

CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DINÂMICOS DE ESTRUTURAS METÁLICAS DO TIPO “STEEL JOIST”

Silmara Cassola

João Antonio Pereira

UNESP- Ilha Solteira- Departamento de Engenharia Mecânica
15.385.000-Ilha Solteira, SP, Brasil

Resumo. Atualmente, o uso de estruturas metálicas do tipo “steel joist” vem ocupando cada vez mais espaço nas construções de pisos e lajes de concreto. Este tipo de estrutura torna as construções mais leves e esbeltas, e portanto mais susceptíveis aos efeitos de vibrações, causadas inclusive pelas próprias condições de uso: movimento de pessoas e máquinas. Neste caso, o isolamento dos efeitos de vibrações é bastante complexo e o controle dos níveis de vibrações excessivos deve ser feito pelas próprias características da estrutura. Isto requer o perfeito conhecimento do comportamento e das propriedades dinâmicas do conjunto piso-estrutura metálica. Este trabalho descreve como técnicas de ajuste de modelo podem ser utilizadas para a definição de modelos de predição do comportamento dinâmico de estruturas do tipo steel joist. O trabalho mostra ainda como o modelo ajustado pode ser utilizado para prever mudanças nas características da estrutura de forma a minimizar os efeitos de vibração. A viabilidade da proposta é demonstrada utilizando dados simulados obtidos a partir de uma estrutura com características similares às estruturas reais.

Palavras-chave: Steel joist, Elementos finitos, Análise modal, Análise de sensibilidade, Ajuste de modelo

1.INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas metálicas do tipo *steel joist* vem ocupando um espaço cada vez maior nos projetos e construções de estruturas civis, sendo utilizadas inclusive na sustentação de pisos construídos por painéis e lajes de concreto. A sua utilização neste tipo de construção deve atentar para o fato de que atualmente existe uma tendência de construção de painéis e lajes cada vez mais leves e esbeltos, visando a redução de custos e materiais. Estes requisitos têm sido obtidos com razoável sucesso através do uso de técnicas de pós-tensionamento, concretos de alta resistência e técnicas de análise estrutural mais elaboradas, o que tem permitido a construção de lajes bastante esbeltas e ainda assim atendendo às condições de resistência.

No entanto, o uso de pisos mais esbeltos leva a uma preocupação imediata com os efeitos de vibrações, visto que estes tipos de estruturas apresentam pouco amortecimento e frequências características na mesma faixa de frequência de excitações “típicas” identificadas em situações corriqueiras de uso, tais como movimento das pessoas durante suas atividades,

deslocamento de mobília, etc. Estas excitações podem levar a problemas de vibrações excessivas e o seu controle ou isolamento é bastante complexo, uma vez que a fonte de excitação e os sensores são os mesmos, ou seja, as pessoas.

Neste caso, os níveis de vibrações devem ser controlados pelas próprias características da estrutura através de alterações em suas propriedades físicas (tipo de material) e/ou geométricas (tipos de perfis, variação das seções transversais, etc.). Consequentemente, o estudo do comportamento dinâmico torna-se obrigatório para essas estruturas visto que, o conhecimento dos seus parâmetros modais (frequência natural, modo próprio e fator de amortecimento) é fundamental para o projeto e desenvolvimento de uma estrutura mais adequada às suas condições de uso. Os níveis de vibrações do conjunto piso-estrutura metálica, sentidos pelos usuários, não devem exceder os valores especificados em norma. As normas classificam estes níveis em: imperceptível, levemente perceptível, claramente perceptível, desagradável e intolerável (CEB N.209, 1991).

