

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ATUALIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO EM
ELEMENTOS FINITOS DE UMA PASSARELA DE
PEDESTRES COM BASE EM DADOS EXPERIMENTAIS

IVIANE CUNHA E SANTOS

ORIENTADOR: JOSÉ LUÍS VITAL DE BRITO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS

PUBLICAÇÃO: E.DM 010A/ 09

BRASÍLIA/DF, 28 de AGOSTO de 2009.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ATUALIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO EM
ELEMENTOS FINITOS DE UMA PASSARELA DE
PEDESTRES COM BASE EM DADOS EXPERIMENTAIS**

IVIANE CUNHA E SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE. APROVADA POR:

JOSÉ LUÍS VITAL DE BRITO, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)

LUCIANO MENDES BEZERRA, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

ZENÓN JOSÉ GUZMÁN NÚÑEZ DEL PRADO, D.Sc. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 28 de AGOSTO de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, IVIANE CUNHA

Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais. [Distrito Federal] 2009.

xvi, 138p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas, 2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Dinâmica

2. Vibrações

3. Estruturas

4. Elementos Finitos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, I. C.(2009). Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 010A/ 09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Iviane Cunha e Santos

TÍTULO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais

GRAU/ANO: Mestre/2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Iviane Cunha e Santos

Praça Nicolino Lourenço Rabelo nº 07 Centro

Guiricema MG

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos pais Maria das Graças Cunha e Afonso Bernardino,
a minha irmã Thyala Anarelli,
ao meu noivo, amigo e companheiro, Fábio Nunes, e a
toda minha família e amigos pelo incentivo durante todo o meu
percurso.*

“Ninguém educa ninguém, ninguém educa a si mesmo, os homens se educam entre si, mediatizados pelo mundo.”

Paulo Freire

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília por ter me proporcionado tal oportunidade.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil em específico ao professor José Luís de Brito pela paciência e acompanhamento.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro recebido.

A toda turma do Mestrado de Brasília pelo amparo e amizade.

A todos aqueles que leram os manuscritos e deram sugestões valiosas, em especial ao meu noivo e companheiro fiel Fábio Nunes.

A minha irmã Thyala Anarelli e a minha família pelo incentivo durante todo o meu percurso.

Aos meus pais por me preparar para vida com muito amor e garra.

Finalmente a Deus, por acreditar que sem ele nada é possível.

RESUMO

Os modelos numéricos vêm sendo cada vez mais utilizados para representar o comportamento das estruturas. O método de elementos finitos pode ajudar no projeto de modificações da estrutura, na análise de carregamento externo, etc., no entanto o nível de exatidão dos modelos numéricos não é suficiente para garantir a precisão requerida na representação de estruturas complexas, como por exemplo, pontes e passarelas. As imprecisões dos modelos numéricos são geralmente devidas às modificações realizadas no processo de modelagem, às incertezas nas propriedades geométricas e dos materiais, imprecisões nas condições de contorno, etc. Para melhorar o modelo numérico de uma passarela, este deve ser atualizado com o intuito de aproximar o comportamento do modelo aos dados modais experimentais, de modo a torná-lo mais preciso. O princípio deste processo é alterar as matrizes do sistema, que descrevem completamente o modelo em elementos finitos, com base nos parâmetros modais obtidos experimentalmente. Neste trabalho avalia-se numericamente uma passarela de pedestres existente na cidade de Brasília, por meio do software ANSYS, onde foi realizada uma análise de sensibilidade para selecionar os parâmetros a serem utilizados no processo de atualização. A atualização foi dividida em duas fases, inicialmente a manual, com o objetivo do refinamento do modelo numérico, e a segunda fase, a automática, onde foi implementado um algoritmo de otimização que utiliza dois métodos: o de Primeira Ordem e o de Aproximação por Subproblema. Os resultados encontrados mostram uma redução do índice FER (Porcentagem de variação da frequência) de 8,77% para 1,50% e um aumento no índice MAC (*Modal Assurance Criterion*) de 0,870345 para 0,9133. O trabalho conclui que o modelo atualizado pode ser utilizado como uma ferramenta importante para a avaliação da estrutura. Um monitoramento contínuo acompanhado de uma seqüência de atualizações do modelo numérico pode possibilitar a identificação de danos na estrutura.

ABSTRACT

The numerical models have been increasingly used to represent the behavior of structures. The finite element model can help in the design of structural modifications and analysis of external loading. However, the level of accuracy of numerical models is not sufficient to ensure the required precision in the representation of complex structures, such as bridges and footbridges. The lack of accuracy of numerical models is usually due to changes made in the modeling process, the uncertainties in the geometric and material properties, inaccuracies to represent the boundary conditions, etc. To improve the numerical modelling of a footbridge, the utilized model should be updated in order to approximate the numerical results to the observed experimental data, with the purpose of make it more precise. The principle of this methodology is to change the matrices, which describe completely the finite element model, based on modal parameters obtained experimentally. In this work, we evaluate numerically, using ANSYS software, a footbridge constructed in Brasilia, where sensitivity analysis were performed to select which parameters should be used in the update process. The update has been divided into two stages; the first one is a manual procedure of updating or tuning, with the goal of refinement the numerical model. The second stage, called automatic updating, was implemented with a optimization algorithm that uses two methods: the First Order and the Subproblem Approximation. The result shows a reduction of the index FER (Percent of frequency changes) of 8.77% to 1.50% and an increase in the index MAC (Modal Assurance Criterion) from 0.870345 to 0.9133. This work concludes that the updated model can be used as an important tool for structural evaluation. A continuous monitoring together with a sequence of updates of the numerical model can enable the damage identification of the structure.

SUMÁRIO

1-Introdução	1
1.1 Motivação	5
1.2 Objetivo	5
1.2.1 Objetivo Geral	5
1.2.2 Objetivo Específico	6
1.3 Organização do Trabalho	6
2-Revisão Bibliográfica	8
3-Formulação Matemática	25
3.1 Sistema de Vários Graus de Liberdade	25
3.2 Ferramenta Computacional: Programa ANSYS	26
4-Modelagem Numérica e Experimental	29
4.1 Descrição da Estrutura	29
4.2 Modelagem Numérica	34
4.3 Modelo Experimental	36
5-Resultados dos Modelos Numéricos e Experimental	42
6-Atualização do Modelo numérico e Otimização de Parâmetros	46
6.1 Parâmetros de Correlação entre os dados numéricos e experimentais	49
6.1.1 Índice de confiança modal – MAC	49
6.1.2 Variação da frequência – FER	49
6.1.3 Critério de seleção dos modos numéricos de vibração e frequências naturais correlacionados aos modos experimentais	50
6.2 Otimização de Parâmetros	50
6.2.1 Formulação da otimização no programa ANSYS	52
6.2.2 Módulo de otimização ANSYS	54
6.3 Função Objetivo e suas Restrições	56
6.4 Análise de Sensibilidade	57
6.5 Atualização Manual	60
6.5.1 Comparação entre os modelos numéricos e o modelo experimental	60
6.6 atualização automática	62
6.6.1 Parâmetros utilizados na otimização da passarela	63
6.6.2 Atualização automática - parâmetros atualizados isoladamente	64
6.6.3 Projeto ótimo	68
7-Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	75
7.1 Elementos Não-Metálicos de Fechamento	75
7.2 Atualização dos Parâmetros da Passarela	76

7.2.1	Processo de atualização manual do modelo numérico _____	76
7.2.2	Análise de sensibilidade _____	77
7.2.3	Processo de atualização automática do modelo numérico _____	77
7.3	Sugestões para Trabalhos Futuros _____	79
Referências Bibliográficas _____		81
Anexo A _____		84
A.1	Elemento BEAM4 _____	84
A.2	Elemento de Massa - MASS21 _____	86
A.3	Elemento SHELL63 _____	88
Anexo B _____		90
B.1	Cálculo da Carga Adicional Utilizadas na Modelagem _____	90
B.1.1	Carregamento distribuído das placas de piso _____	90
B.1.2	Carregamento distribuído placas de cobertura _____	92
Anexo C _____		94
C.1	Implementação de Algoritmo em APDL _____	94

FIGURAS

Figura 1.1 – Passarela Millenium Bridge sobre o rio Tamisa Londres _____	3
Figura 1.2 – Passarela Simone de Beauvoir sobre o rio Sena na França _____	4
Figura 2.1 – Estádio Algarve, em Faro Portugal _____	10
Figura 2.2 – Estádio olímpico João Havelange na cidade do Rio de Janeiro _____	11
Figura 2.3 – Modelo numérico da passarela sobre a E.P.I.A. analisado por Baltar (2000) _____	12
Figura 2.4 – Modelo numérico da passarela sobre a E.P.I.A analisado por Gomes (2006) _____	13
Figura 2.5 – Detalhe da posição dos acelerômetros Brasiliano et al.(2008) _____	14
Figura 2.6 – Ponte que liga Clifton em Bristol a Leigh Woods, Reino Unido _____	15
Figura 2.7 – Modelo inicial em elementos finitos, Merce (2007) _____	16
Figura 2.8 – Processo de atualização do modelo de EF, Merce (2007) _____	16
Figura 2.9 – Ponte basculante Gálata, Turquia _____	17
Figura 2.10 – Ponte da Lagoncinha sobre o Rio Ave, Vila Nova de Famalicão, Portugal. _____	18
Figura 2.11 – Ponte estaiada Barqueta, Sevilha Espanha, à esquerda e o modelo à direita. _____	19
Figura 2.12 – Modelo numérico de elementos de barra e de casca da ponte sobre o Rio Entupido. Situação de comportamento estrutural efetivo, Penner (2001) _____	20
Figura 2.13 – Ponte pênsil John A. Roebling à esquerda e modelo 3D da torre e cabos à direita, Ren et al. 2004 _____	22
Figura 2.14 – Modelo inicial em elementos finitos da ponte estaiada Second Severn Crossing, Daniell & Macdonald (2005) _____	23
Figura 2.15 – Passarela em Nottingham à esquerda e o modelo de EF à direita _____	24
Figura 4.1 – Passarela sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento (E.P.I.A), trecho Cruzeiro Novo/ CEASA, vista superior _____	29
Figura 4.2 – Vista dos Cogumelos da passarela sobre a E.P.I.A _____	30
Figura 4.3 – Disposição dos elementos estruturais que compõem os vãos da passarela sobre a E.P.I.A _____	30
Figura 4.4 – Detalhes das Placas de Piso da Passarela sobre a E.P.I.A, vista inferior _	32
Figura 4.5 – Vista do vão horizontal com detalhes do corrimão e guarda-corpo da passarela sobre a E.P.I.A. _____	33
Figura 4.6 – Detalhes dos enrijecedores do piso a esquerda e da cobertura a direita, da passarela sobre a E.P.I.A _____	33
Figura 4.7 - Seção transversal da passarela sobre a E.P.I.A _____	34

Figura 4.8 - Disposição dos elementos para o vão horizontal da passarela sobre a E.P.I.A _____	35
Figura 4.9 – Pontos de medição e referência do teste modal, Brasiliano et al. (2008) _____	37
Figura 4.10 – Detalhe do posicionamento dos acelerômetros, Brasiliano et al. (2008) _____	37
Figura 4.11 – Pedestres caminhando ao longo da passarela, Brasiliano et al. (2008) _____	38
Figura 4.12 – Resultados experimentais correspondentes ao (a) primeiro modo de vibração (3,9 Hz) e ao (b) segundo modo de vibração (10,1 Hz), Brasiliano et al. (2008) _____	39
Figura 4.13. – Função de densidade espectral de potência para a direção vertical, Brasiliano et al. (2008) _____	40
Figura 4.14. – Função de densidade espectral de potência para a direção lateral Brasiliano et al. (2008) _____	41
Figura 4.15 – Função de densidade espectral de potência para a torção, Brasiliano et al. (2008) _____	41
Figura 6. 1 – Fluxograma do processo de atualização de modelos numéricos. _____	47
Figura 6.2 – Função unimodal: a) Máximo de $-f(x)$; b) Mínimo de $f(x)$ _____	51
Figura 6.3 – Análise de sensibilidade realizada na estrutura da passarela. _____	59
Figura 6.4 – Porcentagem de variação do índice FER e do MAC para a atualização manual da estrutura da passarela. _____	62
Figura 6.5 – Função objetivo versus iterações para a atualização do módulo de elasticidade da placa de cobertura pela análise de primeira ordem. _____	65
Figura 6.6 – Função objetivo versus iterações para a atualização do módulo de elasticidade da placa de cobertura pela análise de aproximação por subproblema. _____	65
Figura 6.8 – Variação da função objetivo no processo de atualização dos parâmetros da estrutura da passarela pelo método de aproximação por subproblema. _____	68
Figura 6.9 – Variação da função objetivo no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de primeira ordem. _____	69
Figura 6.10 – Variação da função objetivo no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de aproximação por subproblema. _____	69
Figura 6.11– Variação dos parâmetros no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de aproximação por subproblema. _____	72
Figura 6.12 – Variação dos parâmetros no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de primeira ordem. _____	73
Figura A.1 – Elemento BEAM3 _____	85
Figura A.2 – Elemento MASS21 _____	86
Figura A.3 – Elemento SHELL63 _____	88
Figura B.1– Placa de piso representação esquemática _____	90
Figura B.2 – Esquema de distribuição da massa das placas de piso nas travessas inferiores _____	91

Figura B.3 – Placa de cobertura – representação esquemática – medidas em cm _____	92
Figura C.1 – Arquivos de programas necessários para a realização da atualização automática. _____	94

TABELAS

Tabela 4.1 – Propriedades das seções da passarela sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento, Gomes (2006). _____	31
Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais que compõe a passarela sobre a E.P.I.A. ____	34
Tabela 4.3 – Elementos utilizados na modelagem da passarela sobre a E.P.I.A. _____	36
Tabela 4.4 – Configuração do teste e pontos de medição, Brasiliano et al. (2008) ____	38
Tabela 4.5 – Frequências naturais verticais, Brasiliano et al. (2008) _____	39
Tabela 5.1 – Análise de vibrações livres da passarela sobre a EPIA – modelo 1 ____	42
Tabela 5.2 – Análise de vibrações livres da passarela sobre a EPIA – modelo 2 ____	43
Tabela 5.3 – Comparação dos resultados das frequência naturais obtidas da análise de vibração livre do vão horizontal da passarela sobre a E.P.I.A _____	44
Tabela 5.4 – Resultados das Frequências Naturais obtidas por Brasiliano et al. (2008) experimentalmente. _____	44
Tabela 6.1– Índices MAC e FER entre os modos experimentais e numéricos – modelo 1 _____	61
Tabela 6.3 – Espaço confiável de projeto das variáveis de projeto da passarela _____	63
Tabela 6.4 – Espaço confiável de projeto das variáveis de estado da passarela _____	64
Tabela 6.5 – Parâmetros atualizados isoladamente _____	66
Tabela 6.6 – Índices MAC e FER entre os modos verticais experimentais e numéricos atualizados. _____	66
Tabela 6.7 – Parâmetros de atualizados – projeto ótimo _____	70
Tabela 6.8 – Frequências naturais experimentais e numéricas e índices FER para os modos verticais do modelo numérico inicial e do projeto ótimo. _____	71
Tabela 6.9 – Índices MAC e FER entre os modos verticais experimentais e projeto ótimo. _____	71
Tabela 6.10 – Comparação entre os valores das frequências naturais experimentais da passarela com os valores obtidos pelos modelos numéricos _____	74
Tabela A.1 - Dados de entrada do programa ANSYS para o elemento BEAM4 _____	85
Tabela A.2 - Dados de entrada do programa ANSYS para o elemento MASS21 ____	87
Tabela A.3 - Dados de entrada do programa ANSYS para o elemento SHELL63 ____	89

SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

C	Matriz de amortecimento do sistema de dimensão NxN
F(t)	Vetor de forças externas aplicadas
K	Matriz de rigidez do sistema de dimensão NxN
M	Matriz de massa do sistema de dimensão NxN
M_g	Função relacionada ao modo g de vibração
MAC_{cg}	Índice modal entre o modo numérico correlacionado ao modo experimental g
N	Grau de liberdade
S_C	Coeficiente de sensibilidade

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a	Vetor contendo as variáveis de projeto
a_i	Variáveis independentes ou de projeto
a_i^i	Limite inferior da variável independente a_i
a_i^s	Limite superior da variável independente a_i
$f_o = f_0(a)$	Função Objetivo
g_i, h_i, w_i	Variáveis de estado do projeto de otimização
m_1, m_2, m_3	Número de variáveis de estado com diferentes valores de limites

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α_g	Fator de peso para o autovalor do modo g
β_g	Fator de peso para o modo g
$\delta_A = A_m - A$	Representa a alteração nos parâmetros de atualização
$\delta_Z = Z_z - Z$	Representa a alteração nas variáveis de estado ou função objetivo
θ	Ângulo de fase
λ_h	Frequência natural numérica do modo h
λ_g	Frequência experimental do modo g

λ_g^*	Autovalor do modo numérico correlacionado ao modo experimental g
$\ddot{v}(t)$	Vetor de acelerações nodais do sistema
$\dot{v}(t)$	Vetor de velocidades nodais do sistema
$v(t)$	Vetor de deslocamentos nodais do sistema
v_o	Vetor que representa a forma deformada do sistema ou autovetor
ϕ_h	Vetor do modo de vibração h obtido numericamente
ϕ_g	Vetor do modo de vibração g obtido experimentalmente
ϕ_g^*	Vetor do modo de vibração numérico correlacionado ao modo experimental g
ω^2	Frequência circular do movimento ou autovalor

ABREVIACOES

APDL	Linguagem Paramétrica de Projeto ANSYS (<i>ANSYS Parametric Design Language</i>)
CEASA	Centrais de Abastecimento
DV	Variáveis de Projeto (<i>Design Variable</i>)
E.P.I.A	Estrada Parque de Indústria e Abastecimento
EF	Elementos finitos
FER	Porcentagem de variação da frequência
MAC	Índice modal para a comparação entre os modos de vibração
OBJ	Função objetivo definida no programa
OF	Função objetivo (<i>Objective Function</i>)
SV	Variáveis de Estado (<i>State Variable</i>)

1 INTRODUÇÃO

A construção de passarelas vem crescendo, principalmente em função do alto custo dos terrenos remanescentes nas cidades. A requalificação dos espaços urbanos através das ligações entre margens tem como principal objetivo integrar os bairros e recuperar áreas sem vitalidade, de forma a povoar novos espaços com atividades constantes, valorizando o espaço público e as áreas próximas à intervenção, bem como oferecendo acesso, segurança e lazer na travessia dos pedestres, Hazan (2007).

O conforto humano nestes elementos de ligação é fundamental para a efetiva utilização das passarelas de pedestres implantadas no perímetro urbano das cidades. A conscientização da população sobre a importância da utilização das passarelas e os índices de acidentes de trânsito nas proximidades de passarelas de pedestres denuncia problemas com a consolidação do uso das mesmas.

As passarelas de pedestres vêm sendo construídas a partir de sistemas estruturais cada vez mais arrojados com emprego de novos materiais e tecnologias. Dando origem a sistemas estruturais bastante esbeltos. Uma consequência dessa tendência de projeto diz respeito a um aumento considerável dos problemas referentes à vibração. Os estados limites de utilização correspondente a vibrações excessivas têm sido constantemente excedidos por parte dos projetistas de estruturas, assim os critérios de conforto humano não têm sido utilizados de forma correta.

Para a avaliação do comportamento estrutural de passarelas é necessário que outras propriedades também sejam conhecidas, além dos aspectos geométricos, das ações, dos esforços solicitantes e dos deslocamentos da estrutura. As propriedades dinâmicas, tais como, as frequências naturais, o grau de amortecimento, o coeficiente de impacto e o fator de amplificação dinâmica, são importantes na avaliação do desempenho de sistemas estruturais submetidos a ações de natureza dinâmica.

Com o intuito de evitar uma análise dinâmica dessas estruturas, o limite de flecha permitido pelas normas no Brasil é muito pequeno para atender à maioria das

passarelas. Dessa forma, a utilização desse critério levaria a passarelas com grande rigidez, não sendo viável do ponto de vista econômico.

A maioria dos casos de vibrações verticais e horizontais estudados refere-se ao desconforto na utilização e, em poucos casos, as estruturas chegaram ao colapso. Entretanto, devido aos casos mais recentes de vibrações excessivas, em muitas passarelas pelo mundo, os pesquisadores estão empenhados em resolver o problema de conforto humano.

O movimento de pedestres produz carregamentos dinâmicos com componentes em baixas frequências, que podem levar a vibrações excessivas estruturas leves e flexíveis como as passarelas, que em geral possuem as frequências naturais da estrutura bem próximas das frequências excitantes. O problema de vibrações em passarelas vem atraindo a atenção de vários pesquisadores em muitos países inclusive no Brasil.

A passarela Millenium Bridge sobre o Rio Tamisa liga a Catedral de St. Paul e a City Of London School com o conjunto formado pelo Museu de Arte Moderna e o Shakespeare Globe Theater. É a mais longa ponte suspensa para pedestres do mundo, com 320 metros de comprimento, tem estrutura complexa e inovadora, porém muito flexível. A ponte que combina o conjunto de estrutura em aço, corrimãos em aço inox e plataformas em alumínio sustentado por apenas dois elementos verticais, tem a leveza de uma fita de metal durante o dia, e de uma lâmina de luz durante a noite (Figura 1.1).

A Millenium Bridge apresentou problemas de vibrações durante a sua inauguração no dia 10 de Junho de 2000. As oscilações na passarela tiveram amplitudes da ordem de 20 cm na direção lateral. Os deslocamentos foram causados pela parcela de força lateral provocadas pelo andar dos pedestres durante a caminhada, segundo Farmer (2003). Apesar da força lateral ser da ordem de 3% da vertical, ela foi preponderante neste caso, devido à frequência natural da passarela na direção lateral e a frequência da excitação serem próximas, proporcionando a amplificação dos deslocamentos. A solução adotada foi à instalação de amortecedores viscoelástico e amortecedores de massa para a redução da energia fornecida à passarela.



Figura 1.1 – Passarela Millenium Bridge sobre o rio Tamisa Londres

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Mill.bridge.from.tate.modern.arp.jpg>,
acesso: novembro 2008

A ressonância de um ou mais modos de vibração são as principais causas da maioria de problemas registrados sobre vibrações excessivas em passarelas.

A passarela Simone de Beauvoir foi inaugurada como a quarta e a maior passagem parisiense sobre o rio Sena, para uso de pedestres e ciclistas. Trata-se, na verdade, da 37ª transposição do rio e a primeira a ter o nome de uma mulher escritora e filósofa parisiense (Figura 1.2). A estrutura metálica ondulada da passarela tem 304m de extensão, dos quais 190m de vão livre sobre o Sena une o átrio da Biblioteca Nacional da França, na margem esquerda, aos jardins do Parque de Bercy, na margem direita.



Figura 1.2 – Passarela Simone de Beauvoir sobre o rio Sena na França

Fonte: www.spirit-of-paris.com/category/seine, acesso: setembro 2008

Em Julho de 2006, ensaios dinâmicos e estáticos foram realizados na passarela com a finalidade de medir seu comportamento sob vibração Moura (2006). Os técnicos temiam que a Simone de Beauvoir, por se tratar de uma passarela longa, pudesse apresentar os mesmos problemas de Solferino, em Paris, e a ponte do Millenium em Londres. Em algumas situações os pedestres apresentavam uma sensação de desconforto, apesar de que na sua concepção foram posicionados amortecedores para garantir o conforto dos pedestres em suas caminhadas. Por meio de ensaios dinâmicos foram verificadas se as respostas experimentais da passarela devido às solicitações induzidas pela passagem de uma multidão coincidiam com os resultados antecipados pelos cálculos. As respostas da estrutura foram excelentes sob diferentes formas de solicitação, como caminhada cadenciada por metrônomo, caminhada livre mais ou menos rápida e caminhada por grupos mais ou menos numerosos. No final, a Simone de Beauvoir se mostrou pronta para receber a multidão de convidados que compareceram à sua inauguração, no dia 13 de julho de 2006.

Pele exposto acima verifica-se que as passarelas são estruturas flexíveis que são excitadas pelo caminhar dos pedestres, podendo em alguns casos apresentar vibrações excessivas. Deste modo, a escolha de um modelo numérico que considere todos os elementos da estrutura, inclusive aqueles elementos de fechamento, é de vital importância para representar adequadamente o comportamento dinâmico da passarela, principalmente com respeito aos modos de vibração lateral e de torção.

Visto que a maioria das técnicas de avaliações de estruturas vem utilizando algum tipo de modelo numérico, como constatado por meio de revisões bibliográficas, a proposta deste trabalho foi aplicar uma metodologia com vistas à avaliação da passarela por meio da utilização de modelos numéricos atualizados. O processo de atualização de modelos corresponde à alteração de um modelo numérico em função do modelo modal experimental da estrutura, com o intuito de minimizar os erros e as desvantagens de cada um destes (modelo modal experimental e numérico).

O modelo numérico atualizado poderá ser utilizado com confiança em todas as análises relacionadas à estrutura. Como monitoramentos e possíveis verificações de ocorrência de danos ao longo do tempo.

1.1 MOTIVAÇÃO

As passarelas mistas de aço e concreto são comuns no Brasil. Essas estruturas são usualmente concebidas como associação de elementos estruturais metálicos, que tem a função de resistir às cargas aplicadas, e elementos não metálicos que têm a função de fechamento como piso e cobertura. A função estrutural desses componentes não metálicos não está completamente esclarecida, em termos da sua influência no comportamento dinâmico da passarela.

Uma representação precisa da estrutura é fundamental para obter, com precisão confiável, o comportamento dinâmico. O modelo numérico apresenta o maior nível de detalhes da estrutura, contudo não possui uma adequada confiabilidade uma vez que os resultados obtidos podem diferir dos resultados experimentais e a atualização do modelo permite superar este problema. O modelo em elementos finitos atualizado constitui uma ferramenta muito útil para a representação numérica de estruturas.

A representação de estruturas por meio de modelos em elementos finitos atualizados proporciona uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais, aproximando o comportamento descrito pelo modelo ao da estrutura.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo Geral deste trabalho é estudar a influência dos componentes de fechamento, como piso e cobertura, que não fazem parte da estrutura principal, nos modos de vibração das passarelas, principalmente aqueles devido aos movimentos laterais e de torção. Para isso, serão obtidos os modos de vibração de modelos numéricos que considerem o piso e a cobertura como elementos de placa ou somente como massa adicional agregada à estrutura principal utilizando a ferramenta computacional ANSYS

versão 10 (2005). A partir da análise desses resultados e de dados experimentais já existentes será feita uma calibração do modelo numérico mais adequado.

O melhor modelo numérico obtido deverá ser submetido a um processo de atualização dividido em duas partes: Atualização Manual e Automática, utilizando a implementação de algoritmos de otimização por meio de programação em APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). O princípio básico dos dois processos é o mesmo, alterar os parâmetros da estrutura do modelo numérico com o objetivo de obter o novo modelo mais próximo do modelo experimental.

1.2.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. A partir do modelo numérico em elementos finitos proposto por GOMES (2006), foi modelada a cobertura da passarela de pedestres como elementos de placas SHELL63, utilizando a ferramenta computacional ANSYS;
2. Averiguar a precisão dos modelos numéricos da passarela em relação à estrutura real.
3. Implementar a formulação da Otimização no Programa ANSYS.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 1 trata da Introdução ao tema de conforto humano, problemas de vibrações excessivas em passarelas e atualização de modelos numéricos. Apresenta ainda a motivação e os objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre análise numérica de outras estruturas, problemas relativos a vibrações, modelagens e tipos de modelos analisados e atualização de modelos numéricos.

O capítulo 3 trata da formulação matemática utilizada para se obter as frequências e os modos de vibração naturais.

O Capítulo 4 descreve a estrutura da passarela de pedestres, os modelos numéricos em elementos finitos analisados e os testes experimentais utilizados para se obter as propriedades dinâmicas da estrutura.

No Capítulo 5 são obtidos os resultados de vibração livre da passarela, com as respectivas frequências e modos de vibração natural dos modelos analisados, com posterior discussão dos resultados obtidos.

O Capítulo 6 trata da atualização do modelo e otimização de parâmetros da passarela para que se obtenha um modelo numérico mais favorável. Nas análises de correlação entre modelos numéricos e experimentais são utilizados dois parâmetros, o primeiro destes foi definido como a correlação entre os modos de vibração, índice de confiança modal MAC, que é uma técnica que utiliza as amplitudes dos modos de vibração experimentais e numéricos nos pontos onde foram colocados os sensores na realização do experimento, e o outro foi à correlação entre as frequências naturais definida pelo índice FER. Com esse objetivo um algoritmo de correlação dos dados numéricos e experimentais foi implementado por meio de programação APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). São apresentadas ainda as formulações e critérios utilizados para a atualização e os resultados obtidos destas análises.

Finalmente no Capítulo 7, encontram-se as conclusões finais e propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas últimas décadas, vários autores têm se dedicado ao estudo do comportamento de passarelas de pedestres submetidas a vibrações. Apresentam-se a seguir alguns desses estudos.

Pereira & Neves (2006) estudaram os níveis de vibrações relacionados à percepção e ao conforto humano, o principal objetivo foi gerar curvas de percepção quanto à vibração através de experimentos de laboratório. A montagem experimental consiste de uma placa de aço, apoiada sobre quatro molas ligadas a um excitador. Os voluntários se posicionam de duas formas nos experimentos: sentados em uma cadeira e em pé sobre a placa. O ensaio foi realizado com a participação de 30 voluntários que, durante 10 minutos, se submeteram a vibrações verticais de 12 a 80 Hz. O primeiro experimento tem por objetivo a determinação do limite de percepção à vibração, realizando-se também, uma análise sobre o intervalo de incerteza das respostas. O segundo experimento corresponde à determinação da relação entre o limite de conforto e o de percepção. Para o limite de percepção, os resultados se apresentam em conformidade com a norma internacional ISO 2631/2 (1989). Os resultados para o limite de conforto se apresentam entre 2 a 4 vezes superiores ao limite de percepção. Portanto não é indicada a utilização de um fator multiplicativo médio para a curva do limite de percepção na predição do conforto à vibração como ocorre na ISO 2631/2 (1989), já que, dependendo da faixa de frequências, as respostas podem estar superestimadas ou subestimadas.

Lima et al. (2008) utilizando a técnica de inteligência computacional avaliaram o conforto humano de passarelas mistas para pedestres, tendo como referência as recomendações fornecidas pela ISO 2631/2. O objetivo foi determinar o vão máximo possível de ser utilizado em projetos de passarelas mistas, a partir do emprego de perfis de aço I. Para tal foram utilizadas estratégias de otimização baseadas nos Algoritmos Genéticos. A passarela analisada é composta por vigas de aço em perfil I que suportam uma laje de concreto apoiada na mesa superior; a união destes dois materiais é feita por intermédio de conectores de cisalhamento. Os resultados obtidos indicaram que, para as vibrações das passarelas atenderem aos níveis das normas de projeto, deve-se restringir

a flexibilidade e a deformabilidade do sistema estrutural. A consideração da interação entre viga e laje é fundamental para o travamento lateral das estruturas, sendo o principal responsável pela deformabilidade lateral dos sistemas, visando o conforto do usuário e o risco de colapso estrutural.

Martins & Estevão (2004) analisaram uma caracterização dinâmica da bancada poente do estádio Algarve na cidade de Faro em Portugal (Figura 2.1). A grande flexibilidade dessa estrutura que apresenta grandes balanços e vigas com grandes vãos exigiu uma análise dinâmica para a verificação da segurança tendo em vista as vibrações induzidas pelos sismos e pelas pessoas. O modelo estrutural adotado foi um modelo tridimensional de elementos finitos de toda a bancada. As estruturas metálicas e de concreto armado foram modeladas respectivamente por elementos de pórtico espacial e as estruturas laminares de placas, por meio de elementos isoparamétricos de quatro nós, de forma a se adaptarem à geometria da construção. O estudo evidenciou uma concepção estrutural pouco apropriada, que se traduziu num aumento da vulnerabilidade da estrutura, quer pela ação de massas humanas em movimento quer face à possível ocorrência de um sismo, dada a elevada casualidade sísmica da região onde o Estádio Algarve está implantado. O estudo realizado teve como consequência importante a elaboração de um conjunto de recomendações. Partindo da análise sísmica foram sugeridas alterações nas seções de concreto armado e foi dada atenção especial às regiões críticas dos pilares, para garantir a existência de uma estrutura globalmente dissipativa. Além disso, o autor apontou como solução o aumento da espessura das seções tubulares, de forma a aumentar a rigidez global da estrutura. Uma vez que o comportamento da estrutura poderá ser agravado pela ação dinâmica conjunta dos sismos e das pessoas, a fim de minimizar as vibrações, foi proposta também a colocação de amortecedores ligando a bancada e os núcleos de concreto armado dos acessos interiores.



Figura 2.1 – Estádio Algarve, em Faro Portugal

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:EstadioAlgarve.JPG>, acesso: agosto 2008

Juliani et al. (2005) analisaram o estádio olímpico João Havelange, construído na cidade do Rio de Janeiro para os jogos Panamericanos de 2007 (Figura 2.2). O projeto das arquibancadas formado por degraus seria inicialmente construído em estrutura de concreto moldado “in loco”, mas devido ao tempo de execução optou-se por construir em estrutura pré-moldada de concreto. Com essa alteração tornou-se necessária a determinação do comportamento dinâmico dessas peças por meio de ensaios e simulação numérica. Foram inicialmente executados dois protótipos para realização de ensaios dinâmicos, contudo tais modelos não atenderam aos valores limites preconizados pelo CEB 209(1991). O fato motivou a realização de um estudo teórico do comportamento dinâmico, por meio de simulação numérica com a utilização do Método dos Elementos Finitos. A análise numérica mostrou que as peças pré-moldadas trabalhando isoladamente, possuem a primeira frequência próxima da frequência de excitação do público. A ligação entre as peças mudou o comportamento do conjunto, fazendo com que a frequência fundamental de vibração se afastasse da frequência de excitação do público, reduzindo assim as amplificações geradas pelos efeitos dinâmicos. Com os resultados da análise teórica foi desenvolvido um terceiro protótipo, em que os degraus deveriam ser ligados entre si em alguns pontos para reduzir as acelerações nas peças. Ensaios dinâmicos também foram realizados neste modelo, sendo que a sua resposta foi satisfatória, para a execução dos modelos definitivos. Após a execução de

um dos pórticos do Estádio Olímpico, foi realizado um ensaio na arquibancada definitiva em duas regiões distintas: a primeira sem a ligação entre as peças pré-moldadas e a segunda com ligação. Os ensaios finais na arquibancada mostraram que a solução adotada é eficaz e reduz os valores máximos de aceleração àqueles considerados aceitáveis em eventos esportivos. Percebe-se claramente a grande interação entre a análise experimental e numérica, pois sem os dados da primeira não se poderia comprovar e calibrar o modelo gerado pela segunda. Foi então descrito todo o procedimento para a elaboração do projeto executivo dos degraus definitivos das arquibancadas do Estádio Olímpico João Havelange a serem utilizados na construção.



