foi aplicada metodologia descrita a seguir.

Após a realização dos ensaios, os arquivos contendo o sinal no tempo foram convertidos para código ASCII, de forma que pudessem ser utilizados nos demais programas computacionais. Após uma análise crítica, foram descartados os dados cujas características desviavam do comportamento esperado para cada tipo de evento. Feita essa triagem, foram gerados os espectros de frequência referentes a cada medição. No caso dos arquivos armazenados no analisador de frequência HP3569A, esses espectros já haviam sido gerados e armazenados pelo próprio aparelho. Para os demais arquivos, os espectros foram gerados através do programa MATLAB versão 6.1, que contém ferramentas apropriadas para este tipo de tratamento. Para os sinais dos ensaios realizados na Estrutura 1, o espectro de frequência foi construído utilizando-se 4000 pontos no cálculo da FFT e 1024 janelas temporais do tipo *hanning*, de iguais tamanhos, com uma sobreposição de 50% de uma sobre a outra.

Uma vez obtidos os espectros de frequência, foram determinadas as componentes de frequência da resposta estrutural e projetados filtros digitais do tipo passa-faixa, também com o mesmo programa, com faixas de frequência passante em torno dessas frequências. Os filtros projetados são do tipo FIR (*Finite Impulse Response*) em virtude da linearidade do seu diagrama de fases, o que garante uma representação perfeita da forma do sinal original, porém com uma defasagem no tempo.

Em seguida, submeteram-se os gráficos dos sinais no tempo a esses filtros e obtiveram-se, então, gráficos contendo os sinais no tempo relativos a cada componente de frequência da resposta da estrutura. As características dos filtros utilizados serão apresentadas, juntamente com o gráfico dos sinais obtidos através desse processo, no Capítulo 5.

Finalmente, utilizando as técnicas descritas no item 3.7 sobre gráficos construídos por meio da filtragem digital, foram obtidos os parâmetros de amortecimento da estrutura associados a cada uma das componentes de frequência.

Para melhor representar esse procedimento e para comprovar sua confiabilidade, será apresentado, a seguir, um exemplo fictício em que esta metodologia será aplicada.

4.2.2 – Exemplo Numérico

Para esta simulação criou-se um sinal supostamente coletado a uma taxa de 50Hz durante 10 segundos, constituído pela soma de três componentes de frequência distintas. Seja $\mathbf{u}(t)$ o sinal simulado criado através da soma de suas componentes $\mathbf{u}_i(t)$ representadas pela Eq. 4.1 e com parâmetros dados na TAB. 1.

$$\mathbf{u}_i(t) = \begin{cases} U_i \cos(\omega_i t - \alpha_i); & \text{para } 0 \leq t \leq 2,0 \text{ seg.} \\ U_i e^{-\zeta_i \omega_i (t-2,0)} \cos(\omega_i t - \alpha_i); & \text{para } 2,0 \leq t \leq 10,0 \text{ seg.} \end{cases} \quad (4.1)$$

TABELA 1 - Parâmetros do sinal $\mathbf{u}_i(t)$

	\mathbf{u}_1	\mathbf{u}_2	\mathbf{u}_3
ω_i	3,0Hz	7,0Hz	10,0Hz
ζ_i	2,00%	2,25%	2,50%
U_i	0,030	0,025	0,030
α_i	0,00rad	0,52rad	0,78rad

Este sinal pode representar, na prática, a resposta de um piso excitado por um motor que contenha as componentes de frequência citadas e que tenha sido desligado após 2 segundos.

As FIG. 24, 25 e 26 mostram o gráfico no tempo das componentes \mathbf{u}_1 , \mathbf{u}_2 e \mathbf{u}_3 e a FIG. 27 mostra o sinal $\mathbf{u}_i(t)$ proveniente da soma dessas três componentes.

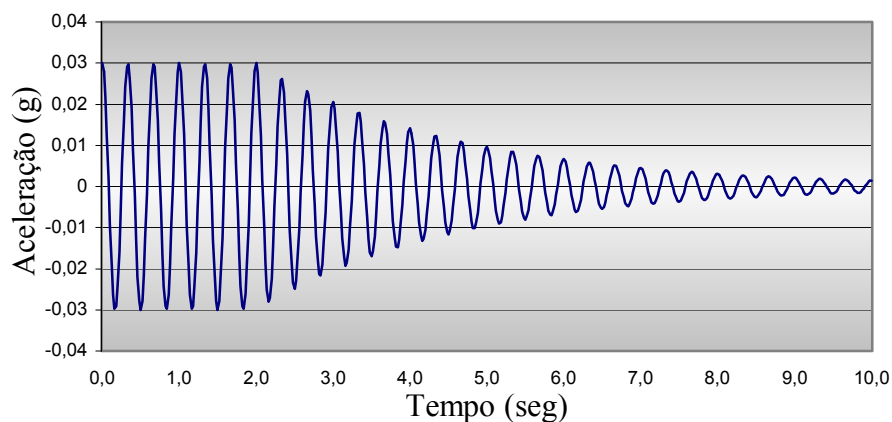
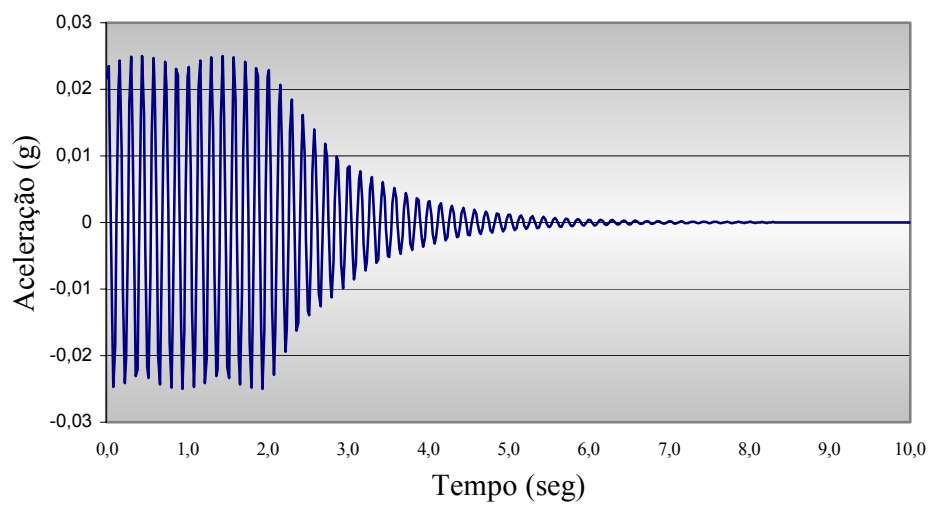
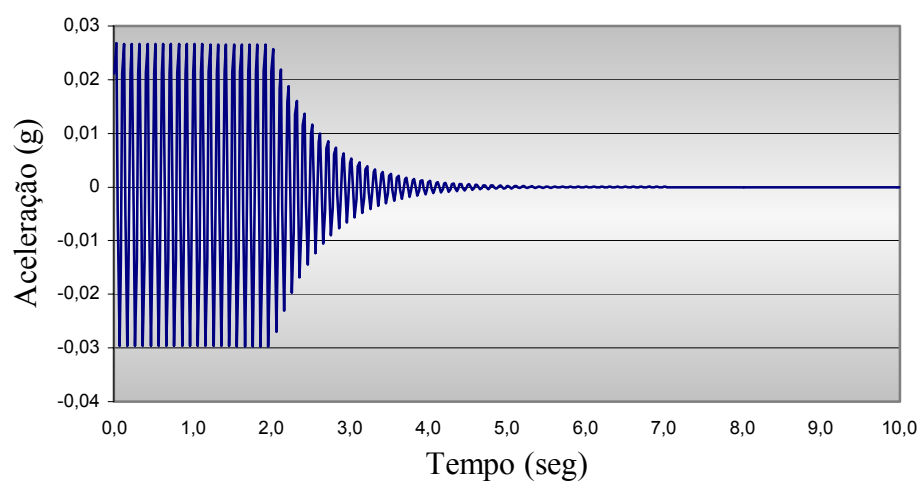


FIGURA 24 - Gráfico no tempo de $u_1(t)$

No gráfico da figura 25, nota-se a presença de ondulações e, na figura 26, a amplitude do sinal não chega ao valor de 0,03 conforme indicado na tabela. Isso se deve ao fato dos gráficos terem sido gerados em um programa computacional que elabora o gráfico simplesmente unindo os pontos gerados. Como ao se gerar os pontos do gráfico, dependendo da taxa de amostragem, os pontos relativos aos picos máximos da função não são gerados, o gráfico não representa exatamente a função e esses efeitos podem ser notados.

Nota-se, pelo gráfico de $u(t)$ (FIG.27) que é impossível detectar visualmente a presença das componentes de 7 e 10Hz. Utilizando a ferramenta adequada do programa MATLAB, obteve-se o espectro de frequência do sinal $u(t)$, utilizando-se 500 pontos para computar a FFT e aplicando-se 256 janelas de *hanning* no gráfico do tempo. A FIG. 28 mostra o espectro obtido, onde se observa claramente a presença das três componentes de 3, 7 e 10Hz.

FIGURA 25 - Gráfico no tempo de $u_2(t)$ FIGURA 26 - Gráfico no tempo de $u_3(t)$

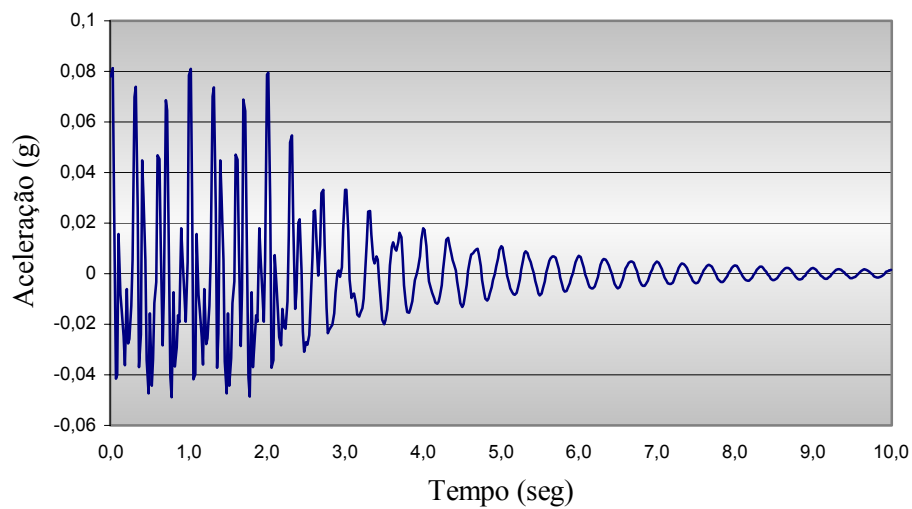


FIGURA 27 - Gráfico no tempo de $u(t)$

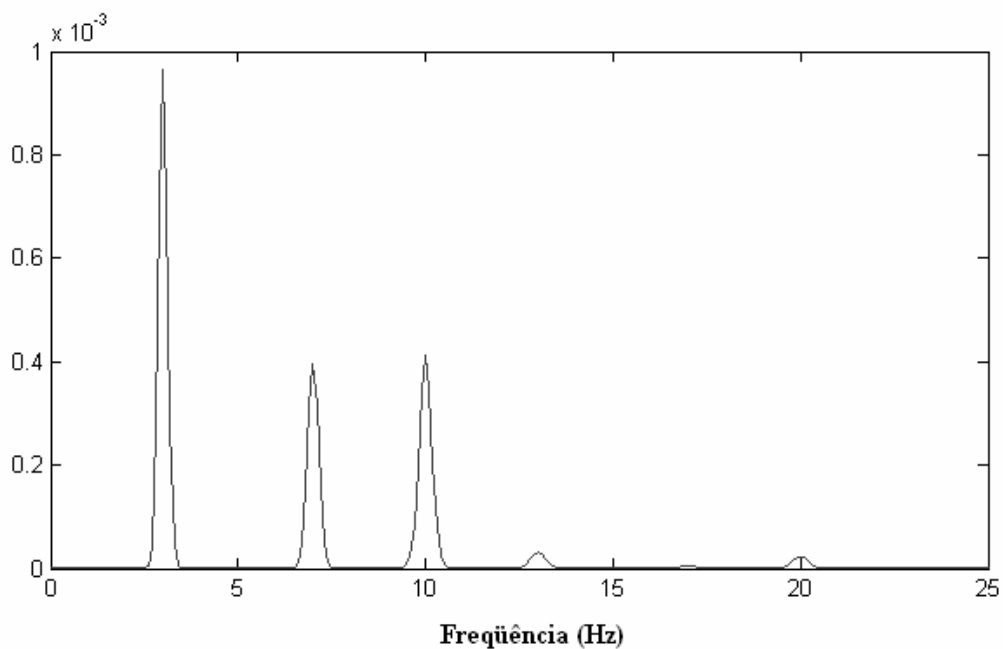


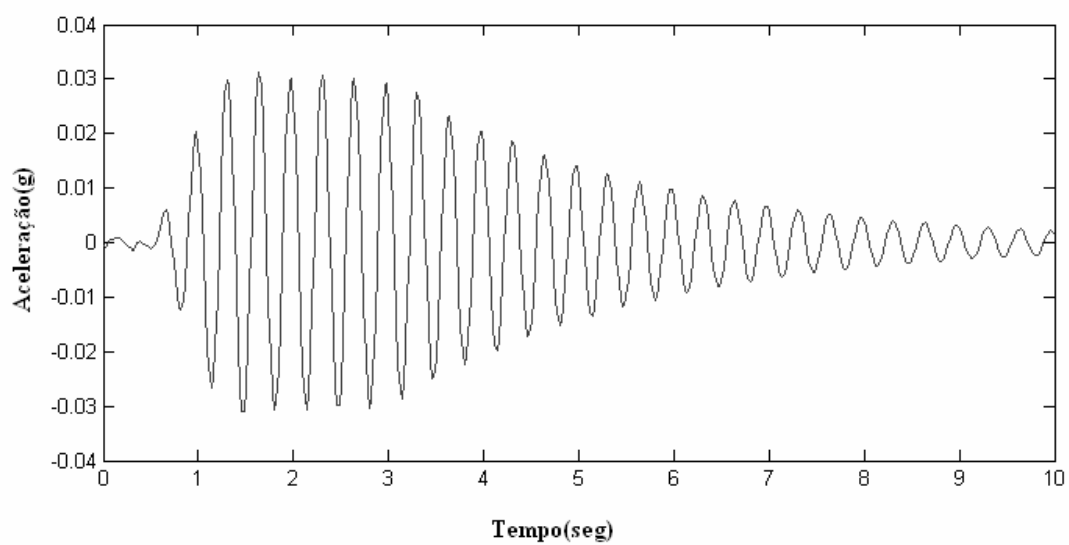
FIGURA 28 - Espectro de frequência do gráfico $u(t)$

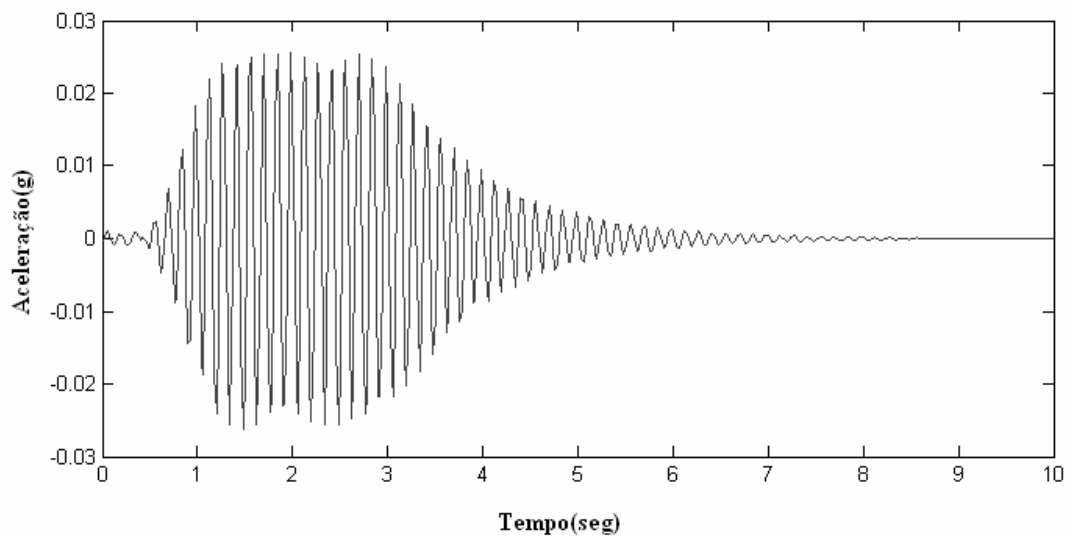
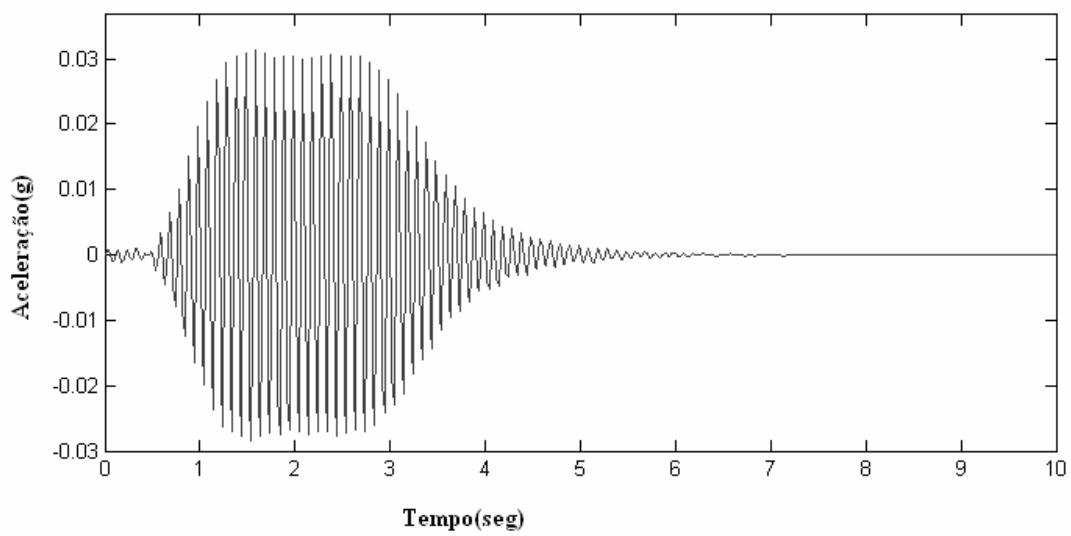
Com a determinação dessas três frequências, foram projetados filtros digitais do tipo passa-faixa com os parâmetros apresentados na TAB. 2, conforme nomenclatura descrita no item 3.5.1.

TABELA 2 - Parâmetros dos filtros

	Fstop1	Fpass1	Fpass2	Fstop2	Dstop1	Dstop2	Dpass
Filtro 1 (3 Hz)	1,75	2,75	3,25	4,25	0,01	0,01	0,01
Filtro 2 (7 Hz)	5,75	6,75	7,25	8,25	0,01	0,01	0,01
Filtro 3 (10 Hz)	8,75	9,75	10,25	11,25	0,01	0,01	0,01

Uma vez aplicados os filtros sobre o sinal $u(t)$, foram obtidos os gráficos mostrados nas FIG. 29 a 31.

FIGURA 29 - Sinal $u(t)$ filtrado pelo Filtro 1 (3 Hz)

FIGURA 30 - Sinal $u(t)$ filtrado pelo Filtro 2 (7 Hz)FIGURA 31 - Sinal $u(t)$ filtrado pelo Filtro 3 (10 Hz)

Posteriormente, para cada um dos três gráficos obtidos, ajustou-se uma curva exponencial aos picos máximos da curva de decaimento, obtendo-se o fator de amortecimento para cada componente de frequência. As FIG. 32, 33 e 34 mostram as curvas ajustadas, as equações das curvas e o fator de amortecimento associado a cada uma delas.

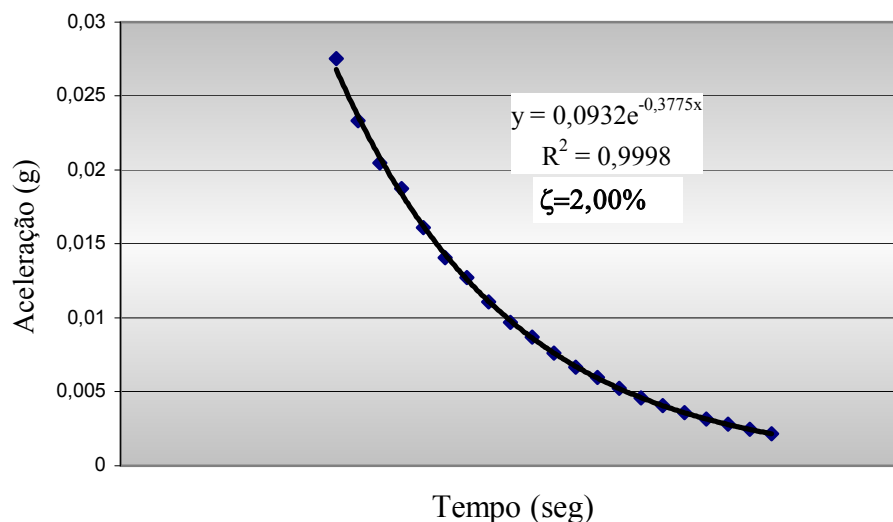


FIGURA 32 - Ajuste da curva exponencial para a componente de 3Hz

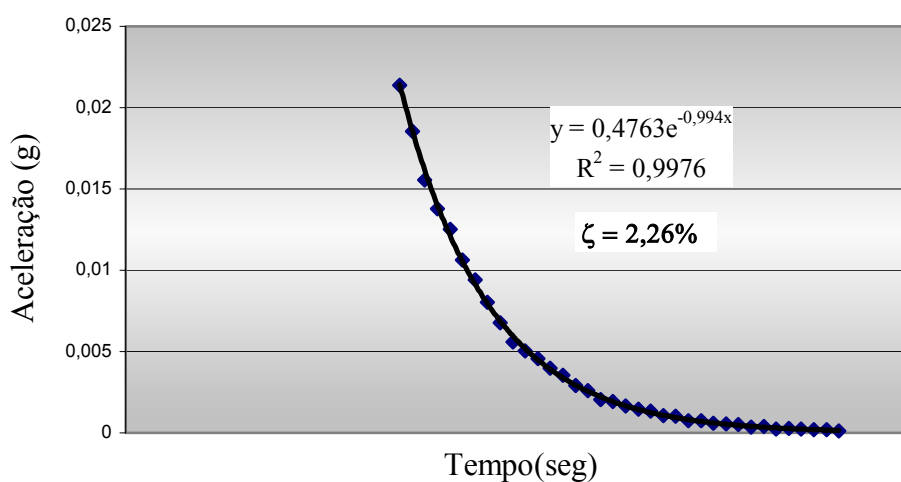


FIGURA 33 - Ajuste da curva exponencial para a componente de 7Hz

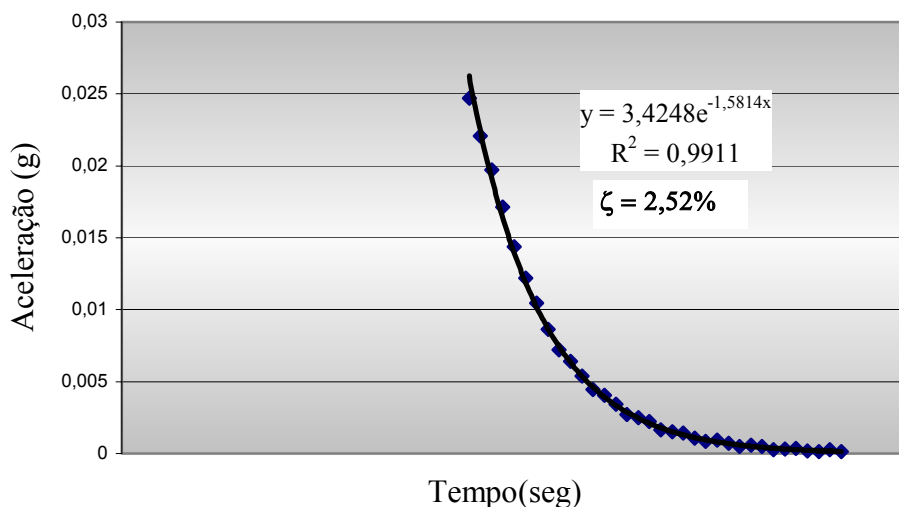


FIGURA 34 - Ajuste da curva exponencial para a componente de 10Hz

Após análise dos gráficos, deve-se ressaltar alguns pontos importantes. Nota-se claramente um deslocamento no tempo do gráfico do sinal filtrado em relação ao sinal original, efeito típico para os sinais sobre os quais se utilizam filtros do tipo FIR. Nos sinais originais o decaimento da amplitude se inicia após 2,0 segundos, ao passo que, nos sinais filtrados, este se inicia em torno dos 3 segundos. Esse efeito, porém, pouco interessa para o objeto deste estudo, que é a obtenção dos parâmetros de amortecimento.