A utilização de técnicas mais atuais de projetos, como o método dos elementos finitos, tem permitido analisar o comportamento dinâmico deste tipo de estrutura levando em consideração os efeitos de vibrações. No entanto, a modelagem dinâmica de estruturas de engenharia civil por elementos finitos ainda requer cuidados especiais e várias hipóteses e simplificações, usualmente adotadas neste tipo de análise, podem levar a resultados muito discrepantes em relação às situações reais. Isto é, o modelo analítico pode não representar adequadamente a estrutura real. Portanto, existe a necessidade de se desenvolver um modelo de elementos finitos detalhado da estrutura a fim de se obter uma solução mais realística quando se deseja definir um modelo de predição confiável.

Modelos mais representativos podem ser obtidos através do uso, de forma complementar, da modelagem de elementos finitos (MEF), testes de análise modal experimental (AME), juntamente com técnicas de correlação e ajuste de modelo de elementos finitos (Friswell e Mottershead, 1995, Pereira, 1996). Atualmente, vários estudos vêm sendo realizados, principalmente nos países desenvolvidos, a respeito da aplicação destas técnicas na modelagem e análise do problema de vibração em estruturas de engenharia civil (Reynolds et al., 1998; Cantieni et al., 1998). No Brasil, este assunto está ainda iniciando mas já existe um grande interesse das empresas neste tipo de análise. Trabalhos como Fusco (1996) e Bonilha (1997), estão voltados diretamente para o problema de vibrações em estruturas causadas por pessoas.

Este artigo descreve como a modelagem por elementos finitos e análise modal podem ser utilizadas para a definição de um modelo de predição representativo do modelo real. Técnicas de correlação e comparação de modelos são utilizadas para melhorar o entendimento e consequentemente, o ajuste ou a correção da discrepância entre a modelagem de elementos finitos e os dados experimentais de análise modal. A necessidade do uso de modelos representativos para o estudo e predição dos efeitos de vibração em estruturas de sustentação de lajes e pisos em edificações é demonstrada utilizando dados simulados de uma estrutura do tipo *steel joist*. Um estudo de sensibilidade dos parâmetros do modelo também é apresentado, visando fornecer subsídios que permitam deslocar as frequências naturais da estrutura da faixa de frequências de excitações típicas causadas pelas atividades de uso.

2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E AJUSTE DE MODELO

Nas últimas décadas, técnicas de ajuste de modelo baseadas em dados experimentais têm sido objeto de amplo estudo. Referências relevantes sobre o assunto podem ser encontradas em vários artigos, por exemplo Mottershead e Friswel (1993), Natke (1997) e Maia e Silva (1997).

O processo de ajuste de modelos busca corrigir as imperfeições do modelo analítico, obtido geralmente por elementos finitos, minimizando a diferença dos dados calculados com relação aos dados medidos no modelo real. O principal objetivo é definir um modelo analítico e confiável representativo do modelo experimental. A flexibilidade do modelo analítico permitirá prever o comportamento do sistema em diferentes condições bem como prever eventuais mudanças no modelo original.

As técnicas de ajuste de modelo, no sentido mais amplo, têm sido usadas para a obtenção de um modelo analítico o mais próximo possível do modelo experimental. Neste caso, o modelo experimental é comparado com o modelo analítico através de técnicas de correlação de parâmetros, e quando a concordância não é satisfatória o modelo analítico inicial é corrigido com base nos dados experimentais (Berman e Flannelly, 1971; Heylen, 1987; Larsson e Sas, 1992; Lin e Ewins, 1994; Pereira, 1996; Natke, 1997). Dependendo da estratégia matemática utilizada na formulação do problema e do tipo de parâmetros utilizados no ajuste, os métodos são classificados em diferentes categorias. Neste trabalho o problema de ajuste será formulado com base nas Funções de Resposta em Freqüência- FRF(s) (Larsson e Sas, 1992; Pereira, 1996), e as variáveis de ajuste são parâmetros físicos e/ou geométricos do modelo.