Figura 2.2 – Estádio olímpico João Havelange na cidade do Rio de Janeiro

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Stitched_003.jpg, acesso: setembro 2008

Baltar (2000) avaliou os níveis de segurança e conforto de seis passarelas de pedestres na cidade de Brasília, sendo três mistas em concreto e aço, duas de aço e uma em concreto. Neste trabalho foram determinados os modos de vibração e, para a passarela mais flexível, foi obtida também a resposta à vibração forçada. Essa estrutura foi modelada em elementos finitos e utilizado o programa ANSYS para a obtenção das respostas estática e dinâmica. No modelo, as placas de piso e de cobertura da passarela foram consideradas como massa adicional distribuída, corrimão e parapeito foram considerados como elementos de massa concentrada nos nós inferiores. As demais barras da estrutura foram consideradas como elemento de pórtico espacial (Figura 2.3). A análise de vibração livre foi realizada para se encontrar as características dinâmicas da passarela, determinando os dez primeiros modos e frequências naturais de vibração. As passarelas mais flexíveis foram submetidas a carregamentos dinâmicos produzidos

pela locomoção de um ou mais pedestres caminhando ou correndo e foram obtidas as amplitudes dos deslocamentos nos nós centrais. Nessa análise os resultados indicaram grande índice de desconforto para os usuários devido à frequência fundamental da estrutura se encontrar muito próxima da frequência de excitação de pessoas caminhando. Mediante a análise dos resultados obtidos, foram sugeridas algumas medidas de correção como a instalação de amortecedores de massa sintonizados e barras de travamento nas passarelas mais flexíveis, comprovando-se, deste modo, a importância de um estudo dinâmico nesse tipo de estrutura.

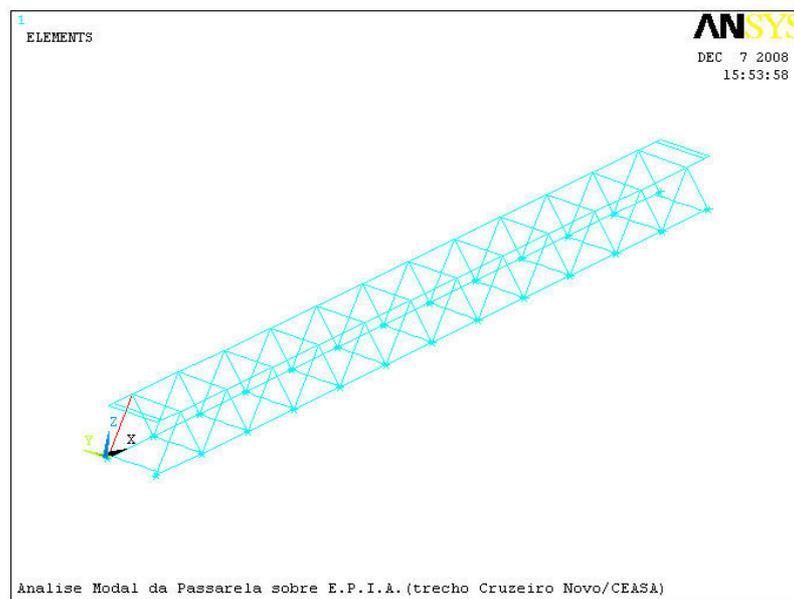


Figura 2.3 – Modelo numérico da passarela sobre a E.P.I.A. analisado por Baltar (2000)

Gomes (2006) estudou problemas de vibrações na passarela sobre a via E.P.I.A. na cidade de Brasília. O autor fez um estudo numérico do comportamento dinâmico da passarela em função de carregamentos induzidos pelas ações humanas de caminhar e correr. A modelagem da estrutura foi feita em Elementos Finitos com a ferramenta computacional ANSYS. O piso da passarela foi modelado como elementos de placa SHELL63 e as placas de cobertura como carga distribuída. Corrimão e parapeito foram considerados como elementos de massa concentradas nos nós inferiores. As demais barras da estrutura foram consideradas como elemento de pórtico espacial (Figura 2.4). A análise de vibrações forçadas para carregamentos típicos da estrutura mostrou que a

passarela apresenta vibrações excessivas e que os limites de serviço indicados na literatura não são verificados em várias situações analisadas. Confirmou-se então a necessidade da introdução de um sistema de controle estrutural na passarela. Este sistema foi projetado através de simulações numéricas com diferentes configurações de amortecedores de massa sintonizados múltiplos (AMSM), além da introdução de barras de travamento na estrutura. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, já que houve redução na amplitude das vibrações da estrutura a níveis aceitáveis de acordo com os limites de serviço consultados na literatura.

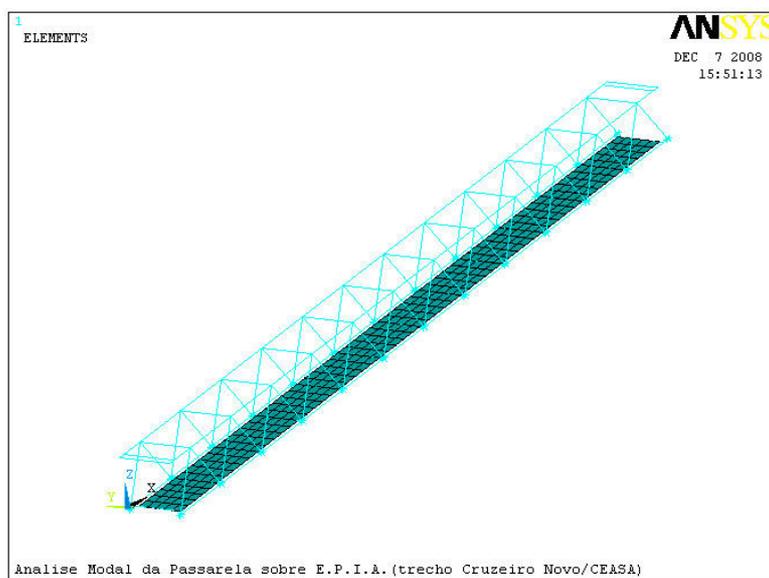


Figura 2.4 – Modelo numérico da passarela sobre a E.P.I.A analisado por Gomes (2006)

Brasiliano et al. (2008) estudaram problemas de vibrações na passarela sobre a via E.P.I.A. Foram realizadas análises experimentais e numéricas a fim de investigar a função dos componentes não metálicos no comportamento da estrutura relativo aos modos de vibração laterais, horizontais e de torção da estrutura. A estrutura foi excitada e as acelerações foram medidas em vários pontos (Figura 2.5). Os resultados experimentais indicaram o valor de 3,9Hz para a primeira frequência vertical e o valor de 10,11 Hz para a segunda frequência vertical. As frequências laterais obtidas foram respectivamente 3,12 Hz e 5,18 Hz. A função de densidade espectral de potência de torção apresentou dois picos em torno das frequências de 8,23 Hz e 11,35 Hz. Na modelagem numérica foram utilizados dois modelos: em um deles o piso foi

considerado como elemento de placa (SHELL63) e no segundo modelo o piso foi considerado como massa distribuída concentrada nos nós inferiores. Pequenos ajustes nos valores dos módulos de elasticidade foram usados para calibrar o modelo. Uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais mostrou que o comportamento dinâmico da passarela na direção vertical pode ser determinado com uma precisão satisfatória a partir de um modelo simples em que os componentes não-metálicos são representados como massa. Por outro lado, ambos os modelos não representam adequadamente os modos de vibração lateral e de torção da passarela. Para o estudo do comportamento dinâmico nestas direções, é necessário um modelo mais preciso e com uma adequada modelagem do pavimento, possivelmente considerando as placas de piso e as placas de cobertura nos modelos. Os resultados obtidos também mostraram que o comportamento real da estrutura está entre a modelagem do pavimento como um elemento de massa e sua modelagem como um elemento de placa.



Figura 2.5 – Detalhe da posição dos acelerômetros Brasileiro et al.(2008)

Merce (2007) realizou uma atualização do modelo numérico em elementos finitos da Ponte de Clifton, uma ponte pênsil de cabos de ferro, que liga Clifton em Bristol a Leigh Woods, em Somerset Norte, Reino Unido (Figura 2.6). A autora apresentou uma metodologia capaz de identificar por intermédio de modelos numéricos o comportamento real das pontes. Nesta metodologia, o modelo numérico da ponte em análise é criado e os parâmetros modais experimentais são identificados a partir de dados obtidos de um ensaio dinâmico. Com base nesses parâmetros, o modelo inicial de EF, mostrado na Figura 2.7, passa por um processo de atualização composto por uma etapa manual e uma automática como mostra o fluxograma da Figura 2.8. Na etapa

manual o modelo inicial de EF é revisado e ajustado manualmente para proporcionar uma melhor relação entre as frequências naturais experimentais e numéricas da ponte. Na etapa automática, o modelo de EF manualmente atualizado é novamente alterado por meio de um processo de otimização. Desta forma pode-se concluir que a atualização manual sobre a ponte de Clifton, que consistiu na construção de diferentes modelos numéricos para comparação com o modelo modal experimental, foi muito útil visto que melhorou significativamente a correlação entre o modelo experimental e o numérico. O modelo numérico atualizado servirá de base para qualquer avaliação futura da estrutura, construindo assim possíveis cenários do comportamento da mesma frente a diferentes ações.



Figura 2.6 – Ponte que liga Clifton em Bristol a Leigh Woods, Reino Unido

Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Clifton.bridge arp.750pix.jpg>,

acesso: agosto 2009

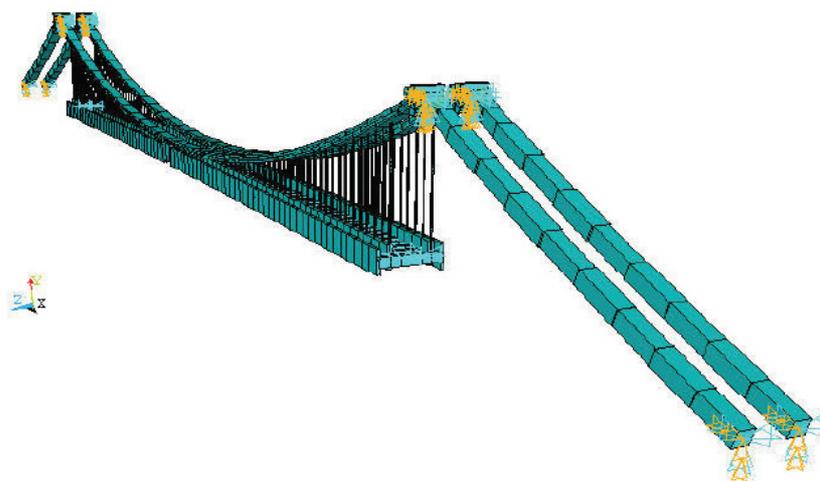


Figura 2.7 – Modelo inicial em elementos finitos, Merce (2007)

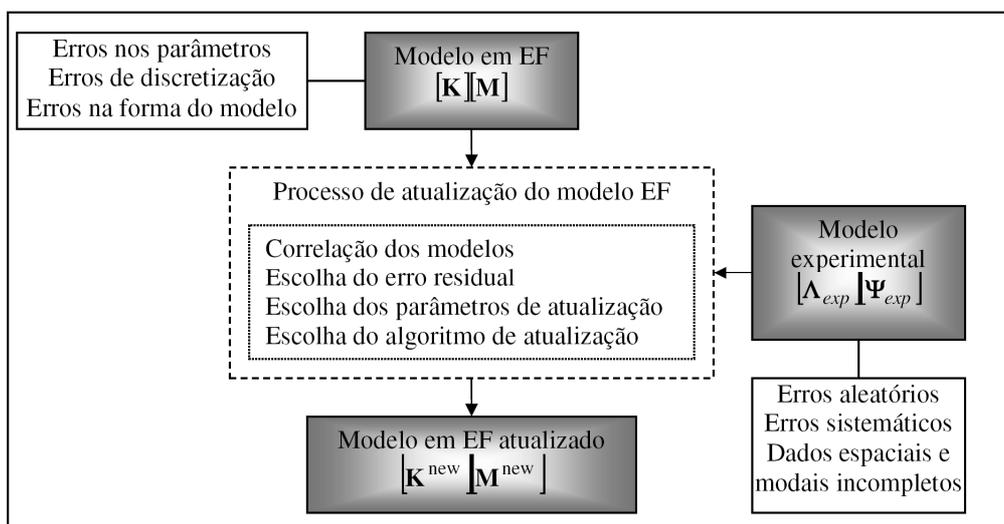


Figura 2.8 – Processo de atualização do modelo de EF, Merce (2007)

Bozdag et al. (2006) realizaram uma análise experimental e numérica com o objetivo de verificar a durabilidade de um reparo realizado na báscula do tabuleiro da ponte basculante de Gálata, Turquia, que é uma das maiores pontes basculante do mundo. Pouco depois de entrar em serviço, algumas fissuras e deformações foram notadas sobre as básculas da ponte em 1998. Para a análise experimental foram realizados estudos relacionados à determinação da tensão atuante sobre a estrutura e seu comportamento dinâmico. O modelo numérico da estrutura foi realizado com o auxílio do programa

computacional ANSYS. Com tal análise os autores puderam constatar que, durante a operação da ponte, a frequência do circuito hidráulico de óleo, encontrava-se entre o intervalo de variância da primeira frequência da estrutura, fato que gerava um comportamento dinâmico instável da ponte durante a operação de abertura das basculas. O estudo revelou também que a primeira frequência natural da estrutura está na faixa de frequência de terremotos possíveis de ocorrer na região de Istambul.



Figura 2.9 – Ponte basculante Gálata, Turquia

Fonte: <http://picasaweb.google.com/goanevy/istanbulturkeyei>, acesso: fevereiro 2009

Costa et al. (2002) realizaram a modelagem e a análise numérica da ponte Lagoncinha em Portugal, mostrada na Figura 2.10, sob a ação do tráfego rodoviário e considerações de recalques de apoio, com o objetivo de averiguar se os danos observados poderiam ser atribuídos a essas solicitações. Para a modelagem numérica foi utilizando o método de elementos finitos com o auxílio do Programa CASTEM2000, dando ênfase a modelagem dos arcos. A coleta de dados para a modelagem foi realizada por meio de inspeções visuais, levantamento topográfico, ensaios laboratoriais e ensaios *in loco*. Com as inspeções visuais as anomalias presentes na estrutura foram detectadas. O levantamento topográfico, para a definição das características geométricas da ponte, foi realizado através da técnica de fotogrametria, que permitiu reconstruir, computacionalmente, modelos 2D e 3D da ponte a partir das fotografias dos elementos. Os ensaios laboratoriais foram realizados para a caracterização mecânica dos materiais

da estrutura, através da extração do material dos blocos de pedra dos arcos. Por sua vez os ensaios *in loco* (ensaios dinâmicos) foram utilizados para a verificação das propriedades modais da estrutura. O tratamento dos dados experimentais, com o auxílio de programas comerciais para processamento de sinal e análise modal SIGNALCALC ACE (12) e o ARTeMIS (13), permitiram obter uma estimativa das frequências da estrutura e os respectivos modos de vibração, indicaram também zonas e direções de menor rigidez. A calibração do modelo numérico foi efetuada com base nos ensaios realizados *in loco*, em laboratórios e nas informações obtidas pelas inspeções visuais. Foi realizada, então, a análise do modelo calibrado frente às solicitações de tráfego e recalque do apoio norte, sendo determinadas as deformações e as tensões principais. Frente à análise feita sobre o monumento os autores concluíram que não há a necessidade de reforço estrutural, e quanto aos efeitos de tráfego foi verificada uma boa margem de segurança. Os recalques nos apoios se apresentam como os responsáveis pelo agravamento significativo da abertura de juntas, e de acordo com a inspeção visual foi indicada a transferência de uma caixa de inspeção existente debaixo da ponte, localizada ao longo da corrente do rio, para um lugar suficientemente afastado, de forma a evitar possíveis recalques causados pela erosão na base dos pilares.



Figura 2.10 – Ponte da Lagoncinha sobre o Rio Ave, Vila Nova de Famalicão, Portugal.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_de_Lagoncinha, acesso: fevereiro 2009

Galvín e Domínguez (2006) realizaram uma análise experimental e numérica sobre a ponte estaiada Barqueta, Sevilha (Espanha), apresentada na Figura 2.11. A análise

experimental foi realizada sob duas condições: uma na hora do *rush*, quando um das linhas da ponte encontrava-se congestionada, e outra em condições normais de uso. Os ensaios foram realizados em dois períodos: julho de 2005 e outubro de 2006. Para a identificação dos parâmetros modais quatro métodos foram aplicados aos dados obtidos dos ensaios: o método de detecção de pico; Averaged Normalized Power Spectral Densities (ANPSD); Enhance Frequency Domain Decomposition (EFDD) e o método de Identificação dos Subespaços Estocásticos (SSI). Os resultados determinados pelos experimentos foram comparados com os obtidos através de um modelo numérico, ambos os conjuntos de dados apresentaram boa concordância. Os resultados obtidos no teste de 2005 foram correlacionados com os obtidos em outubro de 2006 para avaliação do dano da estrutura, por meio do método Damage Index Method (DIM). Os resultados apresentaram boa correlação, o que significa que a ponte não sofreu qualquer dano durante esse período.



Figura 2.11 – Ponte estaiada Barqueta, Sevilha Espanha, à esquerda e o modelo à direita.

Fonte: www.skyscrapercity.com/showthread.php, acesso: fevereiro 2009

Penner (2001) desenvolveu uma técnica para o diagnóstico de sistemas de pontes por meio de ensaios não destrutivos associados à modelagem numérica. Os resultados de ensaios de monitoração do tráfego normal e de provas de cargas dinâmicas foram utilizados no processo de identificação de sistemas. A calibração do modelo numérico foi realizada utilizando os modelos modais experimentais e informações resultantes da verificação do projeto e inspeção visual. Foram utilizados dados de monitoração e prova

de carga dinâmica realizada em pontes localizadas em duas rodovias brasileiras. Os ensaios foram realizados em quatro pontes dos Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro, no período de 1998 a 2000. A modelagem numérica do tabuleiro das pontes foi realizada por meio de duas abordagens, uma delas utilizando elementos de casca e outra utilizando elementos de barra. Na consideração da interação solo estrutura foram utilizados elementos de mola localizados abaixo das transversinas de extremidade e molas horizontais, transversais e longitudinais, de rigidez variável, ao longo da altura dos tubulões conforme indica a Figura 2.12. A modelagem foi feita com o emprego do programa computacional de elementos finitos SAP2000 – não linear. As características do concreto foram obtidas através de ensaios de compressão com testemunhos retirados das vigas da estrutura. A autora pode concluir que os resultados das análises mostraram que a técnica de avaliação de desempenho de sistemas estruturais de pontes de concreto é eficaz para o diagnóstico de pontes existentes, desde que os ensaios sejam realizados de modo adequado, associados à inspeção visual e aos efeitos do tráfego aleatório. As informações obtidas com ensaios dessa natureza poderão vir a contribuir para futuras modificações nos critérios de cálculo das pontes, tanto no aspecto de detalhamento dos elementos secundários quanto nas considerações das ações dinâmicas a serem empregadas na análise estrutural.

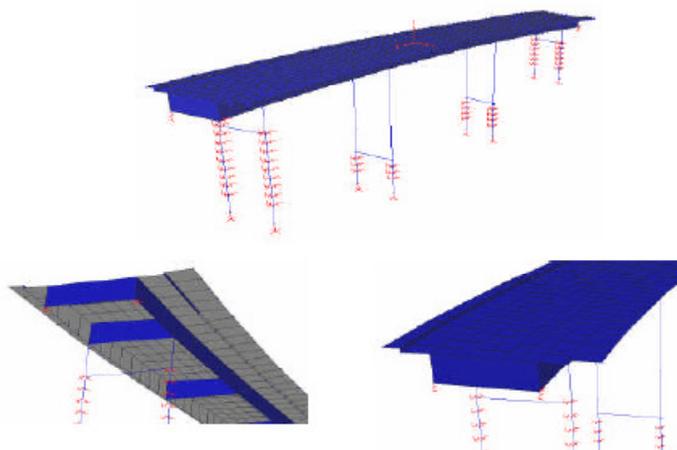


Figura 2.12 – Modelo numérico de elementos de barra e de casca da ponte sobre o Rio Entupido. Situação de comportamento estrutural efetivo, Penner (2001)

Ren et al. (2004, a, b) avaliaram a ponte pênsil Roebling (Figura 2.13), por meio de uma análise dinâmica, com o intuito de obter informações sobre a estrutura. O estudo realizado apresentou as seguintes etapas: modelagem em EF; análise modal; testes de vibrações ambientais na estrutura; atualização do modelo de EF e avaliação da capacidade da ponte quando submetida a carregamentos externos. A ponte foi modelada por intermédio do programa ANSYS, sendo que a técnica de detecção de pico foi aplicada no processo de identificação das propriedades modais a partir de medidas de vibrações ambientais. O processo de atualização foi realizado por meio de um estudo paramétrico, onde o impacto de parâmetros estruturais e geométricos sobre as propriedades modais foram analisados. As conclusões tiradas deste estudo comprovaram que os parâmetros que afetavam as propriedades modais verticais eram o módulo de elasticidade dos cabos, a massa da ponte e a rigidez das treliças, enquanto que os parâmetros que afetavam as propriedades modais transversais eram os mesmos citados anteriormente acrescido da rigidez do tabuleiro. Outra constatação tirada do estudo paramétrico foi que as variações dos parâmetros de rigidez causaram uma reordenação na seqüência dos modos de vibrações do modelo numérico. A atualização do modelo numérico foi então realizada através do ajustamento destes parâmetros de projeto para que as frequências e modos de vibrações numéricos combinassem com as frequências e modos de vibrações obtidos através dos experimentos. Apenas os modos de vibrações verticais e transversais do modelo foram utilizados na calibração, sendo que o novo modelo numérico apresentou uma boa correlação com o experimental. Tendo em mãos o modelo numérico atualizado, este foi subseqüentemente submetido à condição extrema de carregamento para avaliar a margem de segurança estática da estrutura. Uma redução de até 40% da área dos cabos foi também utilizada para simular uma deterioração da estrutura. A margem de segurança encontrada através da análise citada acima foi boa, sendo esta uma conclusão de muita significância para assegurar a continuidade de tráfego sobre a ponte.

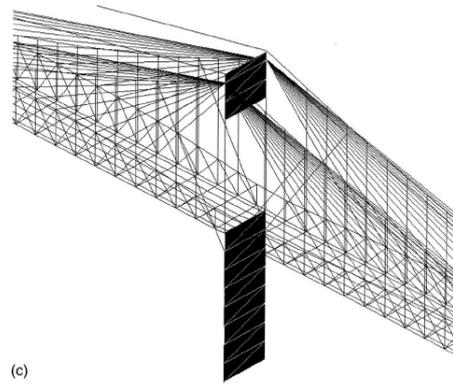
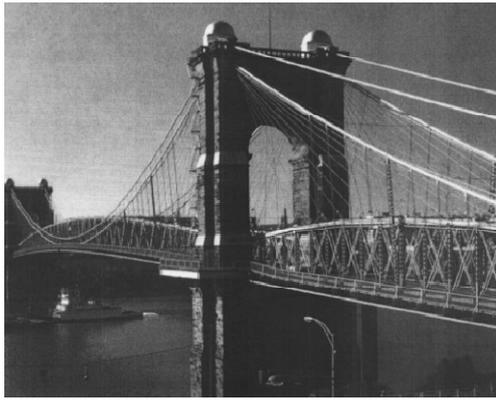


Figura 2.13 – Ponte pênsil John A. Roebling à esquerda e modelo 3D da torre e cabos à direita, Ren et al. 2004

Daniell & Macdonald (2005) descreveram o processo de atualização de um modelo de elementos finitos de uma seção engastada da ponte estaiada Second Severn Crossing, Reino Unido (Figura 2.14), utilizando técnicas de atualização manual. Os dados experimentais foram obtidos através de ensaios de vibrações ambientes durante a construção da ponte, visto que nesta etapa as condições de contorno nos extremos do tabuleiro da ponte eram livres, evitando incertezas no processo de modelagem da conexão e da interação com a estrutura completa. Deste modo, a interferência de cargas móveis, como o tráfego, na frequência natural da estrutura era também minimizada. No processo de atualização manual foi estudada a sensibilidade das frequências naturais da estrutura às mudanças de parâmetros estruturais, à variação do tipo de matriz de massa, matriz consistente ou concentrada, ao aumento da discretização do tabuleiro e à adição de elementos adicionais na modelagem das torres. Além disso, foi realizada uma análise estática com não-linearidade geométrica antes da análise modal. Os autores concluíram que, após a atualização do modelo houve significativa melhora na correlação entre as frequências naturais do modelo numérico e do experimental.

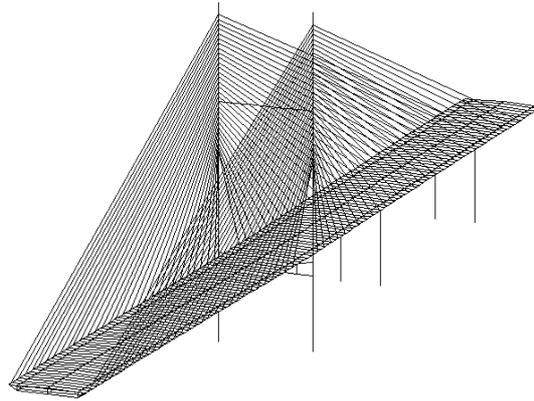


Figura 2.14 – Modelo inicial em elementos finitos da ponte estaiada Second Severn Crossing, Daniell & Macdonald (2005)

Meo & Zupano (2005) realizaram um processo de otimização da localização de sensores sobre a passarela suspensa Nottingham (Figura 2.15). Seis diferentes métodos foram aplicados: três baseados na maximização do determinante da matriz de informação Fisher; que está relacionada aos modos de vibração numéricos, onde se maximiza a combinação da independência espacial dos modos desejados e a força do sinal nos dados dos sensores, um nas propriedades dos coeficientes das matrizes de covariância, sendo este proposto pelos autores, e dois com base em uma abordagem na energia de deformação. Os dados modais obtidos a partir de um modelo de EF da ponte foram utilizados no processo de otimização. Após a realização da otimização, os sensores foram colocados na ponte segundo a indicação de cada método individualmente e os dados modais experimentais foram obtidos. Dois critérios de avaliação foram utilizados para comparar a capacidade de diferentes técnicas de otimização de localização de sensores. O primeiro critério avaliava a capacidade das técnicas de capturar a resposta dinâmica da estruturas medindo o erro quadrado médio entre os modos de vibrações do modelo de elementos finitos e os obtidos por uma interpolação de SPLINE cúbica dos deslocamentos medidos nos sensores selecionados. O segundo critério de comparação foi realizado utilizando a matriz de informação Fisher para a medição da força do sinal. Deste modo, a relação entre o número de sensores e a força do sinal foi estabelecida. Os resultados mostraram que o método desenvolvido pelos autores foi eficaz na otimização da posição onde devem ser colocados os sensores para identificar a vibração das

características das pontes estudadas, tendo a vantagem de ser o único capaz de indicar o número ótimo de sensores.

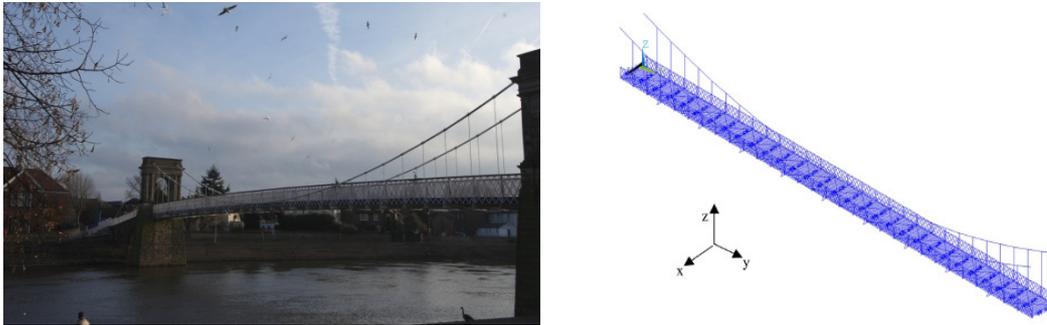


Figura 2.15 – Passarela em Nottingham à esquerda e o modelo de EF à direita

Fonte: <http://www.urban75.org/photos/nottingham/nottingham-2006.html>,
acesso: fevereiro 2009.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 SISTEMA DE VÁRIOS GRAUS DE LIBERDADE

A equação de equilíbrio para um sistema estrutural de N graus de liberdade submetida a carregamentos dinâmicos pode ser dada por (Clough & Penzien, 1993):

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{v}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.1)$$

onde \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} são respectivamente as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema de dimensão NxN. Os vetores $\ddot{\mathbf{v}}(t)$, $\dot{\mathbf{v}}(t)$ e $\mathbf{v}(t)$, representam, respectivamente, os vetores de acelerações, velocidades e deslocamentos nodais do sistema. Sendo $\mathbf{F}(t)$ o vetor de forças externas aplicadas.

As equações de movimento para um sistema em vibração livre e não amortecido, podem ser obtidas da Equação (3.1), omitindo a matriz de amortecimento e o vetor de cargas aplicadas, resultando:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{v}(t) = 0 \quad (3.2)$$

A solução do sistema de equações diferenciais lineares de segunda ordem com coeficientes constantes, dado pela Equação (3.2), apresenta como solução uma equação do tipo harmônico dada por:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (3.3)$$

onde \mathbf{v}_0 é o vetor que representa a forma deformada do sistema, a qual não varia com o tempo, ω é a frequência circular do movimento e θ é o ângulo de fase.

Substituindo a Equação (3.3), bem como a sua segunda derivada, na Equação (3.2), obtém-se a seguinte expressão, visto que, o termo em seno é arbitrário e pode ser omitido:

$$(\mathbf{K} - \mathbf{M} \omega^2) \mathbf{v}_0(t) = 0 \quad (3.4)$$

A Equação (3.4) é a equação de equilíbrio dinâmico do sistema vibrando livremente.

Para que a Equação (3.4) admita uma solução diferente da trivial ($\mathbf{v}_0(t)=0$), é necessário que o determinante do sistema seja nulo, assim:

$$|\mathbf{K} - \mathbf{M} \omega^2| = 0 \quad (3.5)$$

A Equação (3.5) é chamada de equação de frequência do sistema e nos conduz a um problema de autovalores e autovetores, sendo ω^2 o autovalor e \mathbf{v}_0 o autovetor. Essa equação representa uma equação algébrica em ω^2 para um sistema de N graus de liberdade.

As N raízes dessa equação ($\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2, \omega_4^2, \dots, \omega_N^2$) representam os autovalores dos N modos de vibração do sistema. O modo com menor frequência é chamado de primeiro modo, o próximo maior é chamado segundo modo, etc. O vetor composto do conjunto de frequências, disposto em sequência, é chamado vetor de frequência ω :

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N)^T \quad (3.6)$$

Para matriz simétrica, positiva, definida de massa e rigidez referente à estabilidade estrutural do sistema todas as raízes da Equação 3.6 são reais positivas.

3.2 FERRAMENTA COMPUTACIONAL: PROGRAMA ANSYS

Para obtenção de resultados das análises da passarela em estudo, foi utilizado como ferramenta computacional o programa ANSYS versão 10 (2005), que se baseia no método de elementos finitos.

O programa ANSYS (2005) pode ser dividido em dois níveis básicos a seguir: um que corresponde à entrada e saída de dados do programa; e outro onde se processam os

dados, conhecido como rotina de dados, onde se faz a construção do modelo matemático, se aplicam as cargas, obtém-se a solução e avaliam-se os resultados da solução.

O Programa ANSYS possibilita enumerar várias condições de visualizar os resultados, pode-se citar: visualização das condições de contorno impostas ao projeto; vetores, cargas aplicadas e tensões; geração de listagens para relatórios; operação com vetores e escalares; submodelação para obtenção de um resultado aprimorado; geração de malha automatizada; cálculo de derivadas; integrais; vetores normais e tangenciais; fadiga e parâmetros de fratura.

Para avaliar os resultados o programa contém dois pós-processadores diferentes: o pós-processador geral POST1 e o POST26. O pós-processador POST1 permite rever os resultados analisados sobre o modelo por completo, ou parte dele, em específicos passos de carga, instantes de tempo ou frequências. O POST26 é o pós-processador onde se faz análises em regime variável. É usado para rever os resultados em pontos específicos no modelo em relação a uma variável (tempo, frequência, etc.).

O programa ANSYS, também possibilita vários tipos de análises: análise estática estrutural, análise dinâmica estrutural de vibração livre (análise modal) e de vibração forçada (análise transiente).

A análise modal tem por objetivo determinar as frequências e modos de vibração naturais da estrutura. É uma análise com característica linear, não linearidades são ignoradas mesmo se os parâmetros estiverem definidos. Pode-se ainda utilizar estruturas pré-tencionadas.

Para a resolução dos problemas de autovalores e autovetores o programa permite quatro tipos de procedimento: o método reduzido; o método de iteração por subespaços; o método antissimétrico e o método amortecido. O método escolhido para as análises modais deste trabalho foi o método de iteração por subespaços por sua maior simplicidade, e também porque não possui nenhuma restrição por parte do próprio

programa computacional, como por exemplo, quanto a dimensão das matrizes do sistema e tipos de elementos.