Outro efeito que pode ser notado é do estrangulamento que existe no início dos sinais filtrados. Esse fenômeno ocorre porque o filtro de ordem n só age efetivamente sobre a amostra coletada após o n -ésimo ponto da amostra, o que também não influencia os resultados que se quer obter.

No que diz respeito à recuperação da amplitude de cada componente de frequência, comparando-se os gráficos antes e após a filtragem, os filtros projetados se mostraram satisfatórios, pois representaram com precisão os valores dos sinais originais.

Quanto à conservação da forma das componentes dos sinais originais, os filtros projetados também se mostraram eficientes. Isto foi comprovado através da obtenção dos fatores de amortecimento, que apresentaram uma ótima concordância em relação aos utilizados na construção do sinal.

Portanto, a metodologia aplicada na obtenção dos resultados, bem como no projeto dos filtros digitais, apresentou resultados satisfatórios e confiáveis.

4.3 – Simulação Numérica

As simulações numéricas das estruturas ensaiadas foram realizadas utilizando o programa computacional em elementos finitos *ANSYS 5.4*.

Nestes modelos, considerou-se o concreto com densidade de 2.500kg/m^3 , módulo de elasticidade 32000MPa – calculado pela formulação da norma NBR-6118 referente a um concreto com f_{ck} de 20MPa – e coeficiente de Poisson igual a $0,2$. Para o aço, considerou-se a densidade de 7.850kg/m^3 , módulo de elasticidade de 205000MPa e coeficiente de Poisson igual a $0,3$.

Para simular as vigas metálicas, foram utilizados elementos de barra tridimensionais, que além de ter como dados de entrada as propriedades geométricas da seção, permitem fornecer um *off-set* da seção em relação ao eixo da barra. Esse *off-set* foi utilizado para considerar a distância entre os eixos de centro de gravidade do perfil metálico e da mesa de concreto, uma vez que, no modelo, as linhas de contorno das lajes e as linhas das vigas são coincidentes. Além disso, foi assumida a interação total entre laje de concreto e viga metálica.

Para simular as lajes, foram utilizados elementos de placa. Em alguns modelos foram utilizados elementos de espessuras diferentes para representar a nervura dos pisos que utilizam forma de aço. Em outros foram utilizados elementos com uma espessura única e igual à da camada de concreto que se situa acima das nervuras.

Depois de completo o modelamento das estruturas, foram realizadas análises modais para obter suas frequências fundamentais. Comparando estas frequências com as obtidas experimentalmente, pode-se verificar a adequação do modelo computacional em relação à estrutura ensaiada.

5

EXEMPLOS PRÁTICOS

Como já dito, para o desenvolvimento deste estudo, foram realizados ensaios dinâmicos em 3 estruturas. Posteriormente, essas estruturas foram modeladas em um programa computacional em elementos finitos, para análise dos resultados. A seguir, serão apresentados os resultados obtidos tanto através dos ensaios quanto da simulação numérica.

5.1 – Estrutura 1

5.1.1 – Descrição Geral

A Estrutura 1 é um edifício em estrutura metálica que, durante os ensaios, estava em fase de construção, sendo constituído de 11 pavimentos, com lajes em concreto armado com forma de aço incorporada (*steel deck*). A altura total das lajes é de 140mm, sendo 75mm referentes à altura da nervura. A forma de aço tem as características geométricas apresentadas na FIG.35. A FIG. 37 mostra o esquema do pavimento ensaiado e a TAB.3 descreve as dimensões em milímetros das chapas dos perfis utilizados. As setas nas lajes indicam o sentido das nervuras da forma de aço.

A resistência característica à compressão do concreto utilizado nas lajes é de 20MPa. O aço dos perfis soldados é ASTM A-36 (*Multigrade*) com limite de escoamento de

300MPa, e o dos perfis laminados é ASTM A-572 com limite de escoamento de 350MPa.

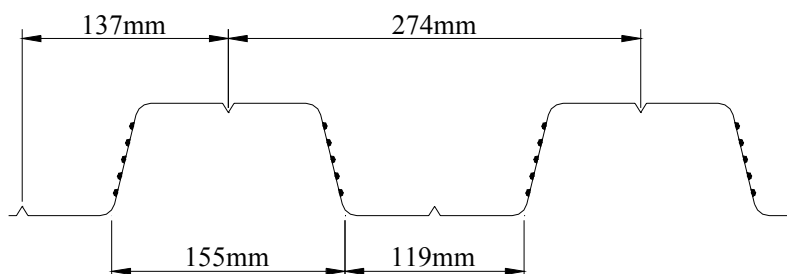


FIGURA 35 - Propriedades geométricas da forma de aço

O pavimento ensaiado será utilizado como garagem e não foi adicionado ao piso nenhum tipo de revestimento, dando-se apenas um polimento à laje de concreto.

As ligações entre todas as vigas e colunas, exceto as utilizadas no sistema de estabilização do edifício, são feitas com parafusos e cantoneiras, podendo-se, então, considerar as vigas como biapoizadas. As vigas de pórtico são engastadas nas colunas, ao passo que as de contraventamento possuem um apoio intermediário por causa da presença das diagonais do contraventamento em delta.

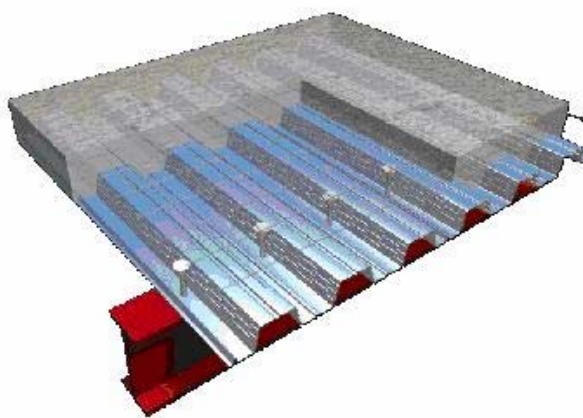
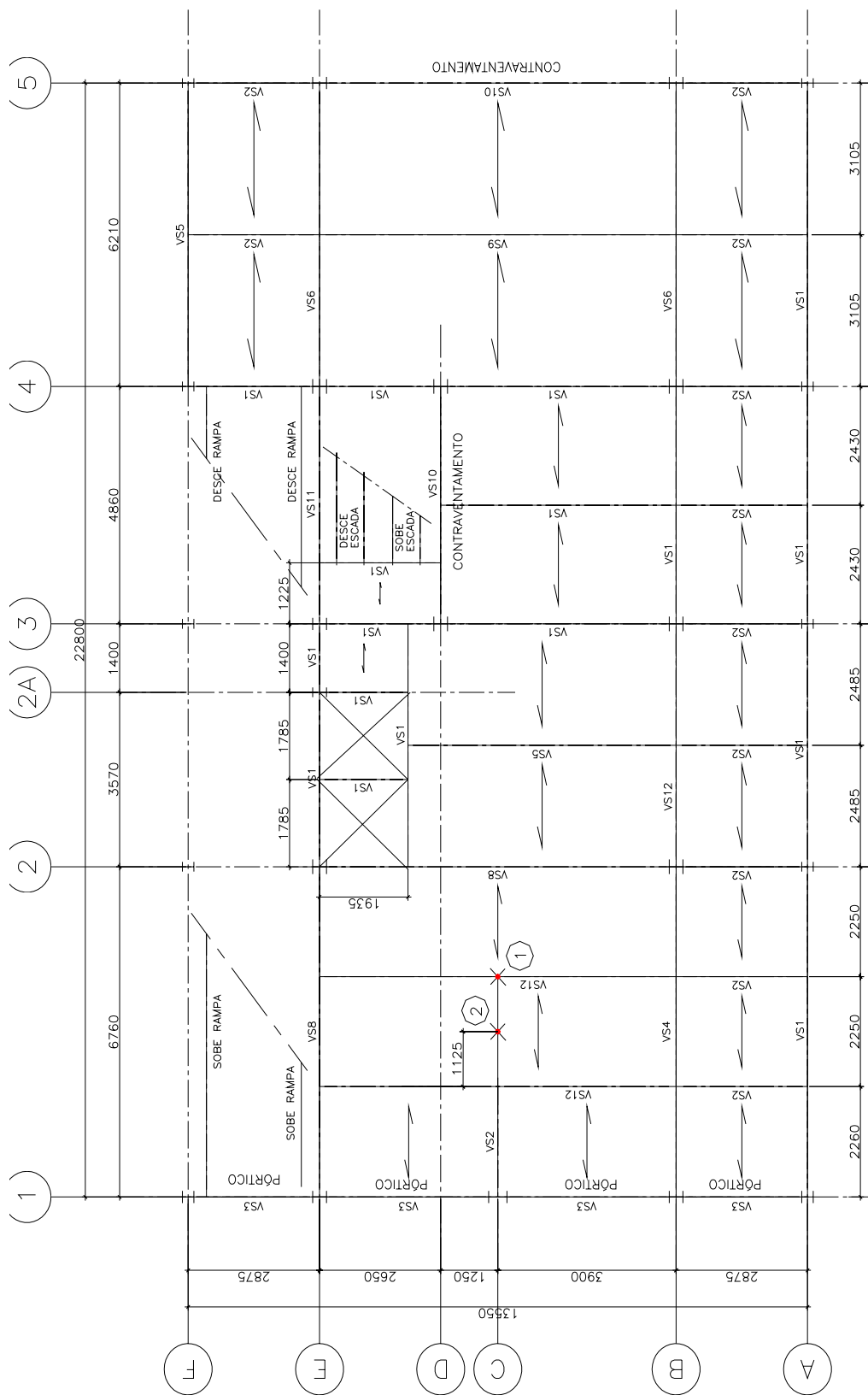


FIGURA 36 – Vista geral de uma laje com forma de aço incorporada (*steel deck*)



* Dimensões em milímetros.

FIGURA 37 - Esquema da Estrutura 1

TABELA 3 – Dimensões dos perfis metálicos da Estrutura 1

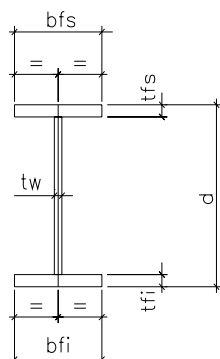


TABELA DE PERFIS I								
MARCA	TIPO	d	bfs	bfi	tfs	tfi	tw	OBS.
VS1	PL	251	101	101	5.33	5.33	4.83	W10x12
VS2	PS	200	125	125	4.75	4.75	3.00	VE 200x14
VS3	PS	400	150	150	12.50	12.50	6.30	
VS4	PS	300	200	200	9.50	9.50	4.75	
VS5	PS	250	130	130	6.30	6.30	4.75	
VS6	PS	300	150	150	8.00	9.50	4.75	
VS8	PL	309	102	102	8.89	8.89	5.97	W12x19
VS10	PS	300	130	130	6.30	6.30	4.75	
VS11	PS	250	150	150	6.30	6.30	4.75	
VS12	PL	303	101	101	5.72	5.72	5.08	W12x14

As vigas metálicas trabalham em conjunto com a laje de concreto unidas por conectores do tipo pino com cabeça, garantindo uma interação parcial ou total entre esses elementos estruturais.

A resposta estrutural foi captada nos pontos 1 e 2, conforme locação indicada na FIG.37, para excitações dinâmicas provocadas pelo caminhar de uma pessoa, oriundas do *heel drop*, e causadas pelo impacto da massa de aço solta de uma altura de 0,5m sobre o piso. As excitações foram produzidas em um ponto próximo ao em que o sinal foi captado.

Sobre a estrutura apresentada foi aplicada a metodologia descrita no Capítulo 4; a seguir, serão apresentados os resultados obtidos.

5.1.2 – Resultados Experimentais

Durante os ensaios realizados na Estrutura 1, para cada sistema de aquisição foram coletadas em torno de 5 amostras de cada tipo de evento realizado – carregamento dinâmico produzido pelo caminhar de uma pessoa, que será aqui chamado de *ensaio de caminhar*, pelo ensaio *heel drop* e pelo impacto da massa de aço sobre o piso, que será chamado de *ensaio de impacto*. As FIG. 38 a 43 mostram um espectro de frequência representativo para o ensaio *heel drop*, de caminhar e de impacto, respectivamente, para

os pontos 1 e 2. Pode-se notar que cada tipo de ensaio realizado excita as frequências fundamentais da estrutura, com magnitudes diferentes em pontos diferentes.

Analisando os espectros obtidos, constata-se que a resposta da estrutura possui componentes, principalmente, nas frequências de 7,75Hz, 11,5Hz, 16,0Hz e 25,0Hz, que são frequências fundamentais da estrutura.

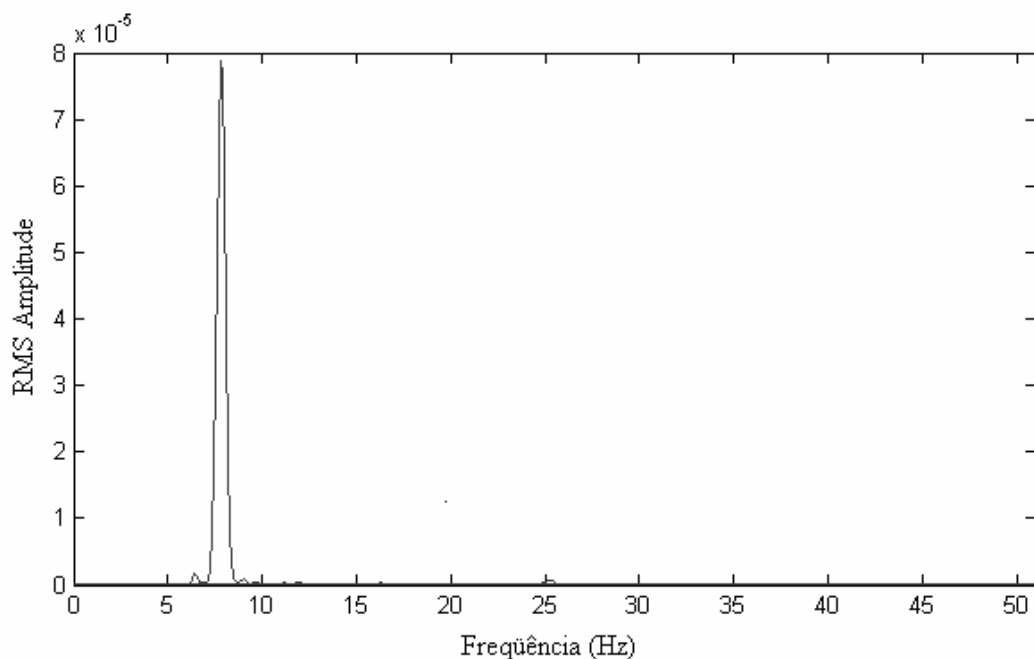


FIGURA 38 – Espectro de frequência – Ponto 1 – Caminhar

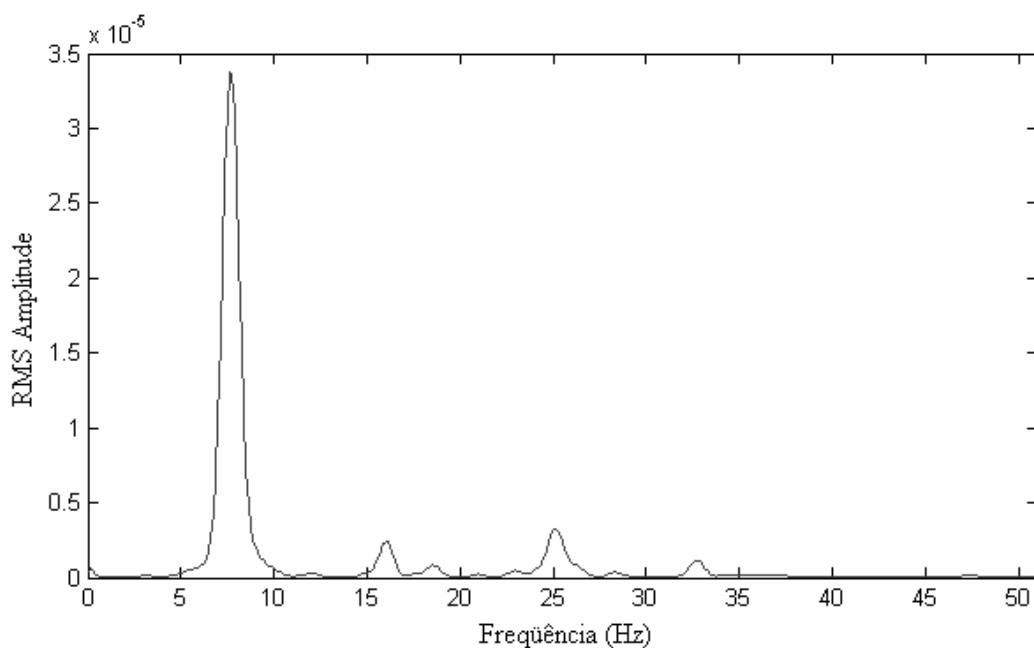


FIGURA 39 – Espectro de frequência – Ponto 1 – Heel Drop

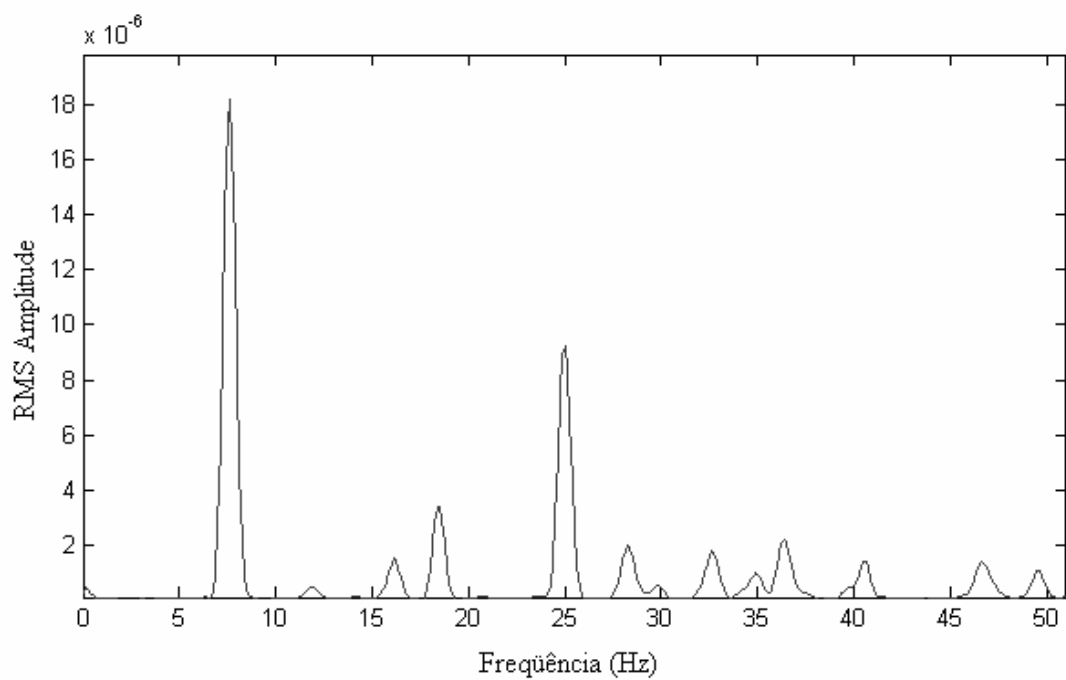


FIGURA 40 – Espectro de frequência – Ponto 1 – Impacto

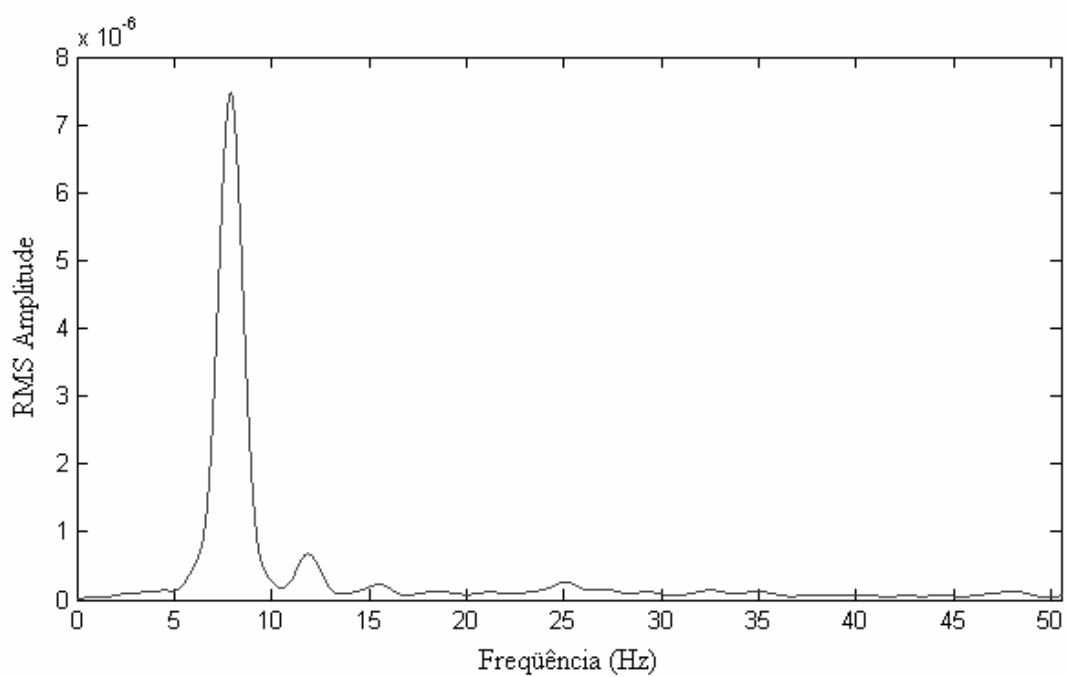


FIGURA 41 – Espectro de frequência – Ponto 2 – Caminhar

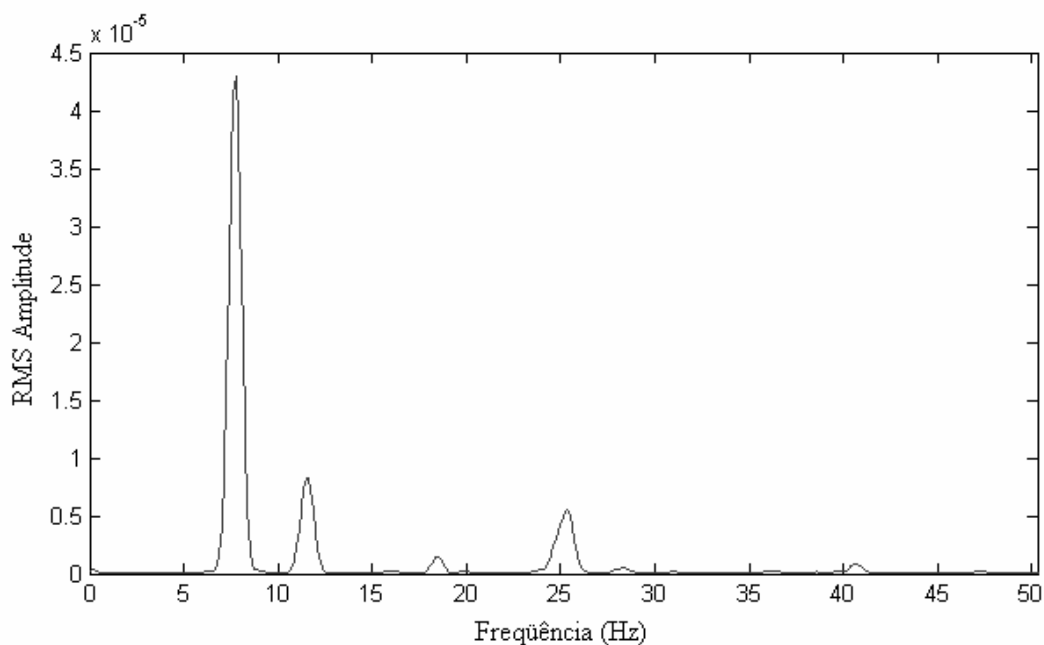


FIGURA 42 – Espectro de frequência – Ponto 2 – *Heel Drop*

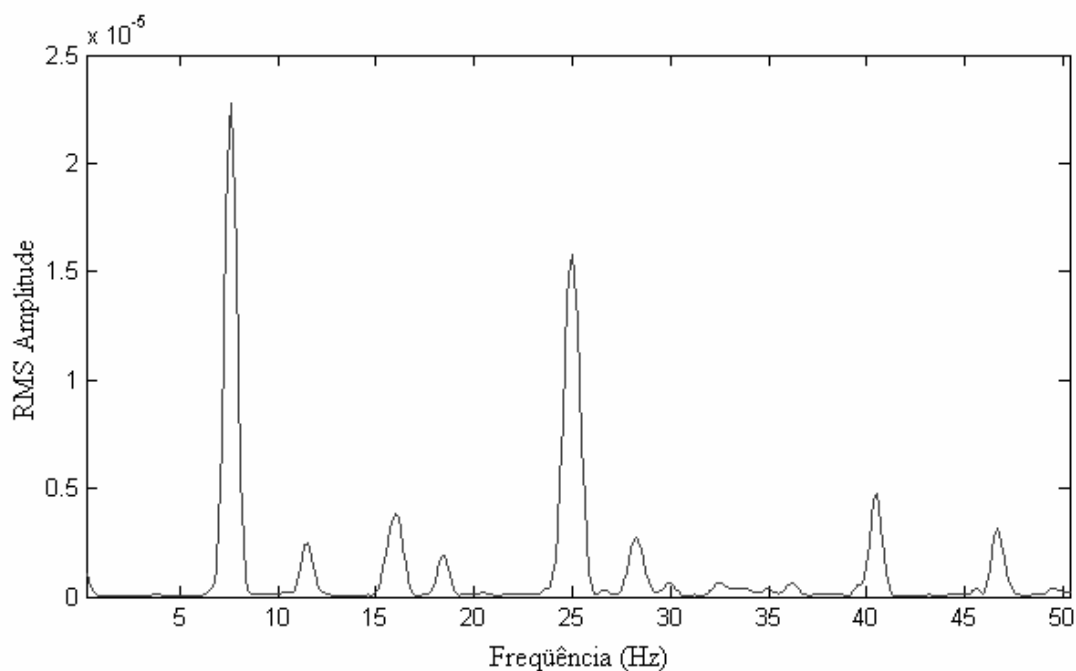


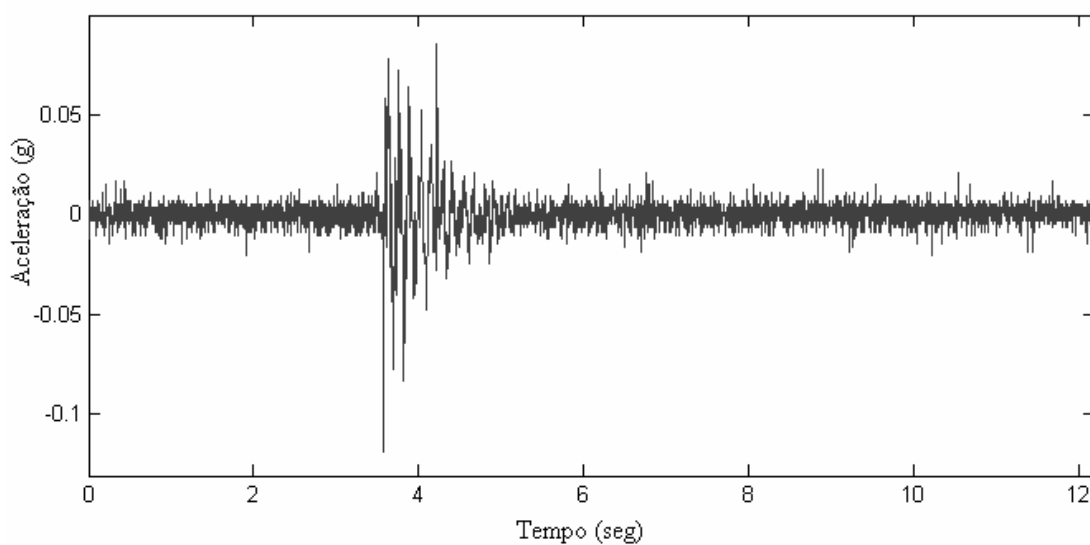
FIGURA 43 – Espectro de frequência – Ponto 2 – Impacto

Com a determinação dessas frequências, foram projetados filtros digitais do tipo passa-faixa, em faixas de frequência relativas às frequências fundamentais da estrutura, e aplicados sobre os sinais coletados. A TAB.4 mostra as características dos filtros projetados.