Neste caso, a discrepância entre os modelos é avaliada a partir de um balanço de força e a diferença entre os dados analíticos e experimentais é descrita em termos de uma função resíduo. O resíduo obtido neste caso é definido em termos dos parâmetros do modelo analítico (matriz de rigidez dinâmica $[Z^A(\{p\})]$) e dos dados experimentais (FRF(s)), Expressão (1). Para uma perfeita correlação entre os modelos os valores de $\{\Delta p\}$ são nulos, no entanto, em situações práticas isto não ocorre visto que os dados experimentais não estão perfeitamente correlacionados com os dados analíticos. A solução do problema é estimada neste caso através da correção dos p-parâmetros do modelo de forma que minimize a discrepância entre eles.

$$\{\varepsilon\} = E\left([Z^A(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_m + \Delta p_m)] \{H^x(\omega_i)\}\right) \equiv \{0\} \quad (1)$$

Um conjunto de equações de ajuste é definido a partir da seleção de n-pontos de freqüência (ω_i) e a solução do problema consiste em encontrar m mudanças nos parâmetros analíticos que minimizam a diferença entre os modelos. Os p-parâmetros podem representar qualquer propriedade física ou geométrica do modelo, eles podem ser um parâmetro de um elemento, no caso dos elementos ajustados independentemente, ou um parâmetro de um grupo de elementos, quando alguns elementos são ajustados proporcionalmente.

Em geral, os critérios adotados para comparar os modelos levam a um conjunto de equações não lineares em relação aos parâmetros de ajuste selecionados $\{p\}$. Dependendo do tipo de parâmetros selecionados, a solução das equações torna-se muito complexa ou pode não existir. A linearização destas equações, para a maioria dos sistemas físicos, é uma suposição válida nas faixas de freqüências de interesse para análises de vibração. Uma solução aproximada do problema é obtida através da linearização da Expressão (1) nos p-parâmetros, conduzindo a um sistema de equações lineares.

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\Delta p\} - \{B\} \quad (2)$$

onde os elementos da matriz sensibilidade $[S]$ e do vetor diferença $\{B\}$ são conhecidos. Eles são obtidos a partir da matriz de rigidez dinâmica do modelo analítico e das funções de resposta em freqüência medidas na estrutura para n-pontos de freqüência selecionados, ou

seja, os $\omega_{r,s}$. Os elementos do vetor $\{\Delta p\}$ são incógnitas a serem estimadas. A solução do sistema de equações linearizadas fornece um modelo analítico corrigido. Se a discrepância entre os modelos não for ainda suficientemente pequena, o processo é iterativamente repetido.

As técnicas de análise de sensibilidade são utilizadas como subsídios nos processos de ajuste de modelos, elas permitem estimar quais componentes e parâmetros da estrutura são mais ou menos sensíveis às variações. No processo de ajuste, bem como no estudo de predição dos efeitos dinâmicos da estrutura (por exemplo produzir um deslocamento das frequências naturais do modelo para evitar uma faixa frequência indesejada), esta é uma informação importante, porque permite uma seleção adequada de quais parâmetros devem ser mudados.

A sensibilidade das frequências características do modelo em relação a um parâmetro $\{p\}$ é calculada como a variação desta quantidade em relação a uma pequena variação deste parâmetro. A sensibilidade de primeira ordem da r -ésima autofrequência λ_r em relação a um parâmetro $\{p\}$ é dada pela bem conhecida expressão:

$$\frac{\partial \lambda_r}{\partial p} = \{\psi\}_r^T \frac{\partial [K]}{\partial p} \{\psi\}_r - \lambda_r \{\psi\}_r^T \frac{\partial [M]}{\partial p} \{\psi\}_r \quad (3)$$

onde: $\{\psi\}_r^T$ - autovetores
 $[M]$ - matriz de massa
 $[K]$ - matriz de rigidez

A avaliação da sensibilidade dos parâmetros é feita através de uma rotina implementada juntamente com o programa de ajuste de modelo. Os próximos tópicos discutem a aplicação da proposta para um exemplo simulado.