4 MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

4.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A passarela analisada neste trabalho está localizada na cidade de Brasília, sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento E.P.I.A, trecho Cruzeiro Novo, (setor residencial de Brasília) / CEASA. A passarela está situada sobre um trecho da rodovia BR040, que atravessa uma área industrial do Distrito Federal, havendo fluxo de veículos pesados no local. Além disso, ao final das rampas existem paradas de ônibus incorporadas à estrutura da passarela no nível da rua. Por esses motivos a passarela é muito utilizada pelos pedestres.

A passarela é composta por quatro vãos de rampa inclinadas, três com 51,165 m e um com aproximadamente 31,27 m, e mais quatro vãos de passarela horizontais, dois com 34,11 m e dois com aproximadamente 31,27 m, Figura 4.1. Os vãos inclinados têm como acesso uma base de concreto que nivela a altura entre o nível de piso e a do vão, com inclinação de 5%.



Figura 4.1 – Passarela sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento (E.P.I.A), trecho Cruzeiro Novo/ CEASA, vista superior

Fonte: <http://maps.google.com.br/> (2008), acesso: agosto 2008

A sustentação da passarela se dá por intermédio de cinco pilares circulares que fazem as ligações entre os vãos inclinados e horizontais, denominados cogumelos como mostra a Figura 4.2. A largura da passarela é de 2,40 m, de eixo a eixo, em todo seu comprimento.



Figura 4.2 – Vista dos Cogumelos da passarela sobre a E.P.I.A

A estrutura da passarela em aço é formada por treliças planas que se ligam através de travessas em aço conforme mostra a Figura 4.3. As treliças são formadas por barras na posição diagonal e na posição horizontal. A passarela pode ser dividida em módulos. Os maiores vãos inclinados possuem 18 módulos cada um, enquanto que os maiores vãos horizontais possuem 12 módulos cada.

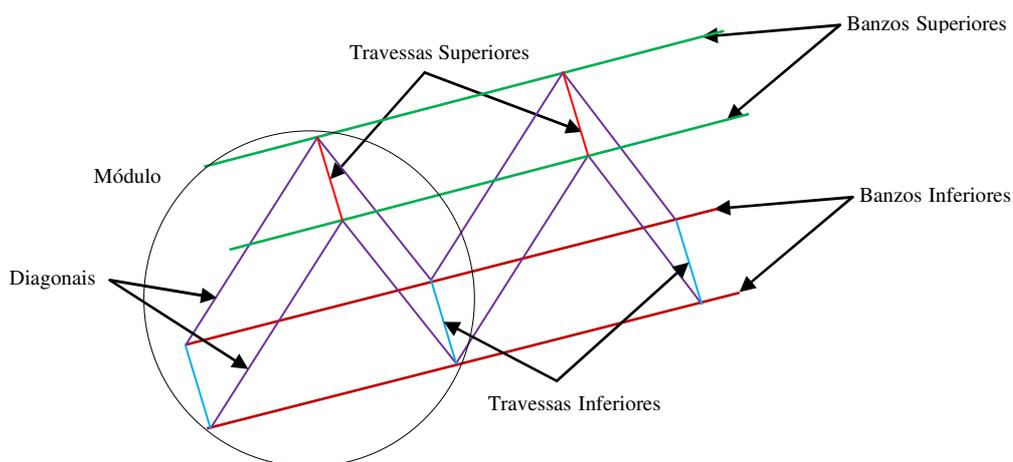
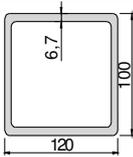
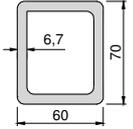
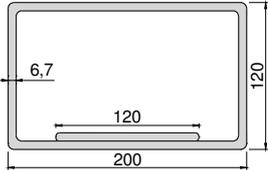
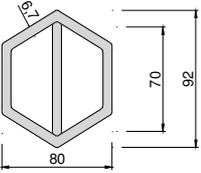


Figura 4.3 – Disposição dos elementos estruturais que compõem os vãos da passarela sobre a E.P.I.A

As peças metálicas são constituídas por diagonais, banzos e travessas. As diagonais têm a seção simples ou reforçada, com o formato de um hexágono com 6,70 mm de espessura. As diagonais reforçadas apresentam uma chapa soldada, atravessada em seu interior, com 70 mm de largura e da mesma espessura e só existe nas barras dos vãos inclinados da passarela próxima aos seus apoios. Os banzos inferiores e superiores possuem seção retangular de espessura variável de 6,70 mm ou 8,00 mm. Os banzos com 8,00 mm de espessura possuem uma chapa de reforço de 6,70 mm de espessura e 120 mm de largura soldada na base inferior do banzo. As travessas também possuem seção retangular com espessura 3,04 mm para as superiores e as inferiores com 6,70 mm de espessura. A Tabela 4.1 abaixo resume as propriedades das seções da estrutura da passarela.

Tabela 4.1 – Propriedades das seções da passarela sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento, Gomes (2006).

<i>Seção</i>	<i>Peça</i>	<i>Descrição</i>
	Travessas Inferiores	As travessas inferiores possuem seção de 120 x 100 mm, com espessura de 6,7 mm.
	Travessas Superiores	As travessas superiores possuem seção de 60 x 70 mm, com espessura de 6,7 mm.
	Banzos	Os banzos superiores e inferiores possuem seção transversal retangular de 120 x 200 mm. A espessura pode ser de 6,7 mm ou de 8,0 mm. Alguns dos banzos que possuem 8,0 mm de espessura possuem também um reforço constituído por uma chapa de 120 mm de largura e de 6,7 mm de espessura, soldada na face inferior.
	Diagonais	As diagonais são hexagonais com de 92 mm de um vértice ao outro oposto. A espessura é de 6,7 mm. Algumas diagonais são reforçadas com uma chapa soldada que atravessa seu interior, com 70 mm de largura e 6,7 mm de espessura.

A cobertura da passarela é confeccionada em placas de argamassa armada em formato de arcos, com 2,84 m de comprimento, 2,4 m de largura em planta, arco com 1,74 m de raio e 2,0cm de espessura. As laterais da cobertura se apóiam sobre os banzos superiores.

O piso da passarela é formado de placas de concreto armado pré-fabricado, com as dimensões de 0,4m de largura e aproximadamente 2,84m de comprimento. As placas têm 3,0cm de espessura e possuem uma nervuras nas bordas com 12,0cm de altura por 5 cm de largura aproximadamente, Figura 4.4.



Figura 4.4 – Detalhes das Placas de Piso da Passarela sobre a E.P.I.A, vista inferior

O corrimão e o guarda-corpo são compostos por barras com seções tubulares em aço, ligadas às faces internas das diagonais por pequenas barras de ferro de seção circular. A barra do corrimão possui 2 1/2” de diâmetro com espessura de 1,6 mm. As três barras que formam o guarda-corpo possuem 1 1/2” de diâmetro com 1,6 mm de espessura, Figura 4.5.



Figura 4.5 – Vista do vão horizontal com detalhes do corrimão e guarda-corpo da passarela sobre a E.P.I.A.

A ligação dos vãos é feita por meio de solda em chapas chumbadas sobre os cogumelos. Nessa região há o encontro entre banzo inferior, diagonal e uma barra vertical que é soldada em uma chapa de aço chumbada sobre toda a borda da laje. As estruturas conjuntas de banzos e travessas inferiores e o piso da passarela apóiam sobre essa região. Todas as ligações entre as peças metálicas componentes da passarela foram realizadas através de solda. Para aumentar a rigidez das ligações foram utilizados enrijecedores em chapa metálica como pode ser visto na Figura 4.6. A Figura 4.7 mostra um desenho esquemático da Seção transversal da passarela.



Figura 4.6 – Detalhes dos enrijecedores do piso a esquerda e da cobertura a direita, da passarela sobre a E.P.I.A

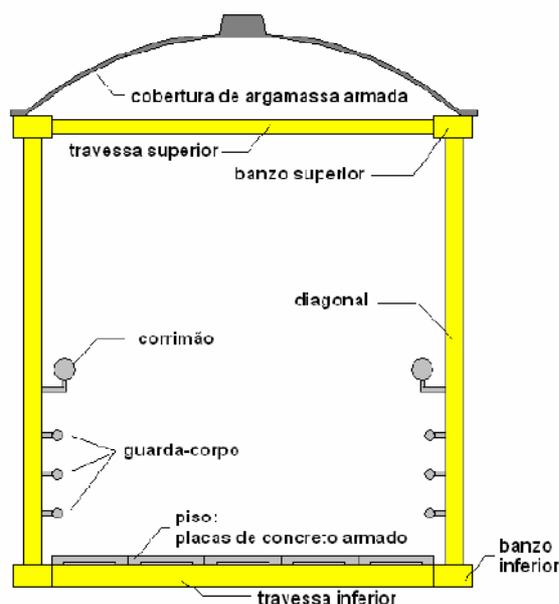


Figura 4.7 - Seção transversal da passarela sobre a E.P.I.A

As propriedades físicas dos materiais que compõe a passarela e consideradas na análise numérica são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades dos materiais que compõe a passarela sobre a E.P.I.A.

<i>Material</i>	<i>Módulo de Elasticidade (N/m²)</i>	<i>Peso Específico (N/m³)</i>	<i>Coefficiente de Poisson</i>
Aço SAC 41	$2,074 \times 10^{11}$	$7,86 \times 10^4$	0,3
Concreto Armado	$2,90 \times 10^{10}$	$2,50 \times 10^4$	0,2
Argamassa Armada	$5,00 \times 10^9$	$2,20 \times 10^4$	0,2

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA

Para a obtenção dos resultados da análise numérica da passarela em estudo, foi utilizado como ferramenta computacional o programa ANSYS versão 10 (2005) que se baseia no método de elementos finitos.

Na modelagem, o vão horizontal da passarela foi considerado como pórtico espacial simplesmente apoiado nos cogumelos de concreto armado. Assim as peças metálicas que compõe a treliça, como as diagonais, banzos inferiores e superiores, travessas inferiores e superiores, foram modeladas como elementos de pórtico espacial. O piso e a cobertura foram consideradas como elementos de placa. Corrimão e as outras barras que fazem parte do parapeito foram considerados como elementos de massa concentradas nos nós inferiores.

Nos apoios das placas de cobertura na treliça metálica da passarela foram utilizados nós que permitem transferência das cargas diretamente para os nós da treliça nos módulos. As placas de piso se apóiam nas travessas inferiores que por sua vez pertencem ao pórtico principal da passarela.

O modelo em estudo foi discretizado em 971 nós e 1341 elementos como mostra a Figura 4.8. A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos elementos utilizados. Após a discretização foram obtidas as frequências e os modos de vibração naturais da passarela com o auxílio das rotinas do programa ANSYS.

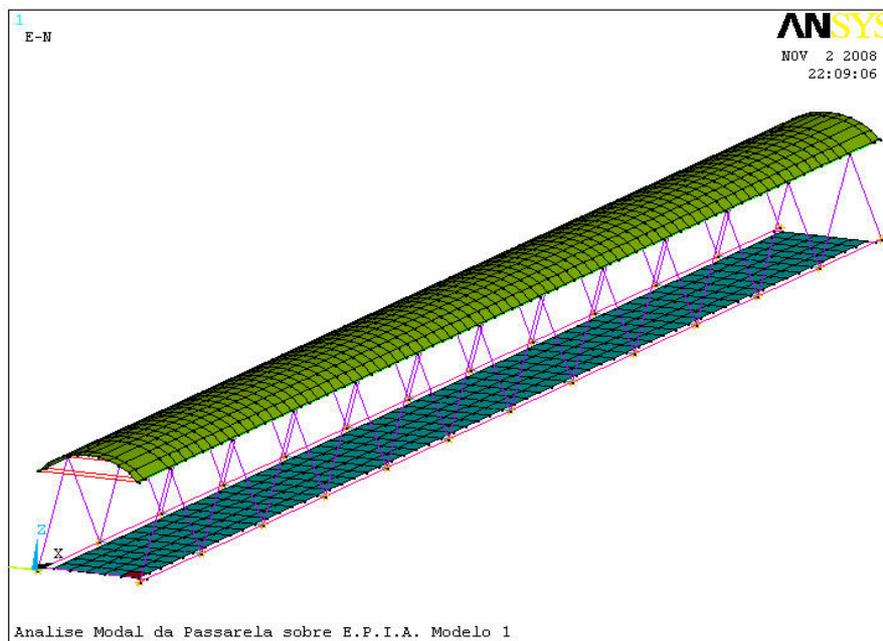


Figura 4.8 - Disposição dos elementos para o vão horizontal da passarela sobre a E.P.I.A

Tabela 4.3 – Elementos utilizados na modelagem da passarela sobre a E.P.I.A.

<i>Peça Estrutural</i>	<i>Tipo de Elemento</i>	<i>Elemento ANSYS</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Cor Correspondente</i>
Diagonais	Pórtico espacial	BEAM4	48	
Travessas	Pórtico espacial	BEAM4	Superiores =16	
		BEAM4	Inferiores =77	
Banzos	Pórtico espacial	BEAM4	Superiores = 30	
		BEAM4	Inferiores = 28	
Corrimão e guarda-corpo	Massa concentrada	MASS21	26	-
Piso	Placa	SHELL63	300	
Cobertura	Placa	SHELL63	802	

Foram considerados dois modelos numéricos neste estudo. No primeiro as propriedades dos materiais foram às apresentadas na Tabela 4.2 e no segundo o módulo de elasticidade das barras de aço que compõe a estrutura principal foi reduzido para $1,72 \times 10^{11}$ N/m² conforme valor utilizado por Brasiliano et al. (2008).

4.3 MODELO EXPERIMENTAL

A fim de identificar as propriedades dinâmicas da passarela, Brasiliano et al. (2008), realizaram testes por intermédio de métodos de identificação estocástica no domínio do tempo, SSICOV/ref e SSI-DATA/ref, utilizando apenas as medidas de acelerações da resposta da estrutura. O objetivo do ensaio foi identificar alguns modos de vibração verticais, laterais e de torção da passarela. Para isto foram medidas as acelerações ao longo do piso da passarela nos pontos indicados na Figura 4.9. Na Figura 4.10, pode ser verificado o posicionamento dos acelerômetros, que estão localizados nos nós da treliça na placa de piso.

Foram escolhidas as linhas de referência que representava maior valor de ordenada dos modos e que não coincidiam com os nodos dos modos com frequência mais baixa.

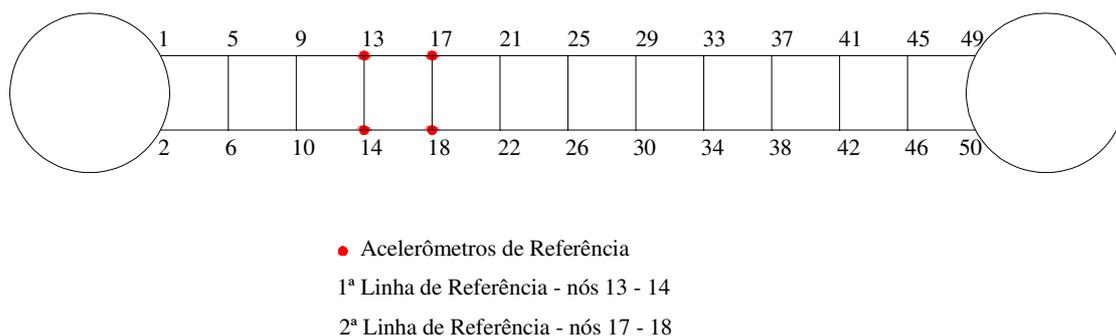


Figura 4.9 – Pontos de medição e referência do teste modal, Brasiliano et al. (2008)



Figura 4.10 – Detalhe do posicionamento dos acelerômetros, Brasiliano et al. (2008)

Os sinais provenientes dos acelerômetros instalados na passarela foram adquiridos por meio de um equipamento Lynx Tecnologia Eletrônica composto por quatro placas do tipo AI 2164 contendo oito canais de aquisição cada. Como parte da aquisição dos dados, foi utilizado o software AqDados 7, instalado no *notebook*, que permitiu a configuração dos ensaios, assim como a visualização dos sinais à medida que estes eram adquiridos. Os nove acelerômetros utilizados eram do tipo piezoelétricos e quatro deles apresentavam sensibilidade de 0,16mV/g enquanto cinco tinham sensibilidade de 103,8mV/g.

O teste modal foi dividido em nove etapas em que duas linhas de acelerômetros permaneceram fixas nos pontos de referência indicados na Figura 4.9. Cada linha compreendia três acelerômetros de alta sensibilidade: um colocado na direção horizontal e dois colocados na direção vertical, um em cada lado da placa de piso Figura 4.10. Em

cada etapa do teste nove registros de acelerações foram obtidos, tais valores com suas respectivas direções estão resumidos na Tabela 4.4, onde V representa a direção vertical e H representa a direção horizontal.

Tabela 4.4 – Configuração do teste e pontos de medição, Brasiliano et al. (2008)

<i>Configuração</i>	<i>Pontos de Medição / Direção</i>	<i>Pontos de Referência / Direção</i>
E1	5 / H, 5 / V, 6 / V	
E2	9 / H, 9 / V, 10 / V	
E3	21 / H, 21 / V, 22 / V	
E4	25 / H, 25 / V, 26 / V	13 / H, 13 / V, 14 / V
E5	29 / H, 29 / V, 30 / V	
E6	33 / H, 33 / V, 34 / V	17 / H, 17 / V, 18 / V
E7	37 / H, 37 / V, 38 / V	
E8	41 / H, 41 / V, 42 / V	
E9	45 / H, 45 / V, 46 / V	

Dos cinco acelerômetros de alta sensibilidade, três foram colocados na primeira linha de referência (13H, 13V e 14V) e os últimos dois colocados para medir as acelerações na segunda linha de referência.

A fim de excitar a estrutura dois pedestres caminharam lado a lado ao longo do vão, Figura 4.11. Outras fontes de excitação também foram utilizadas, como impactos com martelos e outros, porém não excitaram a passarela. A frequência de amostragem utilizada foi de 200 Hz e os sinais foram adquiridos durante 15 segundos.

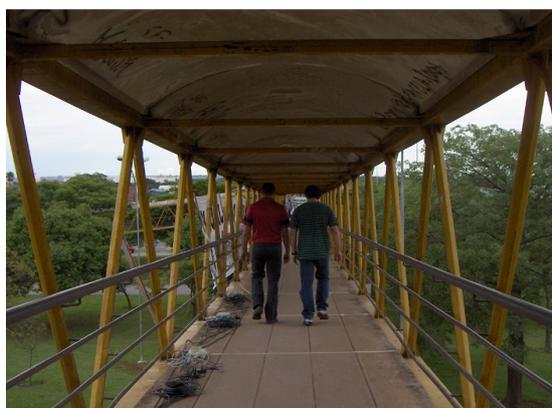


Figura 4.11 – Pedestres caminhando ao longo da passarela, Brasiliano et al. (2008)

Uma vez adquiridos os registros de acelerações, o processamento dos dados foi realizado em duas configurações: na primeira, foram utilizados os métodos do domínio do tempo SSIDATA/ref e SSI-COV/ref a fim de identificar as frequências naturais de vibração na direção vertical e os modos de vibração correspondentes; já na segunda configuração de processamento foram obtidas as funções densidade espectral de potência dos sinais adquiridos com o objetivo de identificar as frequências laterais e de torção uma vez que não foi possível identificá-las na primeira etapa.

Os resultados obtidos a partir dos métodos no domínio do tempo para a direção vertical encontram-se apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.12. A partir destes resultados, verifica-se que foi possível identificar a partir dos registros experimentais apenas os dois primeiros modos de vibração vertical da passarela. Embora as acelerações verticais tenham sido medidas em dois pontos do piso como mostrado na Figura 4.9, uma média desses sinais foi feita antes da aplicação dos métodos de identificação, para poder representar os modos ao longo de uma linha.

Tabela 4.5 – Frequências naturais verticais, Brasiliano et al. (2008)

Frequências	SSI-COV/ref (Hz)	SSI-DATA/ref (Hz)
1 ^a	3.92	3.94
2 ^a	10.08	10.11

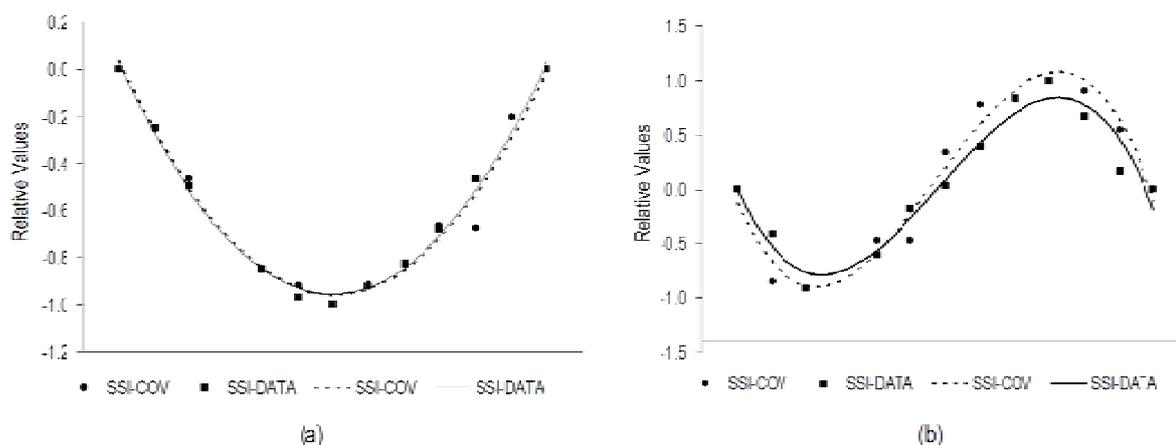


Figura 4.12 – Resultados experimentais correspondentes ao (a) primeiro modo de vibração (3,9 Hz) e ao (b) segundo modo de vibração (10,1 Hz), Brasiliano et al. (2008)

A Figura 4.13 mostra a função de densidade espectral de potência média obtida a partir dos registros de acelerações verticais. Os valores de frequências obtidos pelos métodos do domínio do tempo correspondem aos picos do espectro mostrado nesta figura. O pico pequeno em torno de 2,0Hz corresponde à taxa de passo do pedestre utilizado como fonte de excitação da passarela. O pico correspondente ao segundo harmônico do carregamento dos pedestres (~4,0Hz) não deveria ser maior do que aquele correspondente ao primeiro harmônico (~2,0Hz), portanto o segundo pico na figura corresponde à frequência fundamental da passarela na direção vertical. De fato, os resultados experimentais para a frequência fundamental da passarela podem ter sido influenciados pelas frequências da fonte de excitação; no entanto, uma vez que os métodos aplicados permitiram identificar a forma modal correspondente, pode-se afirmar que o valor em torno de 3,92Hz corresponde à primeira frequência de vibração da estrutura na direção vertical.

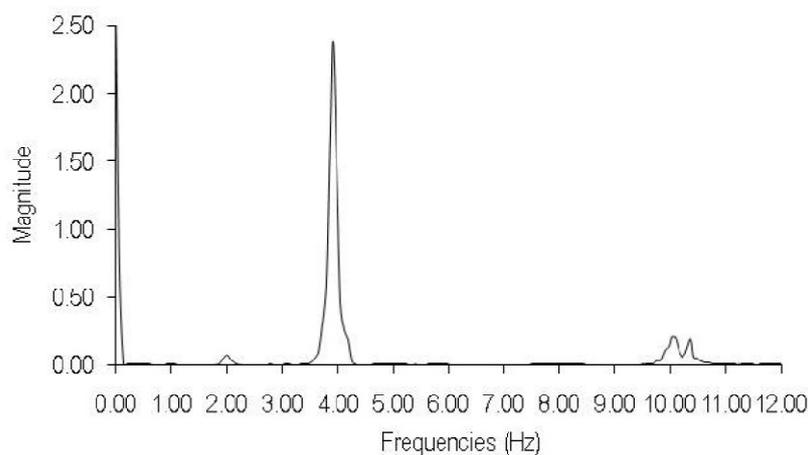


Figura 4.13. – Função de densidade espectral de potência para a direção vertical, Brasiliano et al. (2008)

A Figura 4.14 e Figura 4.15 mostram as funções de densidade espectral de potência obtida a partir dos registros de acelerações na direção lateral e de torção, respectivamente, nos pontos que representariam mais informações a respeito desses modos. Os resultados indicaram que a primeira frequência lateral da passarela é de aproximadamente 3,12 Hz, Figura 4.14. Um segundo pico parece em torno de 5,18 Hz.

A função de densidade espectral de potência para os modos de torção, Figura 4.15, apresenta dois picos, em torno de 8,23Hz e 11,35Hz.

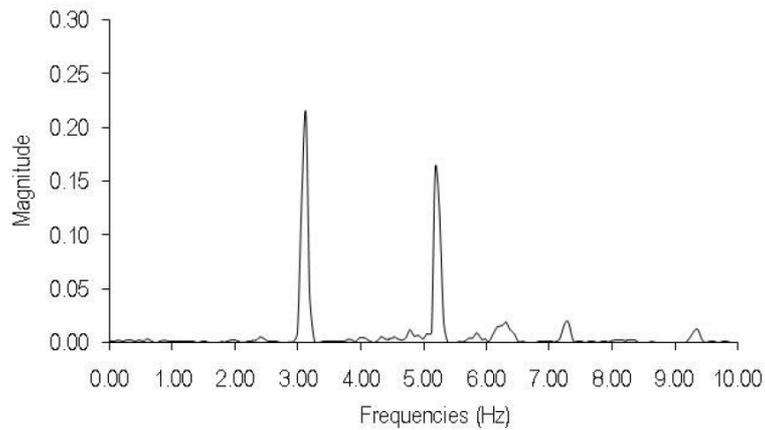


Figura 4.14. – Função de densidade espectral de potência para a direção lateral
Brasiliano et al. (2008)

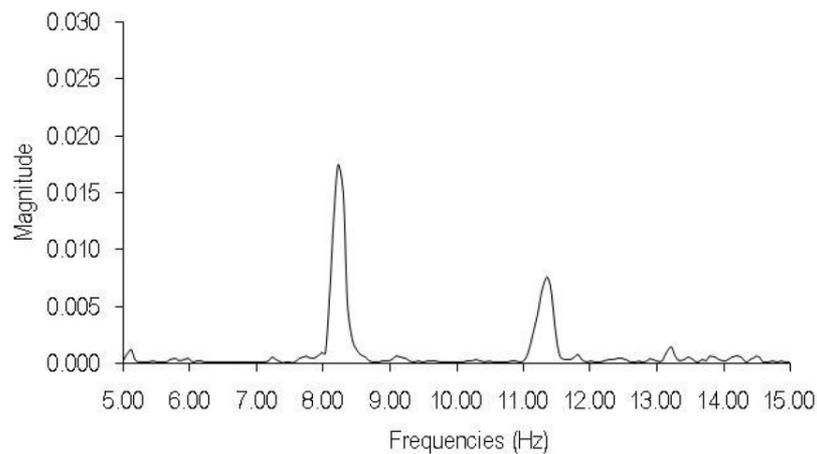


Figura 4.15 – Função de densidade espectral de potência para a torção,
Brasiliano et al. (2008)

Na atualização do modelo numérico foram utilizados apenas os dados referentes ao 1º e 2º modo de vibração vertical, uma vez que os modos de vibração laterais e de torção não puderam ser identificados experimentalmente.

5 RESULTADOS DOS MODELOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAL

Da análise numérica foram obtidas as dez primeiras frequências naturais e os correspondentes modos de vibração. Os resultados encontrados para os dois modelos analisados são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Análise de vibrações livres da passarela sobre a EPIA – modelo 1

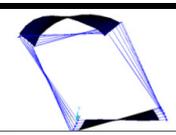
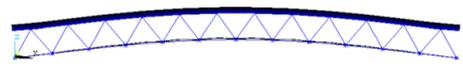
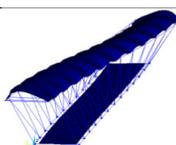
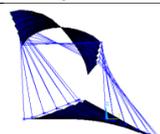
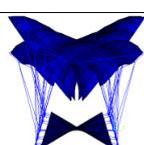
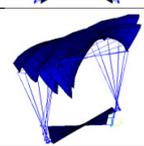
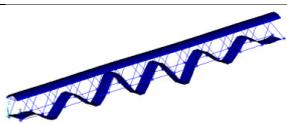
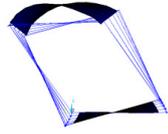
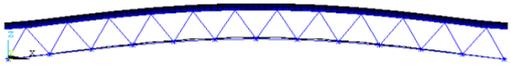
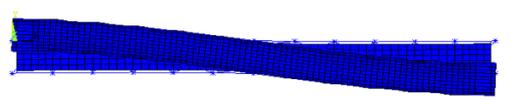
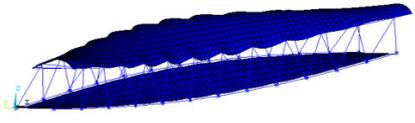
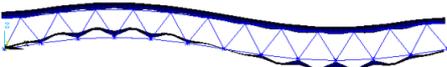
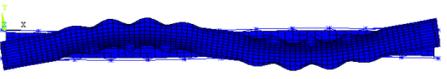
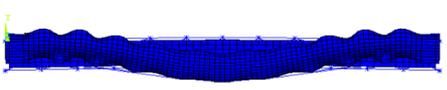
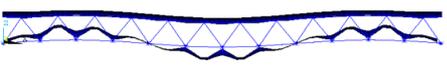
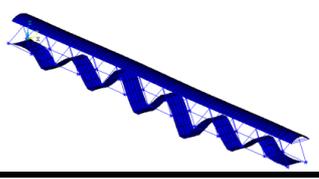
<i>Modos de Vibração</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>Descrição do Modo de Vibração</i>	<i>Vista do Modo de Vibração</i>
1 ^a	2,147	Torção do piso, cobertura e treliça com movimento lateral	
2 ^a	4,353	1º Modo Vertical	
3 ^a	5,226	Modo lateral da cobertura (piso permanece estático)	
4 ^a	6,430	Modo lateral da cobertura com torção, piso com torção	
5 ^a	8,206	Modo lateral do piso com torção, cobertura com torção permanece estática.	
6 ^a	10,779	2º Modo Vertical	
7 ^a	12,286	Modo lateral da cobertura com torção, piso com torção.	
8 ^a	12,826	Modo lateral da cobertura com torção, piso com torção.	
9 ^a	14,687	3º Modo vertical com deformação predominante do piso	
10 ^a	15,782	4º Modo vertical com deformação do piso, cobertura sem deformação.	

Tabela 5.2 – Análise de vibrações livres da passarela sobre a EPIA – modelo 2

<i>Modos de Vibração</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>Descrição do Modo de Vibração</i>	<i>Vista do Modo de Vibração</i>
1 ^a	1,976	Torção do piso, cobertura e treliça com movimento lateral	
2 ^a	4,070	1º Modo Vertical	
3 ^a	4,932	Modo lateral da cobertura (piso permanece estático)	
4 ^a	5,989	Modo lateral da cobertura com torção, piso com torção	
5 ^a	7,690	Modo lateral do piso com torção, cobertura com torção permanece estática.	
6 ^a	10,117	2º Modo Vertical	
7 ^a	11,675	Modo lateral da cobertura com torção, piso com torção.	
8 ^a	12,328	Modo lateral da cobertura com torção, piso com torção.	
9 ^a	13,950	3º Modo vertical com deformação predominante do piso	
10 ^a	15,262	4º Modo vertical com deformação do piso, cobertura sem deformação.	

A Tabela 5.3 compara os resultados encontrados por Baltar (2000), Gomes (2006) e Brasiliano et al. (2008) com os resultados dos modelos estudados correspondente as dez primeiras frequências naturais do vão horizontal da passarela sobre a E.P.I.A. A Tabela 5.4 apresenta o resumo dos resultados das frequências experimentais identificadas.

O piso e a cobertura foram modelados por Baltar (2000) como massa adicional concentrada nos nós inferiores. Gomes (2006) considerou o piso como elemento de placa e a cobertura como massa concentrada e Brasiliano et al. (2008) utilizaram dois modelos numéricos: em um deles o piso foi considerado como elemento de placa (SHELL63) e no segundo modelo o piso foi considerado como massa distribuída concentrada nos nós inferiores, fez ainda pequenos ajustes nos valores dos módulos de elasticidade dos modelos analisados de forma a calibrá-los.

Tabela 5.3 – Comparação dos resultados das frequência naturais obtidas da análise de vibração livre do vão horizontal da passarela sobre a E.P.I.A

<i>Modos de Vibração</i>	<i>Baltar (2000)</i>	<i>Gomes (2006)</i>	<i>Brasiliano et al. (2008)</i>		<i>Modelo 1</i>	<i>Modelo 2</i>
	<i>Elem. de Massa</i>	<i>Elem. de Placa no Piso</i>	<i>Elem. de Massa</i>	<i>Elem. Placa no Piso</i>		
1 ^a	1,3433	2,5860	0,857	2,370	2,1473	1,9767
2 ^a	2,5681	3,7701	1,816	3,442	4,3539	4,0707
3 ^a	3,3091	4,2716	2,797	3,900	5,2266	4,9322
4 ^a	3,7264	4,2743	3,131	3,923	6,4300	5,9893
5 ^a	4,2009	5,1479	3,697	4,694	8,2060	7,6900
6 ^a	4,3045	6,5058	3,917	5,928	10,779	10,117
7 ^a	5,3936	7,6866	4,596	7,073	12,286	11,675
8 ^a	5,8109	8,3693	4,838	7,711	12,826	12,328
9 ^a	7,2347	8,4646	5,921	7,853	14,687	13,950
10 ^a	7,4903	10,948	6,181	10,096	15,782	15,262

Tabela 5.4 – Resultados das Frequências Naturais obtidas por Brasiliano et al. (2008) experimentalmente.

<i>Frequências Experimentais Identificadas</i>		
<i>Frequência Vertical</i>	1 ^a Frequência Vertical = 3,93Hz	2 ^a Frequência Vertical = 10,095Hz
<i>Frequência Lateral</i>	1 ^a Frequência Lateral = 3,12Hz	2 ^a Frequência Lateral = 5,18Hz
<i>Frequência de Torção</i>	1 ^a Frequência Torção = 8,23Hz	2 ^a Frequência Torção = 11,35Hz

Como pode ser visto na tabela acima a função estrutural dos componentes não-metálicos de fechamento como as placas e coberturas, modelo 1 e modelo 2 exerce influência no comportamento dinâmico das passarelas.