TABELA 4 - Propriedades dos filtros digitais projetados para a Estrutura 1

	Fs	Fstop1	Fpass1	Fpass2	Fstop2	Dstop1	Dstop2	Dpass
Filtro 1 (7,75Hz)	500	6,0	7,0	9,0	10,0	0,01	0,01	0,001
Filtro 2 (11,5Hz)	500	10,5	11,0	12,0	12,5	0,01	0,01	0,001
Filtro 3 (16,0Hz)	500	14,0	15,0	17,0	18,0	0,01	0,01	0,001
Filtro 4 (25,0Hz)	500	23,0	24,0	26,0	27,0	0,01	0,01	0,001

A FIG. 44 mostra exemplo de um dos sinais coletados no ponto 2 para o ensaio de *heel drop*.

FIGURA 44 - Sinal captado no ponto 2 para o ensaio *heel drop*

Em seguida, foram aplicados sobre esse sinal os filtros 1, 2 e 4, cujos parâmetros foram descritos na TAB.4, visto que as frequências de 7,75Hz, 11,5Hz e 25Hz são as componentes mais expressivas nesse sinal (FIG.42).

As FIG. 45 a 47 mostram sinais filtrados pelos filtros 1, 2 e 4 respectivamente.

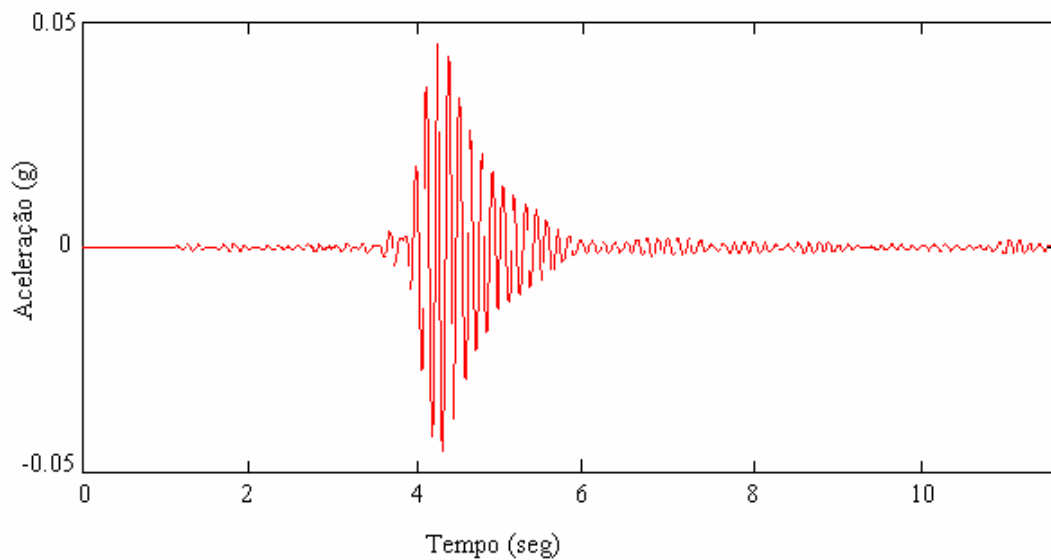


FIGURA 45 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 1 (7,75Hz)

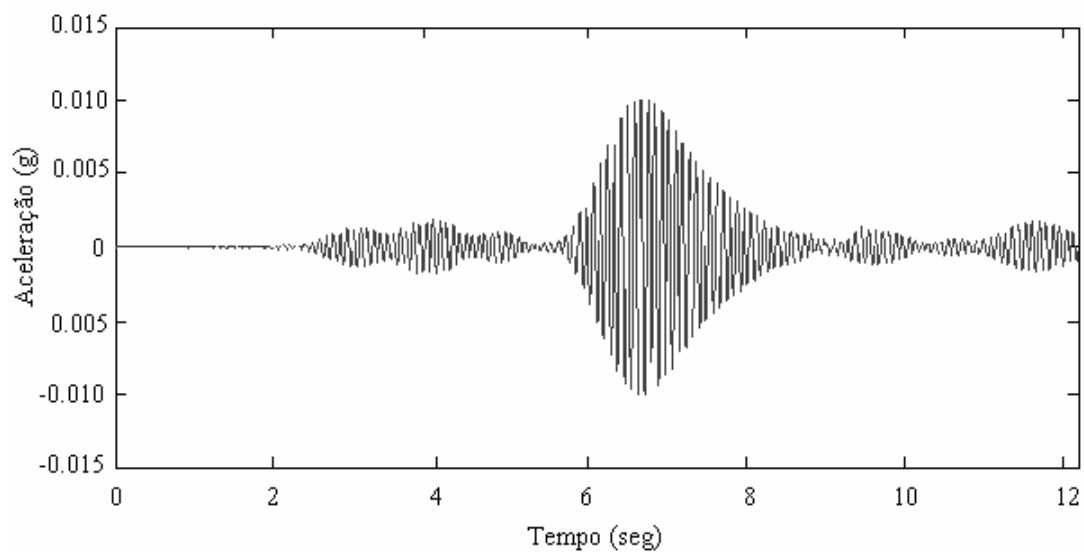


FIGURA 46 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 2 (11,5Hz)

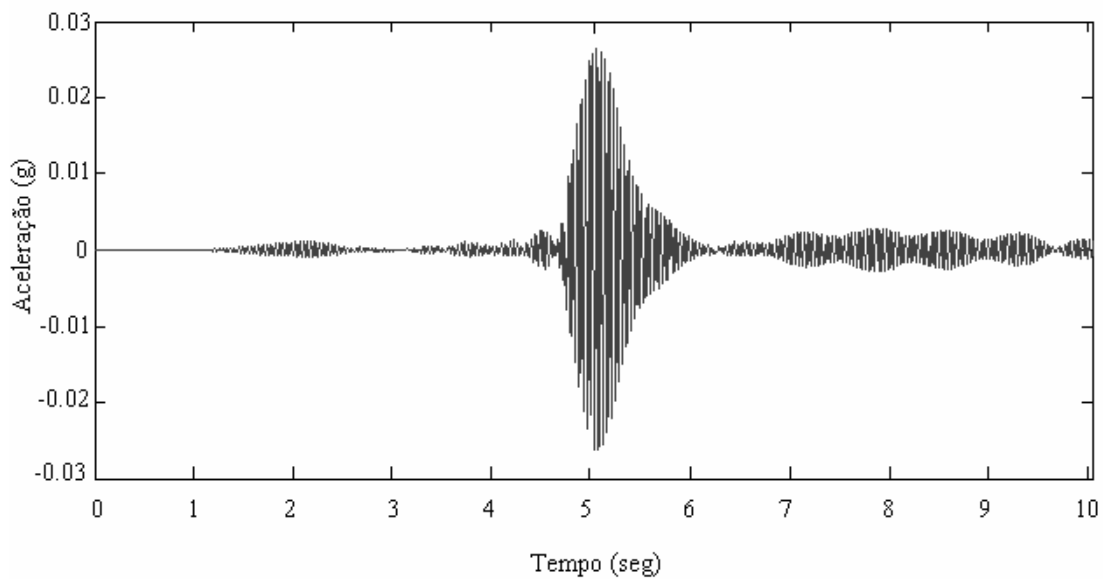


FIGURA 47 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 4 (25,0Hz)

Para cada um dos sinais filtrados, obtiveram-se os picos máximos da sua curva de decaimento (FIG. 48 a 50).

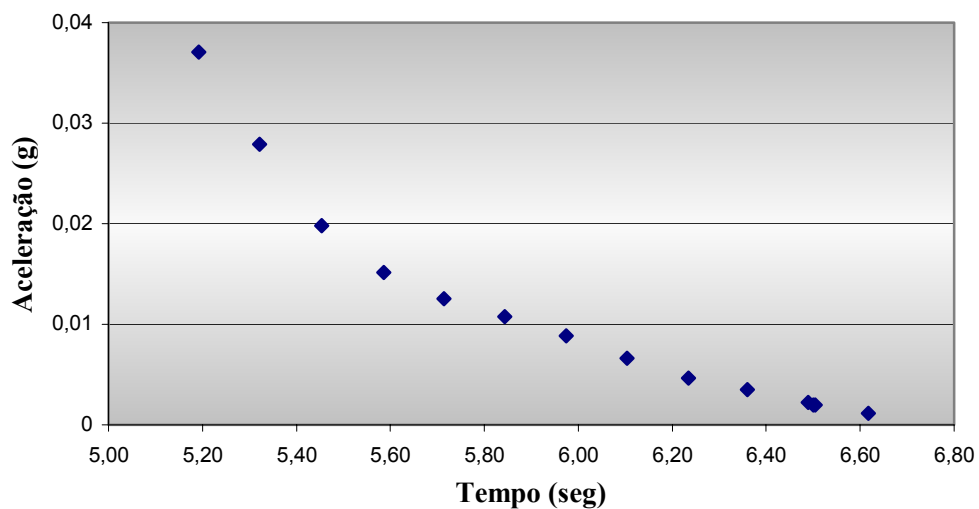


FIGURA 48 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 1 (7,75Hz)

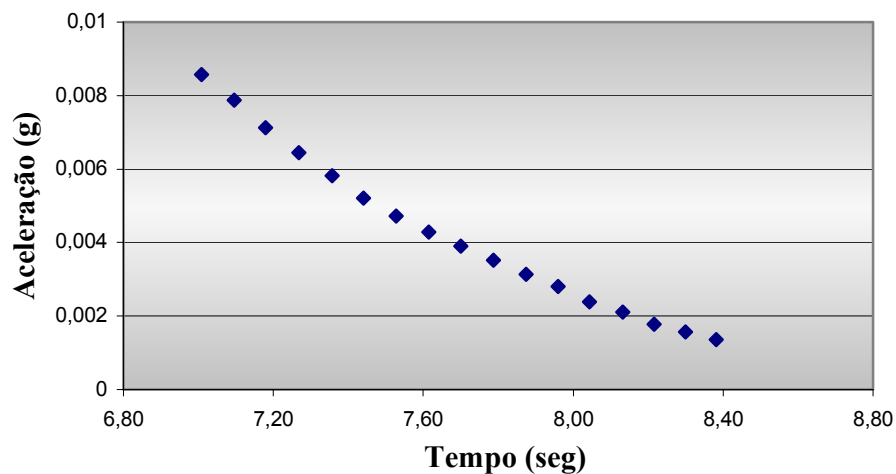


FIGURA 49 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 2 (11,5Hz)

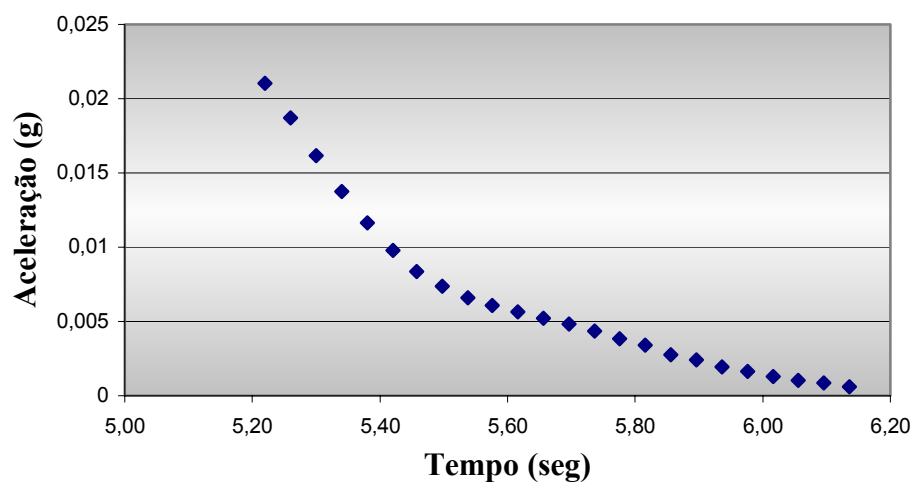


FIGURA 50 – Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 4 (25,0Hz)

Com o gráfico dos picos máximos da curva de decaimento dos sinais filtrados foram obtidos os parâmetros de amortecimento, utilizando os métodos do decaimento logarítmico com os valores apresentados na TAB.5, da meia amplitude cujos resultados são mostrados na TAB.6, e ajuste de curva, cujos gráficos e resultados são apresentados nas FIG. 51 a 53.

TABELA 5 – Amortecimento obtido pelo método do Decaimento Logarítmico

Tempo (seg)	Filtro1 (7,75 Hz) Amplitude	Fator Amort.	Tempo (seg)	Filtro 2 (11,5 Hz) Amplitude	Fator Amort.	Tempo (seg)	Filtro 4 (25,0 Hz) Amplitude	Fator Amort.
5,064	0,040127	1,26%	6,748	0,010007	0,44%	5,1	0,026012	0,67%
5,192	0,037066	4,53%	6,836	0,009736	0,90%	5,14	0,024939	1,16%
5,322	0,027881	5,44%	6,922	0,009201	1,13%	5,18	0,023185	1,54%
5,454	0,019813	4,28%	7,008	0,008568	1,35%	5,22	0,021046	1,88%
5,586	0,015143	3,03%	7,096	0,007872	1,59%	5,26	0,018699	2,31%
5,714	0,01252	2,44%	7,18	0,007122	1,60%	5,3	0,01617	2,56%
5,844	0,010743	3,10%	7,268	0,006441	1,64%	5,34	0,013771	2,68%
5,974	0,008843	4,61%	7,356	0,00581	1,75%	5,38	0,011641	2,78%
6,104	0,006619	5,56%	7,44	0,005207	1,57%	5,42	0,009775	2,50%
6,234	0,004667	4,52%	7,528	0,004717	1,50%	5,458	0,008354	1,95%
6,36	0,003514	7,13%	7,614	0,004294	1,50%	5,498	0,007389	1,81%
6,49	0,002245	1,80%	7,7	0,003907	1,68%	5,538	0,006595	1,32%
6,5	0,002005	0,30%	7,788	0,003517	1,85%	5,576	0,006069	1,17%
6,504	0,001969	8,99%	7,874	0,003131	1,78%	5,616	0,005638	1,23%
6,618	0,00112	4,29%	7,96	0,002799	2,50%	5,656	0,005219	1,30%
			8,044	0,002393	2,00%	5,696	0,00481	1,52%
	Média		8,132	0,002111	2,80%	5,736	0,004373	2,16%
			8,216	0,00177	1,93%	5,776	0,003817	1,78%
			8,3	0,001568	2,35%	5,816	0,003414	3,40%
			8,382	0,001353	1,84%	5,856	0,002758	2,03%
						5,896	0,002428	3,43%
				Média		5,936	0,001958	3,05%
						5,976	0,001617	3,55%
						6,016	0,001293	3,28%
						6,056	0,001053	3,37%
						6,096	0,000852	5,96%
						6,136	0,000586	2,48%

TABELA 6 – Amortecimento obtido pelo método da Meia Amplitude

	Amplitude	Tempo	Amplitude/2	Tempo	N	Amort.
Filtro 1 (7,75Hz)	0,04012677	5,064	0,019813007	5,454	3,023	3,64%
Filtro 2 (11,5Hz)	0,01000741	6,748	0,005207034	7,440	7,958	1,38%
Filtro 4 (25,0Hz)	0,02601231	5,100	0,013770774	5,340	6,000	1,83%

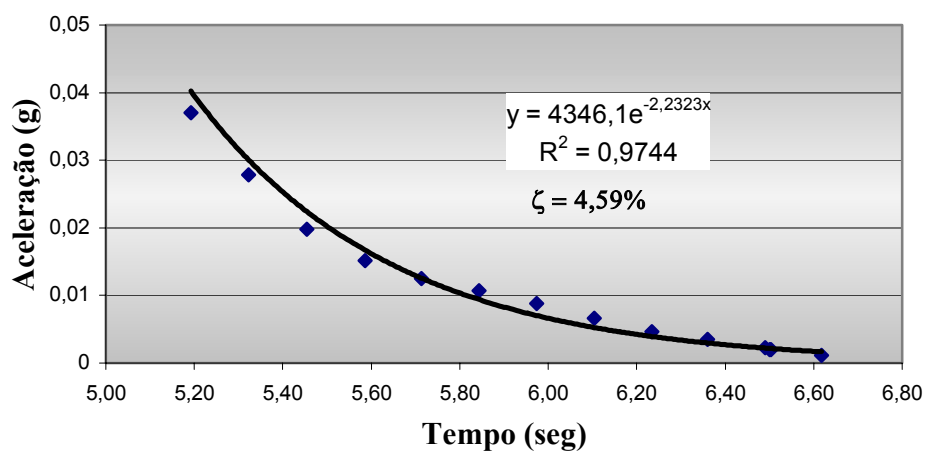


FIGURA 51 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 1 (7,75Hz)

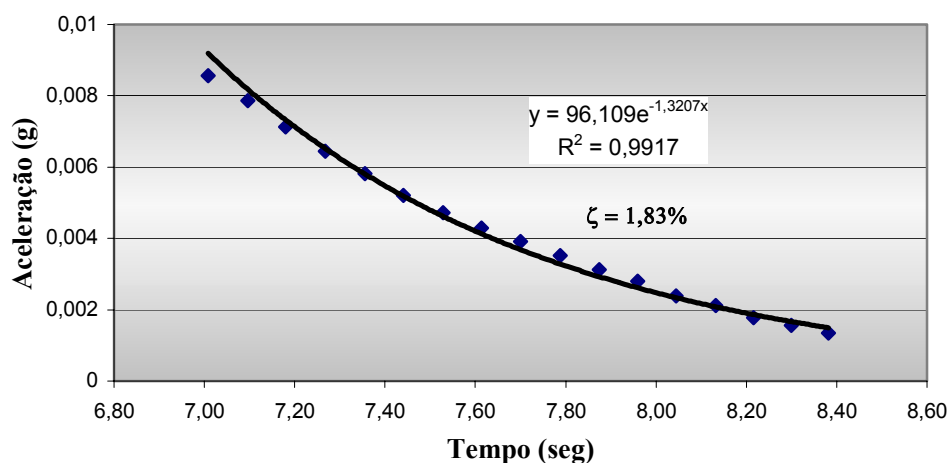


FIGURA 52 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 2 (11,5Hz)

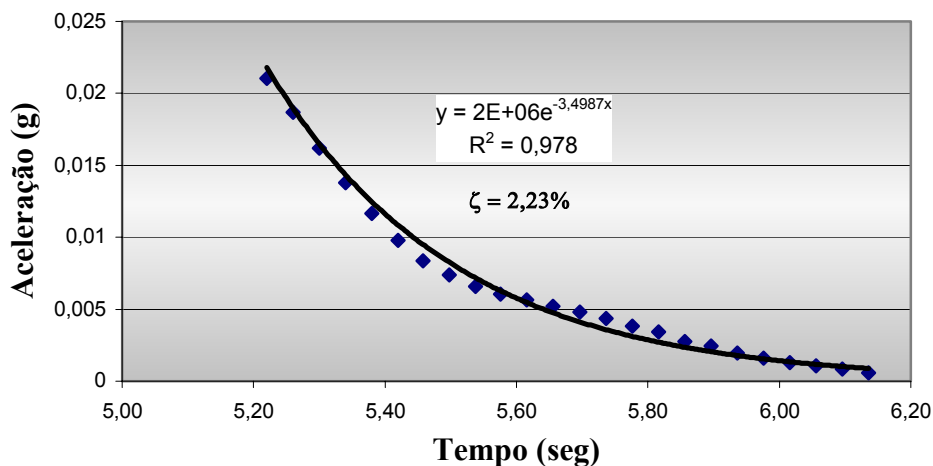


FIGURA 53 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 4 (25,0Hz)

Na obtenção dos valores de amortecimento pelo método do Decaimento Logarítmico foram calculados, pela formulação apresentada no item 3.7.1, os valores de amortecimento para cada par de pontos consecutivos. Posteriormente, foi feita a média aritmética desses valores que foi tomada como fator de amortecimento para a frequência em questão.

Na obtenção dos valores de amortecimento pelo método da Meia Amplitude, foi escolhido um ponto qualquer dos gráficos de picos máximos e tomado o ponto com metade da amplitude deste último, aplicando-se a formulação do item 3.7.2

Para todas as demais amostras coletadas nos ensaios foram aplicados os mesmos métodos descritos acima. Para obter os parâmetros de amortecimento do piso ensaiado, utilizaram-se os sinais oriundos dos ensaios *heel drop* e de impacto. O ensaio de caminhar não foi utilizado para esse fim, já que a curva de decaimento da amplitude do sinal não fica bem caracterizada com esse tipo de excitação.

As TAB. 7 a 10 mostram os resultados obtidos para as demais amostras.

TABELA 7 – Fator de amortecimento para o ensaio *heel drop* no ponto 1

Ponto 1 - Ensaio Heel Drop				
	Amostra	Decaimento	Ajuste	Meia-Amp.
FILTRO 1 (7,75 Hz)	1	3,75%	3,73%	3,43%
	2	4,08%	4,15%	2,76%
	3	3,66%	3,87%	4,05%
	Média	3,83%	3,92%	3,41%
FILTRO 3 (16,0 Hz)	1	1,64%	1,65%	2,17%
	2	1,52%	1,58%	1,46%
	3	1,71%	2,12%	1,54%
	Média	1,62%	1,78%	1,72%
FILTRO 4 (25,0 Hz)	1	-	-	-
	2	2,10%	2,21%	1,85%
	3	1,28%	1,53%	1,58%
	Média	1,69%	1,87%	1,72%

Na TAB.7 não foram apresentados os resultados utilizando-se o Filtro 2 (11,5Hz) pelo fato de que no espectro da FIG.39, o modo de vibração referente a esta frequência foi pouco excitado.