3. APLICAÇÃO DA PROPOSTA PARA A ESTRUTURA

A estrutura estudada foi uma viga metálica do tipo *steel joist*, com 15 m de comprimento e 0.50 m de altura. Banzos paralelos e extremidades em diagonais (SJI-Technical Digest), Fig. 1. Os banzos são compostos por perfis laminados em cantoneira dupla de abas desiguais, e as diagonais, em ferro redondo soldado nos banzos.

O modelo analítico da estrutura foi elaborado utilizando o método dos elementos finitos, a estrutura foi discretizada em vários elementos bi-nodais considerando como nós a ligação dos banzos com as diagonais. Foi usado elemento tipo viga (beam) tridimensional com 6 graus de liberdade por nó, de forma que os elementos podem sofrer efeitos de compressão/tração, flexão e torção. As restrições foram colocadas nas duas extremidades superiores da estrutura, ficando livres, em ambas, as rotações em z , e o deslocamento em x , em apenas uma extremidade.

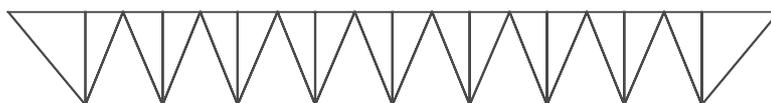


Figura 1 - Estrutura *Steel Joist* Estudada

Os parâmetros modais da estrutura foram obtidos através de um programa de elementos finitos parte do software de ajuste de modelo, **Program of Model Upadting - PROMU** (Pereira, 1996) desenvolvido e implementado pelos autores. A Tabela 1 mostra as primeiras frequências naturais do modelo. Como pode ser observado, a estrutura apresenta baixas frequências que coincidem com a faixa das frequências de excitação típicas verificadas durante as condições de uso de estruturas para sustentação de pisos de lajes. Uma pessoa caminhando pode excitar frequências na faixa de 1,7 a 2,3 Hz (CEB N.209, 1991). O modelo analítico original da estrutura foi utilizado para simular os dados “experimentais” a serem utilizados no processo de ajuste, FRF(s), frequências naturais e modos próprios. Uma vez definido os dados experimentais, um novo modelo foi criado introduzindo-se mudanças conhecidas nos parâmetros geométricos (momento de inércia na direção y) do modelo original. Este novo modelo representa o modelo analítico cujos parâmetros modais são discrepantes em relação ao modelo experimental. A Tabela 1 mostra a comparação do modelo analítico com os dados “experimentais”, a coluna 5 apresenta as diferenças de frequências e a coluna 6, a comparação dos modos (Mac-valores). Mac-valores próximo de 1 significa que os modos estão bem correlacionados, enquanto que Mac-valores próximos de zero significa total ausência de correlação entre os modos comparados.

Tabela 1. Comparação das FRF(s) dos modelos experimental e analítico

Experimental	Analítico	Fx(Hz)	Fa(Hz)	df(%)	Mac(%)
1	1	1,2	1,5	17,77	99,7
2	2	3,4	3,9	14,09	99,5
3	3	6,6	7,4	11,19	99,1
4	4	7,6	7,9	3,34	99,5
5	5	8,2	8,2	0,01	91,5
6	6	9,9	10,2	3,07	99,1
7	7	10,9	11,9	8,66	98,6
8	8	11,8	12,3	4,34	98,9
9	9	14,9	15,7	5,33	98,6
10	10	16,3	17,5	7,40	98,4
11	11	19,3	20,4	5,64	98,3

No exemplo em discussão, um dos objetivos seria investigar formas de alterar as primeiras frequências do modelo visando sair da faixa de frequências de excitação típicas encontradas neste tipo de estrutura. Para tal, fez-se uma análise de sensibilidade da estrutura em relação aos seus parâmetros geométricos, variação da inércia na direção y e na direção z. A Figura 2 mostra a variação de sensibilidade da estrutura em relação aos parâmetros I_y para o primeiro modo, e a Fig. 3 mostra um mapa (contornos) da sensibilidade para os dois primeiros modos.