A consideração do piso e da cobertura como elementos de massa adicional distribuída por unidade de comprimento, Baltar (2000), levaram à frequências laterais e de torção bem inferiores aos valores identificados experimentalmente.

A consideração do piso como elemento de placa, Gomes (2006), melhorou o comportamento do modelo numérico fazendo com que as frequências laterais e de torção apresentassem valores maiores que os obtidos com a consideração inicial, porém ainda muito inferiores aos valores experimentais.

Os elementos de fechamento incrementam a rigidez da estrutura e contribuem para o travamento lateral. As frequências de torção e laterais dos modelos 1 e 2 apresentaram valores de frequências mais próximos dos valores experimentais.

Os modelos 1 e 2 com elementos de placas foram considerados os modelos iniciais a serem utilizados no processo de atualização, de forma a encontrar um modelo numérico com comportamento mais próximo do experimental.

6 ATUALIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS

A maioria das técnicas de avaliações tem utilizado algum tipo de modelo, como constatado por meio de revisões bibliográficas. O processo de atualização de modelos corresponde à alteração de um modelo numérico em função do modelo experimental da estrutura, com o intuito de minimizar erros e/ou desvantagens de cada um destes. O sucesso do processo de atualização depende da concepção do modelo numérico da estrutura e da integração entre os modelos numéricos e experimentais.

Uma representação precisa da estrutura é fundamental para obter, com precisão confiável, o comportamento dinâmico. O modelo numérico representa com maior nível de detalhes a estrutura, contudo não possui um nível adequado de confiabilidade uma vez que os resultados obtidos diferem dos resultados experimentais. A atualização do modelo permite superar este problema, o modelo em elementos finitos atualizado constitui uma ferramenta muito útil para a representação numérica de estruturas. A representação de estruturas por meio de modelos de elementos finitos atualizados proporciona uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais, levando desta forma a uma representação mais precisa da mesma.

O modelo numérico atualizado poderá ser utilizado com confiança em todas as análises relacionadas à estrutura, como por exemplo, verificar as possíveis ocorrências de danos ao longo do tempo.

O processo de atualização de modelos em elementos finitos empregado nesta dissertação segue o fluxograma proposto na Figura 6.1, onde o procedimento foi dividido em duas partes: a atualização manual e a automática. O princípio básico dos dois processos é o mesmo, alterar o modelo numérico com o objetivo de obter um novo modelo com comportamento mais próximo do modelo experimental. A diferença está no processo de alteração do modelo, um manual e o outro por meio dos métodos de otimização que fazem parte dos comandos do programa ANSYS.

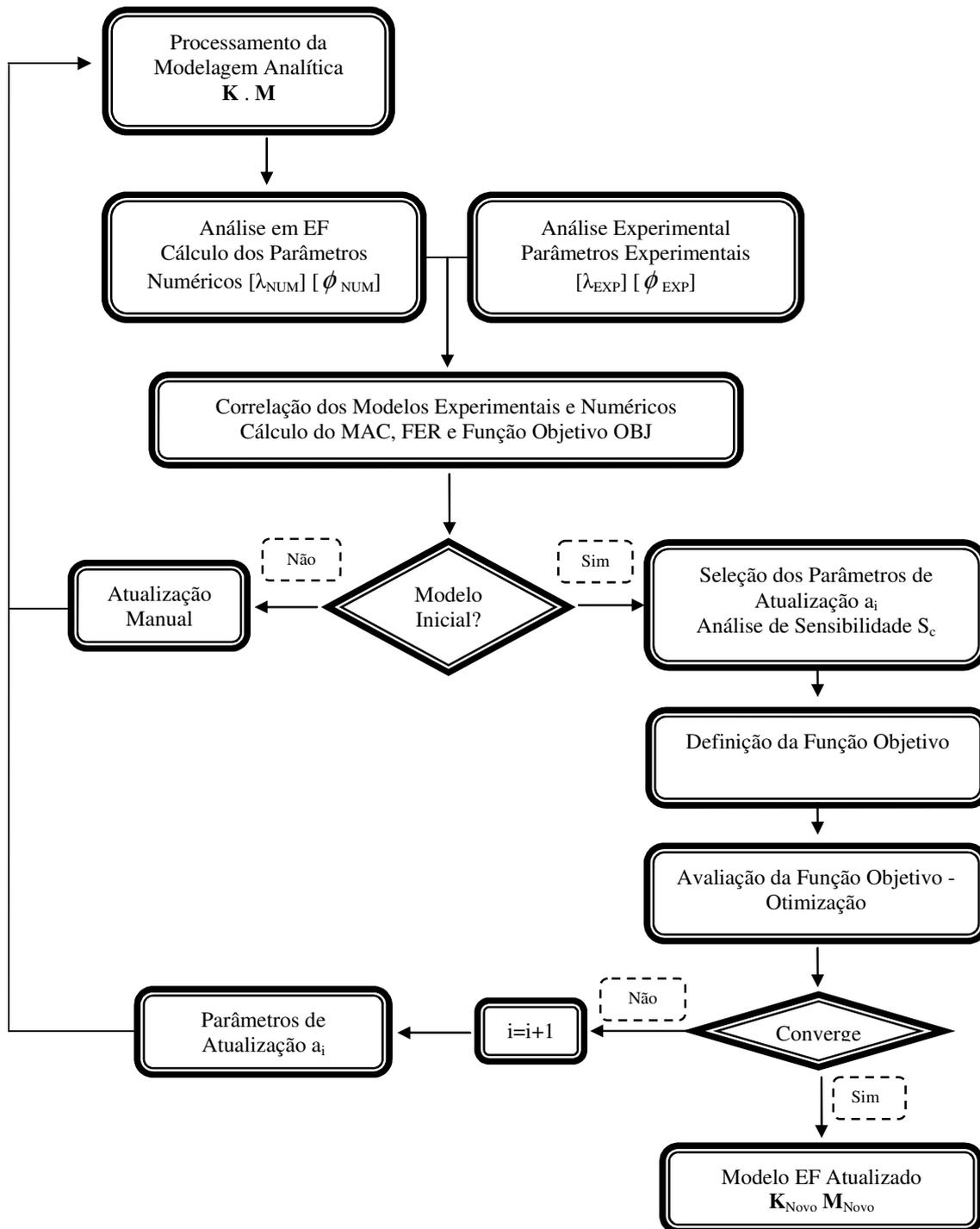


Figura 6. 1 – Fluxograma do processo de atualização de modelos numéricos.

O processo de atualização manual (*Manual Tuning*) é um processo que pode ser feito quantas vezes se julgar necessário e visa o refinamento do modelo numérico. Esta fase do processo realiza mudanças de forma no modelo, parâmetros que descrevem a geometria e o material. O método trabalha com erros não quantitativos, como

configurações de malhas, tipos de elementos e parâmetros estruturais. A escolha do modelo atualizado é definida pela melhor correlação entre o modelo numérico e o experimental. Nesta etapa as imprecisões no modelo que não são possíveis de se identificar quantitativamente podem ser alteradas e as características do novo modelo são comparadas aos dados dinâmicos experimentais. A finalidade é que o modelo numérico possa representar melhor o modelo real com a minimização dos erros não quantitativos. O melhor modelo do processo de atualização manual é o modelo inicial para a atualização automática.

Os métodos de atualização automática de modelos em elementos finitos surgiram na década de 90 como um tópico de grande importância para as estruturas aeroespaciais e mecânicas. Os métodos de atualização automática são basicamente divididos em dois grandes grupos, os métodos diretos onde os ajustes das matrizes de massa e de rigidez são feitos diretamente e os iterativos, onde mudanças paramétricas são realizadas no modelo numérico em EF. A melhora na correlação entre os dados experimentais e os dados numéricos é realizada de forma que o significado físico dos parâmetros seja conservado.

O método de atualização automática trabalha com erros quantitativos, como dados geométricos, materiais, rigidez de elementos tipo mola, neste a decisão é automática e depende da tolerância de convergência da função objetivo já definida no pré-processamento. O processo é iterativo, onde parâmetros quantitativos são alterados por uma rotina computacional, o modelo atualizado manualmente é então submetido a dois processos: pré-processamento, onde se define os parâmetros a serem atualizados e a atualização automática propriamente dita, onde a rotina computacional refina os parâmetros iterativamente.

A metodologia utilizada na atualização automática foi formulada em linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), empregando a ferramenta computacional ANSYS versão 10 (2005), onde foi utilizado os processos de otimização do programa.

6.1 PARÂMETROS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os parâmetros de correlação entre modos de vibração numéricos e experimentais utilizados neste trabalho foram o índice modal MAC (*Modal Assurance Criterion*), para a comparação entre os modos de vibração, e a porcentagem de variação da frequência FER.

6.1.1 Índice de confiança modal – MAC

O índice de confiança modal é uma técnica que utiliza as amplitudes dos modos de vibração experimentais e numéricos nos pontos onde foram colocados os sensores na realização do experimento.

O índice MAC é definido como:

$$MAC_{gh} = \frac{|\phi_g^T \phi_h|^2}{(\phi_h^T \phi_h)(\phi_g^T \phi_g)} \quad (6.1)$$

onde ϕ_h é o vetor do modo de vibração h obtido numericamente e ϕ_g é o vetor do modo de vibração g obtido experimentalmente.

O valor do índice MAC varia 0 a 1. O valor 1 indica correlação completa entre os dois modos comparados, e o valor 0 indica que um modo é completamente independente do outro. Valores na ordem de 0,9 indicam em geral uma boa correlação.

6.1.2 Variação da frequência – FER

A correlação entre as frequências naturais é definida pelo índice FER. Assim, para o modo experimental g o índice é dado por:

$$FER_{gh} = \frac{\lambda_h - \lambda_g}{\lambda_g} \quad (6.2)$$

onde λ_h representa a frequência natural numérica do modo h e λ_g representa a frequência experimental do modo g .

6.1.3 Critério de seleção dos modos numéricos de vibração e frequências naturais correlacionados aos modos experimentais

Após o cálculo dos índices MAC_{gh} e FER_{gh} , foi efetuada uma análise para selecionar dentre todos os modos numéricos h os que estão correlacionados com os modos experimentais g , visto que $h > g$. Nesta análise o par numérico – experimental é escolhido verificando entre todos os modos numéricos h os que apresentam os maiores valores de MAC_{gh} . Tendo este conjunto de modos numéricos h , é então selecionado o que apresenta o menor valor de FER_{gh} relacionados aos modos experimentais. Assim se obtém o modo numérico de vibração ϕ_g e as frequências naturais λ_g correlacionados aos modos experimentais.

6.2 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS

Otimização é o ato de obter o melhor resultado sob determinadas circunstâncias, o problema de otimização está relacionado à minimização de uma função sujeita a restrições, assim, a otimização pode ser definida como um processo para encontrar as condições que darão os valores máximos ou mínimos de uma função.

A Figura 6.2 ilustra graficamente, que se um ponto x^* corresponde ao valor mínimo da função $f(x)$, o mesmo ponto também corresponde ao máximo valor da função negativa – $f(x)$. Então sem perda de generalidade, pode-se dizer que otimização é a minimização de uma função, desde que a maximização deva ser encontrada pelo mínimo do negativo desta mesma função.

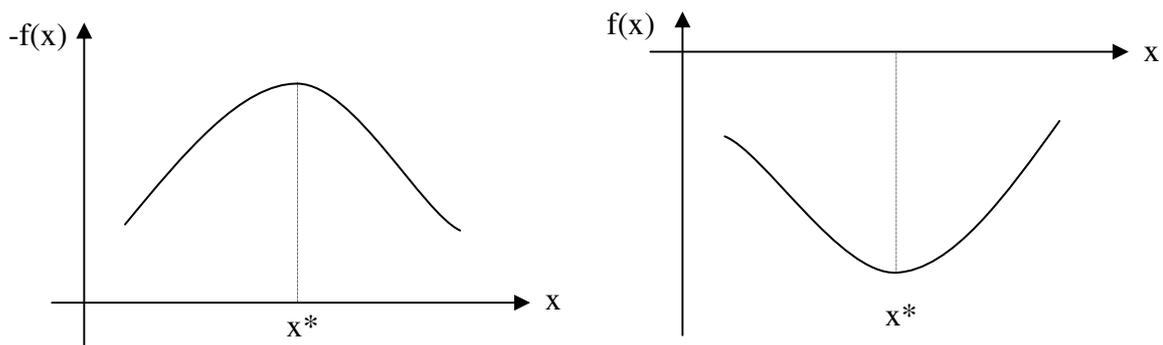


Figura 6.2 – Função unimodal: a) Máximo de $-f(x)$; b) Mínimo de $f(x)$

A formulação de um problema de otimização envolve a tradução de um problema físico para uma exposição matemática bem definida. Esta formulação depende da definição de um grupo de parâmetros, aos quais são atribuídos valores descrevendo um modelo. Os parâmetros definidos ficam livres para serem manipulados, de modo a satisfazer os requisitos do problema. À medida que as variáveis de projeto tenham valores que satisfaçam às restrições, pode-se dizer que este projeto ou que estas variáveis pertencem a um domínio factível. Caso contrário, diz-se que as variáveis de projeto pertencem a um domínio inviável.

O problema de otimização também requer um critério para avaliar a eficiência de cada sistema. Este critério é uma função que depende das variáveis de projeto. Na evolução desta função, as variáveis de projeto devem respeitar limites, como dito anteriormente, pela imposição das condições de restrição.

A chamada otimização estrutural identifica o tipo de problema de projeto onde o grupo de parâmetros é subdividido em parâmetros pré-fixados e variáveis de projeto. O problema consiste, então, em determinar os valores ótimos das variáveis de projeto, tal que elas maximizem ou minimizem uma função específica chamada de função objetivo, enquanto satisfazem o grupo de requisitos geométricos, chamado de restrições lateral, ou comportamental, ou restrições de estado, que são especificados a priori para o projeto.

Resumidamente, pode-se descrever o processo de formulação de um problema em três etapas.

1. A identificação das variáveis de projeto, considerada a mais vital para o projeto, que é feita no processo de análise de sensibilidade.
2. A identificação da função objetivo, a qual avaliará o desempenho do projeto em relação a todos os parâmetros de projeto.
3. Formulação, identificação e desenvolvimento de expressões matemáticas responsáveis pela imposição das restrições do projeto.

6.2.1 Formulação da otimização no programa ANSYS

O ANSYS é um programa de elementos finitos que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia. A capacidade do ANSYS inclui habilidades para resolver análise dinâmica ou estática de estruturas, transferências de calor, modos de vibração e otimização de estruturas entre outras aplicações.

O programa é dotado de um conjunto de macros para otimização de projetos e processos. Utilizando-se esses macros é possível projetar uma peça ou desenvolver um processo de tal forma que ele atenda às condições de trabalho pré-estabelecidas e a um objetivo proposto.

Os métodos de otimização são técnicas que se prestam a minimização de uma única função, a função objetivo, sujeita a restrições. Pode-se implementar um algoritmo de otimização externo através de programação em APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), ou utilizar os métodos disponíveis no programa: como os de aproximação do subproblema e o método de primeira ordem, utilizados neste trabalho.

O método da aproximação do subproblema é um método avançado de ordem zero que usa aproximações para todas as variáveis dependentes, SV , e a função objetivo. É um método geral que pode ser aplicado de forma eficaz para uma ampla gama de problemas de engenharia.

O método de primeira ordem é um método que usa informações das derivadas das variáveis dependentes no que diz respeito às variáveis do projeto. É extremamente preciso e trabalha bem para os problemas nos quais as variáveis dependentes variam amplamente sobre uma grande escala do espaço do projeto. No entanto, este método pode apresentar um tempo de processamento elevado.

A otimização é feita utilizando-se três tipos de variáveis: as variáveis de projeto, as variáveis de estado e a variável que representa a função objetivo. As variáveis de projeto são variáveis independentes que assumem valores dentro de uma faixa especificada pelo usuário até que o programa obtenha a solução ótima. As variáveis de estado são as variáveis que definem as restrições do modelo. A variável da função objetivo é a variável que se pretende otimizar.

De certa forma as variáveis de projeto podem ser representadas por um vetor do tipo:

$$\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n] \quad (6.3)$$

Em que \mathbf{a} é o vetor contendo as variáveis de projeto, a_i que são as variáveis independentes ou de projeto.

As variáveis de projeto são submetidas a n inequações de restrição com limites superiores e inferiores, representadas por:

$$a_i^i \leq a_i \leq a_i^s \quad \text{para} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6.4)$$

Sendo o a_i^i o limite inferior da variável independente a_i , e a_i^s o limite superior da variável independente a_i .

O principal objetivo do processo de otimização é minimizar a função objetivo, $f_o = f(\mathbf{a})$, que está sujeita a:

$$g_i(\mathbf{a}) \leq \bar{g}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_1) \quad (6.5)$$

$$\underline{w}_i \leq w_i(\mathbf{a}) \leq \overline{w}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_2)$$

$$\underline{h}_i(\mathbf{a}) \leq h_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m_3)$$

Onde, g_i , h_i , w_i são as variáveis de estado do projeto de otimização, as barras superiores e inferiores representam restrições superiores e inferiores, respectivamente, e $(m_1 + m_2 + m_3)$ é o número de variáveis de estado com diferentes valores de limites.

O sucesso da aplicação de métodos de atualização, além de estar relacionado à precisão do modelo numérico e à qualidade do teste modal, depende também de uma boa definição do problema de otimização, ou seja, da definição das variáveis e da função objetivo assim como das suas restrições, e da capacidade do algoritmo de otimização.

Para conduzir o processo de otimização é necessário que se desenvolva um modelo paramétrico do sistema, ou seja, os parâmetros a serem otimizados deverão ser incluídos no modelo como variáveis. O processo parte de uma solução inicial com as variáveis de projeto definidas pelo usuário e a partir daí o programa utiliza um processo iterativo para se chegar à solução ótima.

6.2.2 Módulo de otimização ANSYS

O módulo de otimização (/OPT) é uma parte integrante do programa ANSYS empregado na determinação do projeto ótimo. O projeto ótimo é o melhor projeto em algum senso predefinido. Devem-se suprir todas as exigências especificadas pelo projeto arquitetônico e pelo projeto estrutural.

As rotinas de otimização do ANSYS empregam três tipos de parâmetros que caracterizam o processo de projeto: as Variáveis de Projeto DV (*Design Variable*); as Variáveis de Estado SV (*State Variable*) e a função objetivo OF (*Objective Function*). Estas variáveis são representadas através de parâmetros escalares em uma Linguagem Paramétrica de Projeto ANSYS, APDL (*ANSYS Parametric Design Language*).

Programas como o ANSYS, com módulos de otimização, usam técnicas matemáticas que integram o ciclo de processo manual em um processo iterativo computadorizado. Esses processos são realizados automaticamente até que um projeto ótimo seja produzido. Para iniciar o processo de otimização, são primeiramente definidos os parâmetros, que se referem ao conjunto do projeto. Tais parâmetros incluem variáveis de projeto, variáveis de estado e a função objetivo do modelo. Os valores são modificados ao longo do processo de otimização.

As variáveis de projeto (DV) são quantidades independentes dentro das faixas de restrições especificadas e variam, durante o processo de análise de otimização, para alcançarem o projeto ótimo. Têm seus limites superiores e inferiores especificados para servir como as referidas restrições. Estes limites definem a faixa de variação das variáveis de projeto. Às variáveis de projeto não podem ser atribuídos valores nulos ou negativos.

As restrições das variáveis de projeto são freqüentemente chamadas de restrições laterais e definem o que é geralmente classificado como *espaço possível de projeto*, ou melhor, espaço viável de projeto.

Variáveis de estado (SV) são quantidades que fixam as restrições de projeto. São tipicamente variáveis de resposta, funções dependentes das variáveis de projeto, por isso também são chamadas de *variáveis dependentes* e podem ter limite máximo e mínimo ou podem ser *single sided*, quando possuem apenas um só limite. As frequências naturais e os índices MAC e FER são consideradas variáveis de estado.

Há três tipos de projetos: o possível (viável), o impossível (inviável) e o projeto ótimo. Os projetos nos quais as configurações satisfazem todas as restrições são chamados projetos viáveis. Com estes projetos pode-se trabalhar, mas necessariamente não satisfazem as melhores soluções. Quando uma ou mais restrição é violada, diz-se que o projeto é inviável de ser construído. Da definição de espaço viável de projeto, uma tolerância é acrescentada a cada limite da variável de estado.

O projeto ótimo tenta minimizar a função objetivo enquanto for viável, limitada às restrições de projeto. Como os conjuntos de projeto são gerados por métodos ou ferramentas, e caso uma função objetivo esteja definida, o melhor conjunto de projeto é computado e seu número é armazenado.

No programa ANSYS o procedimento de otimização pode requerer o uso de vários conjuntos (sets) de projeto e suas correspondentes soluções, caso o conjunto inicial não seja interrompido pelas restrições especificadas. Estes conjuntos de projeto podem ser criados pelo usuário ou podem ser gerados dentro do programa ANSYS. Cada otimização gera um conjunto de projeto automaticamente sempre que uma otimização de projeto é iniciada.

6.3 FUNÇÃO OBJETIVO E SUAS RESTRIÇÕES

A função objetivo corresponde à variável dependente que se pretende minimizar. Esta função deve ser dependente da variável de projeto, ou seja, para o caso de atualização, dependente dos parâmetros de atualização. Neste trabalho ela foi formulada em termos da discrepância entre os modos de vibração e as frequências do modelo numérico e experimental. A soma das equações (6.6) e (6.7) corresponde à função objetivo utilizada (Jaishi, 2005) (*apud* Merce, 2007):

$$f_{o1}(a) = \sum_{g=1}^w \alpha_g \left(\frac{\lambda_g^* - \lambda_g}{\lambda_g} \right)^2 \quad 0 < \alpha_g \leq 1 \quad (6.6)$$

$$f_{o2}(a) = \sum_{g=1}^w \beta_g M_g \quad 0 < \beta_g \leq 1 \quad (6.7)$$

Onde α_g é o fator de peso para o autovalor do modo g , β_g é o fator de peso para o modo g , λ_g^* é o autovalor do modo numérico correlacionado ao modo experimental g , λ_g é a frequência do modo experimental g , e M_g é uma função relacionada ao modo g de vibração que, pode ser dada da seguinte forma:

$$M_g = f(MAC_{cg}) = \left(\frac{1 - \sqrt{MAC_{cg}}}{MAC_{cg}} \right)^2 \quad (6.8)$$

onde MAC_{cg} é o índice modal entre o modo numérico correlacionado ao modo experimental g , ϕ_g^\bullet , e o modo experimental g , ϕ_g , conforme pode ser visto na equação abaixo:

$$MAC_{cg} = \frac{|\phi_g^T \phi_g^\bullet|^2}{(\phi_g^{\bullet T} \phi_g^\bullet)(\phi_g^T \phi_g)} \quad (6.9)$$

Os fatores de peso α_g e β_g são escolhidos em função da precisão das frequências e modos experimentais de vibração obtidos.

Neste trabalho, a função objetivo definida no programa como OBJ é definida como sendo a soma das Equações 6.6 e 6.7, sendo que foram adotados os valores dos fatores de peso $\alpha_g = 0,80$ para as funções FER e $\beta_g = 0,20$ para as funções MAC.

6.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade tem o objetivo de identificar a influência da variação dos parâmetros sobre as propriedades dinâmicas da passarela. A sensibilidade, associada com o parâmetro de projeto selecionado, é calculada e comparada. Com base nesta comparação pode-se então selecionar os parâmetros mais sensíveis, que serão utilizados no processo de atualização.

A análise de sensibilidade é utilizada para definir os parâmetros de atualização e verificar o grau de sensibilidade dos parâmetros candidatos à atualização em relação à função objetivo e também em relação a todas as variáveis de estado. Os resultados obtidos com tal análise podem mostrar quais são os parâmetros que mais influenciam em uma determinada frequência ou modo de vibração.

A análise de sensibilidade também é capaz de identificar o sentido da variação do parâmetro de atualização, determinando se esta é diretamente ou inversamente proporcional à variação da variável de estado ou da função objetivo.

Na análise de sensibilidade calcula-se o coeficiente de sensibilidade S_C que é definido como a derivada das variáveis de estado ou da função objetivo com respeito às variáveis de projeto, ou ao parâmetro de atualização.

$$\delta_Z = S \cdot \delta_A \quad (6.10)$$

$$S_C = \frac{\delta_Z}{\delta_A} = \frac{Z_m - Z}{A_m - A} \quad (6.11)$$

onde, $\delta_A = A_m - A$ representa a alteração nos parâmetros de atualização; $\delta_Z = Z_z - Z$ representa a alteração nas variáveis de estado ou função objetivo.

Conforme observado nas análises de sensibilidades realizadas sobre a passarela pôde-se verificar que o módulo de elasticidade dos elementos metálicos foi um dos parâmetros que mais alterava as variáveis dependentes, seguido do módulo de elasticidade da placa de cobertura e da massa específica das placas de piso e cobertura, como pode ser visto na Figura 6.3 abaixo, onde o resultado da análise de sensibilidade é representado em termos da função logaritmo na base 100.

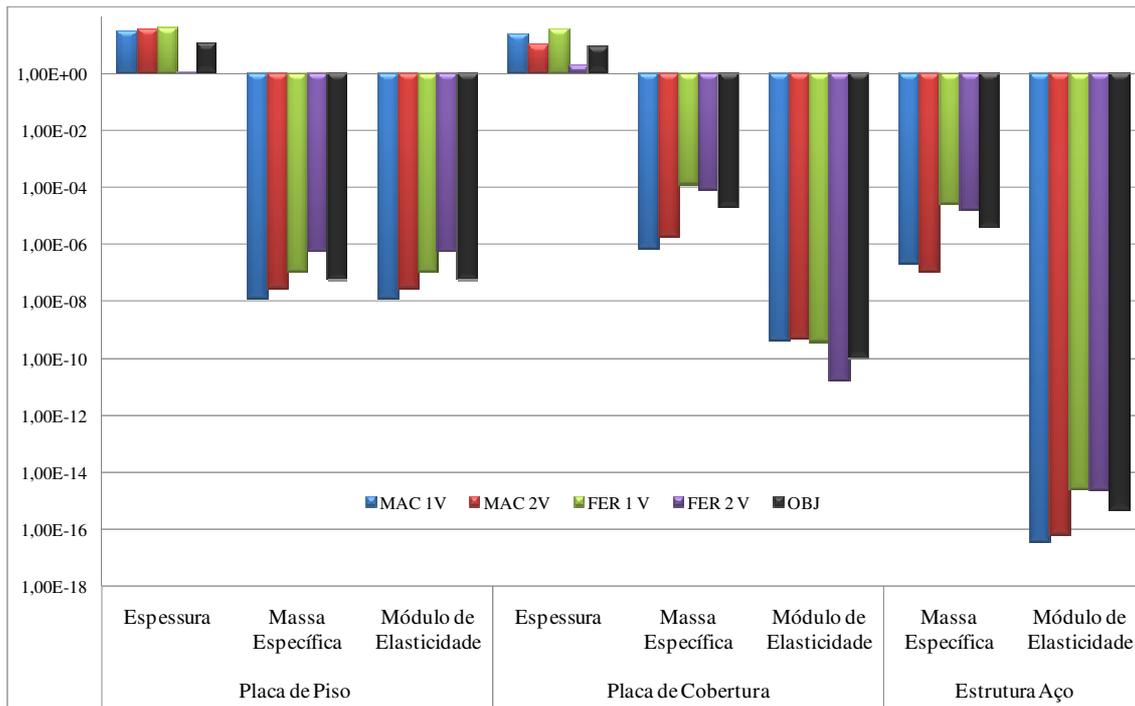


Figura 6.3 – Análise de sensibilidade realizada na estrutura da passarela.

Embasado no estudo de análise de sensibilidade pôde-se fazer a escolha dos parâmetros que mais influenciaram nas variáveis de estado e na função objetivo. Esses parâmetros serão utilizados no estudo de otimização, e são listados abaixo:

- Módulo de elasticidade da placa de piso;
- Massa específica da placa de piso;
- Módulo de elasticidade do aço;
- Massa específica do aço;
- Módulo de elasticidade da placa de cobertura;
- Massa específica da placa de cobertura.

6.5 ATUALIZAÇÃO MANUAL

A atualização manual tem como objetivo principal o refinamento do modelo numérico, de forma a obter um novo modelo que possa representar melhor o comportamento real da estrutura com a minimização dos erros não quantitativos.

A escolha do modelo atualizado foi definida pela melhor correlação entre o modelo numérico e o experimental, por intermédio do índice MAC e FER. O melhor modelo do processo de atualização manual é o modelo inicial para a atualização automática.

Algumas mudanças no modelo em elementos finitos da passarela foram realizadas para simular o comportamento dinâmico da estrutura, objetivando com isso a aproximação do modelo numérico e experimental.

No processo de atualização manual basicamente foram realizadas mudanças nas propriedades do módulo de elasticidade dos elementos de aço que compõe a estrutura principal, como proposto por Brasiliano et al. (2008). Visto que no capítulo 4, foram analisados os melhores modelos numéricos, ou seja, os modelos com os elementos de placas na cobertura com comportamento mais próximo do modelo experimental.

Neste trabalho foram analisados dois modelos numéricos no primeiro as propriedades dos materiais foram às apresentadas na Tabela 4.2, e no segundo o módulo de elasticidade das barras de aço que compõe a estrutura principal foi reduzido para $1,72 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ conforme utilizado por Brasiliano et al (2008). Foram calculados os índices MAC e FER para os modelos propostos.

6.5.1 Comparação entre os modelos numéricos e o modelo experimental

A comparação entre as frequências e os modos de vibração experimental e numérico da passarela sobre a EPIA, conforme mostrado no item anterior, foi realizada utilizando a porcentagem de variação da frequência, FER e o índice modal MAC.

Na Tabela 6.1 são apresentados os resultados encontrados para o índice MAC e a porcentagem de variação da frequência, FER, entre os modos experimentais e

numéricos do modelo 1, onde as propriedades dos materiais foram às apresentadas na Tabela 4.2. O valor médio do índice FER entre as frequências de vibração foi de 8,77%. O índice MAC apresenta um valor médio entre os modos de 0,870345.

Os modos laterais e de torção não puderam ser medidos, uma vez que as leituras das acelerações foram feitas apenas na placa de piso, portanto não foram identificados no ensaio experimental.

Tabela 6.1– Índices MAC e FER entre os modos experimentais e numéricos – modelo 1

<i>Número do modo – modelo 1</i>	<i>1º Modo Vertical</i>	<i>2º Modo Vertical</i>
MAC	0,95648	0,78421
FER (%)	10,78%	6,77%

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos índices MAC e FER, para os modos experimentais e numéricos do modelo 2, onde o módulo de elasticidade das barras de aço que compõe a estrutura principal foi reduzido para $1,72 \times 10^{11}$ N/m². O valor médio do índice FER entre as frequências de vibração foi de 1,89%. O índice MAC apresenta um valor médio entre os modos de 0,913495.

Tabela 6.2– Índices MAC e FER entre os modos experimentais e numéricos – modelo 2

<i>Número do Modo – Modelo 2</i>	<i>1º Modo Vertical</i>	<i>2º Modo Vertical</i>
MAC	0,94547	0,88152
FER (%)	3,57%	0,21%

Na Figura 6.4 são apresentados os valores de porcentagem de variação da frequência para os dois modelos atualizados manualmente e os respectivos valores dos MAC calculados.

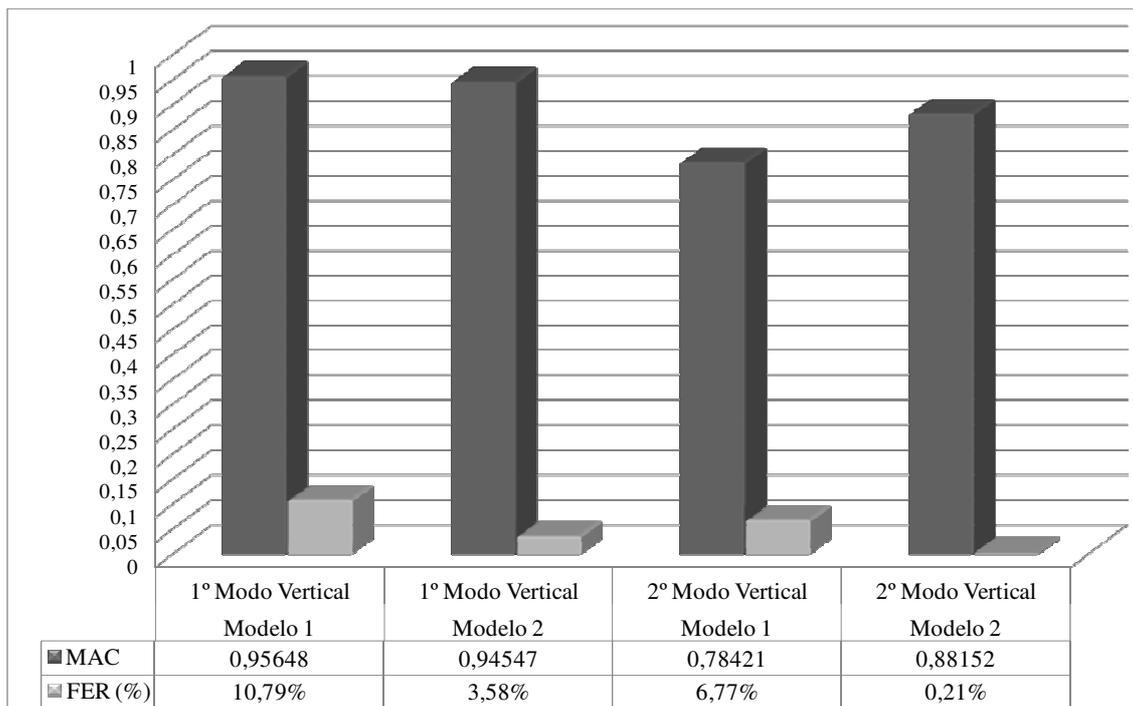


Figura 6.4 – Porcentagem de variação do índice FER e do MAC para a atualização manual da estrutura da passarela.