TABELA 8 – Fator de amortecimento para o ensaio de Impacto no ponto 1

Ponto 1 - Ensaio de Impacto				
	Amostra	Decaimento	Ajuste	Meia-Amp.
FILTRO 1 (7,75 Hz)	1	1,84%	3,22%	3,02%
	2	2,76%	3,06%	3,08%
	3	2,41%	3,00%	3,45%
	4	1,64%	2,95%	2,65%
	Média	2,16%	3,06%	3,05%
FILTRO 4 (25,0 Hz)	1	1,32%	1,31%	1,85%
	2	1,55%	1,75%	2,20%
	3	1,37%	1,52%	1,57%
	4	1,30%	0,85%	2,20%
	Média	1,39%	1,36%	1,96%

Na TAB.8 não foram apresentados os resultados para as frequências de 11,5Hz e 16,0Hz pelo fato das suas curvas de decaimento não terem ficado bem caracterizadas.

TABELA 9 – Fator de amortecimento para o ensaio *heel drop* no ponto 2

Ponto 2 - Ensaio Heel Drop				
	Amostra	Decaimento	Ajuste	Meia-Amp.
FILTRO 1 (7,75 Hz)	1	4,06%	4,45%	3,63%
	2	4,29%	4,59%	5,41%
	3	2,73%	4,25%	3,60%
	4	3,45%	3,75%	3,58%
	5	2,92%	3,91%	3,60%
	Média	3,49%	4,19%	3,96%
	FILTRO 2 (11,5 Hz)	1	1,38%	2,21%
2		1,84%	1,83%	1,58%
3		1,65%	1,96%	1,57%
4		1,25%	1,25%	1,83%
5		1,59%	1,80%	1,72%
Média		1,54%	1,81%	1,78%
FILTRO 4 (25,0 Hz)		1	2,67%	2,56%
	2	2,48%	2,23%	2,45%
	3	1,90%	1,85%	2,00%
	4	2,07%	1,99%	2,45%
	5	2,12%	2,03%	2,20%
	Média	2,25%	2,13%	2,32%

Na TAB.9 não foram apresentados os resultados utilizando-se o Filtro 2 (11,5Hz) pelo fato de que no espectro da FIG.42, o modo de vibração referente a esta frequência foi pouco excitado.

TABELA 10 – Fator de amortecimento para o ensaio de Impacto no ponto 2

Ponto 2 - Ensaio de Impacto				
	Amostra	Decaimento	Ajuste	Meia-Amp.
FILTRO 1 (7,75 Hz)	1	1,62%	2,64%	2,70%
	2	2,05%	2,93%	1,69%
	3	1,64%	2,50%	2,68%
	4	1,64%	3,24%	3,60%
	5	2,31%	2,73%	3,50%
	Média	1,85%	2,81%	2,83%
	FILTRO 4 (25,0Hz)	1	2,36%	2,08%
2		1,99%	1,75%	2,34%
3		2,12%	2,00%	1,79%
4		1,65%	1,70%	1,56%
5		1,82%	2,00%	1,80%
Média		1,99%	1,91%	1,81%

Na TAB.10 não foram apresentados os resultados para as frequências de 11,5Hz e 16,0Hz pelo fato das suas curvas de decaimento não terem ficado bem caracterizadas.

Após a análise dos valores de fatores de amortecimento calculados pode-se considerar que, para a frequência de 7,75Hz, obteve-se um fator de amortecimento entre 2 e 4% do amortecimento crítico. Para a frequência 11,5Hz, obteve-se de 1,5 a 1,8% do amortecimento crítico, para a frequência de 16Hz, obteve-se aproximadamente 1,65% do amortecimento crítico, e para a frequência de 25,0Hz, o fator de amortecimento variou de 1,39 a 2,32% do amortecimento crítico.

5.1.3 – Simulação Numérica e Resultados

Levando em conta a localização dos pontos em que os sinais foram captados, foi modelada, em programa computacional em elementos finitos, a região do piso compreendida entre os eixos 1 e 2 e entre as filas B e E. No modelo foram estabelecidas condições de contorno necessárias para garantir a sua representatividade em relação à estrutura real.

A laje foi considerada simplesmente apoiada ao longo das vigas do eixo 1 e das filas B e E. Embora haja ligação física entre as lajes ao longo da fila B, tal continuidade não foi considerada em virtude da pequena rigidez da laje nesta região, uma vez que a nervura ao longo deste trecho é paralela ao eixo da viga, e por causa da inexistência de armaduras que garantam esta continuidade.

Para garantir que nenhum modo de vibração fosse ocultado em função das condições de simetria consideradas para o modelo, ao longo do eixo 2, foram feitas duas hipóteses de condições de contorno. A primeira, impedindo apenas a rotação na direção do *eixo y* global ao longo desse eixo; a segunda, impedindo apenas a translação na direção do *eixo z* global.

Nas conexões entre viga e coluna foram colocados apoios fixos e móveis restringindo o deslocamento de corpo rígido. Além desses vínculos, nas ligações entre vigas e colunas de pórtico, foram impedidas as rotações em torno do eixo *x* global, simulando assim o engastamento entre estes elementos.

Para simular as vigas utilizaram-se elementos de barra tridimensionais e, para a laje, elementos de placa com espessuras de 140mm e 65mm, para melhor representar a variação, em sua inércia, resultante da presença de nervuras. Também foi considerada a interação total entre as vigas metálicas e a laje de concreto. A FIG.54 mostra um esquema do modelo utilizado, com as restrições aplicadas.

Através da análise modal foram extraídos os 6 primeiros modos de vibração de estrutura modelada. As FIG. 55 a 60 mostram esses modos.

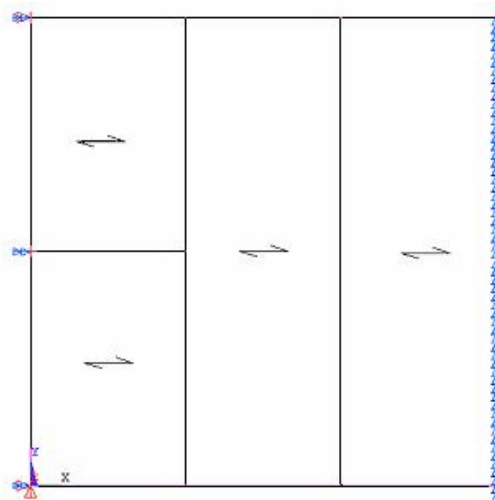


FIGURA 54 – Esquema do modelo numérico da Estrutura 1

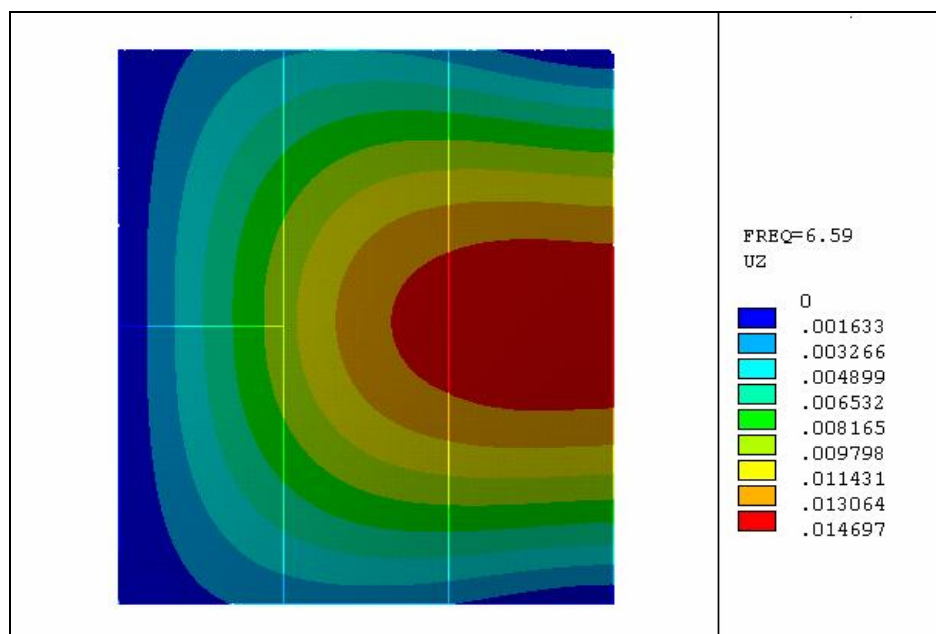


FIGURA 55 - 1º modo de vibração da Estrutura 1 a 6,59Hz

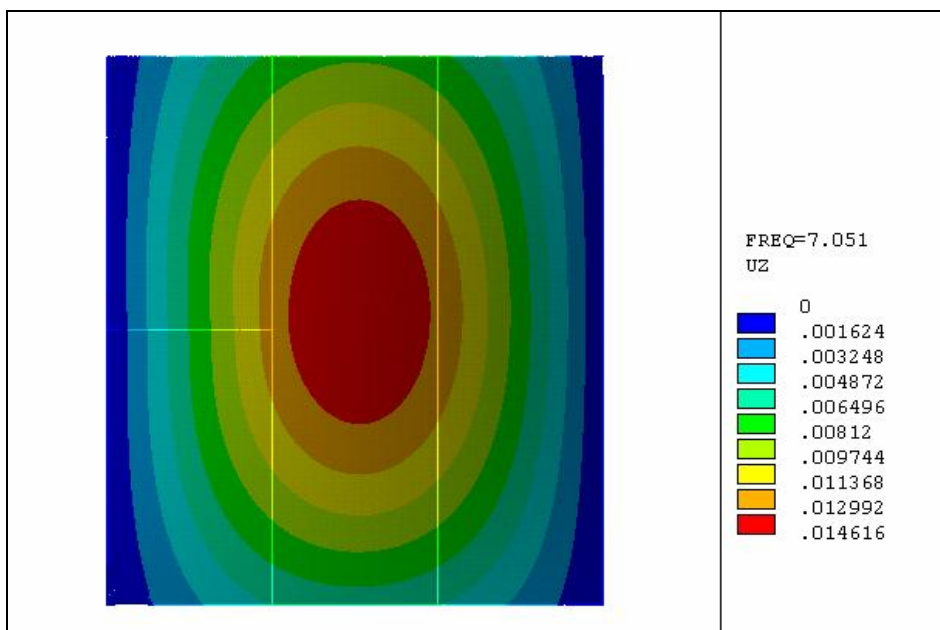


FIGURA 56 - 2º modo de vibração da Estrutura 1 a 7,05Hz

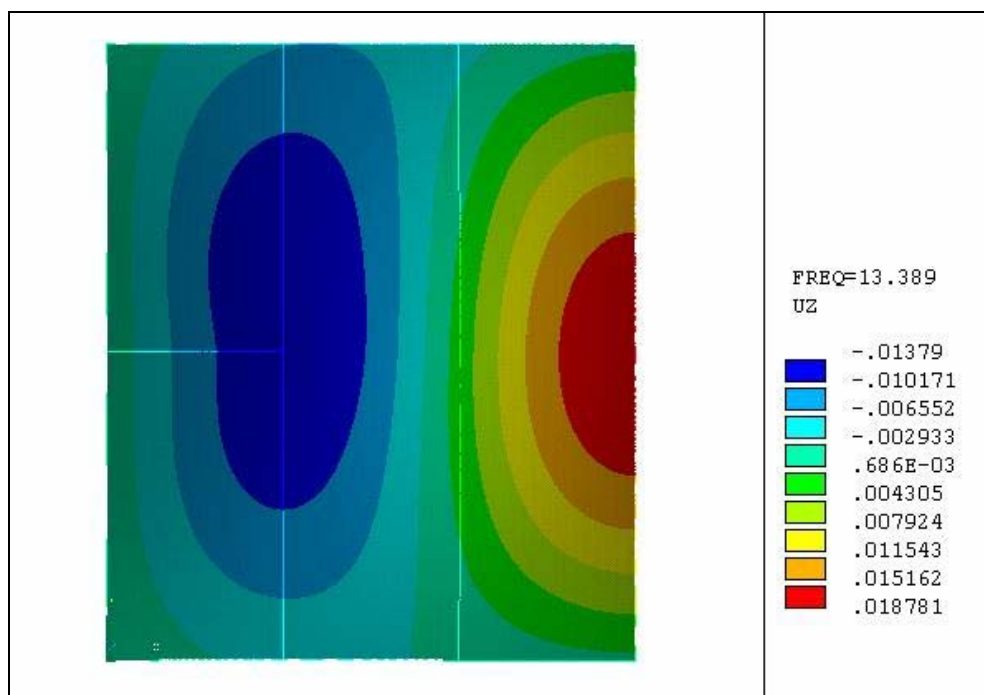


FIGURA 57 - 3º modo de vibração da Estrutura 1 a 13,39Hz

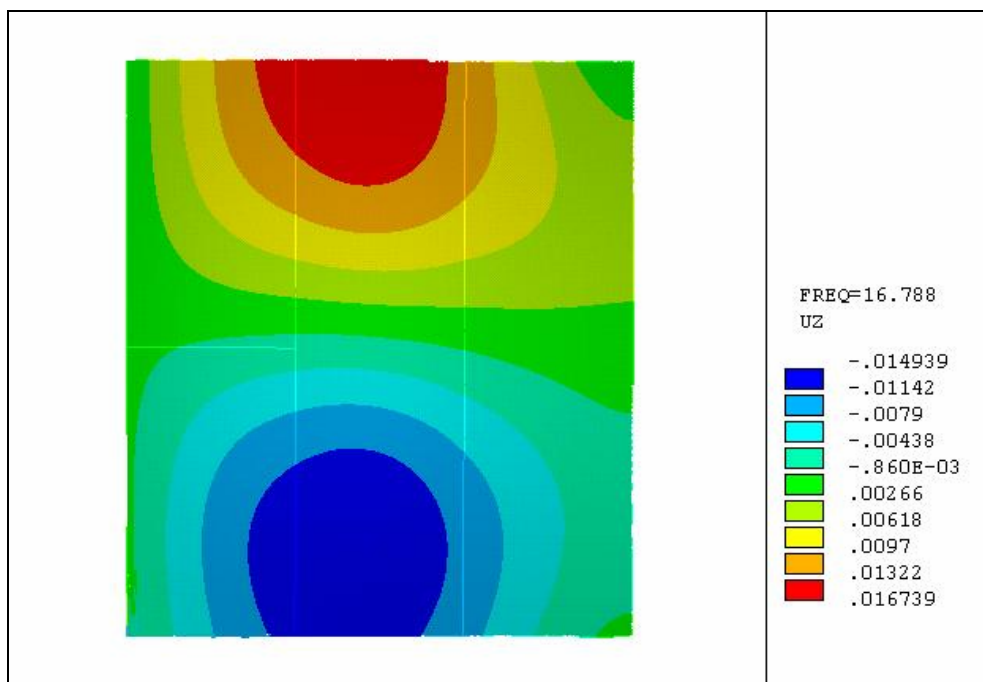


FIGURA 58 - 4º modo de vibração da Estrutura 1 a 16,79Hz

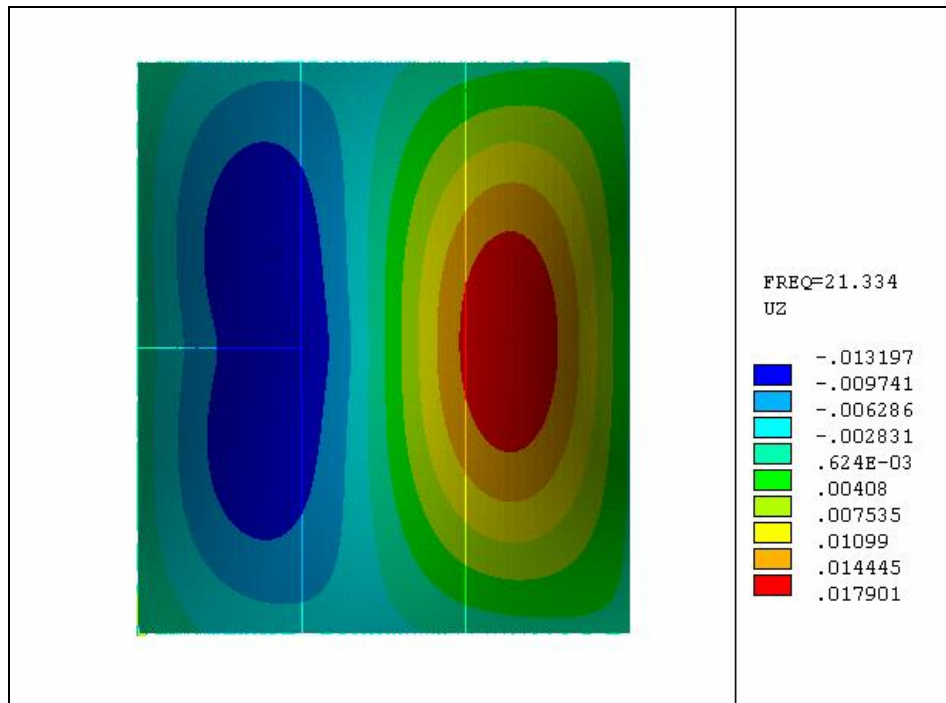


FIGURA 59 - 5º modo de vibração da Estrutura 1 a 21,33Hz

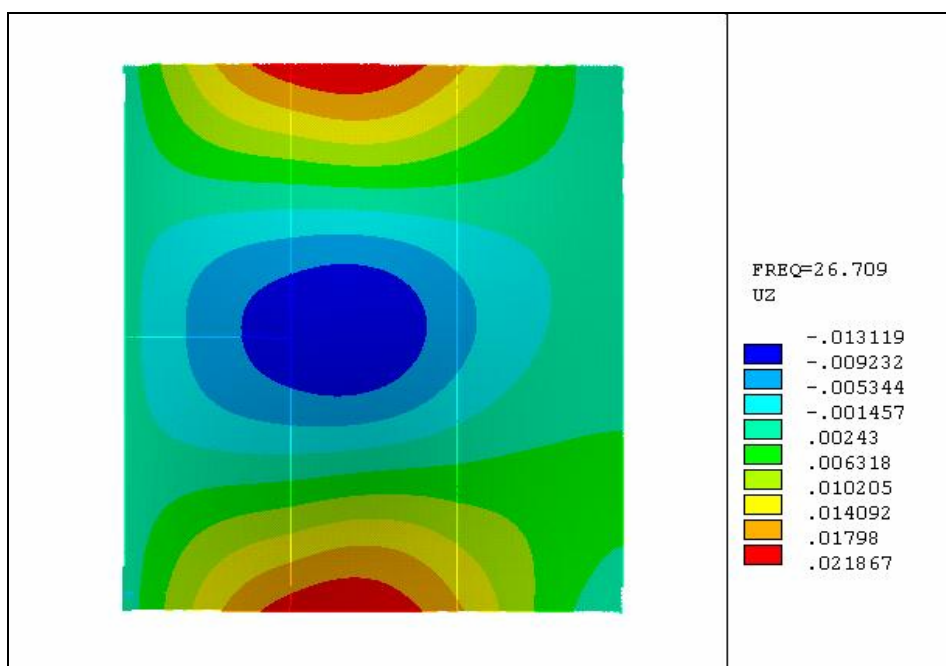


FIGURA 60 - 6º modo de vibração da Estrutura 1 a 26,71Hz

As frequências relativas aos 6 primeiros modos de vibração da estrutura são 6,59Hz, 7,05Hz, 13,39Hz, 16,79Hz, 21,33Hz e 26,71Hz. Após analisar as figuras que mostram os modos de vibração da estrutura ensaiada, conclui-se que o 4º modo, correspondente à frequência de 16,79Hz, não deve ter sido captado pelos acelerômetros em função da sua localização, pois os pontos 1 e 2 se situam em região próxima ao nó desse modo de vibração. Pelo mesmo motivo, o 3º modo de vibração deve ter sido captado com pouca intensidade no ponto 1.

Em relação ao 1º e 2º modos de vibração, com a proximidade dos valores das frequências relativas a esses modos, nos espectros de frequência obtidos, a energia oriunda destes modos ficou concentrada em um mesmo pico de frequência.

5.2 – Estrutura 2

5.2.1 – Descrição Geral

A Estrutura 2 consiste em um ginásio poliesportivo. Esse ginásio, feito em concreto armado, possui uma laje em concreto com forma de aço incorporada (FIG.35) com chapa de aço de 0,8mm e altura total de 150mm, sobre a qual foram realizados os ensaios sobre vigas mistas apoiadas em consoles de concreto. Sobre essa laje, prevê-se a realização de eventos esportivos, concertos musicais e ginástica aeróbica. Na TAB.11 estão descritas as características das vigas utilizadas, em milímetros, e a FIG. 61 mostra o esquema estrutural da laje ensaiada.

Deve-se ressaltar que as vigas de V1 a V4 possuem uma redução da altura do perfil em suas extremidades. Nos seus 9,274m centrais as vigas possuem as dimensões descritas na TAB.11, e nas extremidades sua altura se reduz até chegar a 460mm nos apoios.

TABELA 11 – Dimensões dos perfis metálicos da Estrutura 2

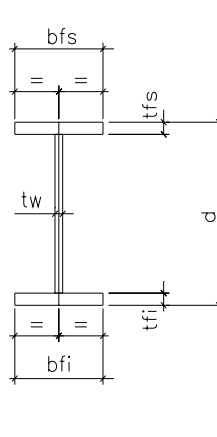


TABELA DE PERFIS I								
MARCA	TIPO	d	bfs	bfi	tfs	tfi	tw	OBS.
V1	PS	400	350	350	12.50	31.50	12.50	
V2	PS	400	350	350	12.50	31.50	12.50	
V3	PS	400	350	350	12.50	31.50	12.50	
V4	PS	400	350	350	12.50	31.50	12.50	
V5	PS	700	200	200	8.00	9.50	8.00	
V6	PS	600	150	150	6.30	6.30	6.30	
V7	PS	600	150	150	6.30	6.30	6.30	
V8	PS	250	130	130	6.30	6.30	4.75	
V9	PS	400	200	200	6.30	8.00	4.75	
V10	PS	400	150	150	6.30	6.30	4.75	
V11	PS	400	150	150	6.30	6.30	4.75	
V12	PS	250	130	130	6.30	6.30	4.75	

Os perfis metálicos são de aço com limite de escoamento de 300MPa. O concreto da laje possui resistência característica à compressão maior ou igual a 20MPa, e o seu módulo de elasticidade foi estimado em 23479MPa, conforme as recomendações da NBR-6118. As ligações entre as vigas são rotuladas.

A estrutura não apresentava nenhum tipo de acabamento ou revestimento no piso.

Foram captadas as respostas estruturais nos pontos 1 e 2, conforme indicado na FIG. 61, para excitações produzidas pela máquina com massa excêntrica descrita no Capítulo 3.

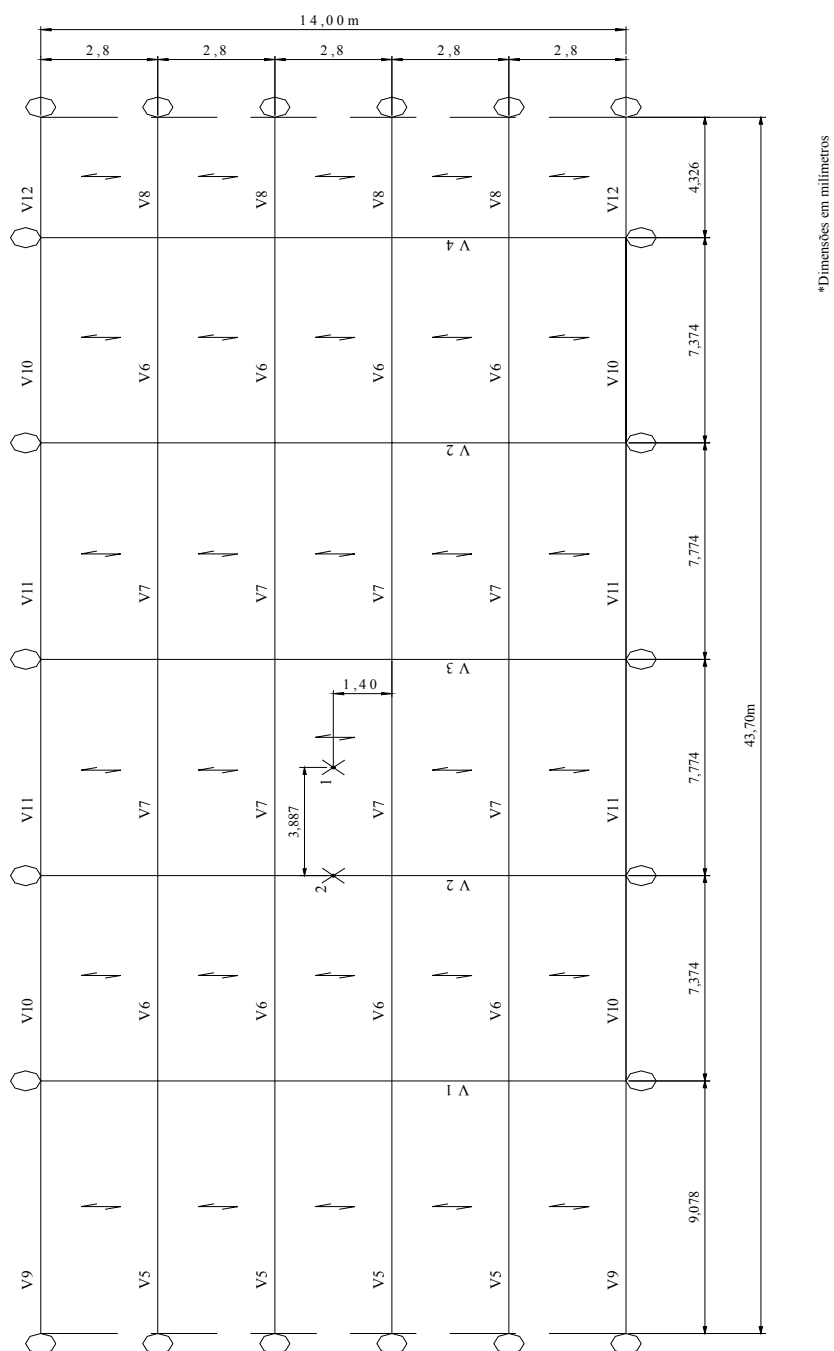


FIGURA 61 – Esquema da Estrutura 2

5.2.2 – Resultados Experimentais

Para este ensaio foram utilizados o sistema de aquisição Linx e o acelerômetro uniaxial produzido pela *Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltd.* Foram captadas 6 amostras da resposta estrutural no ponto 1, e três amostras no ponto 2. Durante cada evento, a captação do sinal foi iniciada com a máquina rotatória desligada. Em seguida a máquina foi ligada até adquirir uma frequência de rotação constante de aproximadamente 4,75Hz e algum tempo depois foi desligada. A captação do sinal perdurou até o instante em que se julgou não haver mais a influência da vibração induzida pela máquina sobre a estrutura.