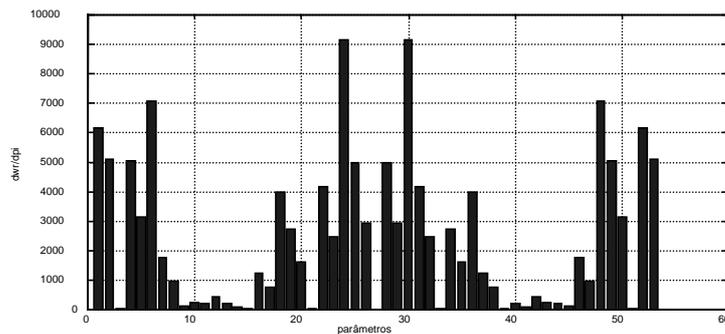


Figura 2 - Sensibilidade da estrutura : primeira freqüência - modelo analítico

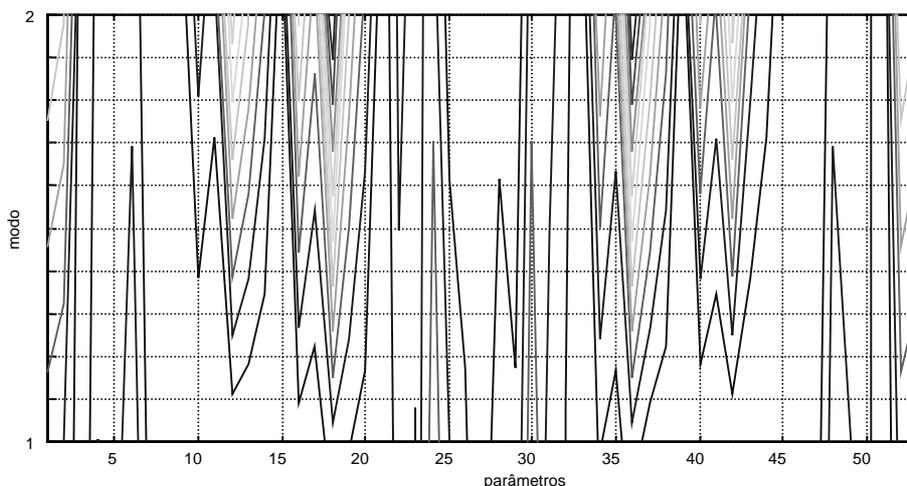


Figura 3 - Sensibilidade da estrutura : duas primeiras freqüências - modelo analítico

Analisando a Figura 2 e a Figura 3, pode-se notar que os parâmetros mais sensíveis são os parâmetros relacionados com os elementos centrais do modelo. No caso de se desejar aumentar as primeiras freqüências do modelo, isto sugere que esta região da estrutura seria a mais adequada para ser alterada. Uma alteração nesta região provavelmente produzirá grandes variações nas primeiras freqüências do modelo levando ao resultado desejado. No entanto, em situações reais essa avaliação pode ser disfarçada visto que o modelo analítico nem sempre é uma boa representação dos dados experimentais e pode levar a informações errôneas, como será discutido a seguir.

Para o exemplo em questão (dados simulados) existe a disponibilidade das matrizes de massa e rigidez do modelo experimental, o que permite checar as informações obtidas na Fig. 2 e na Fig. 3. Utilizando agora as matrizes do modelo original calculou-se as sensibilidades dos parâmetros do modelo em relação às freqüências. A Figura 4 e a Figura 5 mostram a variação da sensibilidade para os mesmos parâmetros utilizados anteriormente.