A influência do módulo de elasticidade dos elementos metálicos pode ser observada nas tabelas acima. Os índices MAC e FER calculados para o modelo 2, onde se propõe uma redução módulo de elasticidade das barras de aço, apresentaram-se mais correlacionados com os experimentais em comparação ao modelo 1, apresentando os menores valores da porcentagem de variação da frequência FER e os maiores valores do índice modal MAC. Portanto o melhor modelo do processo de atualização manual foi modelo 2 que será utilizado como o modelo inicial para a atualização automática.

6.6 ATUALIZAÇÃO AUTOMÁTICA

O processo de atualização automática da passarela sobre a EPIA foi desenvolvido no ANSYS, utilizando suas ferramentas de otimização. A atualização automática foi dividida em duas partes, a primeira onde se definem os parâmetros utilizados na otimização da passarela e a segunda é a atualização propriamente dita, onde a rotina computacional é aplicada, os parâmetros são iterativamente refinados e o modelo é atualizado.

6.6.1 Parâmetros utilizados na otimização da passarela

As variáveis de estado, os parâmetros de atualização, a função objetivo e suas respectivas restrições são definidas. A seleção dos parâmetros de atualização, do espaço de projeto confiável, da variável de estado e da função objetivo são passos importantes na atualização de modelo, uma vez que são as variáveis que definem o problema de otimização.

Após serem definidos por meio da análise de sensibilidade os parâmetros, que mais influenciaram nas variáveis de estado e na função objetivo, foram utilizados no estudo de otimização do modelo inicial definido pela atualização manual. Definidos os parâmetros da atualização, foram feitas análises de varredura de forma a definir o espaço confiável de projeto.

Neste trabalho as variáveis de projeto da passarela utilizadas no processo de otimização, seguem listada na Tabela 6.3 com os seus respectivos limites máximos, mínimos e tolerância, maior valor de mudança que uma variável sofre antes da convergência do problema.

Tabela 6.3 – Espaço confiável de projeto das variáveis de projeto da passarela

<i>Variáveis de Projeto</i>	<i>Valor Inicial</i>	<i>Limite Mínimo</i>	<i>Limite Máximo</i>	<i>Tolerância</i>
Massa específica da placa de piso	2548,42	2300,00	2800,00	0,1E-4
Elasticidade da placa de piso	2,90E+10	2,7702E+10	3,00E+10	0,01
Massa específica da placa de cobertura	2242,6096	2000,00	3000,00	0,1E-4
Elasticidade da placa de cobertura	5,0E+09	4,00E+09	6,00E+09	0,01
Massa específica do aço	8012,2320	7000	9000	0,1E-4
Elasticidade do aço	1,72E+11	1,00 E+11	3,00E+11	0,01

As variáveis de estado utilizadas no processo de otimização da passarela seguem listadas na Tabela 6.4 com os seus respectivos limites máximos, mínimos e a tolerância adotada. Para a função objetivo a ser minimizada no processo de otimização da

passarela, representada pela soma das Equações 6.6 e 6.7, foi adotada uma tolerância de 0,1E-5.

Tabela 6.4 – Espaço confiável de projeto das variáveis de estado da passarela

<i>Variáveis de Projeto</i>	<i>Limite Mínimo</i>	<i>Limite Máximo</i>	<i>Tolerância</i>
MAC 1º Modo Vertical	0,90	1,00	0,01
MAC 2º Modo Vertical	0,80	1,00	0,01
FER 1º Modo Vertical	0,001	0,10	0,001
FER 2º Modo Vertical	0,001	0,10	0,001

6.6.2 Atualização automática - parâmetros atualizados isoladamente

Após a definição dos parâmetros foi realizada a atualização automática. Foram feitas seis atualizações, utilizando cada parâmetro isoladamente, pelos dois métodos de otimização do ANSYS, o método de análise de primeira ordem e análise de aproximação por subproblema. Os melhores resultados serviram para criar um modelo atualizado.

Nas Figuras 6.5 e 6.6 pode-se ver um exemplo do gráfico gerado pelo programa que mostra como a função objetivo varia durante o processo de iteração na atualização automática, no primeiro foi atualizado a elasticidade da placa de cobertura pela análise de primeira ordem e no segundo pela análise de aproximação por subproblema. Os valores dos parâmetros atualizados isoladamente podem ser vistos na Tabela 6.5.

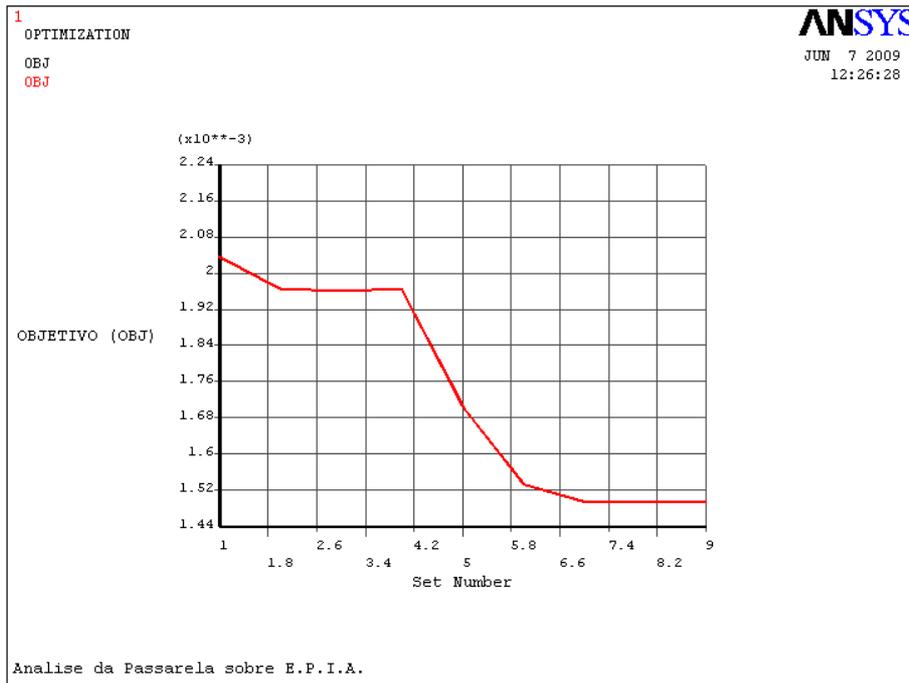


Figura 6.5 – Função objetivo versus iterações para a atualização do módulo de elasticidade da placa de cobertura pela análise de primeira ordem.

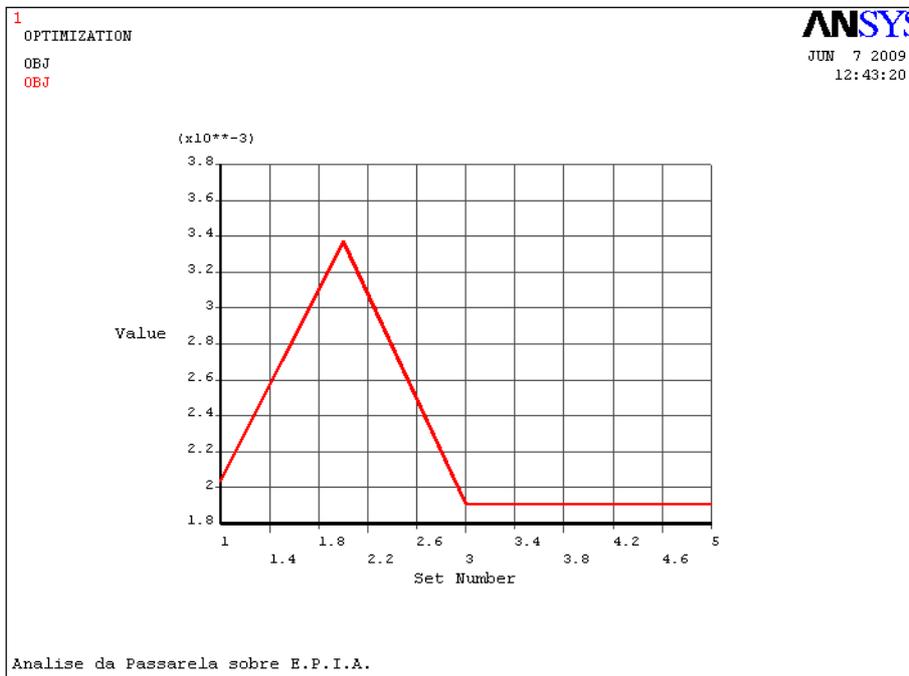


Figura 6.6 – Função objetivo versus iterações para a atualização do módulo de elasticidade da placa de cobertura pela análise de aproximação por subproblema.

Tabela 6.5 – Parâmetros atualizados isoladamente

<i>Parâmetros Atualizados</i>	<i>Un.</i>	<i>Modelo Inicial</i>	<i>Modelo Atualizado</i>	
			<i>Método aproximação por subproblema</i>	<i>Método primeira ordem</i>
Massa Específica da Placa de piso	Kg/m ³	2548,42	2715,07	2719,54
Módulo de Elasticidade da Placa de piso	N/m ²	2,90E+10	2,8706E+10	2,7793E+10
Massa Específica da Placa de Cobertura	Kg/m ³	2242,60	2331,23	2418,82
Módulo de Elasticidade da Placa de Cobertura	N/m ²	5,0E+09	4,9128E+9	4,5686E+9
Massa Específica do Aço	Kg/m ³	8012,23	8995,58	8978,10
Módulo de Elasticidade do Aço	N/m ²	1,72E+11	1,7146E+11	1,6399E+11

A tabela 6.6 mostra a comparação entre os índices MAC e FER para os dois métodos de otimização utilizados em relação ao modelo atualizado a partir dos dados das atualizações isoladas. Pode-se observar que a máxima porcentagem de variação da frequência existente foi de 5,97% para o segundo modo vertical utilizando o método de otimização de primeira ordem. O valor médio do índice FER entre as frequências de vibração foi de 1,77% para o método de aproximação por subproblema foi de 4,66% para o método de primeira ordem. O índice MAC apresenta um valor médio entre todos os modos de 0,9134 para o primeiro método e de 0,9133 para o segundo.

Tabela 6.6 – Índices MAC e FER entre os modos verticais experimentais e numéricos atualizados.

<i>Número do Modo</i>	<i>1º Modo Vertical</i>	<i>2º Modo Vertical</i>	<i>1º Modo Vertical</i>	<i>2º Modo Vertical</i>
Método de Otimização	<i>Aproximação por Subproblema</i>		<i>Primeira Ordem</i>	
MAC	0,94553	0,88139	0,94558	0,88110
FER (%)	0,20%	3,35%	3,34%	5,97%

Tendo como objetivo avaliar o processo de atualização automática, diferentes análises foram realizadas alterando os parâmetros de atualização ou a tolerância adotada para a função objetivo.

Na Figura 6.7 pode-se ver o gráfico que mostra como a função objetivo varia durante o processo de iteração na atualização automática dos parâmetros pelo método de primeira ordem e na Figura 6.8 pelo método de aproximação por subproblema.

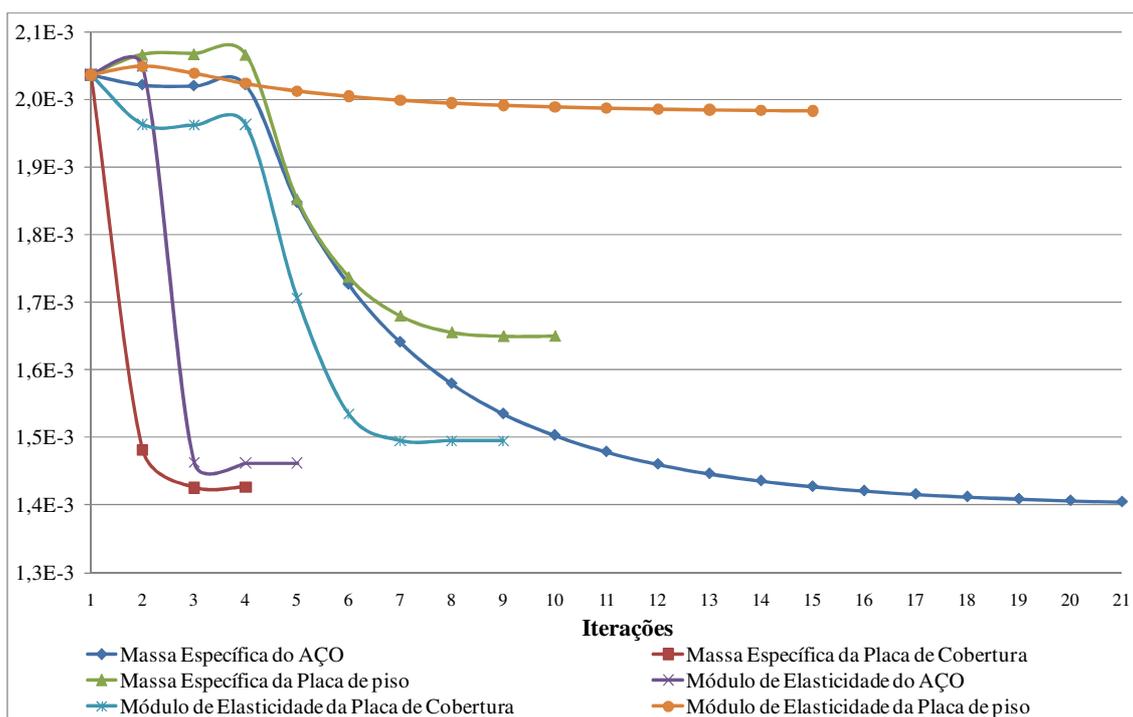


Figura 6.7 – Variação da função objetivo no processo de atualização dos parâmetros da estrutura da passarela pelo método de primeira ordem.

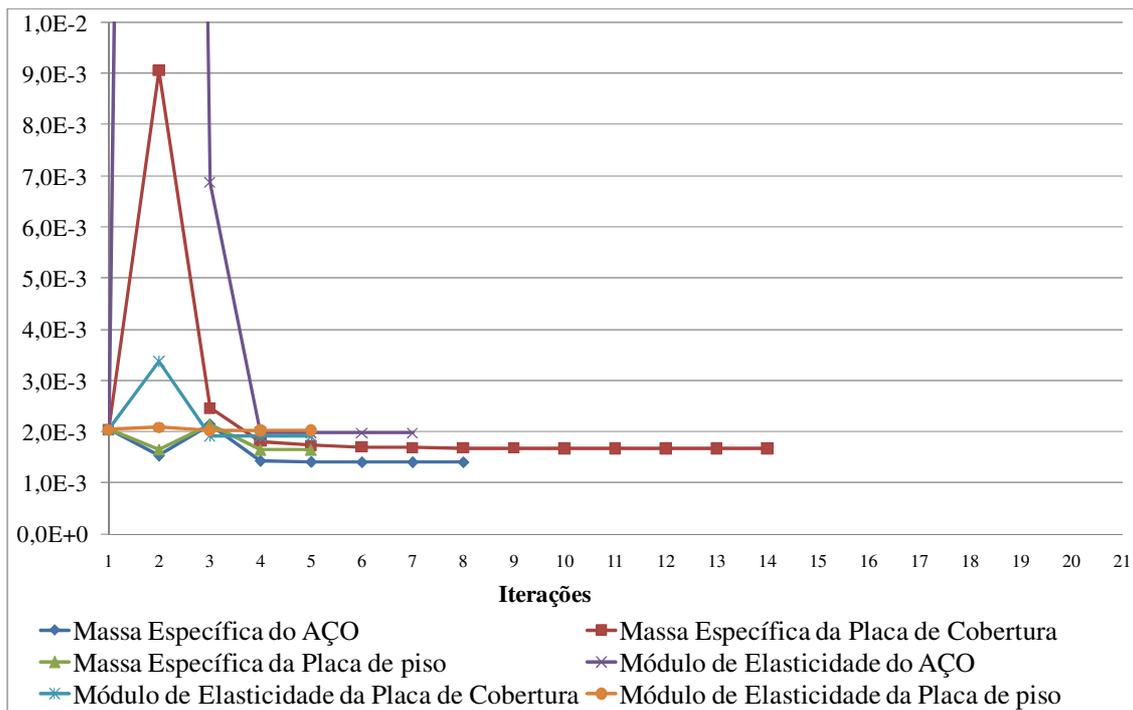


Figura 6.8 – Variação da função objetivo no processo de atualização dos parâmetros da estrutura da passarela pelo método de aproximação por subproblema.

6.6.3 Projeto ótimo

Utilizando os melhores valores dos parâmetros obtidos pelos dois métodos de atualização foram criados dois modelos, um pelo método de aproximação por subproblema e outro pelo método de primeira ordem.

O modelo numérico foi submetido a uma nova atualização com o objetivo de avaliar o comportamento global, considerando agora que todos os parâmetros possam variar ao mesmo tempo. A Figura 6.9 mostra como a função objetivo se comporta durante o processo de iteração na atualização do modelo numérico pelo método de primeira ordem e a Figura 6.10 apresenta, a variação da função objetivo versus o número de iterações, pelo método de aproximação por subproblema.

Os valores dos parâmetros atualizados no projeto ótimo podem ser vistos na Tabela 6.7.

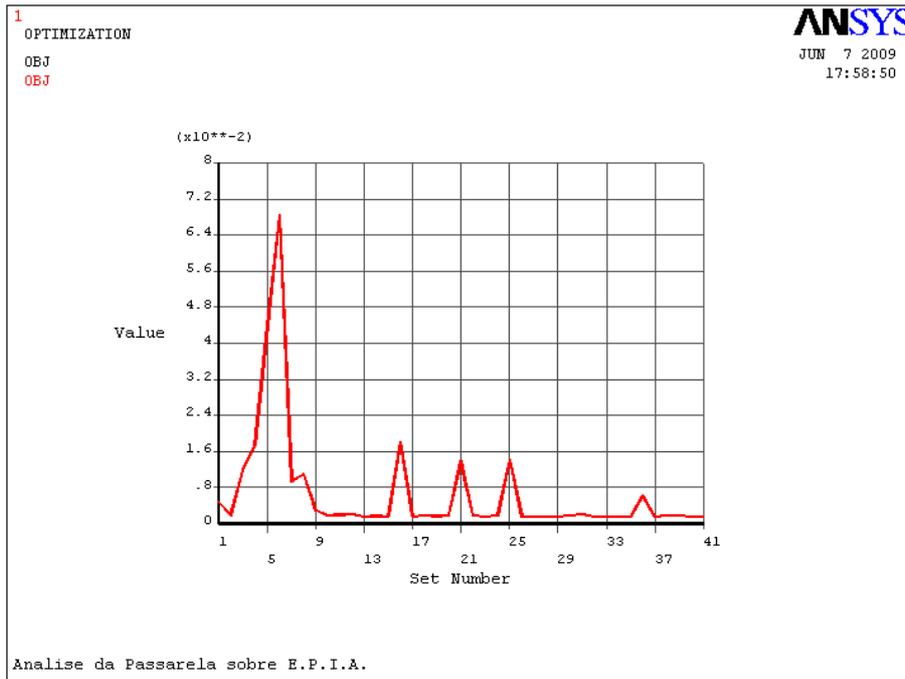


Figura 6.9 – Variação da função objetivo no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de primeira ordem.

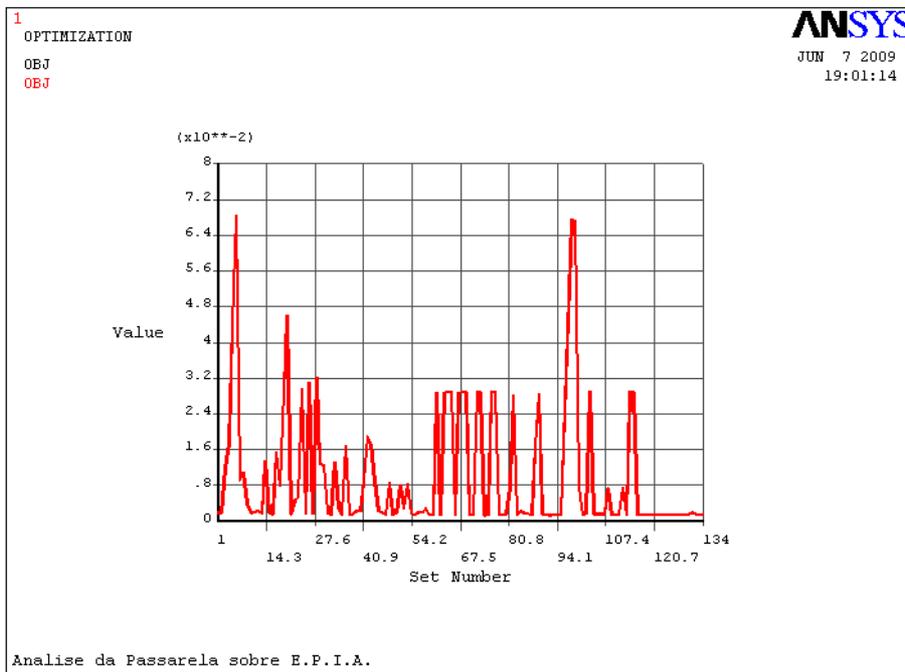


Figura 6.10 – Variação da função objetivo no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de aproximação por subproblema.

Tabela 6.7 – Parâmetros de atualizados – projeto ótimo

<i>Parâmetros Atualizados</i>	<i>Un.</i>	<i>Modelo Inicial</i>	<i>Modelo Atualizado</i>	
			<i>Método aproximação por subproblema</i>	<i>Método primeira ordem</i>
Massa Específica da Placa de piso	Kg/m ³	2548,42	2600,85	2748,85
Módulo de Elasticidade da Placa de piso	N/m ²	2,90E+10	2,9838E+10	2,9862E+10
Massa Específica da Placa de Cobertura	Kg/m ³	2242,60	2397,84	2551,13
Módulo de Elasticidade da Placa de Cobertura	N/m ²	5,0E+09	5,1115E+09	5,7346E+09
Massa Específica do Aço	Kg/m ³	8012,23	8138,29	8425,59
Módulo de Elasticidade do Aço	N/m ²	1,72E+11	1,7181E+11	1,7922E+11

O projeto ótimo criado com os parâmetros atualizados isoladamente teve como resposta as frequências mostradas na Tabela 6.8, com os respectivos índices FER de correlação entre as frequências experimentais e numéricas.

A Tabela 6.9 mostra os índices MAC e FER para os dois métodos de otimização utilizados no projeto ótimo. Pode-se observar que o valor máximo de variação da frequência foi de 2,42% para o 1º modo Vertical. O valor médio do índice FER entre os modos de vibração verticais é de 1,50% para o método de Aproximação por Subproblema e de 1,94% para o método de primeira ordem. O índice MAC apresenta um valor médio entre todos os modos de 0,9133 para o primeiro método e de 0,9135 para o segundo.

Tabela 6.8 – Frequências naturais experimentais e numéricas e índices FER para os modos verticais do modelo numérico inicial e do projeto ótimo.

Número do Modo	Frequência (Hz) <i>(Experimental)</i>	Frequência (Hz) <i>(Modelo Inicial)</i>	Frequência (Hz) <i>(Aproximação por Subproblema)</i>	FER (%) <i>(Aproximação por Subproblema)</i>	Frequência (Hz) <i>(Primeira Ordem)</i>	FER (%) <i>(Primeira Ordem)</i>
1 ^a – 1L	3,12	1,976	1,924	-38,33%	1,915	-38,62%
2 ^a – 1V	3,93	4,070	4,010	2,04%	4,025	2,42%
3 ^a	-	4,932	4,815	-	4,832	-
4 ^a – 2L	5,18	5,989	5,874	13,40%	5,876	13,44%
5 ^a – 1T	8,23	7,690	7,632	-7,27%	7,581	-7,89%
6 ^a – 2V	10,095	10,117	9,997	-0,97%	9,947	-1,47%
7 ^a – 2T	11,35	11,675	11,428	0,69%	11,506	1,37%
8 ^a	-	12,328	12,098	-	12,241	-
9 ^a	-	13,950	13,867	-	13,691	-
10 ^a	-	15,262	15,238	-	14,944	-

Tabela 6.9 – Índices MAC e FER entre os modos verticais experimentais e projeto ótimo.

Número do Modo	1º Modo Vertical	2º Modo Vertical	1º Modo Vertical	2º Modo Vertical
Método de Otimização	<i>Aproximação por Subproblema</i>		<i>Primeira Ordem</i>	
MAC	0,94609	0,88058	0,94524	0,88172
FER (%)	2,04	0,97	2,42	1,47

As Figuras 6.11e 6.12 mostram como se comportam os parâmetros atualizados ao longo das iterações realizadas no processo de otimização automática.

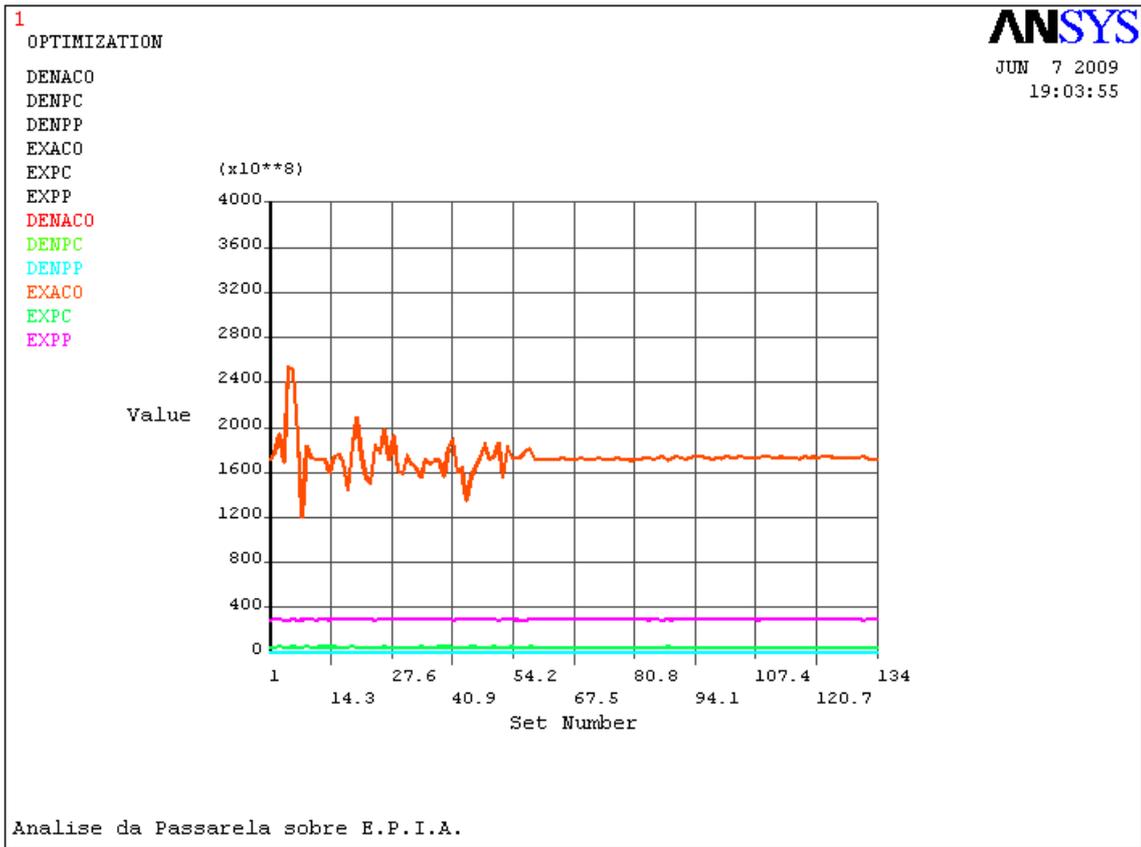


Figura 6.11– Variação dos parâmetros no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de aproximação por subproblema.

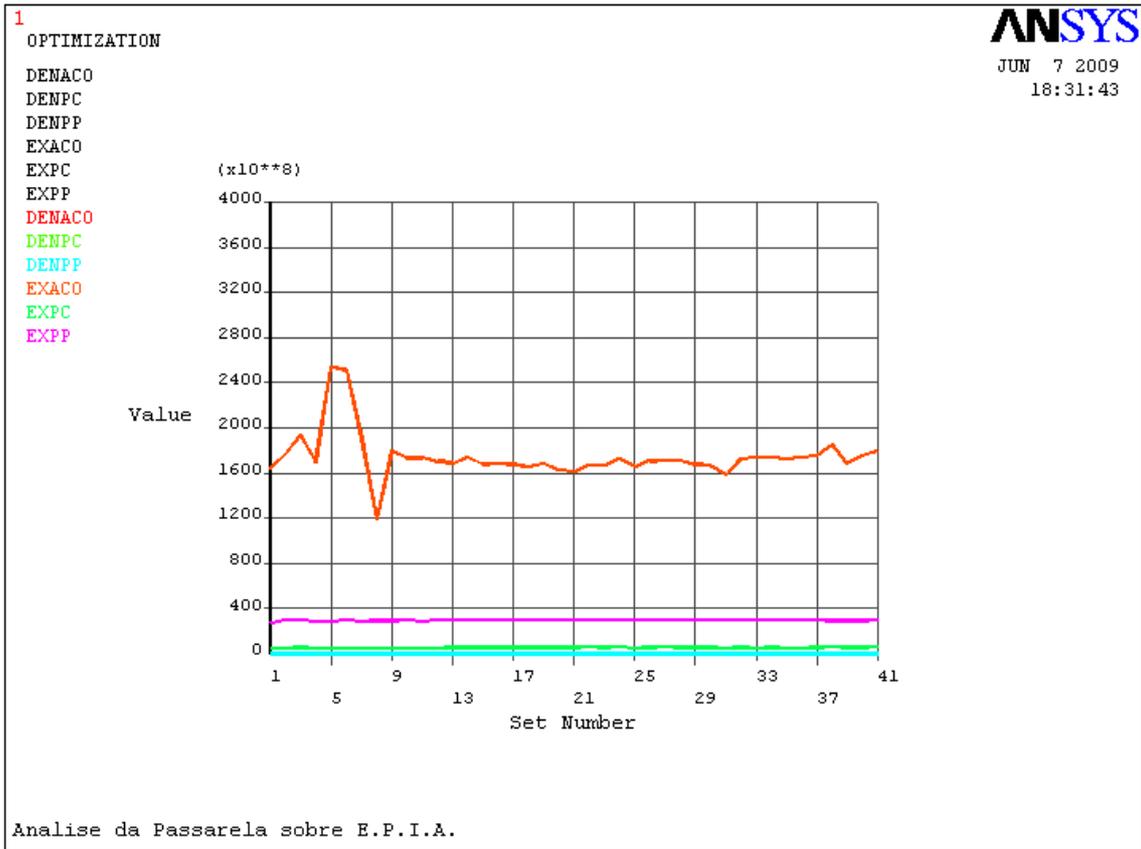


Figura 6.12 – Variação dos parâmetros no processo de atualização do projeto ótimo pelo método de primeira ordem.

Tabela 6.10 – Comparação entre os valores das frequências naturais experimentais da passarela com os valores obtidos pelos modelos numéricos

Número do Modo	Frequência (Hz) Experimental	Baltar (2000) Elem. de Massa	Gomes (2006) Elem. de Placa no Piso	Brasiliano et al. (2008)		Frequência (Hz) Aproximação por Subproblema	Frequência (Hz) Primeira Ordem
				Elem. de Massa	Elem. Placa no Piso		
1^a – 1L	3,12	1,3433	2,5860	0,857	2,370	1,9248	1,9157
2^a – 1V	3,93	2,5681	3,7701	1,816	3,442	4,0104	4,0253
3^a	-	3,3091	4,2716	2,797	3,900	4,8151	4,8323
4^a – 2L	5,18	3,7264	4,2743	3,131	3,923	5,8741	5,8761
5^a – 1T	8,23	4,2009	5,1479	3,697	4,694	7,6320	7,5816
6^a – 2V	10,095	4,3045	6,5058	3,917	5,928	9,9978	9,9474
7^a – 2T	11,35	5,3936	7,6866	4,596	7,073	11,428	11,506
8^a	-	5,8109	8,3693	4,838	7,711	12,098	12,241
9^a	-	7,2347	8,4646	5,921	7,853	13,867	13,691
10^a	-	7,4903	10,948	6,181	10,096	15,238	14,944

A Tabela 6.10 mostra a comparação entre as frequências naturais experimentais e as frequências naturais obtidas pelos modelos propostos por Baltar (2000), Gomes (2006) e Brasiliano et al. (2008) e projeto ótimo desenvolvido neste trabalho.

Pode-se observar que além de melhorar a correlação entre os modos, índice modal MAC, e diminuir a diferença entre as frequências, índice FER, como mostrado na Tabela 6.9, os modelos atualizados atingiram valores de frequências próximas às experimentais para os modos de torção como mostra na Tabela 6.10. Para os modos de laterais o índice FER apresentou valores médios na ordem de -38,48% e de -13,42%, como mostra na Tabela 6.8. Convém comentar, novamente, que na atualização do modelo numérico só foram utilizadas as duas primeiras frequências e modos verticais experimentais da passarela, uma vez que no processo de identificação realizado por Brasiliano et al. (2008) não foi possível identificar os modos laterais e de torção.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho, realizou-se a análise dinâmica e otimização dos parâmetros de uma passarela de pedestres localizada na cidade de Brasília, utilizando o programa ANSYS (1995). Com base neste estudo são apresentadas abaixo as principais conclusões, inicialmente com respeito aos resultados obtidos da análise da influência dos elementos não metálicos de fechamento, posteriormente foi avaliada a atualização dos parâmetros da passarela utilizando a metodologia proposta e a capacidade de obter uma representação satisfatória do comportamento real da estrutura.

7.1 ELEMENTOS NÃO-METÁLICOS DE FECHAMENTO

Como pôde ser visto no capítulo 5 a função estrutural dos componentes não-metálicos de fechamento, como as placas de piso e coberturas, influenciam diretamente no comportamento dinâmico das passarelas.

A consideração das placas de piso e placas de cobertura como elementos de massa adicional distribuída por unidade de comprimento, Baltar (2000), levaram à frequências dos modos laterais e de torção bem inferiores aos valores dos dados experimentais. O modelo com a consideração da placa de piso como elemento de placa, Gomes (2006), influenciou as frequências dos modos laterais e de torção, apresentando melhor que a consideração inicial, porém ainda muito inferior aos valores dos dados experimentais.