O uso da máquina rotativa para excitar dinamicamente o piso foi determinada pela rigidez dos elementos estruturais que compunham o piso. Com a sua utilização esperava-se garantir níveis de aceleração condizentes com a sensibilidade dos acelerômetros utilizados.

Durante o ensaio, por causa da irregularidade do piso sobre o qual a máquina foi assentada, da grandeza da força produzida pela máquina em relação ao seu peso próprio e da impossibilidade de se fixar a máquina na estrutura ensaiada, percebeu-se a ocorrência de impactos da máquina sobre o piso, não se podendo, portanto, estimar com precisão o valor da força máxima atuante.

Os arquivos armazenados no microcomputador foram convertidos para código ASCII e manipulados utilizando o programa MATLAB versão 6.1 . Foram gerados, então, os espectros de frequência dos sinais. As FIG. 62 e 63 mostram gráficos representativos desses espectros para os pontos 1 e 2.

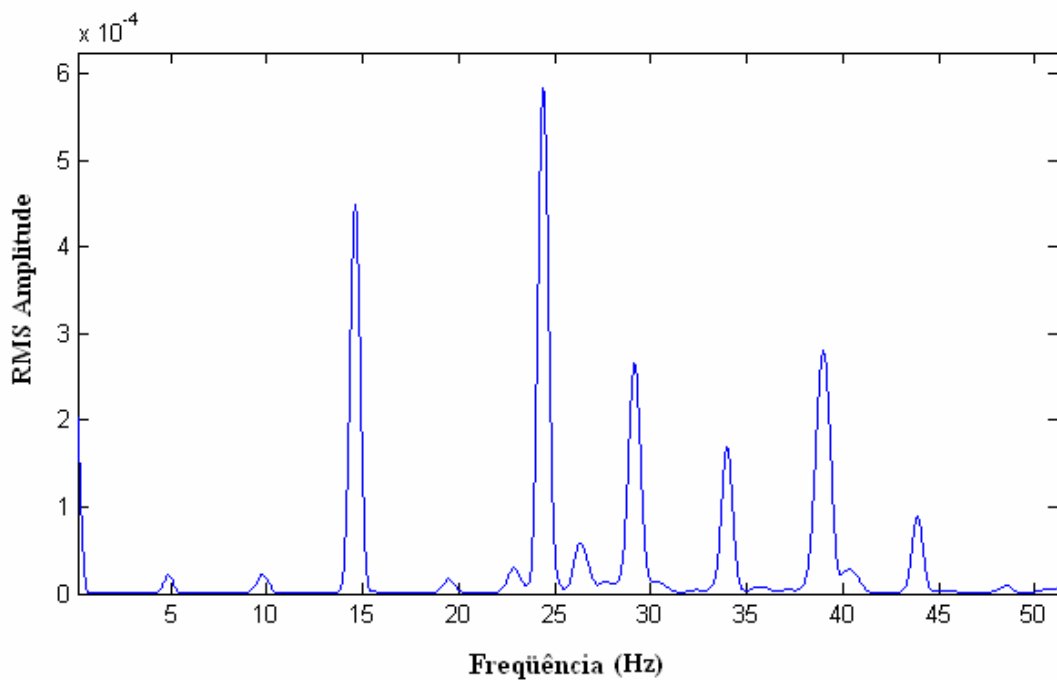


FIGURA 62 – Espectro de frequência – Ponto 1

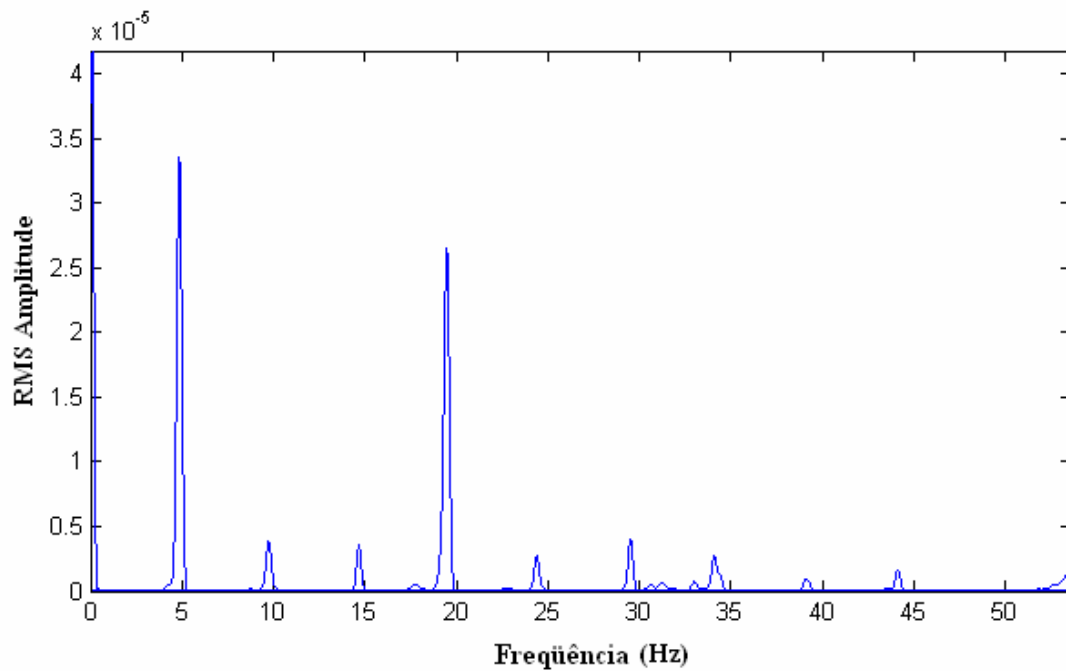


FIGURA 63 – Espectro de frequência – Ponto 2

Por meio do espectro determinam-se as componentes de frequência da resposta estrutural. Para este estudo, porém, serão consideradas apenas as componentes das quatro primeiras frequências, que são aproximadamente 9,75Hz, 14,5Hz, 19,5Hz e 24,5Hz. O acúmulo de energia em torno da frequência de 4,90Hz apontado nos espectros será descartada, já que após a análise numérica que será apresentada posteriormente, esta não é uma frequência natural da estrutura e sim uma vibração induzida pela frequência de excitação da máquina. Com isso a análise do amortecimento para esta frequência não tem nenhum significado físico.

Para obter dos sinais originais, as componentes destas frequências, foram projetados filtros cujos parâmetros da curva de atenuação são dados na TAB.12.

TABELA 12 - Propriedades dos filtros digitais projetados para a Estrutura 2

	Fs	Fstop1	Fpass1	Fpass2	Fstop2	Dstop1	Dstop2	Dpass
Filtro 1 (9,75Hz)	200	8,0	9,0	10,5	11,5	0,01	0,01	0,001
Filtro 2 (14,5Hz)	200	12,5	13,5	15,5	16,5	0,01	0,01	0,001
Filtro 3 (19,5Hz)	200	17,5	18,5	20,5	21,5	0,01	0,01	0,001
Filtro 4 (24,5Hz)	200	22,5	23,5	25,5	26,5	0,01	0,01	0,001

A FIG.64 mostra um exemplo de um dos sinais coletados no ponto 1 para o ensaio descrito.

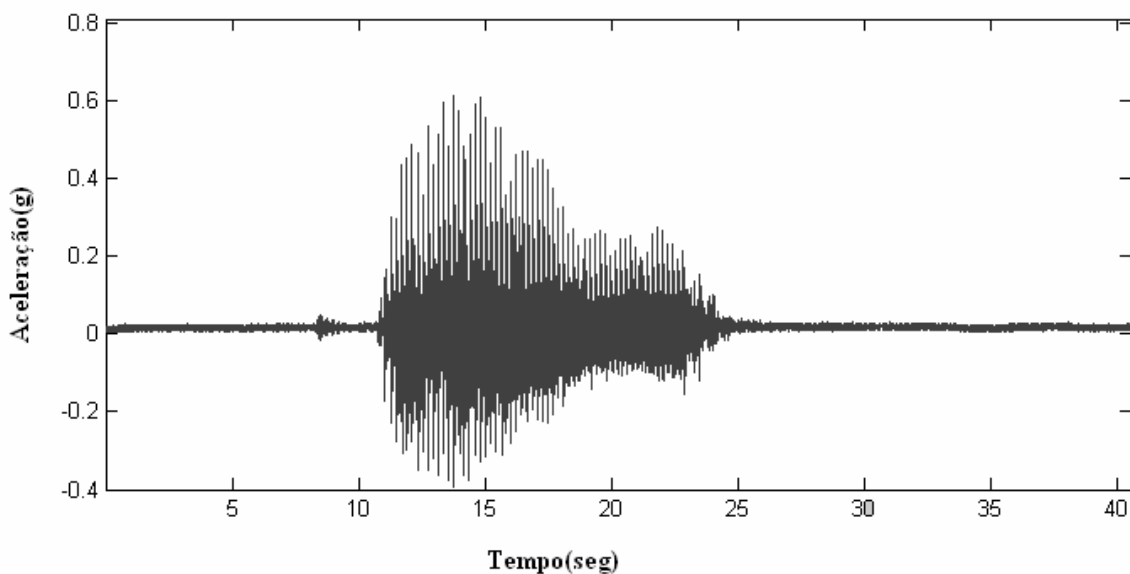


FIGURA 64 - Sinal original captado no ponto 1

Sobre esse sinal foram aplicados os filtros descritos na TAB.12 e obtidos os gráficos no tempo de cada componente, conforme as FIG. 65 a 67.

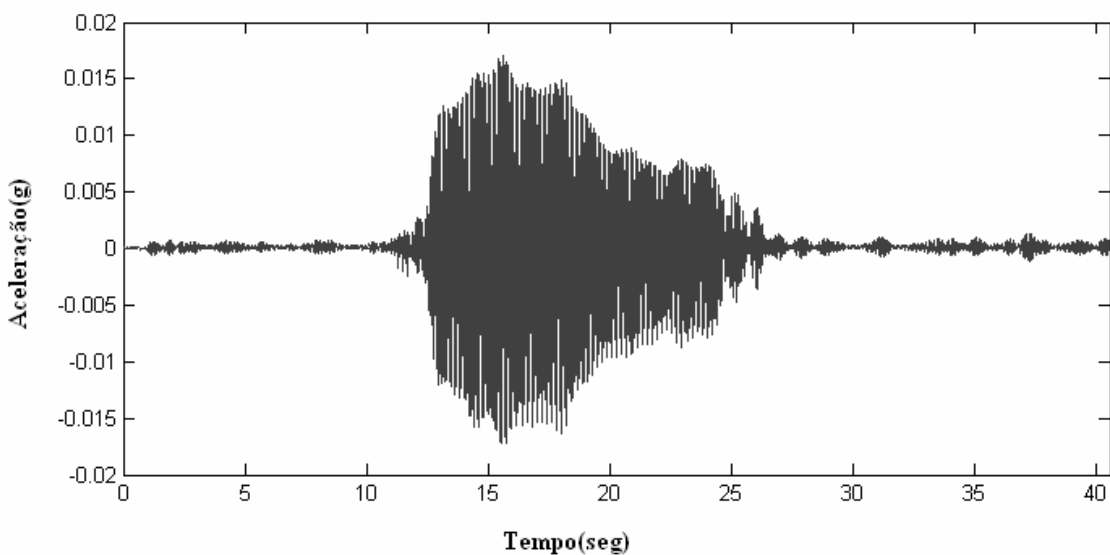


FIGURA 65 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 1 (9,75 Hz)

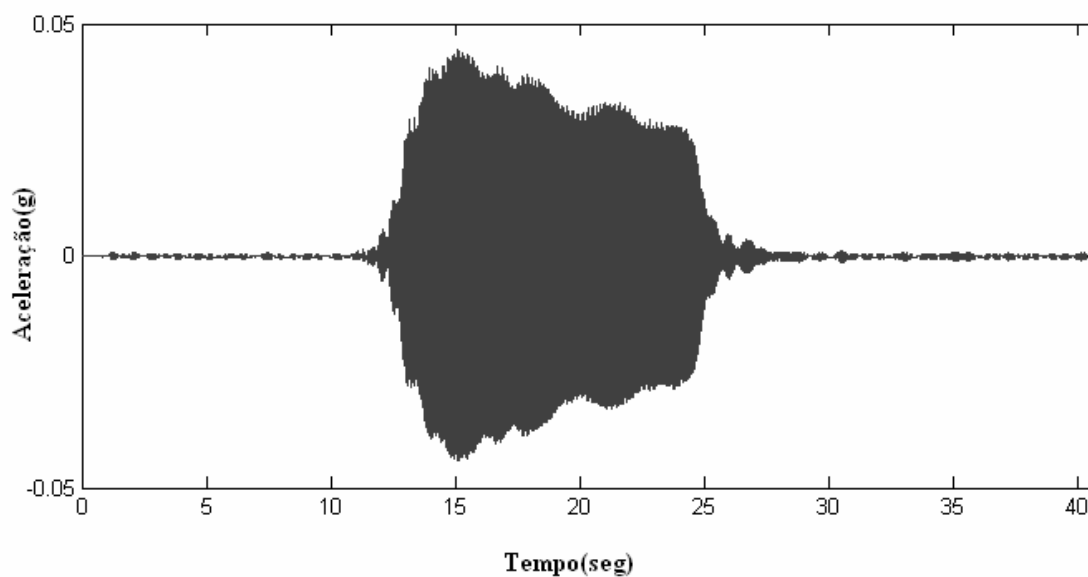


FIGURA 66 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 2 (14,5 Hz)

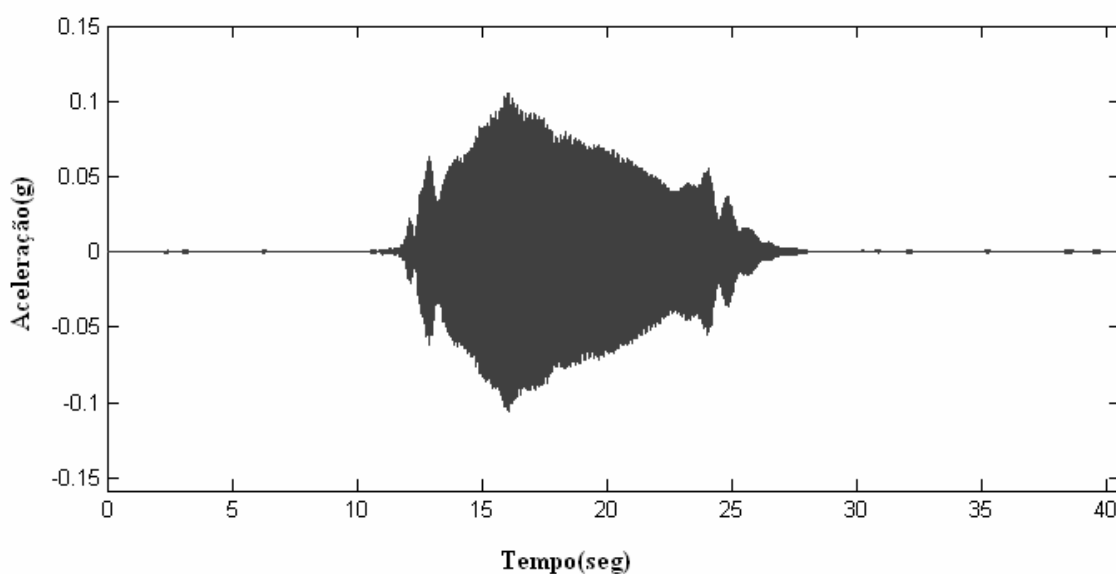


FIGURA 67 - Gráfico do sinal filtrado pelo Filtro 4 (24,5 Hz)

Para cada um dos sinais filtrados, foram obtidos os picos máximos da curva de decaimento, conforme as FIG. 68 a 70.

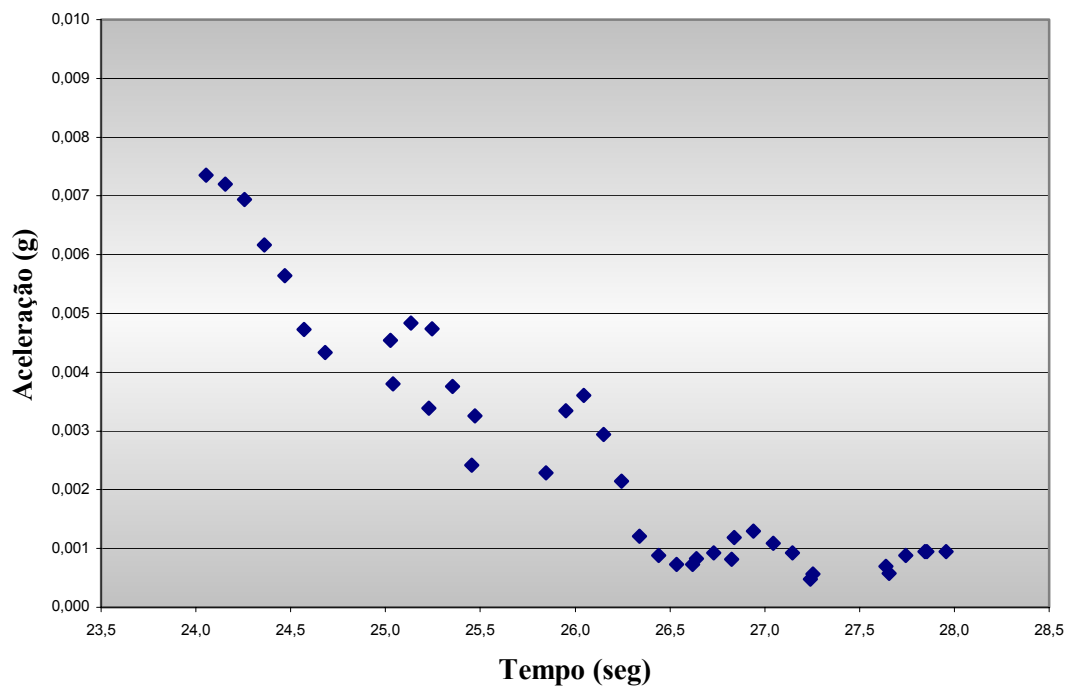


FIGURA 68 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 1 (9,75Hz)

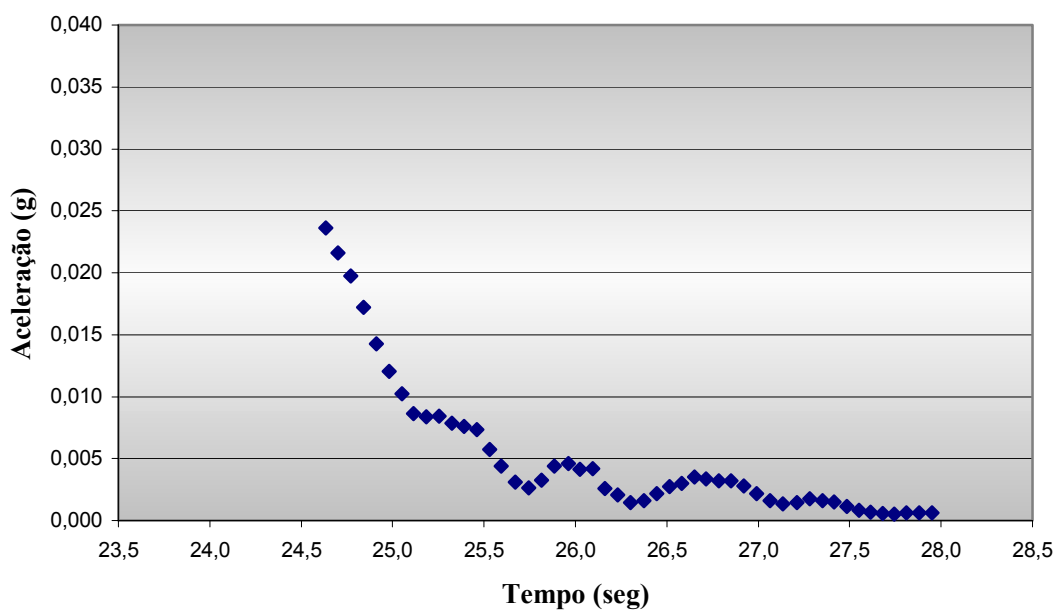


FIGURA 69 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 2 (14,5 Hz)

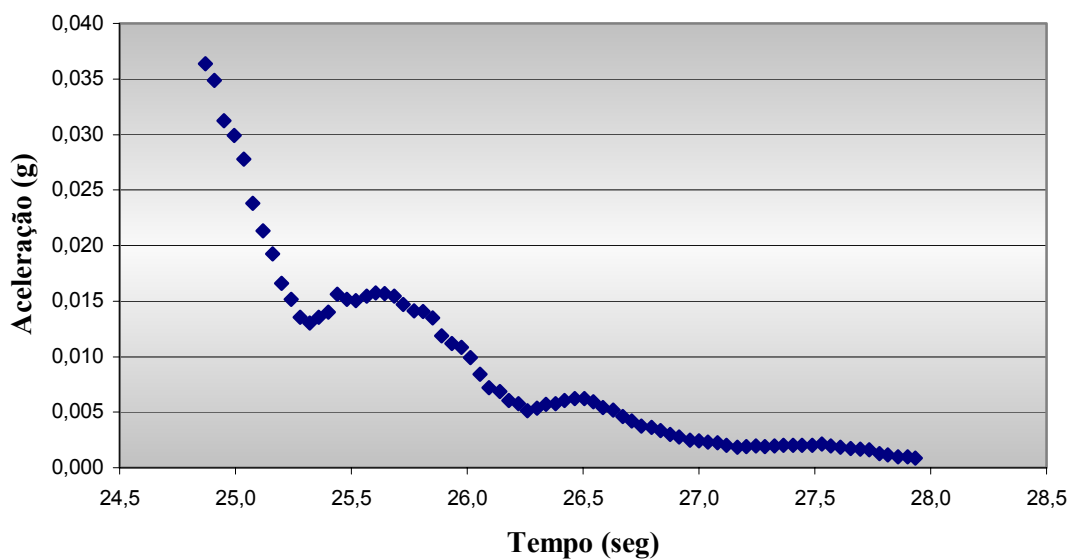


FIGURA 70 - Curva de decaimento do sinal filtrado pelo Filtro 4 (24,5 Hz)

Por meio dos gráficos dos picos máximos da curva de decaimento dos sinais filtrados, foram obtidos os parâmetros de amortecimento, utilizando o ajuste de curva. Essas curvas são apresentadas nas FIG. 71 a 73.

As demais técnicas não foram utilizadas por causa da forma irregular do sinal filtrado, o que acarretou resultados muito distantes um dos outros.