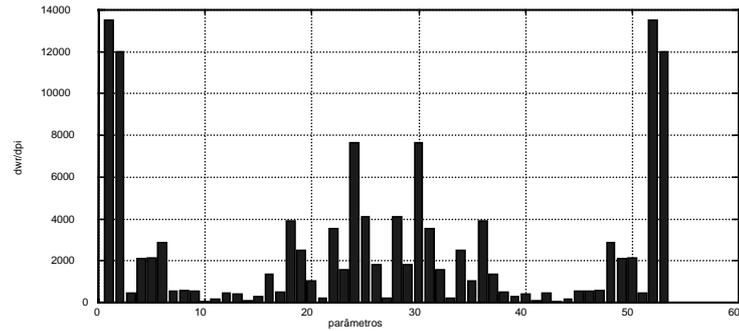


Figura 4 - Sensibilidade da estrutura : primeira frequência - modelo original

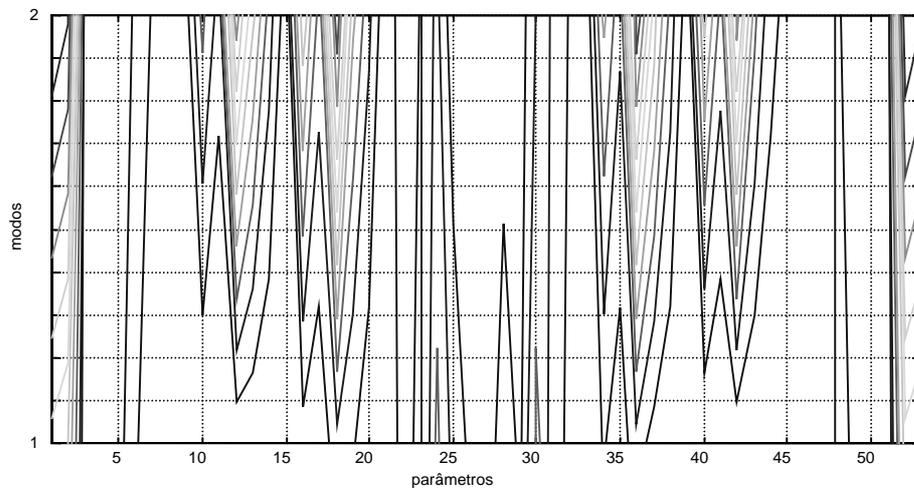


Figura 5 - Sensibilidade da estrutura : duas primeiras frequências - modelo original

Como pode ser observado através da Fig. 4 e da Fig. 5, os parâmetros mais sensíveis são os parâmetros relacionados com o elementos extremos do modelo, diferentemente do caso anterior. Mostrando assim a necessidade de utilizar um modelo detalhado de elementos finitos que represente satisfatoriamente a estrutura real.

A Tabela 1 mostra claramente que existe uma discrepância entre os dois modelos, a qual dever ser minimizada através do processo de ajuste do modelo analítico em relação aos dados experimentais. Observando o mapa de sensibilidade dos parâmetros da estrutura é possível identificar as regiões mais sensíveis do modelo, as quais foram utilizadas para a seleção dos parâmetros de ajuste. Foram selecionados os elementos da regiões extremas e central da estrutura de acordo com a Fig. 2 e a Fig. 3. Os resultados estão mostrados na Tabela 2, comparação de frequências e modos próprios.

A Figura 6 mostra a superposição das FRF(s) medidas no ponto de excitação (drive point) para o modelo analítico, experimental e ajustado. A Figura 7 mostra o novo mapa de análise de sensibilidade agora para a modelo ajustado. Como pode ser observado, o mesmo apresenta uma variação idêntica à da estrutura original, ou seja, da “estrutura real”.