Os modelos 1 e 2 apresentados no capítulo 5, onde foi considerado os elementos de placas também na cobertura, se mostraram mais próximos do modelo experimental. As frequências dos modos de torção e laterais apresentaram frequências muito próximas das frequências experimentais como apresentado nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Podemos então concluir que os elementos de fechamento incrementam a rigidez da estrutura e contribuem para o travamento lateral aproximando os modos laterais e de torção aos modos experimentais.

Em relação à modelagem numérica acredita-se que a maior contribuição tenha sido a utilização dos elementos de casca para a discretização da cobertura.

7.2 ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PASSARELA

Inicialmente, sobre os resultados obtidos da análise da passarela utilizando a metodologia proposta, pode-se concluir que o método tem a capacidade de representar o comportamento da estrutura real de forma mais satisfatória.

7.2.1 Processo de atualização manual do modelo numérico

A atualização manual tem como objetivo principal o refinamento do modelo numérico de forma a obter uma melhor representação do modelo real com a minimização dos erros não quantitativos. Esta etapa é fundamental para o processo de atualização, uma vez que é possível avaliar e melhorar a correlação entre os modelos numéricos e experimentais.

O processo de atualização manual pode ser feito quantas vezes se julgar necessário. Nesta fase realizam-se mudanças de forma no modelo, parâmetros que descrevem a geometria e o material. No processo de atualização manual, realizado neste trabalho, basicamente foram realizadas mudanças nas propriedades do módulo de elasticidade dos elementos de aço, os quais compõem a estrutura principal.

No capítulo 5 foram analisados os quatro modelos citados na revisão bibliográfica, e o modelo proposto neste trabalho, onde a cobertura foi modelada como elementos de placa. O modelo proposto apresentou uma melhor correlação entre o modelo numérico e o comportamento real da estrutura, sendo esta etapa o primeiro passo da atualização manual.

A principal vantagem desta utilização é poder modificar parâmetros que não podem ser representados por variáveis, como tipos de elementos e parâmetros estruturais, fazendo com que este complemente a atualização automática uma vez que supre as suas limitações.

7.2.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade tem o objetivo de identificar a influência da variação dos parâmetros sobre as propriedades da passarela. A sensibilidade, associada com o parâmetro de projeto selecionado, é calculada e comparada. Com base nesta comparação pode-se então selecionar os parâmetros mais sensíveis, que serão utilizados no processo de atualização.

Segundo observado nas análises de sensibilidades realizadas sobre a passarela pode-se notar que o módulo de elasticidade dos elementos metálicos foi um dos parâmetros que mais alterava as variáveis dependentes, seguido do módulo de elasticidade da placa de cobertura e da massa específica das placas de piso e cobertura.

Embasado no estudo de análise de sensibilidade pode-se fazer a escolha dos parâmetros que mais influenciaram nas variáveis de estado e na função objetivo, a serem utilizados no estudo de otimização.

7.2.3 Processo de atualização automática do modelo numérico

A atualização automática desenvolvida no ANSYS foi dividida em duas partes, a primeira onde foram definidos os parâmetros utilizados na otimização da passarela e a segunda a atualização automática, propriamente dita, onde a rotina computacional é aplicada, os parâmetros são iterativamente refinados e o modelo é atualizado.

A definição dos parâmetros a serem utilizados na otimização é uma das etapas mais importantes, uma vez que a definição de um espaço de projeto não confiável levará a uma atualização de parâmetros numéricos mal condicionada.

A seleção dos parâmetros de atualização, do espaço de projeto confiável, da variável de estado e da função objetivo são passos importantes na atualização de modelo, uma vez que são as variáveis que definem o problema de otimização.

A análise de varredura utilizada para a definição dos limites dos parâmetros candidatos à atualização se mostrou muito eficiente e o tempo de processamento relativamente

rápido. Esta ferramenta faz uma avaliação variacional global da função objetivo e das variáveis de estado possíveis. A vantagem de utilização desta análise é conhecer até que ponto a alteração de um parâmetro de atualização auxilia na minimização da função objetivo, ou seja, a determinação de um ponto de mínimo a partir do qual a alteração do parâmetro causa aumento na função objetivo.

As variáveis de estado utilizadas no processo de otimização corresponderam à expectativa, visto que foram escolhidas variáveis dependentes das variáveis de projeto e ao mesmo tempo dependentes dos parâmetros experimentais, proporcionando assim uma ligação entre estes dois conjuntos de valores.

A escolha da função objetivo, assim como a determinação de sua tolerância são fatores que podem alterar consideravelmente o projeto. A convergência do processo ocorre em função da tolerância adotada. Uma tolerância muito pequena ocasionará a não convergência do projeto de atualização.

Os valores de α e β da função objetivo devem ser determinados para cada análise modal experimental, onde o equilíbrio destes valores depende da qualidade do modelo modal experimental adquirido, nesta análise foram extraídos apenas dois modos de vibrações verticais, portanto seriam necessários outros modos de vibrações para se determinar com uma melhor precisão os valores de α e β .

Quanto aos métodos de otimização do ANSYS, análise de primeira ordem e análise de aproximação por subproblema, pode-se concluir o seguinte:

1. O método da aproximação por subproblema, que se mostrou mais eficiente, utiliza aproximações para todas as variáveis dependentes, onde o tempo de processamento ficou na ordem de 60s para análise de um único parâmetro, e convergiu para uma mesma precisão com um número menor de iterações que o método de primeira ordem. É um método geral e pode ser aplicado de forma eficaz para uma ampla gama de problemas de engenharia.

2. O método de primeira ordem é um método que usa as derivadas das variáveis dependentes com respeito às variáveis do projeto. Este método exige um maior tempo de processamento, e neste trabalho, se mostrou menos eficiente que o método de aproximação por subproblema.

Em relação à metodologia foi observado que as modelagens utilizadas são capazes de representar as estruturas com um nível de detalhe satisfatório e com uma precisão confiável. O modelo obtido, que servirá como base para avaliações futuras da passarela, apresenta um comportamento mais próximo da estrutura da passarela.

Por fim percebe-se que o modelo numérico atualizado pode ser utilizado com confiança em todas as análises relacionadas à estrutura, como análises em relação a uma dada excitação e possíveis verificações de ocorrência de danos ao longo do tempo. Além de permitir avaliar o estado de uma estrutura comparando com as propriedades dinâmicas atuais como as obtidas em monitoramentos anteriores.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de várias pesquisas relacionadas a modelos dinâmicos numéricos, alguns temas podem ser necessários e de interesse, uma vez que há uma vasta área de trabalho a ser pesquisada. Assim, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros de forma a complementar e aprofundar a pesquisa realizada na presente dissertação:

1. Na análise foram extraídos apenas dois modos de vibrações verticais experimentais, portanto seriam necessários outros modos de vibração para se determinar com uma melhor precisão o modelo numérico atualizado e também calibrar os valores de α e β da função objetivo para o caso da passarela em estudo;
2. Analisar outras passarelas da cidade de Brasília que apresentem problemas de vibrações excessivas com o objetivo de monitoramento dinâmico;
3. Utilização do modelo atualizado como base para avaliação da estrutura, uma vez que os danos nas estruturas provocam alteração nas matrizes do sistema e conseqüentemente alterações no seu comportamento modal. Deste modo, o modelo

atualizado pode ser utilizado como uma ferramenta para avaliação das possíveis ocorrências de danos ao longo do tempo. Um monitoramento contínuo da estrutura, seguido de seqüências de atualizações do modelo numérico pode possibilitar a identificação de áreas de dano, permitindo avaliar o estado de uma estrutura comparando com as propriedades dinâmicas atuais com as obtidas em monitoramentos anteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, A. – *Elementos Finitos: A Base da tecnologia CAE – Análise Dinâmica*. São Paulo, Editora Érica 2005.

ANSYS Revision 5.2, *ANSYS User's Manual*, vol. 1 a 5, EUA, 1995.159

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7188, *Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre*, Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8800, *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios: Métodos dos Estados Limites*. 2ª Edição - Rio de Janeiro, 1986.

BALTAR, A. C. U. C. V. – *Vibrações Induzidas por Atividades Humanas em Passarelas*. Dissertação de Mestrado, Publicação DM 007A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p, 2000.

BOZDAG, E, SUNBULOGLU, E. E ERSOY, H. – *Vibration analysis of new Galata Bridge—experimental and numerical results*. Computers and Structures 84 – 283–292 2006.

BRASILIANO, A.; DOZ, G.; BRITO, J. L. V. and PIMENTEL, R. – *Role of Non-Metallic Components on the Dynamic Behaviour of Composite Footbridges*. Third International Conference – Footbridges 2008.

CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J., *Dynamics of Structures*, 2ª Edição, McGraw Hill, Inc., New York, 1993.

COSTA, C., ARÊDE, A. E COSTA, A. – *Modelação e análise do comportamento da ponte da Lagoncinha sob a acção do tráfego rodoviário*. Seminário sobre A intervenção no Patrimônio. Práticas de Conservação e Reabilitação – 2002.

CUNHA, R. D. – *Introdução à Linguagem de Programação FORTRAN 90* – Porto Alegre: Editora da UFRGS – 2005.

DANIELL, E. W. & MACDONALD, J. H. G. – *Improved Finite Element Modelling of a Cable-Stayed Bridge Through Systematic Manual Tuning* - Engineering Structures Department of Civil Engineering, University of Bristol, 2005.

FARMER, N. – *A mathematical model of the causes of the lateral vibrations of the millennium bridge*. University of Bristol. Department of Engineering Mathematics. Final year project 2003.

GALVÍN, P. E DOMÍNGUEZ, J. – *Dynamic analysis of a cable-stayed deck steel arch bridge*. Journal of Constructional Steel Research, doi:10.1016/j.jcsr. 11.01.2006

GOMES, D. H. M. – *Controle da Resposta Dinâmica de uma Passarela de Pedestres da Cidade de Brasília com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados*. Dissertação de Mestrado, Publicação: E.DM – 008A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF,xxi,174p – 2006.

HAZAN, V. M. – *As Passarelas Urbanas como Novos Vazios Úteis na Paisagem Contemporânea*. Seminário Estudos Urbanos Vazios Úteis, ISCTE Portugal Julho 2007.

ISO 2631/1 – *Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration - Part 1: General Requirements*. Second Edition. Geneve: International Organization for Standardization 1997.

JULIANI, M. A., BECOCCI, L., CAMILLO, A., LOPES, C. P., IGUTI, E. T. E TAKEUTI, A. R. – *Avaliação dinâmica das arquibancadas do Estádio Olímpico João Havelange utilizando simulação numérica e monitoração*. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, São Carlos Novembro de 2005.

LIMA, N.; SILVA, J.; SOEIRO, F.; NETO,L. & LIMA, L. – *Avaliação do Conforto Humano de Passarelas Mistas com o Uso de Algoritmos Genéticos*. ENGEVISTA, v. 10, n. 1, p. 59-70, junho 2008.

MARTINS, C. & ESTÊVÃO J. – *Caracterização Dinâmica das Bancadas Principais do Estádio Algarve*. 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica Abril, 2004, Guimarães – Portugal

MEO, M. & ZUMPANO, G. – *On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure*. Engineering Structures 27 , 1488–1497, 2005.

MERCE, R. N. – *Metodologia para Atualização de Modelos Numéricos de Pontes com base em Dados Experimentais*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação PECC. TD – 004A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 236p – 2007.

MOURA, E. – *Passarela do aço - Conheça as soluções estruturais da passarela Simone de Beauvoir, sobre o rio Sena, em Paris*. Revista Técnica PINI artigo39260-3, dezembro 2006

PENNER, E. - *Avaliação de desempenho de Sistemas Estruturais de Pontes de Concreto*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil – 2001.

PEREIRA, C. C. G. & NEVES, F. A. – *Conforto humano e limites de percepção para vibrações verticais*. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, jul. set. 2006

REN, W.X., BLANDFORD, G. E. E. HARIK, I. E. *Roebing Suspension Bridge. I: Finite-Element Model and Free Vibration Response*. Journal of Bridge Engineering, Vol. 9, No. 2, 110 – 118 – 2004.

REN, W. X.; HARIK, I. E., BLANDFORD, G. E., LENETT, M. E BASEHEART, T. M. *Roebing Suspension Bridge. II: Ambient Testing and Live-Load Response*. Journal of Bridge Engineering, Vol. 9, No. 2, 119 – 126 – 2004.

ANEXO A

A.1 ELEMENTO BEAM4

O elemento BEAM4 é capaz de absorver esforços de tração, compressão, torção e flexão, e representa um elemento de pórtico espacial no programa. Possui seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações). Permite fazer análises utilizando a teoria dos grandes deslocamentos e deformações.

Este elemento é definido por dois ou três nós, onde o terceiro nó de orientação é opcional, dois momentos de inércia, duas alturas, ângulo de orientação θ sob o eixo x do elemento, módulo de torção e as propriedades do material que o compõe. Se o momento de torção não é especificado, esteja com o valor igual a zero, o programa toma o momento de torção igual ao momento polar, dado pela soma dos dois momentos de inércia. O eixo x do elemento é orientado do nó I para o nó J. Para a entrada opcional com dois nós, θ passa a ser igual a zero e o eixo y do elemento é automaticamente calculado para ser paralelo ao plano global X-Y. No caso em que o elemento seja paralelo ao eixo global Z, o eixo y do elemento é orientado paralelo ao eixo global Y.

A Figura A.1 apresenta o elemento BEAM4 e a Tabela A.1 especifica os dados de entrada para o elemento.

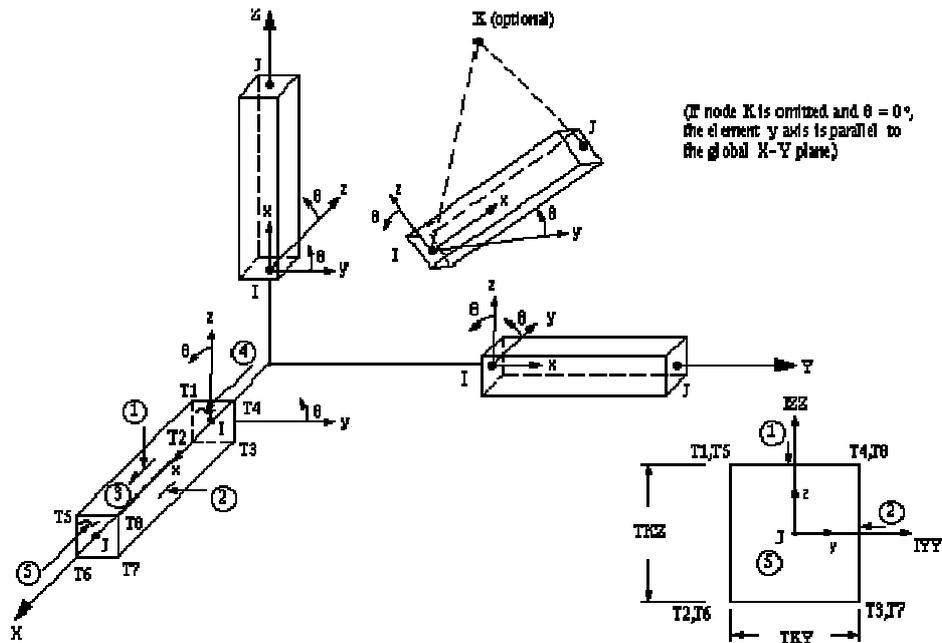


Figura A.1 – Elemento BEAM4

Tabela A.1 - Dados de entrada do programa ANSYS para o elemento BEAM4

Tipo de Elemento	BEAM4 – elemento de viga em 3D
Nós que definem o elemento	Nós I, J, e K (opcional)
Graus de liberdade por nó	UX,UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
Constantes reais	Área, inércia ZZ e YY, largura, altura, 3º nó, tensão inicial, inércia XX, constante de deflexão em 'Z' e em 'Y', adição de massa por comprimento, cortante em Z, cortante em Y
Propriedades do material	Módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação, densidade
Cargas de superfície	Pressões
Tensão interna do corpo	Temperaturas:T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7 e T8

A.2 ELEMENTO DE MASSA - MASS21

O MASS21 é um elemento de massa pontual que possui seis graus de liberdade: translação e rotação nas direções dos eixos x, y, z. Este elemento permite que seja associado para cada direção um valor diferente da inércia rotacional e da massa.

A Figura A.2 apresenta o elemento MASS21, a Tabela A.2 apresenta os dados de entrada do programa ANSYS para o elemento.

Este elemento possui várias opções como, por exemplo, excluir os efeitos de inércia e reduzir o elemento para uma capacidade bidimensional. Se o elemento requer somente uma massa como dado é assumido que ela atuará em todas as direções das coordenadas. Neste trabalho o elemento foi considerado como um elemento de massa estrutural tridimensional paralelo ao sistema de coordenadas cartesianas globais e sem inércia de rotação. Ele foi utilizado para representar o parapeito das passarelas e ficou concentrado nos nós inferiores de cada vão.

Os deslocamentos nodais estão incluídos na solução total dos deslocamentos. Não existe saída de dados para este elemento.

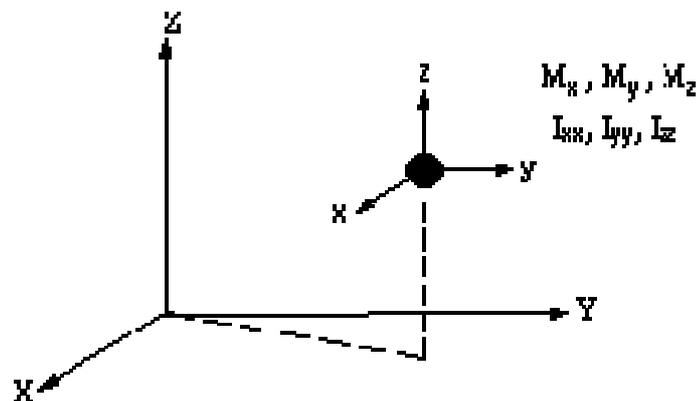


Figura A.2 – Elemento MASS21

Tabela A.2 - Dados de entrada do programa ANSYS para o elemento MASS21

Tipo de Elemento	MASS21 Massas estruturais
Nós que definem o elemento	Nó I
Graus de liberdade por nó	UX,UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
Constantes reais	Massa em 'X', em 'Y', em 'Z' e Inércia em 'X' , em 'Y', em 'Z'.
Opção de análise	Elemento de massa tridimensional, desprezando as inércias de rotação

A.3 ELEMENTO SHELL63

SHELL63 é um elemento para ser aplicável a estruturas laminares como representação de placas (caso desta pesquisa) ou de cascas, podendo considerar efeitos de membrana ou de flexão. O elemento tem seis graus de liberdade para cada nó, translação e rotação nas direções x , y , z , como mostra o esquema apresentado na Figura A.3.

O elemento é definido por quatro nós e quatro espessuras, módulo de elasticidade e as propriedades de um material ortotrópico. A Tabela A.3 descreve este elemento e suas propriedades.

Os deslocamentos nodais estão incluídos na solução total dos deslocamentos. Não existe saída de dados para este elemento.

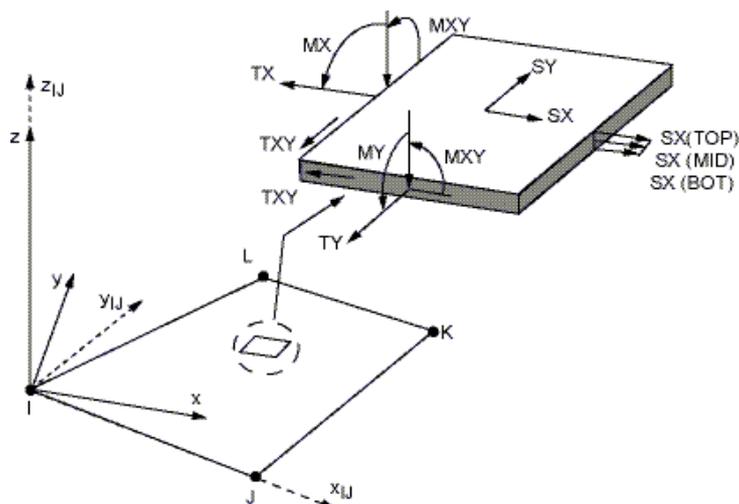


Figura A.3 – Elemento SHELL63

Este elemento permite a escolha de uma espessura constante para o cálculo, bastando somente entrar com o valor de uma única espessura. A rigidez elástica é definida como uma pressão requerida para produzir uma deflexão normal da fundação. Permite ainda a aplicação da não homogeneidade, cargas de superfície em todas suas seis faces, diferentes ou não, inserir diferentes temperaturas nas suas oito arestas, considerar rigidez de flexão ou de membrana e optar pelo cálculo feito com matrizes reduzidas.

Tabela A.3 - Dados de entrada do programa ANSYS para o elemento SHELL63

Tipo de Elemento	SHELL63 – Elem. de placa elástico 3-D
Nós que definem o elemento	Nós I, J, K e L
Graus de liberdade por nó	UX,UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
Constantes reais	Comprimentos em todas direções, espessura
Propriedades do Material	Módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação, coeficiente de Poisson, densidade
Cargas de Superfície	Pressões nas faces 1, 2, 3, 4, 5 e 6
Tensões internas do corpo	Temperatura: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T8

ANEXO B

B.1 CÁLCULO DA CARGA ADICIONAL UTILIZADAS NA MODELAGEM

B.1.1 Carregamento distribuído das placas de piso A placa de piso da passarela é composta por placas de concreto armado pré-fabricadas, que possuem por volta de 0,40 m de largura e aproximadamente 2,84 m de comprimento. As placas possuem espessura de 3,0 cm e em suas bordas as mesmas contêm nervuras que possuem 12 cm de altura por 5 cm de largura aproximadamente (Figura B.1). As placas se apóiam sobre as travessas inferiores.

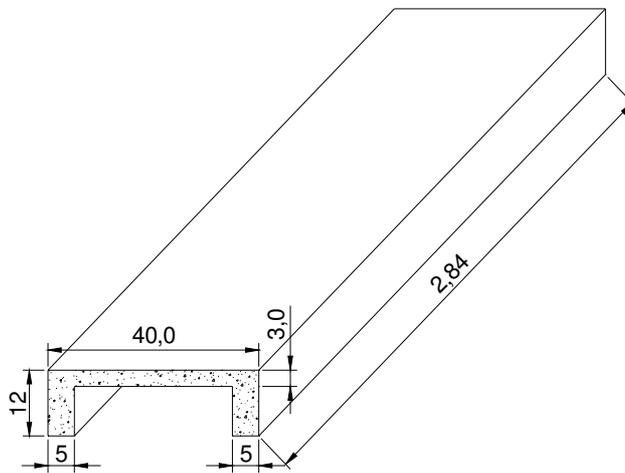


Figura B.1– Placa de piso representação esquemática

Cálculo da altura equivalente da placa considerando a placa retangular para entrada de dados do programa:

$$\text{Área} = (0,40 \cdot 0,12 - 0,30 \cdot 0,090) = 0,021 \text{m}^2$$

$$H_{\text{Equivalente}} = 0,021 \text{m}^2 / 0,40 \text{m} = 0,0525 \text{m}$$

O cálculo da massa adicional a ser considerada na travessa inferior segue abaixo:

Volume da Placa:

$$V = (0,40 \cdot 0,12 - 0,30 \cdot 0,09) \cdot 2,84$$

$$V = 0,05964 \text{m}^3$$

Peso Específico do Concreto: $\gamma = 2,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$

Peso da placa: $P = V \cdot \gamma$

$$P = 0,05964 \cdot 2,5 \cdot 10^4 = 1491 \text{N}$$

Massa da placa considerando $g = 9,81 \text{m/s}^2$

$$M = 1491/9,81 = 151,988 \text{ Kg}$$

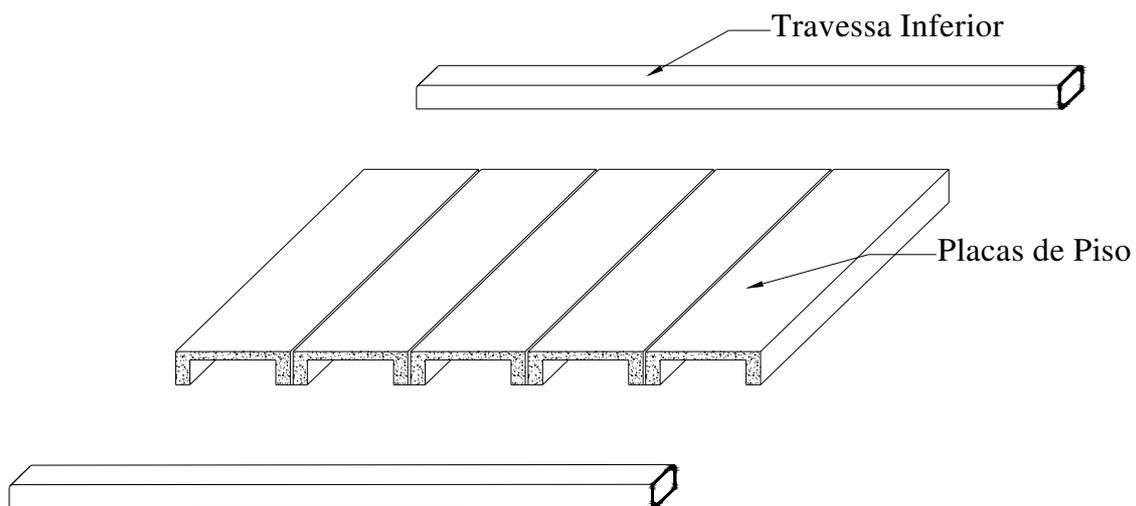


Figura B.2 – Esquema de distribuição da massa das placas de piso nas travessas inferiores

Adicional de massa, nas travessas inferiores nos vãos centrais, considerado o comprimento de apoio de 0,40m:

$$\text{AddMass}_{\text{Central}} = \frac{151,988 \text{ Kg}}{0,40 \text{m}} = 379,969 \text{Kg/m}$$

Nos vãos de extremidade, a massa adicional deve ser considerada metade deste valor, uma vez que não temos placas dos dois lados da travessa inferior.

$$\text{Add Mass}_{\text{Extremo}} = 189,985 \text{Kg/m}$$

B.1.2 Carregamento distribuído placas de cobertura

A placa de cobertura da passarela é arqueadas de argamassa armada, com aproximadamente 2,84m de comprimento, 2,4 m de largura em planta, arco com 1,74 m de raio, e 2 cm de espessura. As laterais da cobertura se apóiam sobre os banzos superiores.

Nos apoios das placas de cobertura na treliça metálica da passarela foram utilizados nós que permitem transferência das cargas diretamente para os nós da treliça nos módulos.

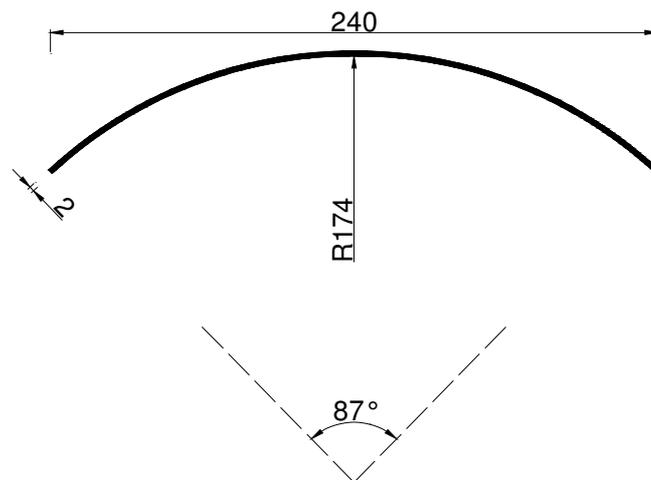


Figura B.3 – Placa de cobertura – representação esquemática – medidas em cm

O cálculo da massa adicional a ser considerada no banzo superior segue abaixo:

Comprimento da Placa: $L = \theta.R$

$$L = 87^\circ \cdot \frac{1,74\text{m}}{180^\circ} = 2,642\text{m}$$

Volume da Placa:

$$V = 2,642 \cdot 0,02 \cdot 2,84 = 0,1501 \text{m}^3$$

Peso Específico da Argamassa Armada: $\gamma = 2,2 \cdot 10^4 \text{N/m}^3$

Peso da placa: $P = V \cdot \gamma$

$$P = 0,1501 \cdot 2,2 \cdot 10^4 = 3301,542 \text{N}$$

Massa da placa considerando $g = 9,81 \text{m/s}^2$

$$M = 3301,542 / 9,81 = 336,549 \text{Kg}$$

Considerando a distribuição da carga entre os banzos do lado esquerdo e direito.

$$M = 336,549 \text{Kg} / 2 = 168,274 \text{Kg/m}$$

Adicional de massa, nos banzos superiores, considerado o comprimento de apoio de 2,84m:

$$\text{Add Mass} = 168,274 \text{ Kg} / 2,84 \text{m} = 59,252 \text{Kg/m}$$

ANEXO C

C.1 IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO EM APDL

Para a execução das análises pelo programa ANSYS são necessários alguns arquivos de comando, relacionados abaixo na Figura C.1:

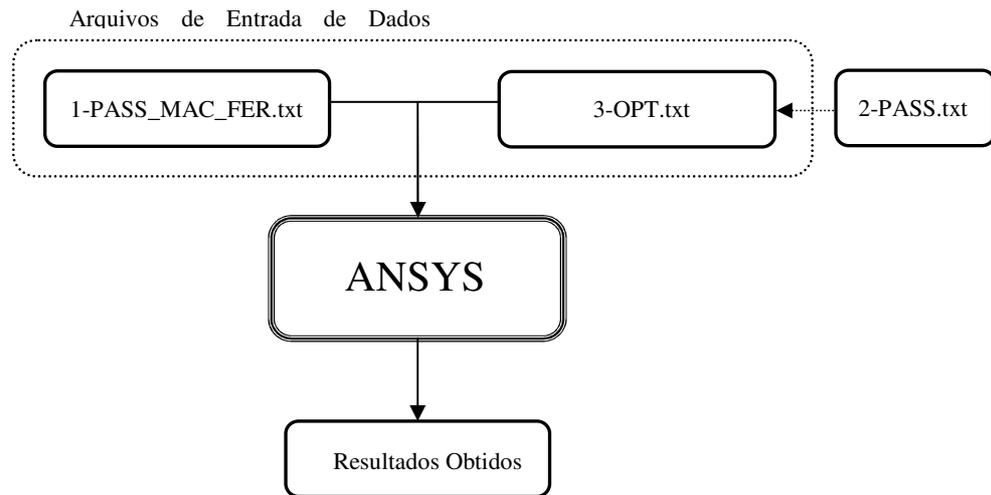


Figura C.1 – Arquivos de programas necessários para a realização da atualização automática.

A sub-rotina 1-PASS_MAC_FER.txt, apresentada abaixo, pode ser dividida em dois passos principais, o primeiro passo modela o maior vão estrutura da passarela sobre a E.P.I.A., como definido no capítulo 4 deste trabalho, sendo a cobertura modelada como elemento de placa SHELL63 o elemento 9 da lista de definições, e o segundo passo calcula os índices MAC e FER para a condição inicial da estrutura da passarela, iniciado no comando do pós-processador POST1 que permite rever os resultados analisados sobre o modelo por completo.