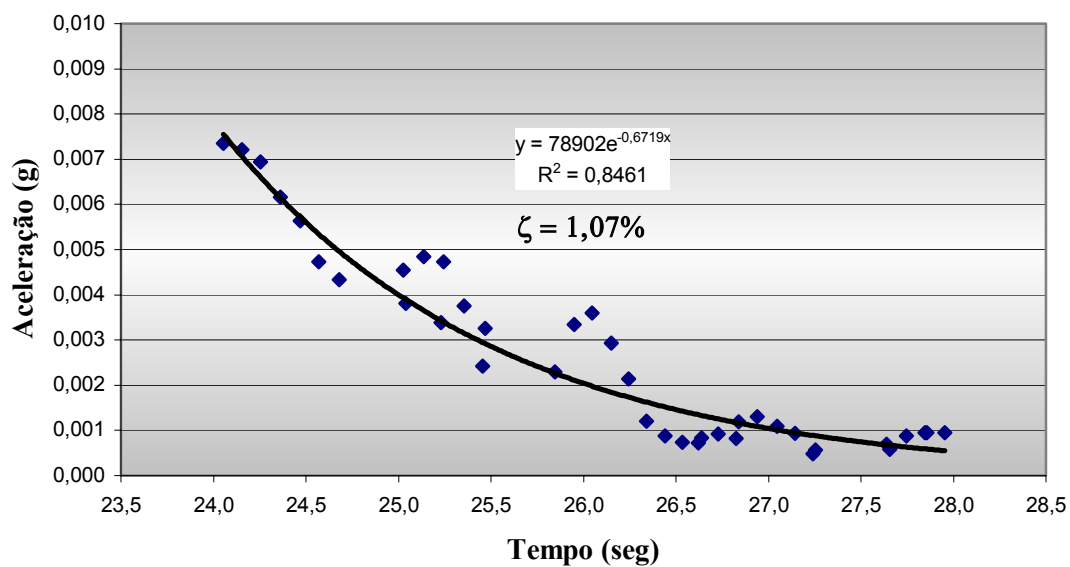


FIGURA 71 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 1 (9,75Hz)

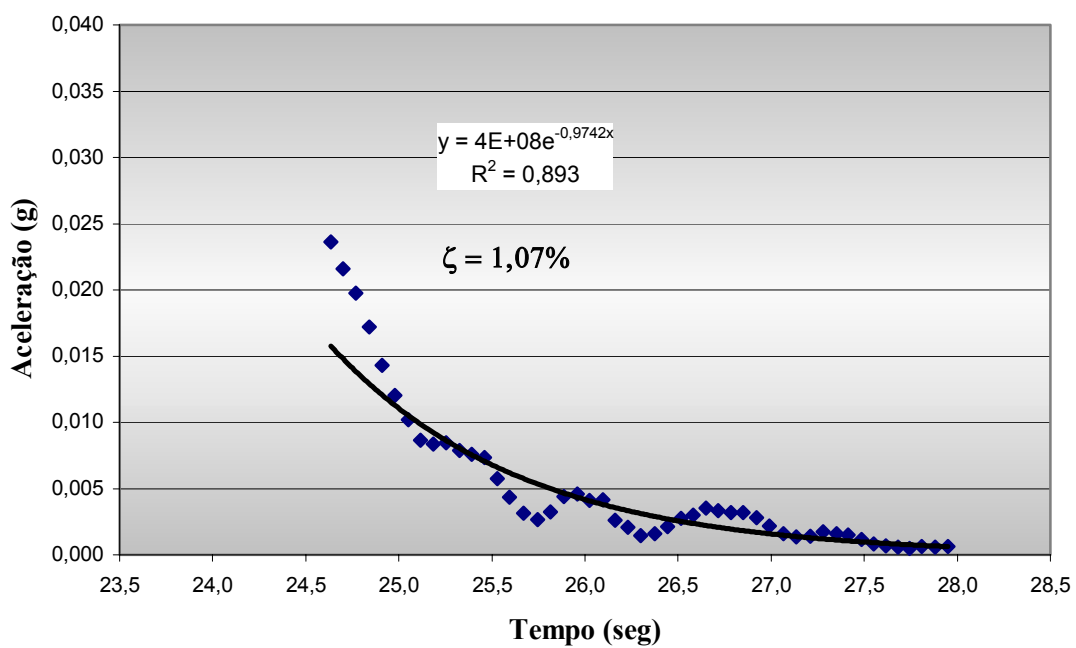


FIGURA 72 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 2 (14,5 Hz)

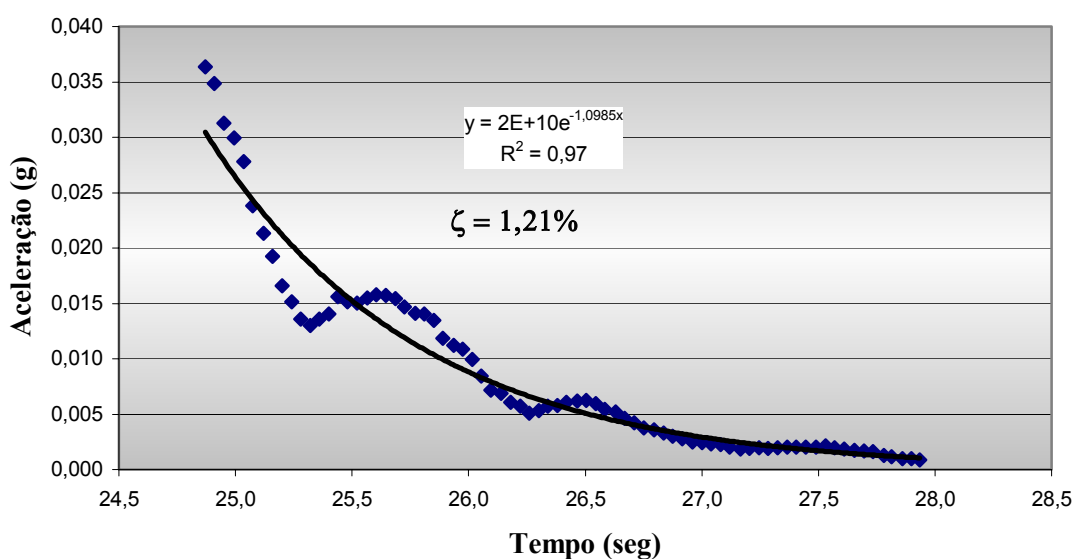


FIGURA 73 - Ajuste da curva exponencial para o sinal filtrado pelo Filtro 4 (24,5Hz)

Para todas as demais amostras coletadas nos ensaios, foram aplicados os mesmos métodos descritos acima.

As TAB. 13 e 14 mostram os resultados obtidos para as demais amostras.

TABELA 13 – Parâmetros de amortecimento obtidos pelo ajuste da curva exponencial para o sinal captado no ponto 1

Amostra	Filtro 1 (9,75 Hz)	Filtro 2 (14,5 Hz)	Filtro 3 (19,5 Hz)	Filtro 4 (24,5 Hz)
1	1,07%	1,07%	-	1,21%
2	1,43%	1,30%	-	0,85%
3	1,08%	1,64%	-	0,83%
4	-	0,85%	-	-
5	0,67%	0,81%	-	0,51%
6	1,77%	1,08%	1,18%	0,51%
Média	1,20%	1,12%	1,18%	0,78%

TABELA 14 – Parâmetros de amortecimento obtidos pelo ajuste da curva exponencial para o sinal captado no ponto 2

Amostra	Filtro 1 (9,75 Hz)	Filtro 2 (14,5 Hz)	Filtro 3 (19,5 Hz)	Filtro 4 (24,5 Hz)
1	-	-	0,38%	0,67%
2	2,70%	0,89%	-	0,91%
3	-	0,75%	0,37%	0,45%
Média	2,70%	0,82%	0,37%	0,68%

Após a análise dos valores dos fatores de amortecimento calculados, pode-se considerar, no ponto 1, que, para a frequência de 9,75Hz, obteve-se de 0,67 a 1,43% do amortecimento crítico; para a frequência de 14,5Hz, obteve-se de 0,81 a 1,64% do amortecimento crítico; para a frequência de 19,5Hz, aproximadamente 1,18%; e para a frequência de 24,5Hz, o fator de amortecimento variou de 0,51 a 1,21% do amortecimento crítico.

No ponto 2, obtiveram-se valores médios para o fator de amortecimento de 2,70%, para a frequência de 9,75Hz; 0,82% do amortecimento crítico para a frequência de 14,5Hz, 0,37% do amortecimento crítico para a frequência de 19,5Hz, e 0,68% para a frequência de 24,5Hz.

5.2.3 – Simulação Numérica e Resultados

Com a finalidade de comparar os resultados experimentais com os resultados numéricos, a laje foi simulada numericamente através de programa computacional em elementos finitos. No modelo utilizado, as vigas do piso são simuladas por elementos de barra tridimensionais. A laje é simulada por elementos de placa; todavia, por simplificação, foi considerado apenas o concreto situado acima do topo das nervuras. Os deslocamentos e rotações das lajes e vigas são compatibilizados através de conexões rígidas de *off-set*. Considerou-se que a estrutura trabalha em regime elástico linear.

Após a realização da análise modal da qual os modos de vibração da estrutura foram obtidos, analisaram-se os resultados e são apresentados, nas FIG. 74 a 76, alguns dos modos captados pelos acelerômetros colocados nos pontos 1 e 2. As frequências associadas a esses modos são 10,91Hz, 14,60Hz e 21,70Hz.

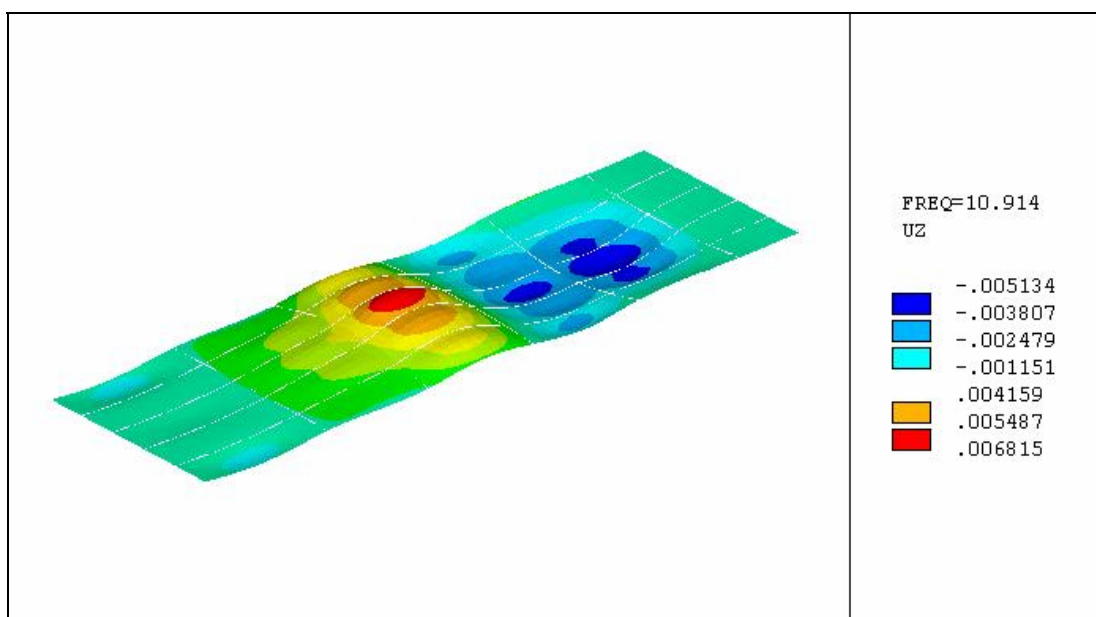


FIGURA 74 – Modo de vibração da Estrutura 2 associado à frequência de 10,91Hz

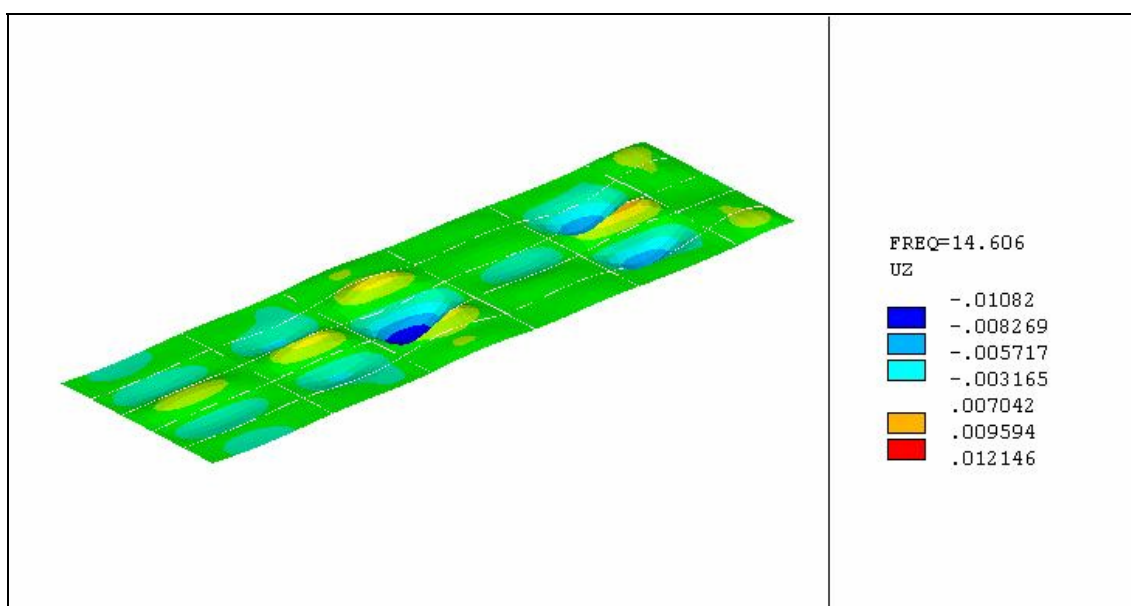


FIGURA 75 – Modo de vibração da Estrutura 2 associado à frequência de 14,60Hz

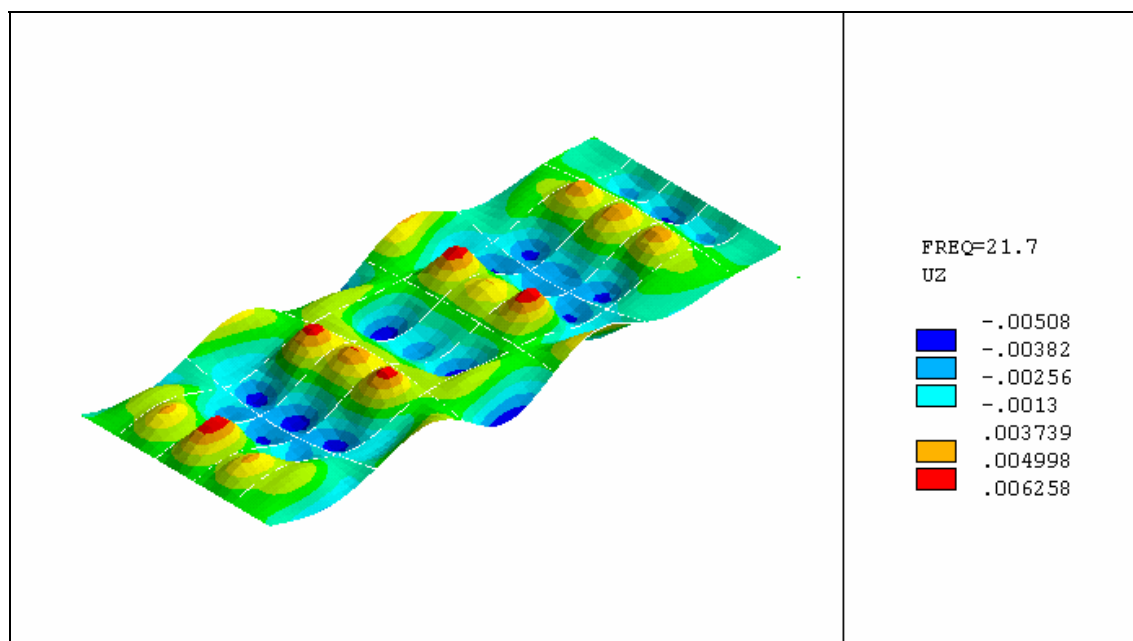


FIGURA 76 – Modo de vibração da Estrutura 2 associado à frequência de 21,70Hz

Com essa análise, conclui-se que a resposta captada pelos acelerômetros, na frequência aproximada de 4,9Hz (FIG. 62 e 63) não corresponde a uma frequência natural do piso e, sim, uma resposta da estrutura à excitação causada pela máquina nessa mesma frequência.

5.3 – Estrutura 3

5.3.1 – Descrição Geral

A Estrutura 3 é uma edificação de um pavimento sustentada por um sistema de vigas metálicas apoiadas sobre dezesseis colunas também metálicas. Essa edificação é um protótipo em escala real, que foi utilizado em estudos do comportamento de um dos tipos de sistema de piso esbelto.

O sistema de piso esbelto se caracteriza pelo embutimento da laje de concreto na alma do perfil metálico, gerando uma série de vantagens, tais como ganho de altura útil nos andares da edificação, melhoria da estética, além de possuir considerável resistência em situação de incêndio.

Nessa estrutura também utilizou-se forma de aço. A laje, cuja face superior nivela-se com a mesa superior da viga metálica, foi apoiada sobre a mesa inferior das vigas metálicas, ligando-se a elas por meio de conectores do tipo pino com cabeça (FIG.77).

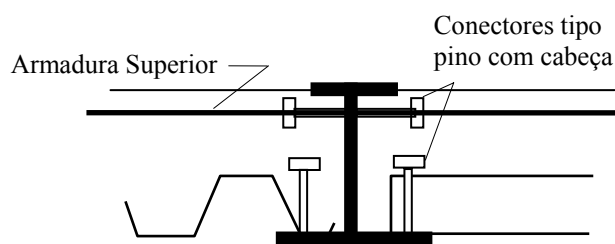


FIGURA 77 - Detalhe típico da ligação laje-viga metálica do sistema de piso esbelto

A forma de aço age em conjunto com o concreto nas regiões de momento positivo. A continuidade da laje, nas regiões de momento negativo, é garantida pela presença de armaduras contínuas através da alma do perfil metálico.

A resistência característica à compressão do concreto utilizado na laje é de 20MPa, e o valor considerado para o módulo de elasticidade foi de 32.000 MPa, calculado segundo recomendações da norma NBR 6118.

O limite de escoamento do aço das vigas metálicas é de 300MPa, com módulo de elasticidade de 205.000MPa.

A FIG.78 mostra o esquema estrutural da laje ensaiada. As setas indicam o sentido das nervuras da forma de aço.

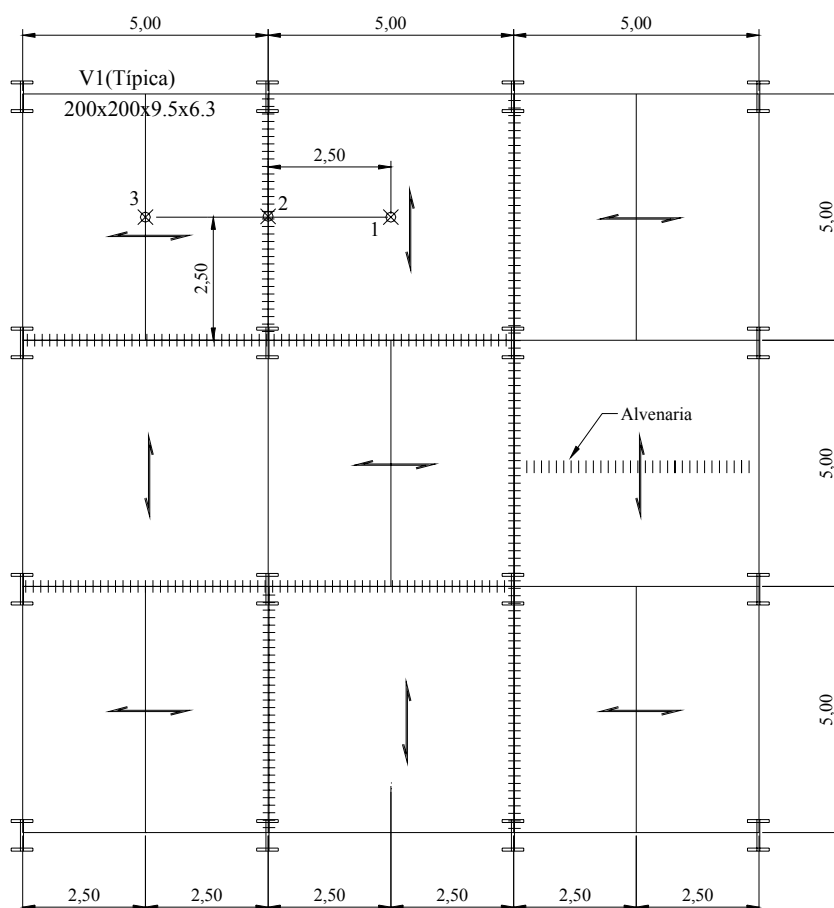


FIGURA 78 – Esquema da Estrutura 3

O piso dessa edificação não possui qualquer tipo de acabamento. Abaixo dele, porém, existem alvenarias constituídas de tijolo cerâmico, que vão do chão ao teto, indicadas na FIG. 78.

5.3.2 – Resultados Experimentais

Para a realização dos ensaios na Estrutura 3, utilizou-se o analisador de frequência HP3569A e o acelerômetro uniaxial PCB. Além do ensaio *heel drop*, a estrutura foi excitada através do salto de uma pessoa sobre o piso. Os sinais foram captados a uma frequência de amostragem de 128Hz. Para cada ponto ensaiado captaram-se, em média, duas amostras de cada tipo de ensaio. Além destes ensaios, a resposta da estrutura foi captada sem que ela sofresse qualquer tipo de excitação dinâmica. A FIG. 79 mostra o gráfico do sinal captado.

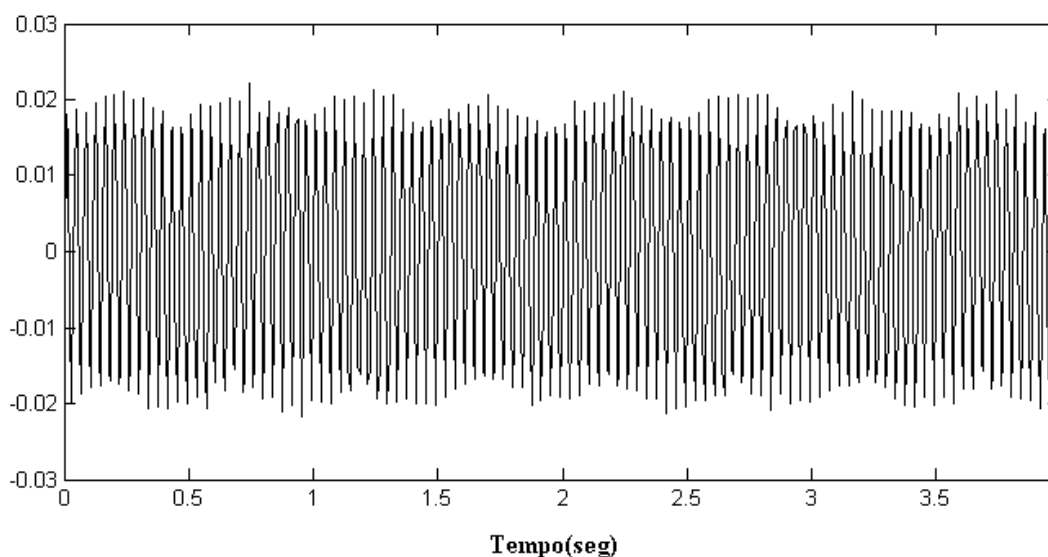


FIGURA 79 - Gráfico do ruído captado na Estrutura 3

Representando o espectro de frequência do sinal captado mediante utilização de 512 pontos para computar a FFT e de 128 janelas de *hanning*, detectou-se que o sinal ocorria a uma frequência de aproximadamente 26Hz, conforme mostrado na FIG. 83 . Uma das prováveis causas desse ruído é a proximidade da estrutura de galpões

industriais que abrigavam máquinas, as quais podem ter induzido essa excitação, que foi transmitida à estrutura através do solo e seus elementos de fundação.

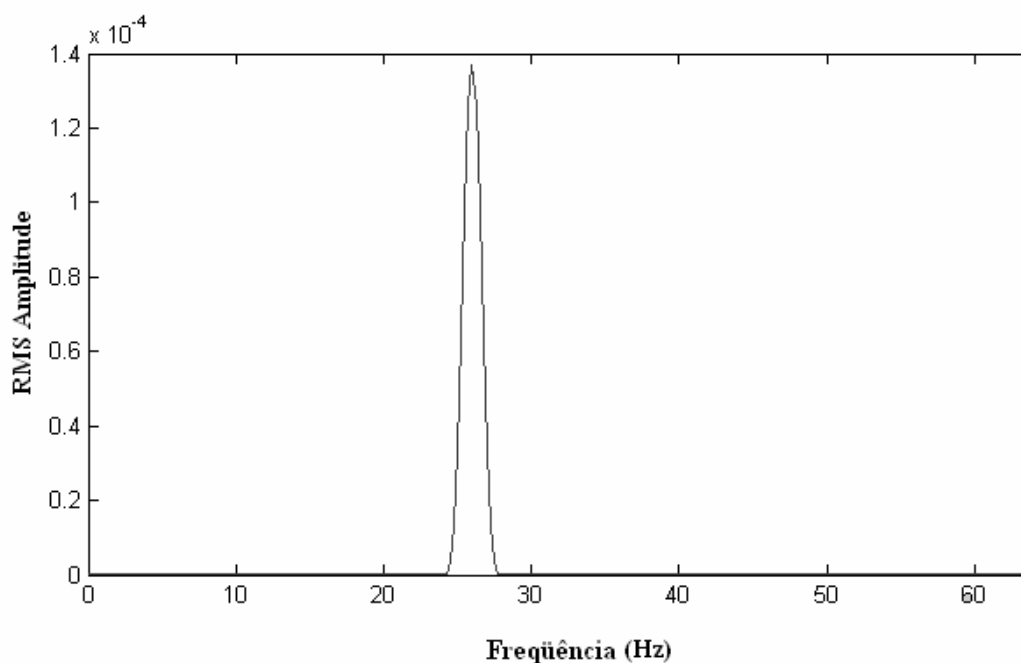


FIGURA 80 - Espectro de frequência do ruído captado na Estrutura 3

Os arquivos armazenados no microcomputador foram convertidos para código ASCII e manipulados através do programa MATLAB versão 6.1. Foram gerados, então, os espectros de frequência desses sinais. As FIG. 81 a 83 mostram gráficos representativos desses espectros para cada ponto ensaiado.