Tabela 2. Comparação das FRF(s) dos modelos experimental e analítico ajustado

Experimental	Analítico	Fx(Hz)	Fa(Hz)	Df(%)	Mac(%)
1	1	1,2	1,2	0,02	100,0
2	2	3,4	3,4	0,01	100,0
3	3	6,6	6,6	0,01	100,0
4	4	7,6	7,6	0,00	100,0
5	5	8,2	8,2	-0,00	100,0
6	6	9,9	9,9	0,00	100,0
7	7	10,9	10,9	0,01	100,0
8	8	11,8	11,8	0,00	100,0
9	9	14,9	14,9	0,01	100,0
10	10	16,3	16,3	0,01	100,0
11	11	19,3	19,3	0,01	100,0

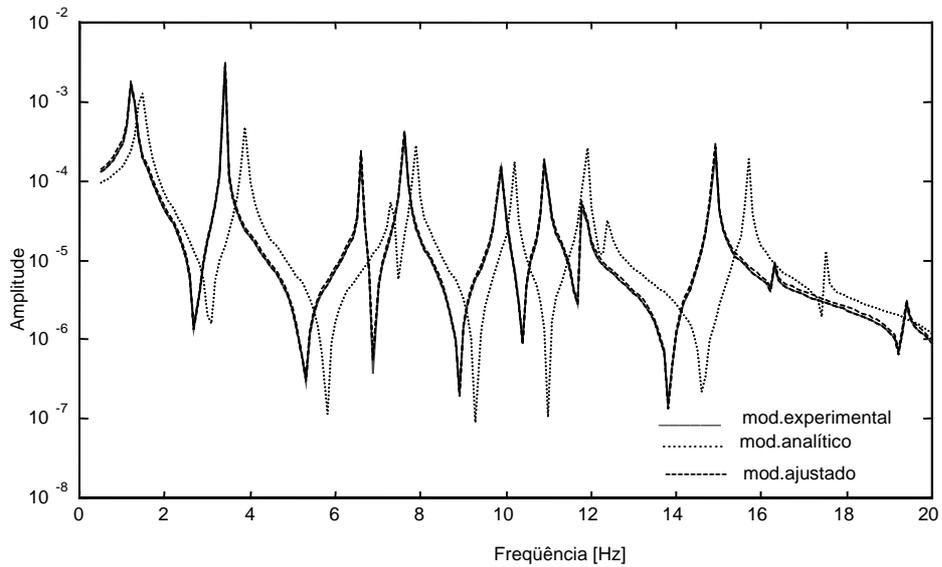


Figura 6 – Superposição das FRF(s) medidas no ponto de excitação para os modelos analítico, experimental e ajustado

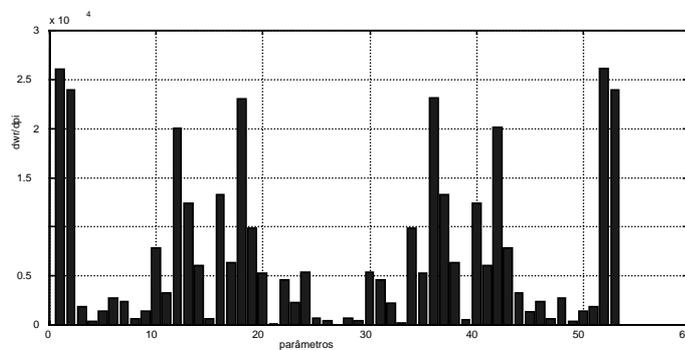


Figura 7 - Sensibilidade da estrutura : modelo ajustado – primeira frequência

Os resultados acima mostram a importância de se definir um modelo analítico representativo quando se deseja estudar as características dinâmicas de um sistema, principalmente quando o objetivo é prever seu comportamento dinâmico. Técnicas de ajuste podem ser utilizadas para a definição de modelos de predição bastante próximos dos dados experimentais. A análise de sensibilidade permitiu mostrar quais regiões ou componentes do modelo que levariam a mudanças mais acentuadas das suas propriedades dinâmicas sem provocar grandes alterações na estrutura. Estas informações são fundamentais quando se deseja controlar os níveis de vibrações da estrutura, deslocando as frequências características do modelo das faixas indesejadas imposta por projetos.