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7
/TITLE,Analise da Passarela sobre E.P.I.A.
!
! Criação do Modelo
!
*set,expp,2.9e10      !Elasticidade Placa de piso
*set,denpp,2548.41998 !Densidade Placa de piso
```

```

*set,exaco,1.72e11      !Elasticidade AÇO
*set,denaco,8012.232   !Densidade AÇO
*set,expc,5.0e9        !Elasticidade Placa de Cobertura
*set,denpc,2242.6096   !Densidade Placa de Cobertura
!
!Placa de piso em concreto armado
!
ET,1,SHELL63
R,1,0.0525
UIMP,1,EX,,expp,
UIMP,1,DENS,,,denpp,
UIMP,1,NUXY,,,0.3
!
!Diagonais
!
ET,2,BEAM4
R,2,16.9411e-4,126.357e-8,126.357e-8,0.092,0.08
RMORE,,252.714e-8,,,,
UIMP,2,EX,,exaco,
UIMP,2,DENS,,,denaco,
KEYOPT,2,6,1
!
!Travessas Superiores
ET,3,BEAM4
R,3,7.5343e-4,54.1511e-8,42.4964e-8,0.06,0.07
RMORE,,96.6475e-8,,,,
UIMP,3,EX,,exaco,
UIMP,3,DENS,,,denaco,
KEYOPT,3,6,1
!
!Travessas Inferiores
ET,4,BEAM4
R,4,27.6844e-4,565.8051e-8,423.0613e-8,0.1,0.12
RMORE,,991.8664e-8,,,,
UIMP,4,EX,,exaco,
UIMP,4,DENS,,,denaco,
KEYOPT,4,6,1
!
!Banzos e = 6.7 mm (INFERIORES)
ET,5,BEAM4
R,5,41.0844e-4,2228.2052e-8,996.3422e-8,0.12,0.2
RMORE,,3224.5474e-8,,,,
UIMP,5,EX,,exaco,
UIMP,5,DENS,,,denaco,
KEYOPT,5,6,1
!
!Banzos e = 6.7 mm (SUPERIORES - Inclui a carga da coberta em RMORE)
ET,6,BEAM4
R,6,41.0844e-4,2228.2052e-8,996.3422e-8,0.12,0.2
RMORE,,3224.5474e-8,,,,
UIMP,6,EX,,exaco,
UIMP,6,DENS,,,denaco,
KEYOPT,6,6,1
!
!Concentração da massa do para-peito
ET,7,MASS21
R,7,18.18
KEYOPT,7,3,2
!
!Travessas Inferiores das Extremidades
ET,8,BEAM4
R,8,27.6844e-4,565.8051e-8,423.0613e-8,0.1,0.12
RMORE,,991.8664e-8,,,,
UIMP,8,EX,,exaco,
UIMP,8,DENS,,,denaco,
KEYOPT,8,6,1
!
!Placa de Cobertura - Argamassa Armada
ET,9,SHELL63
R,9,0.05
UIMP,9,EX,,expc,
UIMP,9,DENS,,,denpc,
UIMP,9,NUXY,,,0.2
!
!Nós para geração da Malha Piso

```

```

!
N,1001,0.3,-2.2,0
N,1005,2.3340,-2.2,0
FILL
N,1006,2.8425,-2.2,0
N,1056,31.2675,-2.2,0
FILL
N,1057,31.7760,-2.2,0
N,1061,33.81,-2.2,0
FILL
NGEN,6,61,1001,1061,1,0,0.40
!
!Nós para Placa de Cobertura
!
N      ,      70      ,      0.00000      ,      -0.05000      ,      2.25000
N      ,      71      ,      0.30000      ,      -0.05000      ,      2.25000
N      ,      72      ,      1.42125      ,      -0.05000      ,      2.25000
N      ,      73      ,      1.82732      ,      -0.05000      ,      2.25000
N      ,      148     ,      32.28268     ,      -0.05000     ,      2.25000
FILL
N      ,      149     ,      32.68875     ,      -0.05000     ,      2.25000
N      ,      150     ,      33.81000     ,      -0.05000     ,      2.25000
N      ,      151     ,      34.11000     ,      -0.05000     ,      2.25000
NGEN,2,82,70,151,1,0,-2.3000
N      ,      234     ,      0.00000      ,      -0.24000      ,      2.44130
N      ,      235     ,      0.30000      ,      -0.24000      ,      2.44130
N      ,      236     ,      1.42125      ,      -0.24000      ,      2.44130
N      ,      237     ,      1.82732      ,      -0.24000      ,      2.44130
N      ,      312     ,      32.28268     ,      -0.24000     ,      2.44130
FILL
N      ,      313     ,      32.68875     ,      -0.24000     ,      2.44130
N      ,      314     ,      33.81000     ,      -0.24000     ,      2.44130
N      ,      315     ,      34.11000     ,      -0.24000     ,      2.44130
NGEN,2,82,234,315,1,0,-1.9200
N      ,      398     ,      0.00000      ,      -0.48000      ,      2.57410
N      ,      399     ,      0.30000      ,      -0.48000      ,      2.57410
N      ,      400     ,      1.42125      ,      -0.48000      ,      2.57410
N      ,      401     ,      1.82732      ,      -0.48000      ,      2.57410
N      ,      476     ,      32.28268     ,      -0.48000     ,      2.57410
FILL
N      ,      477     ,      32.68875     ,      -0.48000     ,      2.57410
N      ,      478     ,      33.81000     ,      -0.48000     ,      2.57410
N      ,      479     ,      34.11000     ,      -0.48000     ,      2.57410
NGEN,2,82,398,479,1,0,-1.4400

N      ,      562     ,      0.00000      ,      -0.72000      ,      2.66250
N      ,      563     ,      0.30000      ,      -0.72000      ,      2.66250
N      ,      564     ,      1.42125      ,      -0.72000      ,      2.66250
N      ,      565     ,      1.82732      ,      -0.72000      ,      2.66250
N      ,      640     ,      32.28268     ,      -0.72000     ,      2.66250
FILL
N      ,      641     ,      32.68875     ,      -0.72000     ,      2.66250
N      ,      642     ,      33.81000     ,      -0.72000     ,      2.66250
N      ,      643     ,      34.11000     ,      -0.72000     ,      2.66250
NGEN,2,82,562,643,1,0,-0.9663
N      ,      726     ,      0.00000      ,      -0.96000      ,      2.71340
N      ,      727     ,      0.30000      ,      -0.96000      ,      2.71340
N      ,      728     ,      1.42125      ,      -0.96000      ,      2.71340
N      ,      729     ,      1.82732      ,      -0.96000      ,      2.71340
N      ,      804     ,      32.28268     ,      -0.96000     ,      2.71340
FILL
N      ,      805     ,      32.68875     ,      -0.96000     ,      2.71340
N      ,      806     ,      33.81000     ,      -0.96000     ,      2.71340
N      ,      807     ,      34.11000     ,      -0.96000     ,      2.71340
NGEN,2,82,726,807,1,0,-0.4800
N      ,      890     ,      0.00000      ,      -1.20000      ,      2.73000
N      ,      891     ,      0.30000      ,      -1.20000      ,      2.73000
N      ,      892     ,      1.42125      ,      -1.20000      ,      2.73000
N      ,      893     ,      1.82732      ,      -1.20000      ,      2.73000
N      ,      968     ,      32.28268     ,      -1.20000     ,      2.73000
FILL
N      ,      969     ,      32.68875     ,      -1.20000     ,      2.73000
N      ,      970     ,      33.81000     ,      -1.20000     ,      2.73000
N      ,      971     ,      34.11000     ,      -1.20000     ,      2.73000
!

```

!Malha para as Estruturas de Barras

!

N,1,0,0,0
N,2,0,-2.4,0
N,3,1.42125,-2.4,2.25
N,4,1.42125,0,2.25
N,5,2.8425,0,0
N,6,2.8425,-2.4,0
N,7,4.26375,-2.4,2.25
N,8,4.26375,0,2.25
N,9,5.685,0,0
N,10,5.685,-2.4,0
N,11,7.10625,-2.4,2.25
N,12,7.10625,0,2.25
N,13,8.5275,0,0
N,14,8.5275,-2.4,0
N,15,9.94875,-2.4,2.25
N,16,9.94875,0,2.25
N,17,11.37,0,0
N,18,11.37,-2.4,0
N,19,12.79125,-2.4,2.25
N,20,12.79125,0,2.25
N,21,14.2125,0,0
N,22,14.2125,-2.4,0
N,23,15.63375,-2.4,2.25
N,24,15.63375,0,2.25
N,25,17.055,0,0
N,26,17.055,-2.4,0
N,27,18.47625,-2.4,2.25
N,28,18.47625,0,2.25
N,29,19.8975,0,0
N,30,19.8975,-2.4,0
N,31,21.31875,-2.4,2.25
N,32,21.31875,0,2.25
N,33,22.74,0,0
N,34,22.74,-2.4,0
N,35,24.16125,-2.4,2.25
N,36,24.16125,0,2.25
N,37,25.5825,0,0
N,38,25.5825,-2.4,0
N,39,27.00375,-2.4,2.25
N,40,27.00375,0,2.25
N,41,28.425,0,0
N,42,28.425,-2.4,0
N,43,29.84625,-2.4,2.25
N,44,29.84625,0,2.25
N,45,31.2675,0,0
N,46,31.2675,-2.4,0
N,47,32.68875,-2.4,2.25
N,48,32.68875,0,2.25
N,49,34.11,0,0
N,50,34.11,-2.4,0
N,51,0.3,0,0
N,52,0.3,-2.4,0
N,53,0,-2.4,2.25
N,54,0,0,2.25
N,55,0.3,-2.4,2.25
N,56,0.3,0,2.25
N,57,33.81,0,0
N,58,33.81,-2.4,0
N,59,33.81,-2.4,2.25
N,60,33.81,0,2.25
N,61,34.11,-2.4,2.25
N,62,34.11,0,2.25

!

NPLOT

NLIST

!

!Placa de Piso concreto armado

MAT,1

REAL,1

TYPE,1

E,1001,1002,1063,1062

EGEN,60,1,1,60

E,1062,1063,1124,1123

```

EGEN,60,1,61,120
E,1123,1124,1185,1184
EGEN,60,1,121,180
E,1184,1185,1246,1245
EGEN,60,1,181,240
E,1245,1246,1307,1306
EGEN,60,1,241,300
!
!Diagonais
MAT,2
REAL,2
TYPE,2
E,1,4
E,4,5
E,5,8
E,8,9
E,9,12
E,12,13
E,13,16
E,16,17
E,17,20
E,20,21
E,21,24
E,24,25
E,25,28
E,28,29
E,29,32
E,32,33
E,33,36
E,36,37
E,37,40
E,40,41
E,41,44
E,44,45
E,45,48
E,48,49
E,2,3
E,3,6
E,6,7
E,7,10
E,10,11
E,11,14
E,14,15
E,15,18
E,18,19
E,19,22
E,22,23
E,23,26
E,26,27
E,27,30
E,30,31
E,31,34
E,34,35
E,35,38
E,38,39
E,39,42
E,42,43
E,43,46
E,46,47
E,47,50
!
!Travessas Superiores
MAT,3
REAL,3
TYPE,3
E,54,70
E,56,71
E,4,72
E,8,79
E,12,86
E,16,93
E,20,100
E,24,107
E,28,114
E,32,121

```

E	,	36	,	128
E	,	40	,	135
E	,	44	,	142
E	,	48	,	149
E	,	60	,	150
E	,	62	,	151
E	,	70	,	152
E	,	71	,	153
E	,	72	,	154
E	,	79	,	161
E	,	86	,	168
E	,	93	,	175
E	,	100	,	182
E	,	107	,	189
E	,	114	,	196
E	,	121	,	203
E	,	128	,	210
E	,	135	,	217
E	,	142	,	224
E	,	149	,	231
E	,	150	,	232
E	,	151	,	233
E	,	152	,	53
E	,	153	,	55
E	,	154	,	3
E	,	161	,	7
E	,	168	,	11
E	,	175	,	15
E	,	182	,	19
E	,	189	,	23
E	,	196	,	27
E	,	203	,	31
E	,	210	,	35
E	,	217	,	39
E	,	224	,	43
E	,	231	,	47
E	,	232	,	59
E	,	233	,	61

!

!Travessas Inferiores

MAT,4
 REAL,4
 TYPE,4
 E,6,1006
 E,1006,1067
 E,1067,1128
 E,1128,1189
 E,1189,1250
 E,1250,1311
 E,1311,5
 E,10,1011
 E,1011,1072
 E,1072,1133
 E,1133,1194
 E,1194,1255
 E,1255,1316
 E,1316,9
 E,14,1016
 E,1016,1077
 E,1077,1138
 E,1138,1199
 E,1199,1260
 E,1260,1321
 E,1321,13
 E,18,1021
 E,1021,1082
 E,1082,1143
 E,1143,1204
 E,1204,1265
 E,1265,1326
 E,1326,17
 E,22,1026
 E,1026,1087
 E,1087,1148
 E,1148,1209

E,1209,1270
 E,1270,1331
 E,1331,21
 E,26,1031
 E,1031,1092
 E,1092,1153
 E,1153,1214
 E,1214,1275
 E,1275,1336
 E,1336,25
 E,30,1036
 E,1036,1097
 E,1097,1158
 E,1158,1219
 E,1219,1280
 E,1280,1341
 E,1341,29
 E,34,1041
 E,1041,1102
 E,1102,1163
 E,1163,1224
 E,1224,1285
 E,1285,1346
 E,1346,33
 E,38,1046
 E,1046,1107
 E,1107,1168
 E,1168,1229
 E,1229,1290
 E,1290,1351
 E,1351,37
 E,42,1051
 E,1051,1112
 E,1112,1173
 E,1173,1234
 E,1234,1295
 E,1295,1356
 E,1356,41
 E,46,1056
 E,1056,1117
 E,1117,1178
 E,1178,1239
 E,1239,1300
 E,1300,1361
 E,1361,45
 !
 !Banzos e=6.7 mm
 MAT,5
 REAL,5
 TYPE,5
 E,1,51
 E,2,52
 E,51,5
 E,5,9
 E,52,6
 E,6,10
 E,9,13
 E,10,14
 E,13,17
 E,14,18
 E,17,21
 E,18,22
 E,21,25
 E,22,26
 E,25,29
 E,26,30
 E,29,33
 E,30,34
 E,33,37
 E,34,38
 E,37,41
 E,38,42
 E,41,45
 E,42,46
 E,45,57

```

E,46,58
E,57,49
E,58,50
!
!Banzos e=6.7 mm SUPERIOR
MAT,6
REAL,6
TYPE,6
E,53,55
E,55,3
E,3,7
E,7,11
E,11,15
E,15,19
E,19,23
E,23,27
E,27,31
E,31,35
E,35,39
E,39,43
E,43,47
E,47,59
E,59,61
E,54,56
E,4,56
E,4,8
E,8,12
E,12,16
E,16,20
E,20,24
E,24,28
E,28,32
E,32,36
E,36,40
E,40,44
E,44,48
E,48,60
E,60,62
!
!Massa do para peito
REAL,7
TYPE,7
E,1
E,2
E,5
E,6
E,9
E,10
E,13
E,14
E,17
E,18
E,21
E,22
E,25
E,26
E,29
E,30
E,33
E,34
E,37
E,38
E,41
E,42
E,45
E,46
E,49
E,50
!
!Travessas Inferiores das Extremidades
MAT,8
REAL,8
TYPE,8
E,52,1001
E,1001,1062

```

E,1062,1123
 E,1123,1184
 E,1184,1245
 E,1245,1306
 E,1306,51
 E,58,1061
 E,1061,1122
 E,1122,1183
 E,1183,1244
 E,1244,1305
 E,1305,1366
 E,1366,57

!

!Placa de cobertura Argamassa armada

MAT,9

REAL,9

TYPE,9

E	,	70	,	71	,	235	,	234
E	,	71	,	72	,	236	,	235
E	,	72	,	73	,	237	,	236
E	,	73	,	74	,	238	,	237
E	,	74	,	75	,	239	,	238
E	,	75	,	76	,	240	,	239
E	,	76	,	77	,	241	,	240
E	,	77	,	78	,	242	,	241
E	,	78	,	79	,	243	,	242
E	,	79	,	80	,	244	,	243
E	,	80	,	81	,	245	,	244
E	,	81	,	82	,	246	,	245
E	,	82	,	83	,	247	,	246
E	,	83	,	84	,	248	,	247
E	,	84	,	85	,	249	,	248
E	,	85	,	86	,	250	,	249
E	,	86	,	87	,	251	,	250
E	,	87	,	88	,	252	,	251
E	,	88	,	89	,	253	,	252
E	,	89	,	90	,	254	,	253
E	,	90	,	91	,	255	,	254
E	,	91	,	92	,	256	,	255
E	,	92	,	93	,	257	,	256
E	,	93	,	94	,	258	,	257
E	,	94	,	95	,	259	,	258
E	,	95	,	96	,	260	,	259
E	,	96	,	97	,	261	,	260
E	,	97	,	98	,	262	,	261
E	,	98	,	99	,	263	,	262
E	,	99	,	100	,	264	,	263
E	,	100	,	101	,	265	,	264
E	,	101	,	102	,	266	,	265
E	,	102	,	103	,	267	,	266
E	,	103	,	104	,	268	,	267
E	,	104	,	105	,	269	,	268
E	,	105	,	106	,	270	,	269
E	,	106	,	107	,	271	,	270
E	,	107	,	108	,	272	,	271
E	,	108	,	109	,	273	,	272
E	,	109	,	110	,	274	,	273
E	,	110	,	111	,	275	,	274
E	,	111	,	112	,	276	,	275
E	,	112	,	113	,	277	,	276
E	,	113	,	114	,	278	,	277
E	,	114	,	115	,	279	,	278
E	,	115	,	116	,	280	,	279
E	,	116	,	117	,	281	,	280
E	,	117	,	118	,	282	,	281
E	,	118	,	119	,	283	,	282
E	,	119	,	120	,	284	,	283
E	,	120	,	121	,	285	,	284
E	,	121	,	122	,	286	,	285
E	,	122	,	123	,	287	,	286
E	,	123	,	124	,	288	,	287
E	,	124	,	125	,	289	,	288
E	,	125	,	126	,	290	,	289
E	,	126	,	127	,	291	,	290

E	,	127	,	128	,	292	,	291
E	,	128	,	129	,	293	,	292
E	,	129	,	130	,	294	,	293
E	,	130	,	131	,	295	,	294
E	,	131	,	132	,	296	,	295
E	,	132	,	133	,	297	,	296
E	,	133	,	134	,	298	,	297
E	,	134	,	135	,	299	,	298
E	,	135	,	136	,	300	,	299
E	,	136	,	137	,	301	,	300
E	,	137	,	138	,	302	,	301
E	,	138	,	139	,	303	,	302
E	,	139	,	140	,	304	,	303
E	,	140	,	141	,	305	,	304
E	,	141	,	142	,	306	,	305
E	,	142	,	143	,	307	,	306
E	,	143	,	144	,	308	,	307
E	,	144	,	145	,	309	,	308
E	,	145	,	146	,	310	,	309
E	,	146	,	147	,	311	,	310
E	,	147	,	148	,	312	,	311
E	,	148	,	149	,	313	,	312
E	,	149	,	150	,	314	,	313
E	,	150	,	151	,	315	,	314
E	,	234	,	235	,	399	,	398
E	,	235	,	236	,	400	,	399
E	,	236	,	237	,	401	,	400
E	,	237	,	238	,	402	,	401
E	,	238	,	239	,	403	,	402
E	,	239	,	240	,	404	,	403
E	,	240	,	241	,	405	,	404
E	,	241	,	242	,	406	,	405
E	,	242	,	243	,	407	,	406
E	,	243	,	244	,	408	,	407
E	,	244	,	245	,	409	,	408
E	,	245	,	246	,	410	,	409
E	,	246	,	247	,	411	,	410
E	,	247	,	248	,	412	,	411
E	,	248	,	249	,	413	,	412
E	,	249	,	250	,	414	,	413
E	,	250	,	251	,	415	,	414
E	,	251	,	252	,	416	,	415
E	,	252	,	253	,	417	,	416
E	,	253	,	254	,	418	,	417
E	,	254	,	255	,	419	,	418
E	,	255	,	256	,	420	,	419
E	,	256	,	257	,	421	,	420
E	,	257	,	258	,	422	,	421
E	,	258	,	259	,	423	,	422
E	,	259	,	260	,	424	,	423
E	,	260	,	261	,	425	,	424
E	,	261	,	262	,	426	,	425
E	,	262	,	263	,	427	,	426
E	,	263	,	264	,	428	,	427
E	,	264	,	265	,	429	,	428
E	,	265	,	266	,	430	,	429
E	,	266	,	267	,	431	,	430
E	,	267	,	268	,	432	,	431
E	,	268	,	269	,	433	,	432
E	,	269	,	270	,	434	,	433
E	,	270	,	271	,	435	,	434
E	,	271	,	272	,	436	,	435
E	,	272	,	273	,	437	,	436
E	,	273	,	274	,	438	,	437
E	,	274	,	275	,	439	,	438
E	,	275	,	276	,	440	,	439
E	,	276	,	277	,	441	,	440
E	,	277	,	278	,	442	,	441
E	,	278	,	279	,	443	,	442
E	,	279	,	280	,	444	,	443
E	,	280	,	281	,	445	,	444
E	,	281	,	282	,	446	,	445
E	,	282	,	283	,	447	,	446
E	,	283	,	284	,	448	,	447
E	,	284	,	285	,	449	,	448

E	,	285	,	286	,	450	,	449
E	,	286	,	287	,	451	,	450
E	,	287	,	288	,	452	,	451
E	,	288	,	289	,	453	,	452
E	,	289	,	290	,	454	,	453
E	,	290	,	291	,	455	,	454
E	,	291	,	292	,	456	,	455
E	,	292	,	293	,	457	,	456
E	,	293	,	294	,	458	,	457
E	,	294	,	295	,	459	,	458
E	,	295	,	296	,	460	,	459
E	,	296	,	297	,	461	,	460
E	,	297	,	298	,	462	,	461
E	,	298	,	299	,	463	,	462
E	,	299	,	300	,	464	,	463
E	,	300	,	301	,	465	,	464
E	,	301	,	302	,	466	,	465
E	,	302	,	303	,	467	,	466
E	,	303	,	304	,	468	,	467
E	,	304	,	305	,	469	,	468
E	,	305	,	306	,	470	,	469
E	,	306	,	307	,	471	,	470
E	,	307	,	308	,	472	,	471
E	,	308	,	309	,	473	,	472
E	,	309	,	310	,	474	,	473
E	,	310	,	311	,	475	,	474
E	,	311	,	312	,	476	,	475
E	,	312	,	313	,	477	,	476
E	,	313	,	314	,	478	,	477
E	,	314	,	315	,	479	,	478
E	,	398	,	399	,	563	,	562
E	,	399	,	400	,	564	,	563
E	,	400	,	401	,	565	,	564
E	,	401	,	402	,	566	,	565
E	,	402	,	403	,	567	,	566
E	,	403	,	404	,	568	,	567
E	,	404	,	405	,	569	,	568
E	,	405	,	406	,	570	,	569
E	,	406	,	407	,	571	,	570
E	,	407	,	408	,	572	,	571
E	,	408	,	409	,	573	,	572
E	,	409	,	410	,	574	,	573
E	,	410	,	411	,	575	,	574
E	,	411	,	412	,	576	,	575
E	,	412	,	413	,	577	,	576
E	,	413	,	414	,	578	,	577
E	,	414	,	415	,	579	,	578
E	,	415	,	416	,	580	,	579
E	,	416	,	417	,	581	,	580
E	,	417	,	418	,	582	,	581
E	,	418	,	419	,	583	,	582
E	,	419	,	420	,	584	,	583
E	,	420	,	421	,	585	,	584
E	,	421	,	422	,	586	,	585
E	,	422	,	423	,	587	,	586
E	,	423	,	424	,	588	,	587
E	,	424	,	425	,	589	,	588
E	,	425	,	426	,	590	,	589
E	,	426	,	427	,	591	,	590
E	,	427	,	428	,	592	,	591
E	,	428	,	429	,	593	,	592
E	,	429	,	430	,	594	,	593
E	,	430	,	431	,	595	,	594
E	,	431	,	432	,	596	,	595
E	,	432	,	433	,	597	,	596
E	,	433	,	434	,	598	,	597
E	,	434	,	435	,	599	,	598
E	,	435	,	436	,	600	,	599
E	,	436	,	437	,	601	,	600
E	,	437	,	438	,	602	,	601
E	,	438	,	439	,	603	,	602
E	,	439	,	440	,	604	,	603
E	,	440	,	441	,	605	,	604
E	,	441	,	442	,	606	,	605
E	,	442	,	443	,	607	,	606

E	,	443	,	444	,	608	,	607
E	,	444	,	445	,	609	,	608
E	,	445	,	446	,	610	,	609
E	,	446	,	447	,	611	,	610
E	,	447	,	448	,	612	,	611
E	,	448	,	449	,	613	,	612
E	,	449	,	450	,	614	,	613
E	,	450	,	451	,	615	,	614
E	,	451	,	452	,	616	,	615
E	,	452	,	453	,	617	,	616
E	,	453	,	454	,	618	,	617
E	,	454	,	455	,	619	,	618
E	,	455	,	456	,	620	,	619
E	,	456	,	457	,	621	,	620
E	,	457	,	458	,	622	,	621
E	,	458	,	459	,	623	,	622
E	,	459	,	460	,	624	,	623
E	,	460	,	461	,	625	,	624
E	,	461	,	462	,	626	,	625
E	,	462	,	463	,	627	,	626
E	,	463	,	464	,	628	,	627
E	,	464	,	465	,	629	,	628
E	,	465	,	466	,	630	,	629
E	,	466	,	467	,	631	,	630
E	,	467	,	468	,	632	,	631
E	,	468	,	469	,	633	,	632
E	,	469	,	470	,	634	,	633
E	,	470	,	471	,	635	,	634
E	,	471	,	472	,	636	,	635
E	,	472	,	473	,	637	,	636
E	,	473	,	474	,	638	,	637
E	,	474	,	475	,	639	,	638
E	,	475	,	476	,	640	,	639
E	,	476	,	477	,	641	,	640
E	,	477	,	478	,	642	,	641
E	,	478	,	479	,	643	,	642
E	,	562	,	563	,	727	,	726
E	,	563	,	564	,	728	,	727
E	,	564	,	565	,	729	,	728
E	,	565	,	566	,	730	,	729
E	,	566	,	567	,	731	,	730
E	,	567	,	568	,	732	,	731
E	,	568	,	569	,	733	,	732
E	,	569	,	570	,	734	,	733
E	,	570	,	571	,	735	,	734
E	,	571	,	572	,	736	,	735
E	,	572	,	573	,	737	,	736
E	,	573	,	574	,	738	,	737
E	,	574	,	575	,	739	,	738
E	,	575	,	576	,	740	,	739
E	,	576	,	577	,	741	,	740
E	,	577	,	578	,	742	,	741
E	,	578	,	579	,	743	,	742
E	,	579	,	580	,	744	,	743
E	,	580	,	581	,	745	,	744
E	,	581	,	582	,	746	,	745
E	,	582	,	583	,	747	,	746
E	,	583	,	584	,	748	,	747
E	,	584	,	585	,	749	,	748
E	,	585	,	586	,	750	,	749
E	,	586	,	587	,	751	,	750
E	,	587	,	588	,	752	,	751
E	,	588	,	589	,	753	,	752
E	,	589	,	590	,	754	,	753
E	,	590	,	591	,	755	,	754
E	,	591	,	592	,	756	,	755
E	,	592	,	593	,	757	,	756
E	,	593	,	594	,	758	,	757
E	,	594	,	595	,	759	,	758
E	,	595	,	596	,	760	,	759
E	,	596	,	597	,	761	,	760
E	,	597	,	598	,	762	,	761
E	,	598	,	599	,	763	,	762
E	,	599	,	600	,	764	,	763
E	,	600	,	601	,	765	,	764

E	,	601	,	602	,	766	,	765
E	,	602	,	603	,	767	,	766
E	,	603	,	604	,	768	,	767
E	,	604	,	605	,	769	,	768
E	,	605	,	606	,	770	,	769
E	,	606	,	607	,	771	,	770
E	,	607	,	608	,	772	,	771
E	,	608	,	609	,	773	,	772
E	,	609	,	610	,	774	,	773
E	,	610	,	611	,	775	,	774
E	,	611	,	612	,	776	,	775
E	,	612	,	613	,	777	,	776
E	,	613	,	614	,	778	,	777
E	,	614	,	615	,	779	,	778
E	,	615	,	616	,	780	,	779
E	,	616	,	617	,	781	,	780
E	,	617	,	618	,	782	,	781
E	,	618	,	619	,	783	,	782
E	,	619	,	620	,	784	,	783
E	,	620	,	621	,	785	,	784
E	,	621	,	622	,	786	,	785
E	,	622	,	623	,	787	,	786
E	,	623	,	624	,	788	,	787
E	,	624	,	625	,	789	,	788
E	,	625	,	626	,	790	,	789
E	,	626	,	627	,	791	,	790
E	,	627	,	628	,	792	,	791
E	,	628	,	629	,	793	,	792
E	,	629	,	630	,	794	,	793
E	,	630	,	631	,	795	,	794
E	,	631	,	632	,	796	,	795
E	,	632	,	633	,	797	,	796
E	,	633	,	634	,	798	,	797
E	,	634	,	635	,	799	,	798
E	,	635	,	636	,	800	,	799
E	,	636	,	637	,	801	,	800
E	,	637	,	638	,	802	,	801
E	,	638	,	639	,	803	,	802
E	,	639	,	640	,	804	,	803
E	,	640	,	641	,	805	,	804
E	,	641	,	642	,	806	,	805
E	,	642	,	643	,	807	,	806
E	,	726	,	727	,	891	,	890
E	,	727	,	728	,	892	,	891
E	,	728	,	729	,	893	,	892
E	,	729	,	730	,	894	,	893
E	,	730	,	731	,	895	,	894
E	,	731	,	732	,	896	,	895
E	,	732	,	733	,	897	,	896
E	,	733	,	734	,	898	,	897
E	,	734	,	735	,	899	,	898
E	,	735	,	736	,	900	,	899
E	,	736	,	737	,	901	,	900
E	,	737	,	738	,	902	,	901
E	,	738	,	739	,	903	,	902
E	,	739	,	740	,	904	,	903
E	,	740	,	741	,	905	,	904
E	,	741	,	742	,	906	,	905
E	,	742	,	743	,	907	,	906
E	,	743	,	744	,	908	,	907
E	,	744	,	745	,	909	,	908
E	,	745	,	746	,	910	,	909
E	,	746	,	747	,	911	,	910
E	,	747	,	748	,	912	,	911
E	,	748	,	749	,	913	,	912
E	,	749	,	750	,	914	,	913
E	,	750	,	751	,	915	,	914
E	,	751	,	752	,	916	,	915
E	,	752	,	753	,	917	,	916
E	,	753	,	754	,	918	,	917
E	,	754	,	755	,	919	,	918
E	,	755	,	756	,	920	,	919
E	,	756	,	757	,	921	,	920
E	,	757	,	758	,	922	,	921
E	,	758	,	759	,	923	,	922

E	,	759	,	760	,	924	,	923
E	,	760	,	761	,	925	,	924
E	,	761	,	762	,	926	,	925
E	,	762	,	763	,	927	,	926
E	,	763	,	764	,	928	,	927
E	,	764	,	765	,	929	,	928
E	,	765	,	766	,	930	,	929
E	,	766	,	767	,	931	,	930
E	,	767	,	768	,	932	,	931
E	,	768	,	769	,	933	,	932
E	,	769	,	770	,	934	,	933
E	,	770	,	771	,	935	,	934
E	,	771	,	772	,	936	,	935
E	,	772	,	773	,	937	,	936
E	,	773	,	774	,	938	,	937
E	,	774	,	775	,	939	,	938
E	,	775	,	776	,	940	,	939
E	,	776	,	777	,	941	,	940
E	,	777	,	778	,	942	,	941
E	,	778	,	779	,	943	,	942
E	,	779	,	780	,	944	,	943
E	,	780	,	781	,	945	,	944
E	,	781	,	782	,	946	,	945
E	,	782	,	783	,	947	,	946
E	,	783	,	784	,	948	,	947
E	,	784	,	785	,	949	,	948
E	,	785	,	786	,	950	,	949
E	,	786	,	787	,	951	,	950
E	,	787	,	788	,	952	,	951
E	,	788	,	789	,	953	,	952
E	,	789	,	790	,	954	,	953
E	,	790	,	791	,	955	,	954
E	,	791	,	792	,	956	,	955
E	,	792	,	793	,	957	,	956
E	,	793	,	794	,	958	,	957
E	,	794	,	795	,	959	,	958
E	,	795	,	796	,	960	,	959
E	,	796	,	797	,	961	,	960
E	,	797	,	798	,	962	,	961
E	,	798	,	799	,	963	,	962
E	,	799	,	800	,	964	,	963
E	,	800	,	801	,	965	,	964
E	,	801	,	802	,	966	,	965
E	,	802	,	803	,	967	,	966
E	,	803	,	804	,	968	,	967
E	,	804	,	805	,	969	,	968
E	,	805	,	806	,	970	,	969
E	,	806	,	807	,	971	,	970
E	,	890	,	891	,	809	,	808
E	,	891	,	892	,	810	,	809
E	,	892	,	893	,	811	,	810
E	,	893	,	894	,	812	,	811
E	,	894	,	895	,	813	,	812
E	,	895	,	896	,	814	,	813
E	,	896	,	897	,	815	,	814
E	,	897	,	898	,	816	,	815
E	,	898	,	899	,	817	,	816
E	,	899	,	900	,	818	,	817
E	,	900	,	901	,	819	,	818
E	,	901	,	902	,	820	,	819
E	,	902	,	903	,	821	,	820
E	,	903	,	904	,	822	,	821
E	,	904	,	905	,	823	,	822
E	,	905	,	906	,	824	,	823
E	,	906	,	907	,	825	,	824
E	,	907	,	908	,	826	,	825
E	,	908	,	909	,	827	,	826
E	,	909	,	910	,	828	,	827
E	,	910	,	911	,	829	,	828
E	,	911	,	912	,	830	,	829
E	,	912	,	913	,	831	,	830
E	,	913	,	914	,	832	,	831
E	,	914	,	915	,	833	,	832
E	,	915	,	916	,	834	,	833
E	,	916	,	917	,	835	,	834

E	,	917	,	918	,	836	,	835
E	,	918	,	919	,	837	,	836
E	,	919	,	920	,	838	,	837
E	,	920	,	921	,	839	,	838
E	,	921	,	922	,	840	,	839
E	,	922	,	923	,	841	,	840
E	,	923	,	924	,	842	,	841
E	,	924	,	925	,	843	,	842
E	,	925	,	926	,	844	,	843
E	,	926	,	927	,	845	,	844
E	,	927	,	928	,	846	,	845
E	,	928	,	929	,	847	,	846
E	,	929	,	930	,	848	,	847
E	,	930	,	931	,	849	,	848
E	,	931	,	932	,	850	,	849
E	,	932	,	933	,	851	,	850
E	,	933	,	934	,	852	,	851
E	,	934	,	935	,	853	,	852
E	,	935	,	936	,	854	,	853
E	,	936	,	937	,	855	,	854
E	,	937	,	938	,	856	,	855
E	,	938	,	939	,	857	,	856
E	,	939	,	940	,	858	,	857
E	,	940	,	941	,	859	,	858
E	,	941	,	942	,	860	,	859
E	,	942	,	943	,	861	,	860
E	,	943	,	944	,	862	,	861
E	,	944	,	945	,	863	,	862
E	,	945	,	946	,	864	,	863
E	,	946	,	947	,	865	,	864
E	,	947	,	948	,	866	,	865
E	,	948	,	949	,	867	,	866
E	,	949	,	950	,	868	,	867
E	,	950	,	951	,	869	,	868
E	,	951	,	952	,	870	,	869
E	,	952	,	953	,	871	,	870
E	,	953	,	954	,	872	,	871
E	,	954	,	955	,	873	,	872
E	,	955	,	956	,	874	,	873
E	,	956	,	957	,	875	,	874
E	,	957	,	958	,	876	,	875
E	,	958	,	959	,	877	,	876
E	,	959	,	960	,	878	,	877
E	,	960	,	961	,	879	,	878
E	,	961	,	962	,	880	,	879
E	,	962	,	963	,	881	,	880
E	,	963	,	964	,	882	,	881
E	,	964	,	965	,	883	,	882
E	,	965	,	966	,	884	,	883
E	,	966	,	967	,	885	,	884
E	,	967	,	968	,	886	,	885
E	,	968	,	969	,	887	,	886
E	,	969	,	970	,	888	,	887
E	,	970	,	971	,	889	,	888
E	,	808	,	809	,	645	,	644
E	,	809	,	810	,	646	,	645
E	,	810	,	811	,	647	,	646
E	,	811	,	812	,	648	,	647
E	,	812	,	813	,	649	,	648
E	,	813	,	814	,	650	,	649
E	,	814	,	815	,	651	,	650
E	,	815	,	816	,	652	,	651
E	,	816	,	817	,	653	,	652
E	,	817	,	818	,	654	,	653
E	,	818	,	819	,	655	,	654
E	,	819	,	820	,	656	,	655
E	,	820	,	821	,	657	,	656
E	,	821	,	822	,	658	,	657
E	,	822	,	823	,	659	,	658
E	,	823	,	824	,	660	,	659
E	,	824	,	825	,	661	,	660
E	,	825	,	826	,	662	,	661
E	,	826	,	827	,	663	,	662
E	,	827	,	828	,	664	,	663
E	,	828	,	829	,	665	,	664

E	,	829	,	830	,	666	,	665
E	,	830	,	831	,	667	,	666
E	,	831	,	832	,	668	,	667
E	,	832	,	833	,	669	,	668
E	,	833	,	834	,	670	,	669
E	,	834	,	835	,	671	,	670
E	,	835	,	836	,	672	,	671
E	,	836	,	837	,	673	,	672
E	,	837	,	838	,	674	,	673
E	,	838	,	839	,	675	,	674
E	,	839	,	840	,	676	,	675
E	,	840	,	841	,	677	,	676
E	,	841	,	842	,	678	,	677
E	,	842	,	843	,	679	,	678
E	,	843	,	844	,	680	,	679
E	,	844	,	845	,	681	,	680
E	,	845	,	846	,	682	,	681
E	,	846	,	847	,	683	,	682
E	,	847	,	848	,	684	,	683
E	,	848	,	849	,	685	,	684
E	,	849	,	850	,	686	,	685
E	,	850	,	851	,	687	,	686
E	,	851	,	852	,	688	,	687
E	,	852	,	853	,	689	,	688
E	,	853	,	854	,	690	,	689
E	,	854	,	855	,	691	,	690
E	,	855	,	856	,	692	,	691
E	,	856	,	857	,	693	,	692
E	,	857	,	858	,	694	,	693
E	,	858	,	859	,	695	,	694
E	,	859	,	860	,	696	,	695
E	,	860	,	861	,	697	,	696
E	,	861	,	862	,	698	,	697
E	,	862	,	863	,	699	,	698
E	,	863	,	864	,	700	,	699
E	,	864	,	865	,	701	,	700
E	,	865	,	866	,	702	,	701
E	,	866	,	867	,	703	,	702
E	,	867	,	868	,	704	,	703
E	,	868	,	869	,	705	,	704
E	,	869	,	870	,	706	,	705
E	,	870	,	871	,	707	,	706
E	,	871	,	872	,	708	,	707
E	,	872	,	873	,	709	,	708
E	,	873	,	874	,	710	,	709
E	,	874	,	875	,	711	,	710
E	,	875	,	876	,	712	,	711
E	,	876	,	877	,	713	,	712
E	,	877	,	878	,	714	,	713
E	,	878	,	879	,	715	,	714
E	,	879	,	880	,	716	,	715
E	,	880	,	881	,	717	,	716
E	,	881	,	882	,	718	,	717
E	,	882	,	883	,	719	,	718
E	,	883	,	884	,	720	,	719
E	,	884	,	885	,	721	,	720
E	,	885	,	886	,	722	,	721
E	,	886	,	887	,	723	,	722
E	,	887	,	888	,	724	,	723
E	,	888	,	889	,	725	,	724
E	,	644	,	645	,	481	,	480
E	,	645	,	646	,	482	,	481
E	,	646	,	647	,	483	,	482
E	,	647	,	648	,	484	,	483
E	,	648	,	649	,	485	,	484
E	,	649	,	650	,	486	,	485
E	,	650	,	651	,	487	,	486
E	,	651	,	652	,	488	,	487
E	,	652	,	653	,	489	,	488
E	,	653	,	654	,	490	,	489
E	,	654	,	655	,	491	,	490
E	,	655	,	656	,	492	,	491
E	,	656	,	657	,	493	,	492
E	,	657	,	658	,	494	,	493
E	,	658	,	659	,	495	,	494

E	,	659	,	660	,	496	,	495
E	,	660	,	661	,	497	,	496
E	,	661	,	662	,	498	,	497
E	,	662	,	663	,	499	,	498
E	,	663	,	664	,	500	,	499
E	,	664	,	665	,	501	,	500
E	,	665	,	666	,	502	,	501
E	,	666	,	667	,	503	,	502
E	,	667	,	668	,	504	,	503
E	,	668	,	669	,	505	,	504
E	,	669	,	670	,	506	,	505
E	,	670	,	671	,	507	,	506
E	,	671	,	672	,	508	,	507
E	,	672	,	673	,	509	,	508
E	,	673	,	674	,	510	,	509
E	,	674	,	675	,	511	,	510
E	,	675	,	676	,	512	,	511
E	,	676	,	677	,	513	,	512
E	,	677	,	678	,	514	,	513
E	,	678	,	679	,	515	,	514
E	,	679	,	680	,	516	,	515
E	,	680	,	681	,	517	,	516
E	,	681	,	682	,	518	,	517
E	,	682	,	683	,	519	,	518
E	,	683	,	684	,	520	,	519
E	,	684	,	685	,	521	,	520
E	,	685	,	686	,	522	,	521
E	,	686	,	687	,	523	,	522
E	,	687	,	688	,	524	,	523
E	,	688	,	689	,	525	,	524
E	,	689	,	690	,	526	,	525
E	,	690	,	691	,	527	,	526
E	,	691	,	692	,	528	,	527
E	,	692	,	693	,	529	,	528
E	,	693	,	694	,	530	,	529
E	,	694	,	695	,	531	,	530
E	,	695	,	696	,	532	,	531
E	,	696	,	697	,	533	,	532
E	,	697	,	698	,	534	,	533
E	,	698	,	699	,	535	,	534
E	,	699	,	700	,	536	,	535
E	,	700	,	701	,	537	,	536
E	,	701	,	702	,	538	,	537
E	,	702	,	703	,	539	,	538
E	,	703	,	704	,	540	,	539
E	,	704	,	705	,	541	,	540
E	,	705	,	706	,	542	,	541
E	,	706	,	707	,	543	,	542
E	,	707	,	708	,	544	,	543
E	,	708	,	709	,	545	,	544
E	,	709	,	710	,	546	,	545
E	,	710	,	711	,	547	,	546
E	,	711	,	712	,	548	,	547
E	,	712	,	713	,	549	,	548
E	,	713	,	714	,	550	,	549
E	,	714	,	715	,	551	,	550
E	,	715	,	716	,	552	,	551
E	,	716	,	717	,	553	,	552
E	,	717	,	718	,	554	,	553
E	,	718	,	719	,	555	,	554
E	,	719	,	720	,	556	,	555
E	,	720	,	721	,	557	,	556
E	,	721	,	722	,	558	,	557
E	,	722	,	723	,	559	,	558
E	,	723	,	724	,	560	,	559
E	,	724	,	725	,	561	,	560
E	,	480	,	481	,	317	,	316
E	,	481	,	482	,	318	,	317
E	,	482	,	483	,	319	,	318
E	,	483	,	484	,	320	,	319
E	,	484	,	485	,	321	,	320
E	,	485	,	486	,	322	,	321
E	,	486	,	487	,	323	,	322
E	,	487	,	488	,	324	,	323
E	,	488	,	489	,	325	,	324

E	,	489	,	490	,	326	,	325
E	,	490	,	491	,	327	,	326
E	,	491	,	492	,	328	,	327
E	,	492	,	493	,	329	,	328
E	,	493	,	494	,	330	,	329
E	,	494	,	495	,	331	,	330
E	,	495	,	496	,	332	,	331
E	,	496	,	497	,	333	,	332
E	,	497	,	498	,	334	,	333
E	,	498	,	499	,	335	,	334
E	,	499	,	500	,	336	,	335
E	,	500	,	501	,	337	,	336
E	,	501	,	502	,	338	,	337
E	,	502	,	503	,	339	,	338
E	,	503	,	504	,	340	,	339
E	,	504	,	505	,	341	,	340
E	,	505	,	506	,	342	,	341
E	,	506	,	507	,	343	,	342
E	,	507	,	508	,	344	,	343
E	,	508	,	509	,	345	,	344
E	,	509	,	510	,	346	,	345
E	,	510	,	511	,	347	,	346
E	,	511	,	512	,	348	,	347
E	,	512	,	513	,	349	,	348
E	,	513	,	514	,	350	,	349
E	,	514	,	515	,	351	,	350
E	,	515	,	516	,	352	,	351
E	,	516	,	517	,	353	,	352
E	,	517	,	518	,	354	,	353
E	,	518	,	519	,	355	,	354
E	,	519	,	520	,	356	,	355
E	,	520	,	521	,	357	,	356
E	,	521	,	522	,	358	,	357
E	,	522	,	523	,	359	,	358
E	,	523	,	524	,	360	,	359
E	,	524	,	525	,	361	,	360
E	,	525	,	526	,	362	,	361
E	,	526	,	527	,	363	,	362
E	,	527	,	528	,	364	,	363
E	,	528	,	529	,	365	,	364
E	,	529	,	530	,	366	,	365
E	,	530	,	531	,	367	,	366
E	,	531	,	532	,	368	,	367
E	,	532	,	533	,	369	,	368
E	,	533	,	534	,	370	,	369
E	,	534	,	535	,	371	,	370
E	,	535	,	536	,	372	,	371
E	,	536	,	537	,	373	,	372
E	,	537	,	538	,	374	,	373
E	,	538	,	539	,	375	,	374
E	,	539	,	540	,	376	,	375
E	,	540	,	541	,	377	,	376
E	,	541	,	542	,	378	,	377
E	,	542	,	543	,	379	,	378
E	,	543	,	544	,	380	,	379
E	,	544	,	545	,	381	,	380
E	,	545	,	546	,	382	,	381
E	,	546	,	547	,	383	,	382
E	,	547	,	548	,	384	,	383
E	,	548	,	549	,	385	,	384
E	,	549	,	550	,	386	,	385
E	,	550	,	551	,	387	,	386
E	,	551	,	552	,	388	,	387
E	,	552	,	553	,	389	,	388
E	,	553	,	554	,	390	,	389
E	,	554	,	555	,	391	,	390
E	,	555	,	556	,	392	,	391
E	,	556	,	557	,	393	,	392
E	,	557	,	558	,	394	,	393
E	,	558	,	559	,	395	,	394
E	,	559	,	560	,	396	,	395
E	,	560	,	561	,	397	,	396
E	,	316	,	317	,	153	,	152
E	,	317	,	318	,	154	,	153
E	,	318	,	319	,	155	,	154

E	,	319	,	320	,	156	,	155
E	,	320	,	321	,	157	,	156
E	,	321	,	322	,	158	,	157
E	,	322	,	323	,	159	,	158
E	,	323	,	324	,	160	,	159
E	,	324	,	325	,	161	,	160
E	,	325	,	326	,	162	,	161
E	,	326	,	327	,	163	,	162
E	,	327	,	328	,	164	,	163
E	,	328	,	329	,	165	,	164
E	,	329	,	330	,	166	,	165
E	,	330	,	331	,	167	,	166
E	,	331	,	332	,	168	,	167
E	,	332	,	333	,	169	,	168
E	,	333	,	334	,	170	,	169
E	,	334	,	335	,	171	,	170
E	,	335	,	336	,	172	,	171
E	,	336	,	337	,	173	,	172
E	,	337	,	338	,	174	,	173
E	,	338	,	339	,	175	,	174
E	,	339	,	340	,	176	,	175
E	,	340	,	341	,	177	,	176
E	,	341	,	342	,	178	,	177
E	,	342	,	343	,	179	,	178
E	,	343	,	344	,	180	,	179
E	,	344	,	345	,	181	,	180
E	,	345	,	346	,	182	,	181
E	,	346	,	347	,	183	,	182
E	,	347	,	348	,	184	,	183
E	,	348	,	349	,	185	,	184
E	,	349	,	350	,	186	,	185
E	,	350	,	351	,	187	,	186
E	,	351	,	352	,	188	,	187
E	,	352	,	353	,	189	,	188
E	,	353	,	354	,	190	,	189
E	,	354	,	355	,	191	,	190
E	,	355	,	356	,	192	,	191
E	,	356	,	357	,	193	,	192
E	,	357	,	358	,	194	,	193
E	,	358	,	359	,	195	,	194
E	,	359	,	360	,	196	,	195
E	,	360	,	361	,	197	,	196
E	,	361	,	362	,	198	,	197
E	,	362	,	363	,	199	,	198
E	,	363	,	364	,	200	,	199
E	,	364	,	365	,	201	,	200
E	,	365	,	366	,	202	,	201
E	,	366	,	367	,	203	,	202
E	,	367	,	368	,	204	,	203
E	,	368	,	369	,	205	,	204
E	,	369	,	370	,	206	,	205
E	,	370	,	371	,	207	,	206
E	,	371	,	372	,	208	,	207
E	,	372	,	373	,	209	,	208
E	,	373	,	374	,	210	,	209
E	,	374	,	375	,	211	,	210
E	,	375	,	376	,	212	,	211
E	,	376	,	377	,	213	,	212
E	,	377	,	378	,	214	,	213
E	,	378	,	379	,	215	,	214
E	,	379	,	380	,	216	,	215
E	,	380	,	381	,	217	,	216
E	,	381	,	382	,	218	,	217
E	,	382	,	383	,	219	,	218
E	,	383	,	384	,	220	,	219
E	,	384	,	385	,	221	,	220
E	,	385	,	386	,	222	,	221
E	,	386	,	387	,	223	,	222
E	,	387	,	388	,	224	,	223
E	,	388	,	389	,	225	,	224
E	,	389	,	390	,	226	,	225
E	,	390	,	391	,	227	,	226
E	,	391	,	392	,	228	,	227
E	,	392	,	393	,	229	,	228
E	,	393	,	394	,	230	,	229