Através dos espectros determinaram-se as componentes de frequência da resposta estrutural, que foram aproximadamente 9,75, 14,0 e 26Hz. Pode-se constatar, realmente, a presença do ruído a 26Hz em todos os sinais. A componente da resposta na frequência de 14Hz foi detectada em todos os pontos, ao passo que a de 9,75Hz foi captada apenas no ponto 1.

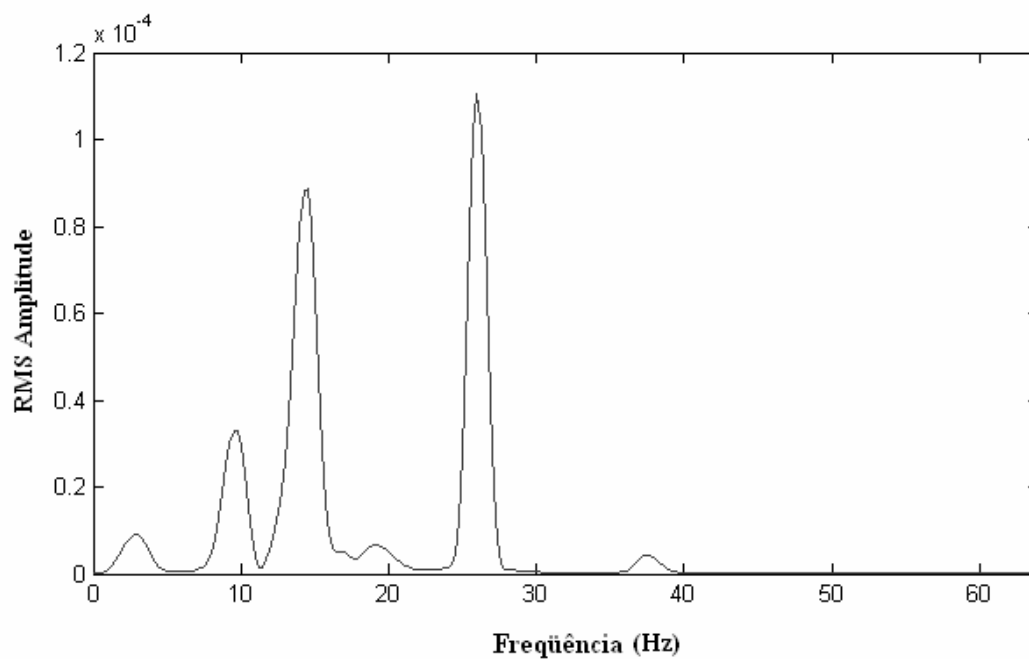


FIGURA 81 - Espectro de frequência do sinal captado no ponto 1

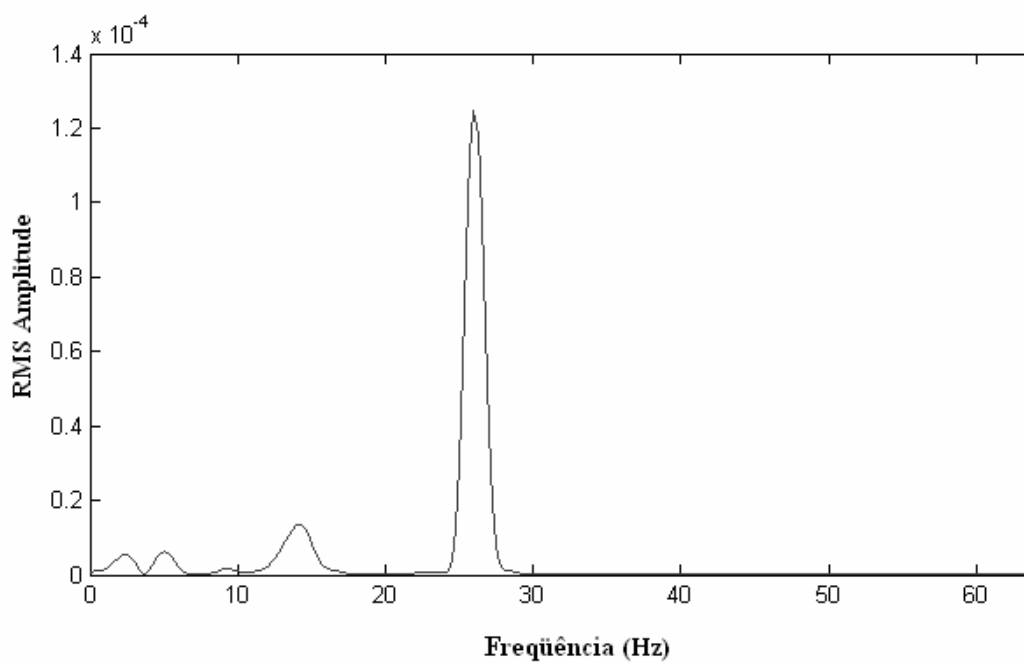


FIGURA 82 - Espectro de frequência do sinal captado no ponto 2

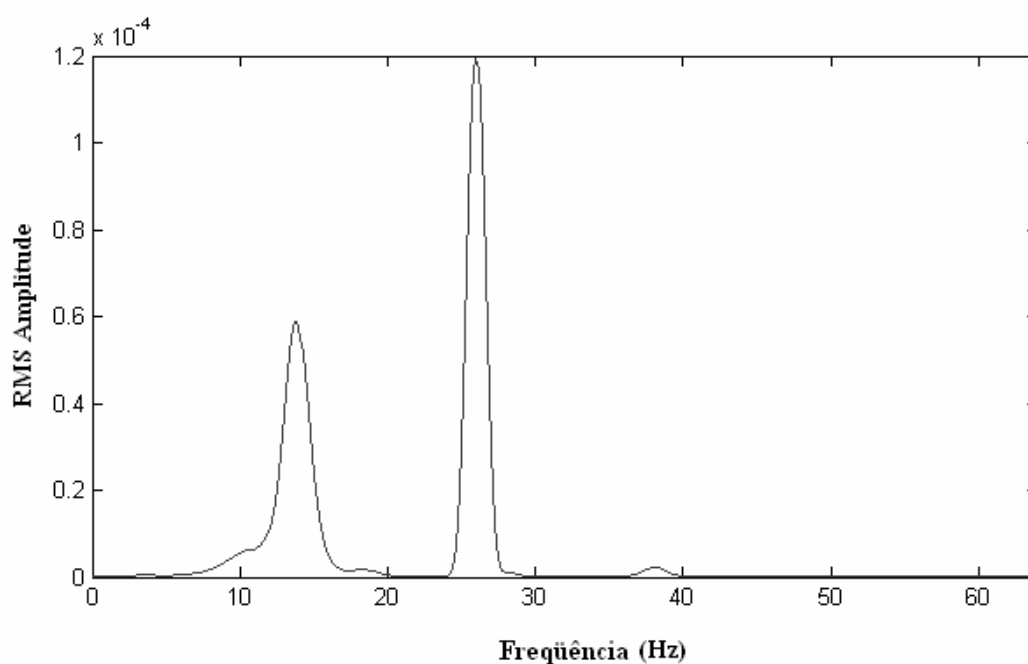


FIGURA 83 - Espectro de frequência do sinal captado no ponto 3

Baseando-se nos espectros apresentados, foram projetados filtros passa-faixa cujas características são apresentadas na TAB. 15.

TABELA 15 - Propriedades dos filtros digitais projetados para a Estrutura 3

	F_s	F_{stop1}	F_{pass1}	F_{pass2}	F_{stop2}	D_{stop1}	D_{stop2}	D_{pass}
Filtro 1 (9,75Hz)	128	7,0	8,5	10,5	12,0	0,1	0,1	0,1
Filtro 2 (14,0Hz)	128	11,5	13,0	15,0	16,5	0,1	0,1	0,1
Filtro 3 (26,0Hz)	128	23,0	25,0	27,0	29,0	0,1	0,1	0,1

Sobre os sinais armazenados foram aplicados os filtros descritos na TAB. 15 e obtidos os gráficos no tempo de cada componente de frequência. As FIG. 84 a 87 mostram estes gráficos para a resposta captada no ponto 1, quando a estrutura foi excitada pelo pulso de uma pessoa sobre o piso.

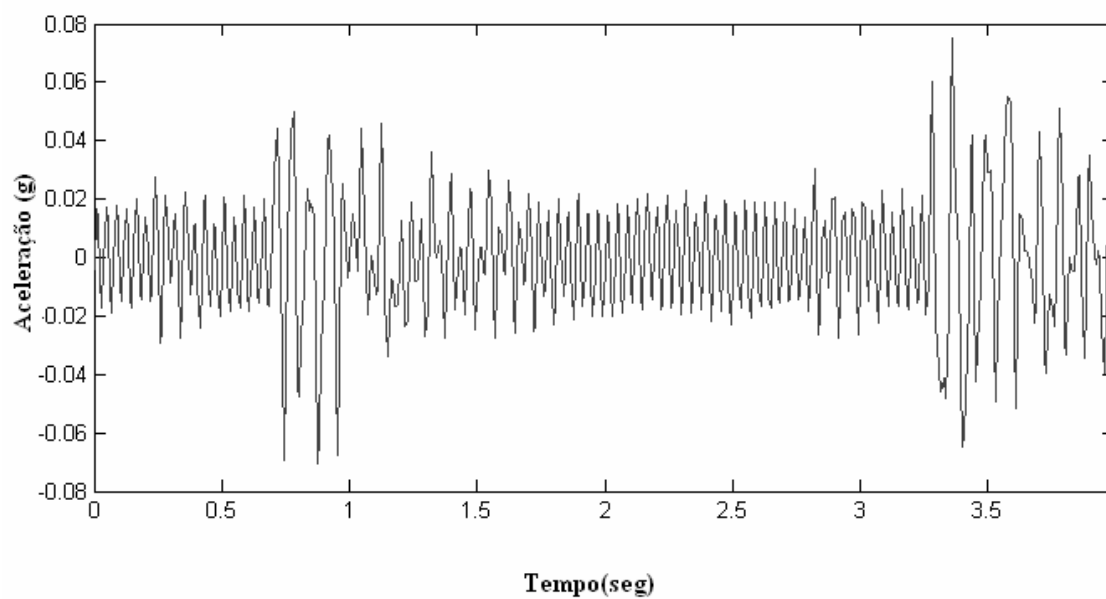


FIGURA 84 - Gráfico no tempo de uma amostra captada no ponto 1

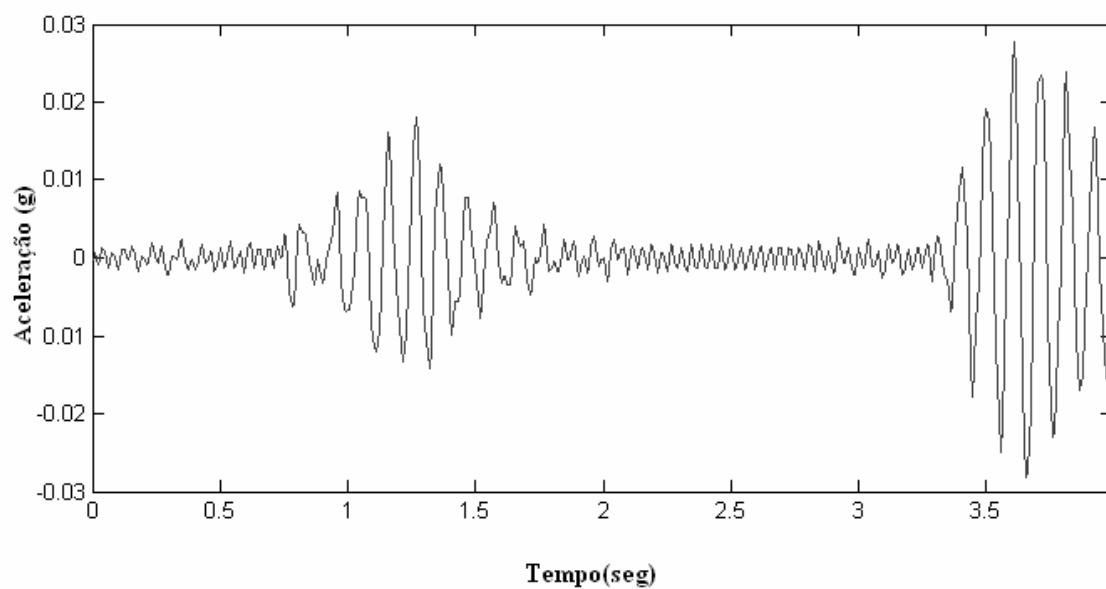


FIGURA 85 - Resposta no tempo do ponto 1 filtrada pelo Filtro 1 (9,75 Hz)

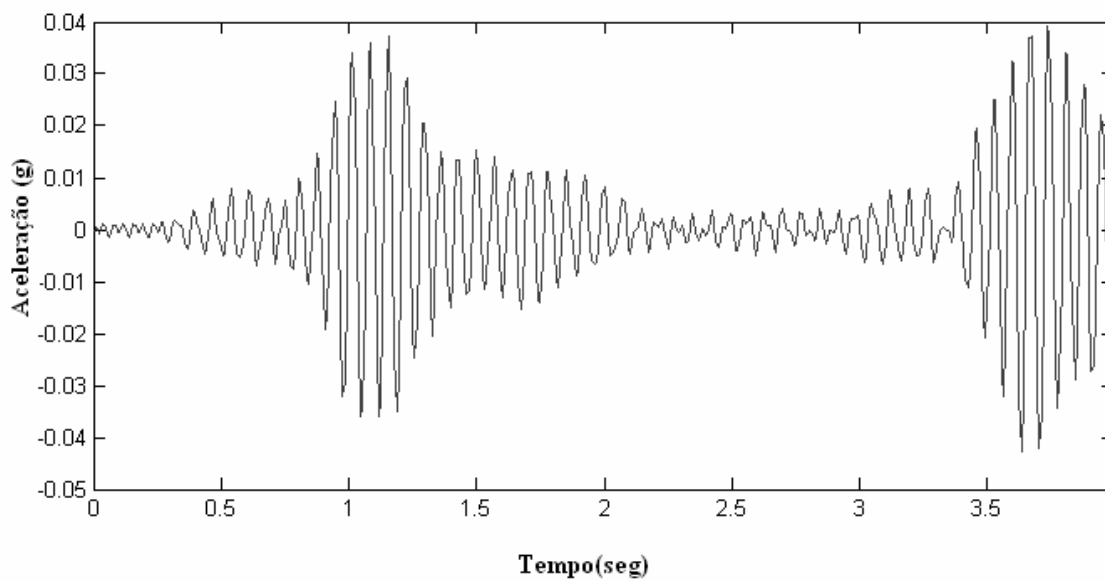


FIGURA 86 - Resposta no tempo do ponto 1 filtrada pelo Filtro 2 (14,0 Hz)

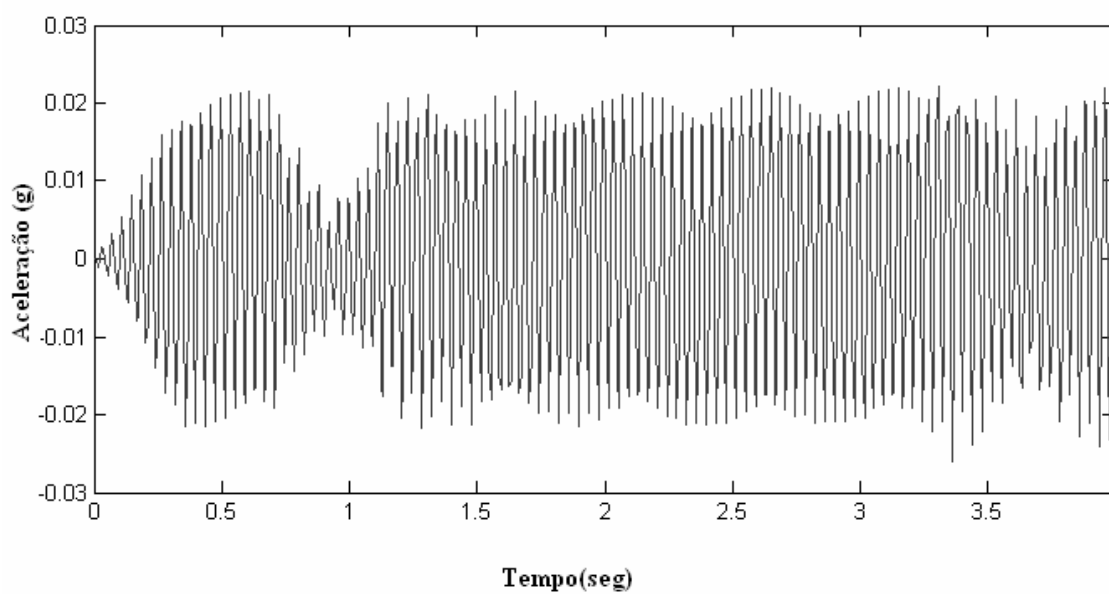


FIGURA 87 - Resposta no tempo do ponto 1 filtrada pelo Filtro 3 (26,0 Hz)

A presença de duas curvas de decaimento nos gráficos das figuras 84 a 86 deve-se ao fato de terem sido realizados dois impactos na estrutura durante a captação dos sinais.

Nota-se que a resposta no tempo do sinal filtrado pelo Filtro 3 não apresenta decaimento em sua amplitude, confirmando, então, a presença de um ruído provocado provavelmente por alguma excitação contínua a uma frequência aproximada de 26Hz.

Para os sinais filtrados foram obtidos os picos máximos da sua curva de decaimento (FIG. 88 e 89).

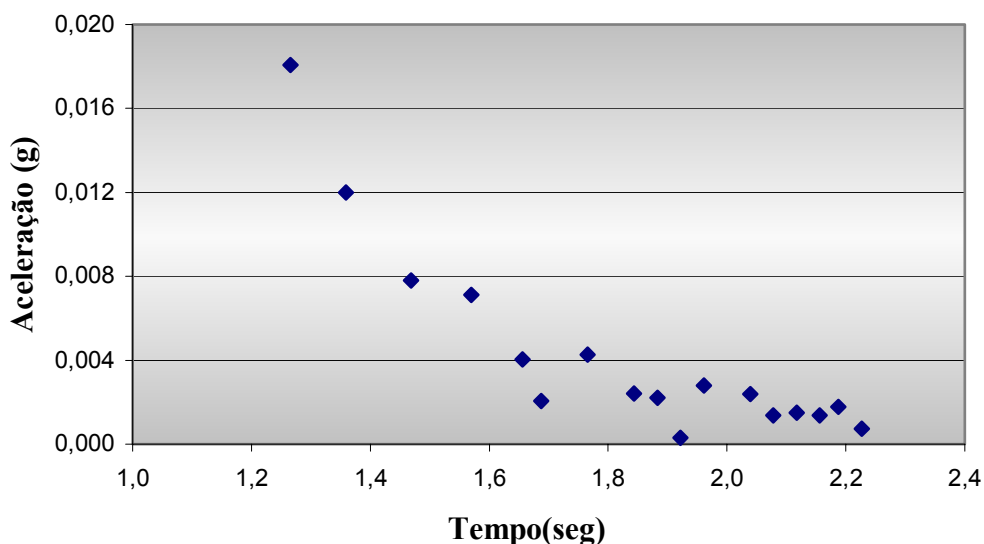


FIGURA 88 - Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 1 (9,75 Hz)

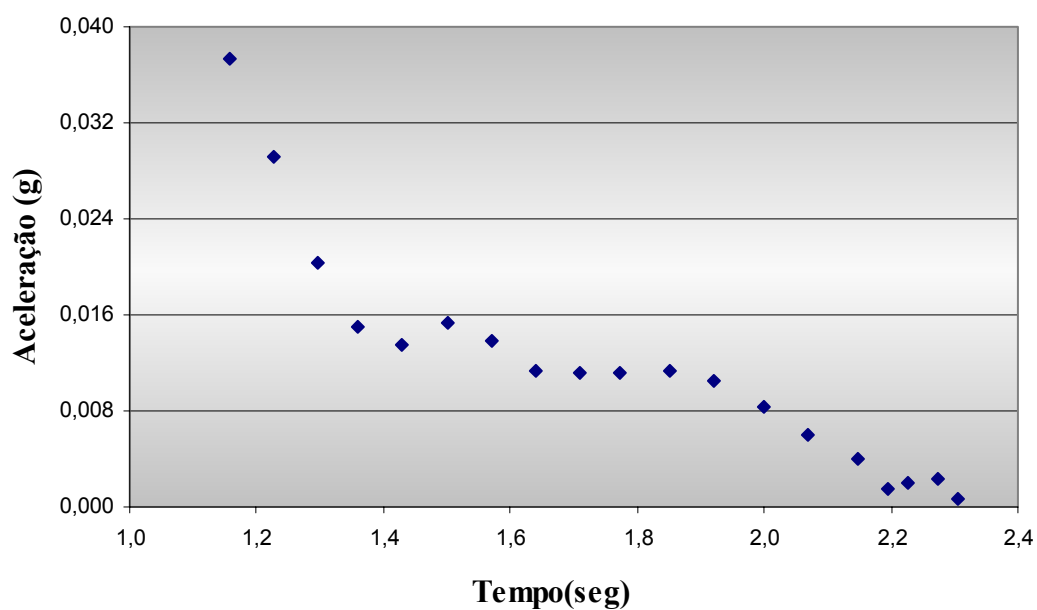


FIGURA 89 - Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 2 (14,0 Hz)

Com o gráfico dos picos máximos da curva de decaimento dos sinais filtrados foram obtidos os parâmetros de amortecimento, utilizando os métodos do decaimento logarítmico, com os valores apresentados na TAB. 16, e de ajuste de curva, cujos gráficos e resultados são apresentados nas FIG. 90 e 91.

TABELA 16 - Fator de Amortecimento pelo Decaimento Logarítmico para o ponto 1

Tempo (seg)	Filtro1 (9,75 Hz) Amplitude	Fator Amort.	Tempo (seg)	Filtro 2 (14,0 Hz) Amplitude	Fator Amort.
1,2656250	0,01807044	6,52%	1,1562500	0,03726820	3,89%
1,3593750	0,01199745	6,85%	1,2265625	0,02918527	5,70%
1,4687500	0,00780525	1,50%	1,2968750	0,02040046	4,94%
1,5703125	0,00710300	9,03%	1,3593750	0,01496132	1,66%
1,6562500	0,00402838	-0,96%	1,4296875	0,01347821	-2,02%
1,7656250	0,00427765	9,07%	1,5000000	0,01529895	1,54%
1,8437500	0,00242086	1,39%	1,5703125	0,01389174	3,13%
1,8828125	0,00221871	-3,67%	1,6406250	0,01141329	0,27%
1,9609375	0,00279375	2,57%	1,7109375	0,01122029	-0,03%
2,0390625	0,00237726	8,62%	1,7734375	0,01124361	-0,14%
2,0781250	0,00138336	-1,36%	1,8515625	0,01133990	1,22%
2,1171875	0,00150685	1,39%	1,9218750	0,01050176	3,76%
2,1562500	0,00138127	-4,14%	2,0000000	0,00829453	5,19%
2,1875000	0,00179122	14,07%	2,0703125	0,00598602	6,61%
2,3437500	0,00162371	2,26%	2,1484375	0,00395140	15,72%
			2,1953125	0,00147206	-5,20%
	Média		2,2265625	0,00203998	-1,84%
			2,2734375	0,00229036	2,61%

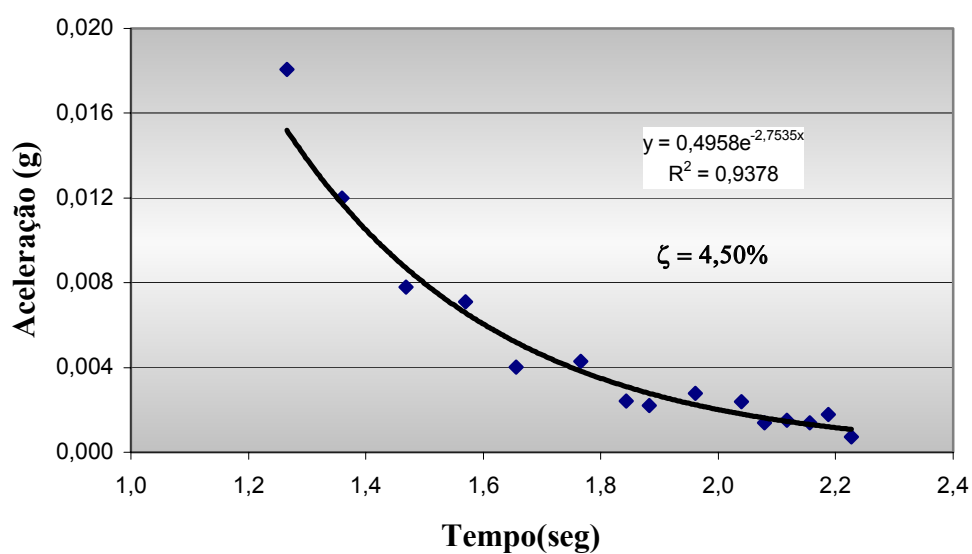


FIGURA 90 - Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 1 (9,75 Hz)

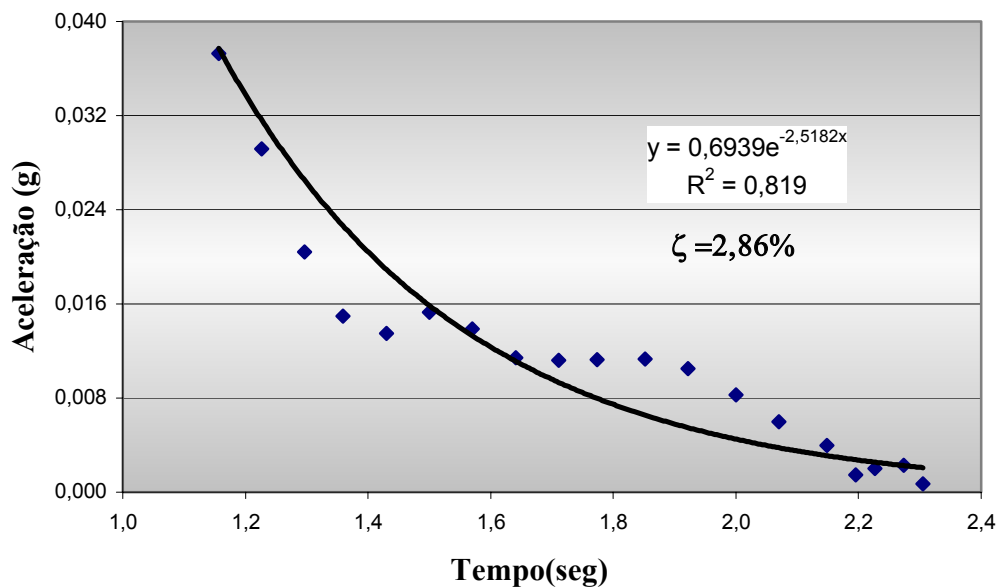


FIGURA 91 - Picos máximos da resposta do ponto 1 filtrada pelo Filtro 2 (14,0 Hz)

Pelo método da meia amplitude obteve-se um fator de amortecimento de 4,53% do amortecimento crítico para o sinal filtrado pelo Filtro 1 (9,75Hz), e de 5,42% para o sinal filtrado pelo Filtro 2 (14,0Hz).