4- CONCLUSÃO

Neste trabalho foi discutido como se obter um modelo de elementos finitos representativo baseado em dados experimentais de análise modal. Técnicas de análise de sensibilidade e ajuste de modelos utilizadas na formulação do problema foram apresentadas.

A importância do desenvolvimento de um modelo representativo para a análise e predição das propriedades dinâmicas dos sistemas foi demonstrada com dados simulados para uma estrutura metálica do tipo *steel joist*. Os resultados mostram que a utilização de modelos de predição sem uma correlação suficiente pode levar a interpretações errôneas. O próximo passo será avaliar a proposta discutida com dados experimentais

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Berman, A., and Flannelly, W., 1971, Theory of incomplete models of dynamic structures, AIAA journal, v-9, pp 1482-1487.
- Bonilha, L.A.S., 1997, Investigação dos comportamentos de estruturas civis submetidas a vibrações induzidas por pessoas, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Cantieni, R., Pietrzko, S. and Deger Y., 1998, Modal investigation of an office building floor, proceedings of the XVI-IMAC.
- Comite Euro-International du beton – Bulletin d'Information n° 209, 1991–Vibration problems in structures- CEB n° 209/1991- Viena.
- Friswell, M. J. and Mottershead, J. E.; 1995, Finite element model updating in structural dynamics, Kluwer Academic Publishers.
- Fusco, P. B., 1996, A Investigação experimental de estrutura, BT/PEF/9616, EDUSP.
- Heylen, W., 1987, Optimization of model matrices of mechanical structures using experimental modal data, Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Larsson, P. O. and Sas, P., 1992, Model updating based on forced vibration testing using numerically stable formulations, proceedings of the X-IMAC.
- Lin, R. M. and Ewins, D. J., 1994, Analytical model improvement using frequency response functions, Mechanical System and Signal Processing, 8(4), pp 437-458.
- Maia, N. M. M. e Silva, J. M. M., 1997, Theoretical and experimental modal analysis, Research Studies Press Ltda. John Wiley & Sons Inc.

- Mottershead, J. E. and Friswell, M. I., 1993, Model updating in structural dynamics: a survey, *Journal of Sound and Vibration*, 167(2), pp 347-375.
- Natke, H. G. et al, 1997, Some recent advances in model updating, proceedings of DETC'97, ASME Design Engineering Technical Conferences, 16th Biennial Conf. on Mechanics Vib. and Noise: Sacramento-USA. sept/97, paper DETC97/VIB-4142.
- Reynolds P. et al., 1998, Modal testing, FE analysis and FE model correlation of a 600 tonne post-tensioned concrete floor. XXIII-International Seminar on Modal Analysis.
- Reynolds, P., Pavic, A. and Waldron, P., 1998, Modal testing of a 150-tonne concrete slab incorporating a false floor system, proceedings of the XVI-IMAC.
- S.J.I. – Technical Digest , published by Steel Joist Institute
- Pereira, J. A.,1996, Structural damage detection methodology using a model updating procedure based on frequency response functions - FRF(s), Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.

Characterization of Dynamic Parameters of Steel Joist Structures

Abstract. The interest in the use of steel joist structures in long space-span concrete floors is, in general, increasing. The use of this kind of structures allied to prestressing techniques and high strength concrete permits more slender concrete floor construction. However, whilst such floor may still attending the strength condition, they are more liable to the vibration problems, including those caused by people walking, moving, etc. In this case, the isolation of the vibration effects is very complex and the control must be done by the own characteristic of the structure. So, it requires an accurate modelling of the dynamic behaviour of the model. This work describes the use of finite element model updating in order to define an accurate model of a steel joist structure. It also shows as the updated model can be useful for prediction studies, like to investigate the changes of the structures that may reduce the vibration levels by shifting their natural frequencies away from an undesirable range of excitation frequencies. The viability of the proposed has been demonstrated by using simulated data from a structure with characteristic similar to a real structure.

Key-words: Steel joist, Finite Element, Modal Analysis, Sensitivity, Model updating.