```

E      ,      394      ,      395      ,      231      ,      230
E      ,      395      ,      396      ,      232      ,      231
E      ,      396      ,      397      ,      233      ,      232
!

```

```

EPLLOT
GPLOT
FINISH
!
! Solução do Problema
!

```

```

/SOLU
ANTYPE,2
MODOPT,SUBSP,11,0,50,,
!SUBOPT,,,,300,,
D,1,UX,0
D,1,UY,0
D,1,UZ,0
D,2,UX,0
D,2,UY,0
D,2,UZ,0
D,49,UX,0
D,49,UY,0
D,49,UZ,0
D,50,UX,0
D,50,UY,0
D,50,UZ,0

```

```

SAVE
SOLVE
FINISH
! Expand the Modes

```

```

/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,11,0,50,YES

```

```

SOLVE
FINISH
! Rewiew the Results

```

```

/POST1
/COLOR,ELEM,RED,1
SET,LIST
SET,1,1
PLDISP
PRDISP

```

```

/Post1

```

```

! ***** * * * * * * * * * * * * * * * * *****
! *      Universidade de Brasília      *
! *      Faculdade de Tecnologia      *
! *      Departamento de Engenharia Civil *
! *      Mestrado em Estruturas      *
! *      Iviane Cunha e Santos      *
! ***** * * * * * * * * * * * * * * * * *****
!

```

```

!*****Declaração de Variáveis*****
!

```

```

! modi(nn,nfnum) - Deslocamentos dos Modos Numéricos
! modi(nn,nfnum) - modi**2
! mode(nn,nfexp) - Deslocamentos dos Modos Experimentais
! mode2(nn,nfexp) - mode**2
! fexp(nfexp) - Frequencias Experimentais
! fnun(nfnum) - Frequencias Numéricas
! red_(nfexp) - Soma dos Quadrados dos Deslocamentos Modos Exp. - SQD
! re_(nfnum) - Soma dos Quadrados dos Deslocamentos Modos Num. - SQD
! mage1_(nfexp) - Raiz da SQD - Exp.
! magt1_(nfnum) - Raiz da SQD - Num.
! nn - N° de nós onde se tem o deslocamentos Vertical - Exp.
! nfexp - N° de Frequencias Exp.
! nfnum - N° de Frequencias Neméricas
!

```

```

PASS = 'C:\MESTRADO\Passarela.txt'

```

```

*c fopen,%PASS%
!

```

```

nn=11
nfexp=2
nfnum=11

```

```

!
*dim,modi,,nn,nfnum
*dim,vmodi,,nfnum,nn
*dim,mode,,nn,nfexp
*dim,modi_le,,nn,nfnum
*dim,modi_ld,,nn,nfnum
*dim,modi2,,nn,nfnum
*dim,mode2,,nn,nfexp
*dim,red,,nn
*dim,re,,nn
*dim,magt1,,nn
*dim,mage1,,nn
*dim,macmat1,,nfnum,nfexp
*dim,macmat,,nfnum,nfexp
*dim,v,,nfnum,nfexp
*dim,fnun,,nfnum
*dim,fexp,,nfexp
allsel,all
!
!*****Leitura dos Modos e Frequencias Numericas*****
!
*do,i,1,nfnum
  set,1,i
  *get,fnun(i),active,,set,freq
  *get,modi_ld(1,i),node,5,u,z
  *get,modi_ld(2,i),node,9,u,z
  *get,modi_ld(3,i),node,13,u,z
  *get,modi_ld(4,i),node,17,u,z
  *get,modi_ld(5,i),node,21,u,z
  *get,modi_ld(6,i),node,25,u,z
  *get,modi_ld(7,i),node,29,u,z
  *get,modi_ld(8,i),node,33,u,z
  *get,modi_ld(9,i),node,37,u,z
  *get,modi_ld(10,i),node,41,u,z
  *get,modi_ld(11,i),node,45,u,z
*enddo
*do,i,1,nfnum
  *get,modi_le(1,i),node,6,u,z
  *get,modi_le(2,i),node,10,u,z
  *get,modi_le(3,i),node,14,u,z
  *get,modi_le(4,i),node,18,u,z
  *get,modi_le(5,i),node,22,u,z
  *get,modi_le(6,i),node,26,u,z
  *get,modi_le(7,i),node,30,u,z
  *get,modi_le(8,i),node,34,u,z
  *get,modi_le(9,i),node,38,u,z
  *get,modi_le(10,i),node,42,u,z
  *get,modi_le(11,i),node,46,u,z
*enddo
*do,i,1,nn
  *do,j,1,nfnum
    modi(i,j)=(modi_ld(i,j)+modi_le(i,j))*0.5
  *enddo
*enddo
!
!*****Leitura dos Modos e Frequencias Experimentais*****
!
fexp(1)      =    3.93  !Média Freq. Vertical 1  SSI-COV e SSI-DATA
fexp(2)      =   10.095 !Média Freq. Vertical 2  SSI-COV e SSI-DATA
mode(1,1)    =    0.00
mode(2,1)    =   0.003839496
mode(3,1)    =   0.00735933
mode(4,1)    =   0.012964463
mode(5,1)    =   0.01447401
mode(6,1)    =   0.015262597
mode(7,1)    =   0.014038469
mode(8,1)    =   0.010313067
mode(9,1)    =   0.008400075
mode(10,1)   =   0.008619192
mode(11,1)   =    0.00
mode(1,2)    =    0.00
mode(2,2)    =   0.004406466
mode(3,2)    =   0.009292356
mode(4,2)    =   0.006196275
mode(5,2)    =   0.001916479

```

```

mode(6,2) = -0.000492378
mode(7,2) = -0.004148694
mode(8,2) = -0.010237634
mode(9,2) = -0.006876832
mode(10,2) = -0.00180002
mode(11,2) = 0.00
!
!*****Calcula mage1 - Experimental*****
!
*do,i,1,nfexp
    red(i)=0
*enddo
*do,i,1,nn
    *do,j,1,nfexp
        mode2(i,j)=mode(i,j)*mode(i,j)
    *enddo
*enddo
*do,i,1,nfexp
    *do,j,1,nn
        red(i)=red(i)+mode2(j,i)
    *enddo
*enddo
*do,i,1,nfexp
    mage1(i)=red(i)**0.5
*enddo
!
!*****Calcula magt1 - Numerico*****
!
*do,i,1,nfnum
    re(i)=0
*enddo
*do,i,1,nn
    *do,j,1,nfnum
        modi2(i,j)=modi(i,j)*modi(i,j)
    *enddo
*enddo
*do,i,1,nfnum
    *do,j,1,nn
        re(i)=re(i)+modi2(j,i)
    *enddo
*enddo
*do,i,1,nfnum
    magt1(i)=re(i)**0.5
*enddo
!
!*****Transposta da Matriz Deslocamentos dos Modos - Numerico*****
!
*do,i,1,nn
    *do,j,1,nfnum
        vmodi(j,i)=modi(i,j)
    *enddo
*enddo
!
!*****calculo do valor de MAC*****
!
*moper,macmat1,vmodi,mult,mode
*do,n,1,nfnum
    *do,m,1,nfexp
        macmat(n,m)=(macmat1(n,m)/(magt1(n)*mage1(m))**2
        v(n,m)=macmat(n,m)
    *enddo
*enddo

*vwrite,'Freq.','Numericas'
(a)
*vwrite,fnun(1)
(4F10.4)
*vwrite,'Desloc.','Lado','Direito'
(a)
*vwrite,modi_ld(1,1),modi_ld(1,2),modi_ld(1,3),modi_ld(1,4),modi_ld(1,5),modi_
ld(1,6),modi_ld(1,7),modi_ld(1,8),modi_ld(1,9),modi_ld(1,10),modi_ld(1,11)
(11F10.5)
*vwrite,'Desloc.','Lado','Esquerdo'
(a)

```

```

*vwrite,modi_le(1,1),modi_le(1,2),modi_le(1,3),modi_le(1,4),modi_le(1,5),modi_
le(1,6),modi_le(1,7),modi_le(1,8),modi_le(1,9),modi_le(1,10),modi_le(1,11)
(11F10.5)
*vwrite,'Desloc.','Médio'
(a)
*vwrite,modi(1,1),modi(1,2),modi(1,3),modi(1,4),modi(1,5),modi(1,6),modi(1,7),
modi(1,8),modi(1,9),modi(1,10),modi(1,11)
(11F10.5)
*vwrite,'Desloc.','Experim.'
(a)
*vwrite,mode(1,1),mode(1,2)
(2F10.5)
*vwrite,'Freq.','Experim.'
(a)
*vwrite,fexp(1)
(1F10.5)
*vwrite,'mode2'
(a)
*vwrite,mode2(1,1),mode(1,2)
(2F10.5)
*vwrite,'Red'
(a)
*vwrite,red(1)
(1F10.5)
*vwrite,'Multipli'
(a)
*vwrite,mage1(1)
(1F10.5)
*vwrite,'modi2'
(a)
*vwrite,modi2(1,1),modi2(1,2),modi2(1,3),modi2(1,4),modi2(1,5),modi2(1,6),modi
2(1,7),modi2(1,8),modi2(1,9),modi2(1,10),modi2(1,11)
(11F10.5)
*vwrite,'Re'
(a)
*vwrite,re(1)
(1F10.5)
*vwrite,'Multipli'
(a)
*vwrite,magt1(1)
(1F10.5)
*vwrite,'Transpos','Matriz','Desloc','Numer.'
(a)
*vwrite,vmodi(1)
(1F10.5)
*vwrite,'Numerado'
(a)
*vwrite,macmat1(1,1),macmat1(1,2)
(2F10.5)
*vwrite,'MAC'
(a)
*vwrite,v(1,1),v(1,2)
(2F10.5)
!
!*****Encontra a Diferença entre as Frequencias Exp. e Num.*****
!
*dim,aa_,,nfexp,4
*dim,b_,,nfexp,4
*dim,fr_,,nfexp,4
*dim,c_,,nfexp,4
*dim,d_,,nfexp
*dim,z_,,nfexp
*dim,mac01t_,,nfnum,nfexp
*dim,mac02t_,,nfnum,nfexp
*dim,mac03t_,,nfnum,nfexp
*dim,mac04t_,,nfnum,nfexp
*dim,dif_,,nfexp,3
*dim,vff_,,nfexp,4
*dim,xx_,,2,nfexp
*dim,fr,,3,nfexp
*do,j,1,nfexp
    *do,i,1,4
        aa_(j,i) = 0
        b_(j,i) = 0
        fr_(j,i) = 0

```

```

        c_(j,i) = 0
    *enddo
        d_(j) = 0
        z_(j) = 3
*enddo
*do,n,1,nfnum
    *do,m,1,nfexp
        mac01t_(n,m) = macmat(n,m)
        *if,macmat(n,m),gt,aa_(m,1),then
            aa_(m,1) = 0
            aa_(m,1) = macmat(n,m)
            b_(m,1) = n
            fre_(m,1) = fnun(n)
        *endif
    *enddo
*enddo
*do,n,1,nfnum
    *do,m,1,nfexp
        mac01t_(b_(m,1),m) = 0
        mac02t_(n,m) = mac01t_(n,m)
        *if,mac01t_(n,m),gt,aa_(m,2),then
            aa_(m,2) = 0
            aa_(m,2) = mac01t_(n,m)
            b_(m,2) = n
            fre_(m,2) = fnun(n)
        *endif
    *enddo
*enddo
*do,n,1,nfnum
    *do,m,1,nfexp
        mac02t_(b_(m,2),m)=0
        mac03t_(n,m)=mac02t_(n,m)
        *if,mac02t_(n,m),gt,aa_(m,3),then
            aa_(m,3)=0
            aa_(m,3)=mac01t_(n,m)
            b_(m,3)=n
            fre_(m,3)=fnun(n)
        *endif
    *enddo
*enddo
*do,n,1,nfnum
    *do,m,1,nfexp
        mac03t_(b_(m,3),m)=0
        mac04t_(n,m)=mac03t_(n,m)
        *if,mac03t_(n,m),gt,aa_(m,4),then
            aa_(m,4)=0
            aa_(m,4)=mac01t_(n,m)
            b_(m,4)=n
            fre_(m,4)=fnun(n)
        *endif
    *enddo
*enddo
*vwrite,'AA'
(a)
*vwrite,aa_(1,1),aa_(1,2),aa_(1,3),aa_(1,4)
(4F10.5)
*vwrite,'B'
(a)
*vwrite,b_(1,1),b_(1,2),b_(1,3),b_(1,4)
(4F10.5)
*vwrite,'FRE_'
(a)
*vwrite,fre_(1,1),fre_(1,2),fre_(1,3),fre_(1,4)
(4F10.5)
*do,i,1,nfexp
    *do,j,1,3
        fre_(i,1)=fnun(b_(i,1)) ! i dont know if i need this row
        dif_(i,j)=(aa_(i,j)-aa_(i,j+1))
        *if,dif_(i,j),gt,0.04666,then
            fre_(i,j+1)=5
    *enddo
*enddo

```

```

                c_(i,j+1)=1
                *elseif,aa_(i,j+1),lt,0.7,then
                fre_(i,j+1)=5
                c_(i,j+1)=1
                *elseif,c_(i,j),eq,1,then
                fre_(i,j+1)=5
                c_(i,j+1)=1
                *else
                fre_(i,1+j)=fnun(b_(i,1+j))
            *endif
        *enddo
    *enddo

*vwrite,'DIF'
(a)
*vwrite,dif_(1,1),dif_(1,2),dif_(1,3)
(3F10.5)
*vwrite,'c'
(a)
*vwrite,c_(1,1),c_(1,2),c_(1,3),c_(1,4)
(4F10.5)
*vwrite,'FRE_'
(a)
*vwrite,fre_(1,1),fre_(1,2),fre_(1,3),fre_(1,4)
(4F10.5)

!Diferença Entre Freq. Experimental e Numérica

*do,i,1,nfexp
    *do,j,1,4
        vff_(i,j)=((fexp(i)-fre_(i,j))**2)**0.5
    *enddo
*enddo

*vwrite,'VFF' ! Verifica a Diferença entre as Freq
(a)
*vwrite,vff_(1,1),vff_(1,2),vff_(1,3),vff_(1,4)
(4F10.5)

*do,m,1,nfexp
    xx_(1,m)=0
    xx_(2,m)=0
*enddo

*do,m,1,nfexp
    *do,n,1,4
        *if,vff_(m,n),lt,z_(m),then
            z_(m)=vff_(m,n)
            xx_(1,m)=xx_(2,m)
            xx_(2,m)=n
        *endif
    *enddo
*enddo

*vwrite,'XXAlt'
(a)
*vwrite,xx_(1,1),xx_(1,2)
(2F10.5)
*vwrite,'z_'
(a)
*vwrite,z_(1)
(1F10.5)

*do,i,1,nfexp
    *if,xx_(2,i),eq,1,then
        fr(1,i)=b_(i,1)
        fr(3,i)=vff_(i,1)
        fr(2,i)=macmat(b_(i,1),i)
    *elseif,xx_(2,i),eq,2,then
        fr(1,i)=b_(i,2)
        fr(3,i)=vff_(i,2)
        fr(2,i)=macmat(b_(i,2),i)
    *elseif,xx_(2,i),eq,3,then
        fr(1,i)=b_(i,3)
        fr(3,i)=vff_(i,3)
    *endif
*enddo

```

```

fr(2,i)=macmat(b_(i,3),i)
*elseif,xx_(2,i),eq,4,then
d_(i)=(macmat(b_(i,xx_(1,i)),i)-macmat(b_(i,xx_(2,i)),i))
*if,d_(i),gt,0.0466,and,vff_(i,xx_(1,i)),lt,0.08,then
fr(1,i)=b_(i,1)
fr(3,i)=vff_(i,1)
fr(2,i)=macmat(b_(i,1),i)
*else
fr(1,i)=b_(i,4)
fr(3,i)=vff_(i,4)
fr(2,i)=macmat(b_(i,4),i)
*endif
*endif
*enddo
!Matriz de Resultado FR
!Primeira Linha Freq. correspondente
!Segundo Linha MAC
!Terceira Linha Diferença Entre Freq. Experimental e Numérica
*vwrite,'FR'
(a)
*vwrite,fr(1,1),fr(1,2)
(2F10.5)
!
!***** Cálculo do FER *****
!
*set,mac1v,fr(2,1)
*set,mac2v,fr(2,2)
*set,fer1v,fr(3,1)/fexp(1)
*set,fer2v,fr(3,2)/fexp(2)
*vwrite,'Mac 1V'
(a)
*vwrite,mac1v
(1F20.15)
*vwrite,'Mac 2V'
(a)
*vwrite,mac2v
(1F20.15)
*vwrite,'FER 1V'
(a)
*vwrite,fer1v
(1F20.15)
*vwrite,'FER 2V'
(a)
*vwrite,fer2v
(1F20.15)
!
!***** Função Objetivo *****
!
!Neste trabalho a função objetivo foi formulada em termos da discrepância
!entre os modos de vibração e as frequências do modelo numérico e
!experimental.
*dim,mg,,nfexp
*dim,f,,nfexp
*do,i,1,nfexp
f(i)=(fr(3,i)/fexp(i))**2 !função 6.6 Capitulo 6 dissertação
mg(i)=((1-fr(2,i)**0.5)**2)/fr(2,i) !função 6.7 relacionada ao modo g de
vibração
*enddo
*vwrite,'Função'
(a)
*vwrite,f(1)
(1F20.15)
*vwrite,'Mg'
(a)
*vwrite,mg(1)
(1F20.15)

*VSCFUN,OBJV,SUM,f
*VSCFUN,OBJ2V,SUM,mg

*vwrite,'OBJV'
(a)
*vwrite,OBJV
(1F20.15)

```

```

*vwrite,'OBJ2V'
(a)
*vwrite,OBJ2V
(1F20.15)

*del,,prm_

*set,OBJ,0.8*(OBJV)+0.2*(OBJ2V)

*vwrite,'OBJ'
(a)
*vwrite,OBJ
(1F20.15)

*cfclos,%PASS%

```

Os métodos de otimização são técnicas que se prestam a minimização de uma única função, a função objetivo, sujeita a restrições. Pode-se implementar um algoritmo de otimização externo através de programação em APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), ou utilizar os métodos disponíveis no programa: aproximação do subproblema e o método de primeira ordem, utilizados neste trabalho.

A seguir tem-se a subrotina para a otimização dos parâmetros denominada 3-OPT.txt

```

/OPT
OPANL,'PASS','txt','C:\MESTRADO\'

OPVAR,expp,DV,0.277023320E+11,.3e11,10 ! Elasticidade Placa de Piso
OPVAR,denpp,DV,2.3e3,2.8e3,.1e-11 ! Massa Específica Placa de Piso

OPVAR,exaco,DV,1.e11,3.e11,1 ! Elasticidade AÇO
OPVAR,denaco,DV,7000,9000,0.00001 ! Densidade AÇO

OPVAR,expc,DV,4.0e9,6.0e9,0.1 ! Elasticidade Placa de Cobertura
OPVAR,denpc,DV,2000,3000,0.1 ! Densidade Placa de Cobertura

OPVAR,mac1v,SV,0.9,1.,0.01
OPVAR,mac2v,SV,0.8,1.,0.01

OPVAR,fer1v,SV,0.001,0.10,0.001
OPVAR,fer2v,SV,0.001,0.10,0.001

OPVAR,OBJ,OBJ,,0.1e-5

!OPTYPE,RAND
!OPRAND,10,10

OPTYPE,SWEEP
OPSWEEP,best,10

!OPTYPE,SUBP
!OPSUBP,
!optype,grad

!OPTYPE,FIRST
!OPFRST,20,20,0.2,

OPEXE

OPLIST,ALL,,1
/AXLAB,Y,OBJETIVO (OBJ)
PLVAROPT,OBJ

FINISH

```

A sub-rotina 2-PASS.txt foi construída com base na 1-PASS_MAC_FER.txt e tem como objetivo complementar a sub-rotina de otimização 3-OPT.txt, porém a variável a ser otimizada é definida como uma função, mostrada em destaque no fragmento abaixo:

```
/PREP7
/TITLE,Análise da Passarela sobre E.P.I.A.
!
! Criação do Modelo
!
*set,expp,2.9e10      !Elasticidade Placa de piso
*set,denpp,2548.41998 !Densidade Placa de piso
*set,exaco,1.72e11   !Elasticidade AÇO
*set,denaco,denaco !Densidade AÇO
*set,expc,5.0e9      !Elasticidade Placa de Cobertura
*set,denpc,2242.6096 !Densidade Placa de Cobertura
!
(...)
```