Para todas as demais amostras coletadas nos ensaios foram aplicados os mesmos métodos descritos acima. Como já dito anteriormente, pelo fato da componente da resposta na frequência de 9,75Hz ter sido detectada somente no espectro dos sinais obtidos no ponto 1, não utilizamos o Filtro 1 nos sinais obtidos nos pontos 2 e 3. As TAB. 17 e 18 mostram os resultados para as demais amostras nestes pontos.

TABELA 17 - Valores do Fator de Amortecimento para o ponto 2

Ponto 2				
FILTRO 2 (14,0 Hz)	Amostra	Decaimento	Ajuste	Meia-Amp.
	1	6,93%	6,06%	6,83%
	2	6,91%	6,64%	5,42%
	3	7,00%	7,47%	7,90%
	Média	6,95%	6,72%	6,72%

TABELA 18 - Valores do Fator de Amortecimento para o ponto 3

Ponto 3				
FILTRO 2 (14,0 Hz)	Amostra	Decaimento	Ajuste	Meia-Amp.
	1	2,76%	2,23%	4,27%
	2	4,19%	4,42%	5,45%
	3	3,22%	3,77%	3,47%
	4	3,73%	3,98%	3,59%
	5	3,58%	3,52%	3,05%
	6	3,22%	3,26%	3,24%
	Média	3,45%	3,53%	3,85%

5.3.3 – Simulação Numérica e Resultados

Na simulação numérica da Estrutura 3, a laje foi modelada com o uso do elemento de placa SHELL63, e as vigas metálicas foram modeladas mediante utilização do elemento de barra tridimensional BEAM24.

Para melhor representar a variação de inércia da laje resultante da presença de nervuras, foram utilizados elementos de placa de diferentes espessuras.

Em virtude das condições de simetria que a estrutura apresenta, apenas um quarto da estrutura foi modelada em programa computacional. Foram impostas restrições necessárias para garantir essas condições. A FIG. 95 mostra um esquema do modelo construído.

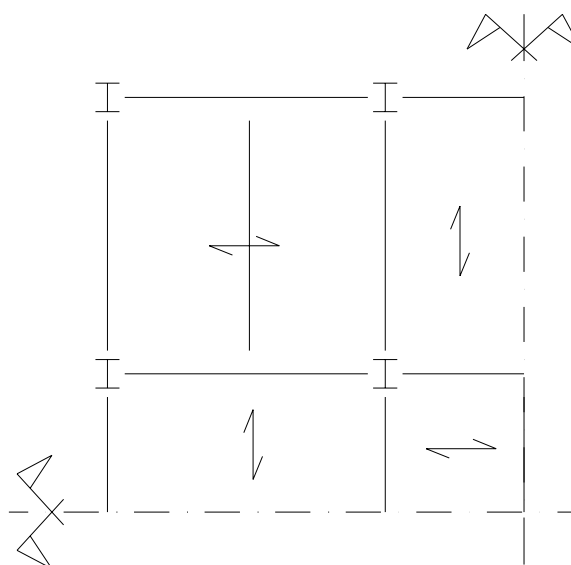


FIGURA 92 - Esquema do modelo numérico da Estrutura 3

Através da análise modal foram extraídos os 3 primeiros modos de vibração de estrutura modelada. As FIG. 93 a 95 mostram esses modos e as respectivas freqüências que são 10,18Hz, 10,74Hz e 13,02Hz. Essas freqüências têm valores bem próximos dos obtidos experimentalmente, que foram aproximadamente 9,75Hz e 14,0Hz.

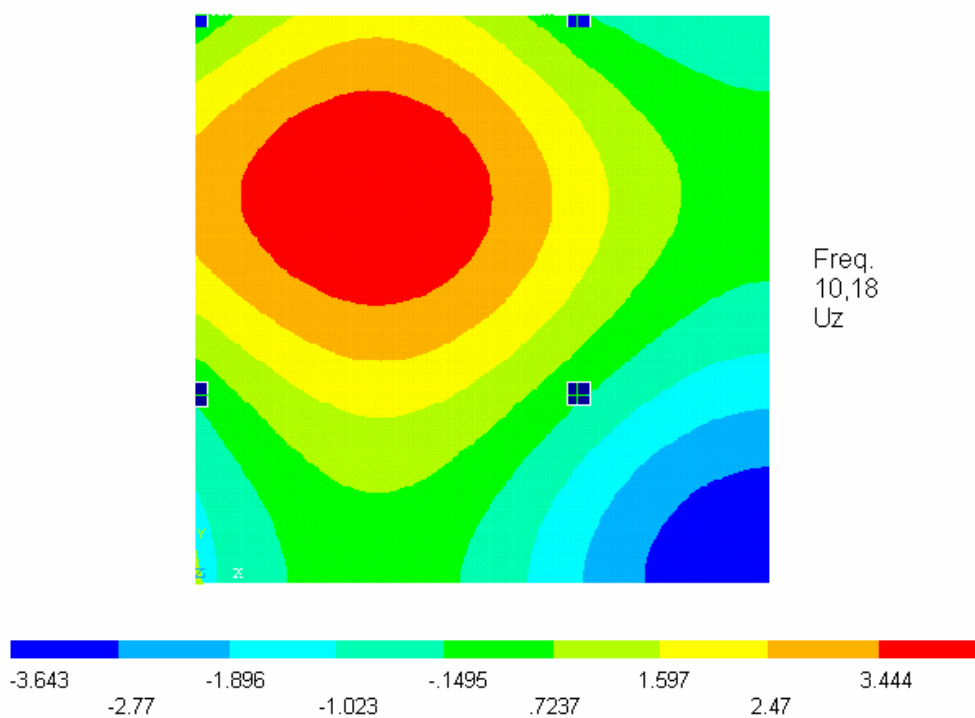


FIGURA 93 - Modo de vibração associado à frequência de 10,18Hz

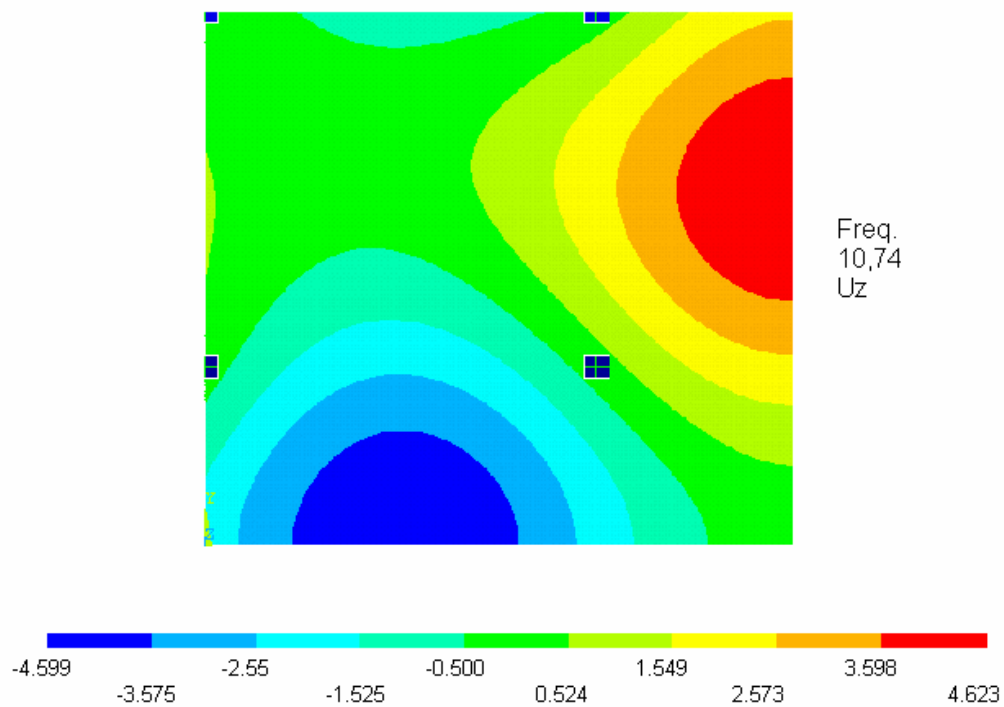


FIGURA 94 - Modo de vibração associado à frequência de 10,74Hz

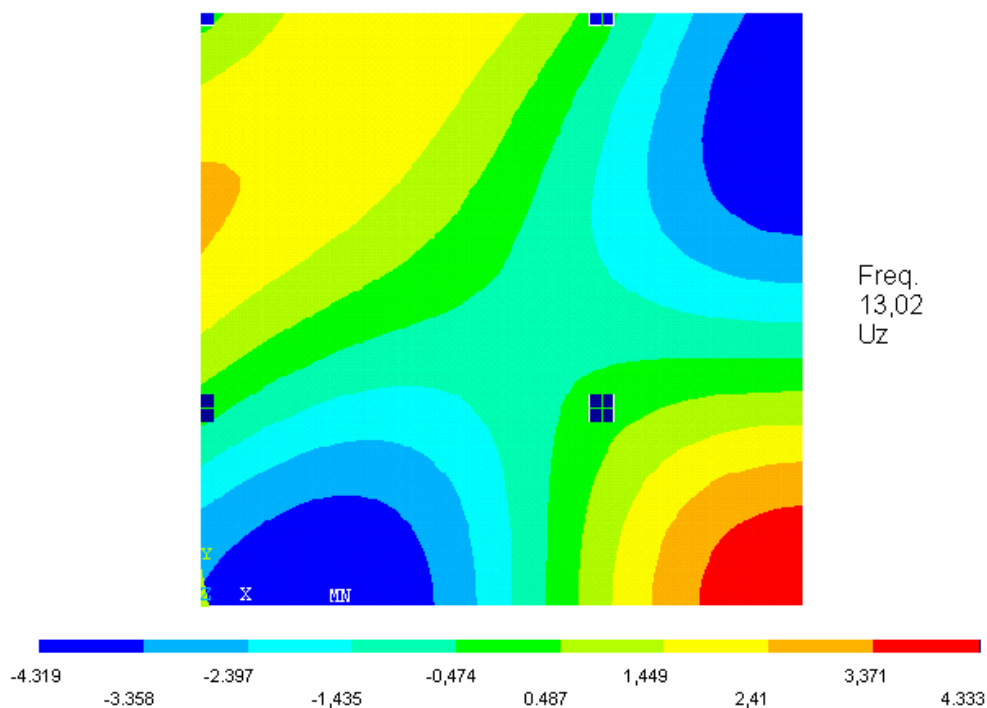


FIGURA 95 - Modo de vibração associado à frequência de 13,02Hz

Após analisar as FIG. 93 a 95, concluiu-se que, por causa da proximidade dos valores das frequências relativas ao 1º e 2º modos de vibração, a energia oriunda desses modos concentrou-se em um mesmo pico de frequência nos espectros obtidos experimentalmente.

6

CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como objetivo principal a obtenção de valores de fatores de amortecimento para pisos mistos aço-concreto, mediante a realização de ensaios dinâmicos em algumas estruturas, e discutir a metodologia aplicada na análise experimental.

Propôs-se, ainda, utilizar algumas das propriedades dinâmicas obtidas por meio desses ensaios para adequar as simulações numéricas das estruturas.

Os valores de fatores de amortecimento obtidos por meio dos diversos métodos descritos no Capítulo 3 foram condizentes com aqueles esperados para as estruturas ensaiadas. Os valores, de um modo geral, variaram de 0,5 a 4% do amortecimento crítico. Eles estão dentro de uma faixa de valores recomendados em várias referências bibliográficas e usualmente praticados na engenharia estrutural.

Apenas em um dos pontos da Estrutura 3 encontraram-se valores em torno de 7% do amortecimento estrutural. A ocorrência deste valor discrepante dos demais deveu-se, provavelmente, à existência de uma alvenaria logo abaixo do ponto no qual o sinal foi medido, que exerceu a função de um apoio contínuo na estrutura. Com isso, o sinal captado ficou prejudicado e o fator de amortecimento obtido da análise deste sinal não deve ser considerado.

Seria importante um estudo mais aprofundado sobre a influência de componentes não estruturais nas propriedades dinâmicas em pisos mistos. Para isso, pode-se obter, experimentalmente, os valores dos fatores de amortecimento de um piso para várias fases de uma construção: somente a estrutura, estrutura com alvenarias, estrutura com alvenarias e revestimentos nos pisos e edificação acabada.

Dos métodos experimentais utilizados para obtenção do fator de amortecimento, o método do Ajuste de Curva mostrou-se mais confiável para o tipo de sinal captado. Após o tratamento dos sinais, não foi possível obter as componentes da resposta estrutural para frequências discretas, mas, sim, para uma faixa de frequências. Com isso, a curva logarítmica de decaimento do sinal muitas vezes não ficava bem caracterizada, prejudicando a precisão dos resultados obtidos por meio dos outros métodos.

O método da Meia Amplitude foi o mais sensível às imperfeições do sinal captado. Ao escolher um ponto para estabelecer o respectivo ponto de meia amplitude, foram necessárias aproximações, já que a resposta obtida em um ensaio dinâmico é um sinal discreto. Para o tipo de sinais captados durante os ensaios, isso prejudicou significativamente a precisão dos resultados obtidos.

Entretanto, para sinais onde a curva de decaimento é bem caracterizada, os métodos do Decaimento Logarítmico e da Meia Amplitude fornecem resultados bastante confiáveis, como foi o caso dos resultados obtidos na Estrutura 1.

Embora citado no Capítulo 3, o método da Meia Potência não foi utilizado neste estudo em razão das limitações dos mecanismos de excitação utilizados. Segundo as literaturas, esse método é o que conduz a resultados mais precisos já que, para utilizá-lo, é necessária a aplicação de um carregamento harmônico em várias frequências, sobre a estrutura, o que torna esse método menos sensível à influência de ruídos externos.

Os critérios utilizados na construção dos filtros digitais também foram bem determinados e acarretaram a obtenção de gráficos das componentes de frequência bastante satisfatórios e conforme às expectativas. A confiabilidade nos métodos

utilizados para construir esses filtros foi obtida por meio da simulação descrita no item 4.2.2. Deve-se enfatizar que a utilização dessa poderosa ferramenta foi determinante e indispensável para a obtenção dos fatores de amortecimento, merecendo atenção especial na realização de estudos futuros, principalmente, no que diz respeito ao amortecimento modal e ao tratamento de sinais de uma forma geral.

Durante os ensaios, os sinais foram coletados com várias taxas de amostragem. Após a análise dos gráficos da resposta estrutural para cada faixa de frequência estudada, constatou-se que a utilização da frequência de *Nyquist* como taxa de amostragem para coleta de dados fornece gráficos com resolução não ideal para fins de obtenção dos fatores de amortecimento pelos métodos baseados na curva de decaimento. Na prática deve-se utilizar uma frequência de amostragem no mínimo duas vezes maior que a frequência de *Nyquist*. Particularmente, para o tipo de estrutura ensaiada, uma frequência de amostragem de 200Hz é suficiente.

Embora os sinais captados tenham fornecido bons resultados para os valores dos fatores de amortecimento, faz-se necessário realizar um número maior de medições para cada ponto como também captar os sinais em mais pontos da estrutura. Com isso pode-se fazer um melhor tratamento estatístico dos dados coletados, além de obter uma compreensão melhor do comportamento dinâmico da estrutura.

Dos métodos utilizados para excitar dinamicamente as estruturas escolhidas, o ensaio de impacto, utilizando a massa de aço, foi aquele que proporcionou amostras de sinais com a curva de decaimento mais bem definida, condição essencial para se utilizar, com confiança, os três métodos experimentais de obtenção de fator de amortecimento. Se comparado com os demais ensaios, o controle desse ensaio é muito maior, podendo-se, inclusive, simular o carregamento em programas computacionais. Deve-se ressaltar que a massa utilizada nesse tipo de ensaio deve ser proporcional à rigidez da estrutura ensaiada.

O ensaio *heel drop* e o realizado com o pulo de uma pessoa sobre a laje também proporcionaram bons resultados, mas com definição do gráfico de decaimento inferior

ao obtido pelo ensaio de impacto. Como a energia envolvida nesses dois ensaios é relativamente pequena, alguns dos modos de vibração que são captados através do ensaio de impacto não são captados nesses.

A excitação provocada pela máquina rotativa com massa desbalanceada foi a que acarretou mais incertezas nas medições realizadas. Nesse mecanismo, vários fatores prejudicaram a obtenção da curva de decaimento da resposta estrutural. A impossibilidade de interromper subitamente a rotação da máquina quando desligada ocasionou o aparecimento de vários lóbulos no gráfico da resposta estrutural em função do tempo, como se pôde ver no trecho final da FIG. 67.

Com apenas uma massa desbalanceada girando a uma freqüência única, a máquina impunha uma força com valor constante, mas em todas as direções. Esse fator, aliado às irregularidades do piso, à magnitude da força produzida, da mesma ordem de grandeza do peso próprio da máquina, e a não fixação da máquina ao piso ensaiado produziram impactos contínuos da máquina sobre a estrutura ensaiada. Com esse impacto, freqüências mais altas foram excitadas, prejudicando a qualidade das componentes do sinal em freqüências mais baixas, que são as mais importantes nesse caso.

O uso da máquina tinha como objetivo conseguir uma excitação harmônica, que produzisse sobre a estrutura uma força maior, por causa da grande rigidez da estrutura ensaiada, e obter um gráfico da resposta estrutural em função da freqüência de excitação, podendo-se, então, aplicar o método da Meia Potência para obter fatores de amortecimento. Seria preciso, portanto, que a máquina pudesse variar a sua freqüência de rotação por meio de um inversor de freqüência, dispositivo que permite controlar a freqüência do motor indutor de força eletromotriz.

Com a adição desse dispositivo à máquina existente, com a diminuição da força aplicada pela máquina e com a adição de outra massa com mesma grandeza girando em sentido oposto, eliminando assim as forças horizontais induzidas sobre o piso, pode-se conseguir bons resultados de fatores de amortecimento aplicando o método da Meia

Potência. Todavia, mesmo com essas modificações, o uso da máquina não é adequado para obter a curva de decaimento da resposta estrutural.

A utilização das frequências fundamentais obtidas experimentalmente como parâmetros de ajuste dos modelos numéricos realizados foi bastante eficaz para os dois primeiros modos de vibração da estrutura. Os valores encontrados numericamente são próximos dos obtidos experimentalmente com pequenos desvios, em função principalmente da incerteza dos valores utilizados para o módulo de elasticidade do concreto. Isso influencia diretamente a rigidez do modelo e, conseqüentemente, os valores das frequências fundamentais calculadas. Para modos de vibração em frequências mais altas, a comparação se mostrou inconsistente, sendo necessária, para melhorá-la, a realização de uma análise modal experimental, utilizando-se vários acelerômetros e fazendo um cruzamento de fases dos sinais captados em vários pontos da estrutura. Para esse tipo de análise, pode-se utilizar um martelo específico para excitar a estrutura e realizar o *impact hammer test*.

Com base no que foi exposto e demonstrado, pode-se considerar que os objetivos propostos nesta dissertação foram alcançados.

Como continuação dos estudos realizados, sugere-se a análise do amortecimento para as diferentes fases de construção de uma edificação, podendo-se utilizar o método da Meia Potência para obtenção dos valores e dando um tratamento estatístico mais adequado aos sinais captados com a captação de um número maior de amostras.

Dessa forma, podem-se conseguir valores para o fator de amortecimento, que poderão ser tomados como referência em análises dinâmicas.

7

BIBLIOGRAFIA

ANSYS, 1996, *Engineering Analysis System – Theoretical Manual*, Swanson Analysis Systems Inc., Houston, E.U.A.

CARVALHO, F. W. L. et al, *Estudo Comparativo da Resposta Dinâmica em Estruturas Mistas Aço-Concreto Utilizando Diferentes Considerações para o Amortecimento*, Anais do IV Simpósio Mineiro de Mecânica Computacional, Maio, 2002, Uberlândia.

CLOUGH, R.; Penzien, J., “*Dynamics of Structures*”, McGraw-Hill, Book Co., 2a. Edição, 1975.

COOLEY, J. W. ; TUKEY, *An Algorithm for Machine Calculation Complex Fourier Series*, Mathematical Computations, v.19, pp.297-301, 1965.

CRAIG JR., R. R., *Structural Dynamics – An introduction to Computer Methods*, John Wiley & Sons, 1981.

ELLIS, B. R., *Full-scale Measurements of the Dynamic Characteristics of Buildings in the UK*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59 (1996) 365-382.

FERREIRA, W. G., *Análise Dinâmica não Linear no Domínio da Freqüência de Sistemas Estruturais com Amortecimento não Proporcional*, Tese de Doutorado, UFRJ, Fevereiro de 1998, Rio de Janeiro.

FUKUWA, N.; NISHIZAKA, R; YAGI, S.; TANAKA, K.; TAMURA, Y., *Field Measurement of Damping and Natural Frequency of an actual Steel-framed Building Over a Wide range of Amplitudes*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59 (1996) 325-347.

GERGES, S. Y., *Análise Digital de Sinais*, Apostila do Laboratório de Vibrações e Acústica do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, segundo trimestre 1999.

HART, G. C., *Random Damping in Buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59, pp 233-246, 1996.

KAREEM, A.; GURLEY, K., *Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59, pp 131-157 , 1996.

LAZAN, B. J., *Energy Dissipation Mechanisms in Structures, with Particular Reference to Material Damping*, a colloquium on structural damping held at the ASME annual meeting in Atlantic City, N. J., in December 1959, Pergamon Press, 1960.

MORAES, F. J. V., *Teoria Wavelet Aplicada à Análise de Vibrações*, Tese de Mestrado a Universidade Estadual de Campinas, 1996.

MURRAY, T.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E., *Floor Vibrations Due to Human Activity*, Steel Design Guide Series No. 11, 1997.

NASHIF, A. D.; JONES, D. I. G.; HENDERSON, J. P., *Vibration Damping*, John Wiley & Sons, 1985.

PLUNKETT, R., *Measurement of Damping*, a colloquium on structural damping held at the ASME annual meeting in Atlantic City, N. J., in December 1959, Pergamon Press, 1960.

QUEIROZ, G.; de PAULA, F. A., *Calibration of a Simplified Finite Element Model for the Analysis of Composite Slim Floor Analysis*, In. SSRC Annual Technical Session, Structural Stability Research Council, University of Florida, pp.288-300,2000.

SERRA, C. P., *Teoria e Projeto de Filtros*, Cartigraf Editora Ltda, 1983, Campinas-SP.

SUDA, K.; SATAKE, N.; ONO, J.; SASAKI, A., *Damping Properties of Buildings in Japan*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59, pp.383-392, 1996.

SUN, C. T.; LU, Y. P., *Vibration Damping of Structural Elements*, Prentice Hall,1995.

VECCI, M. A. M., FAKURY, R. H.; MAGALHÃES, M. C., *Análise do Comportamento Dinâmico de Pisos Metálicos Submetidos a Excitações Rítmicas*, III Simpósio Mineiro de Mecânica Computacional, Ouro Preto, MG, pp. 349-356, 19-21 de Novembro de 1998.