



TESTES MODAIS PARA ANÁLISE DE CONEXÕES DE ESTRUTURAS RETICULADAS TEMPORÁRIAS

Rozemberg de Carvalho Finizola

Bolsista PIBIC / CNPq.

Centro de Tecnologia - UFPB.

Campus Universitário, s/n - CEP: 58059-900, João Pessoa, PB.

e-mail: rcfini@hotmail.com.br

Roberto Leal Pimentel

Prof. Adjunto do Departamento de Tecnologia da Construção Civil – Centro de Tecnologia – UFPB

e-mail: pimentel@netwaybbs.com.br

Seyyed Said Dana

Prof. Adjunto do Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – UFPB

e-mail: dana@dtm.ct.ufpb.br

Resumo. *Estruturas reticuladas temporárias, tais como arquibancadas e palcos utilizados em eventos públicos, freqüentemente empregam barras metálicas em sua montagem, possuindo conexões rígidas e também de encaixe com elementos de fixação. Estão sujeitas a ações dinâmicas devido ao movimento dos usuários sobre as mesmas.*

Inspeções realizadas permitiram a modelagem de duas destas estruturas em programa de elementos finitos. Há potenciais problemas de vibrações excessivas causadas pela proximidade entre as freqüências naturais da estrutura e as freqüências da excitação, verificando-se também que as conexões têm influência nas freqüências naturais.

Neste trabalho objetiva-se analisar, em mais detalhes, o comportamento real das conexões, enfocando as conexões de encaixe com parafuso de fixação. Para tal, testes modais foram realizados em protótipo de estrutura reticulada cujos elementos possuem este tipo de conexão. Os resultados experimentais foram utilizados para validar modelo de elementos finitos do protótipo e assim determinar os valores de constante de mola que melhor representam as conexões.

Os resultados dos testes e simulações numéricas permitiram concluir que a introdução de molas nas conexões entre as barras torna o modelo mais realístico do que com ligação rígida e que o projeto destas conexões desempenha um papel significativo no comportamento dinâmico das estruturas em estudo.

Palavras-chave: *Estruturas temporárias, conexões, testes modais.*

1. INTRODUÇÃO

Os problemas dinâmicos têm em comum a possibilidade de ocorrência de ressonância, devido à coincidência ou proximidade entre as freqüências de excitação e as freqüências naturais do sistema. Isto implica na presença de vibrações excessivas, que podem causar incômodo direto ou indireto aos usuários, assim como risco da segurança do sistema ou comprometimento de sua durabilidade.

De fato, situações de projeto ocorrem dentro da Engenharia nos quais os efeitos dinâmicos devem ser levados em conta. Dentre eles, um caso que requer cuidados com relação a estes efeitos é a utilização de estruturas reticuladas temporárias para grandes eventos. Exemplos típicos são as

arquibancadas e palcos utilizados em eventos públicos e festividades ao ar livre. Estas estruturas, compostas por barras metálicas, são modulares possuindo conexões rígidas (soldadas) e também de encaixe com elementos de fixação, sendo a montagem realizada no local do evento. Pode-se imaginar um grupo de pessoas dançando em ritmo sobre uma de tais estruturas para se ter idéia do elevado nível de cargas aplicadas. Isso nos chama a atenção ao fato de que pode haver comprometimento estrutural caso os efeitos dinâmicos não sejam levados em conta. Problemas de vibração excessiva têm sido reportados em estruturas semelhantes, tais como as arquibancadas de estádios (Batista e Magluta, 1993; Kasperski, 1996; Littler, 1999), inclusive requerendo intervenção para reduzir a intensidade de tais vibrações (Juliani e Becocci, 1998).

Por outro lado, problemas de colapso têm sido reportados em arquibancadas temporárias. Littler (1996) relata dois colapsos de arquibancadas temporárias durante eventos, o que chama a atenção a eventuais problemas de vibração excessiva nestas estruturas.

Ji e Ellis (1999) chamam a atenção ao fato que as arquibancadas temporárias tendem a ter frequências naturais mais altas na direção vertical do que as arquibancadas permanentes (por exemplo, as de estádios). Entretanto, estas estruturas temporárias apresentam comportamento mais crítico na direção lateral. Nesta direção, as frequências naturais da estrutura tendem a ser mais baixas e, portanto a estrutura tende a apresentar vibrações de maior amplitude já que se torna mais facilmente excitável por movimentos rítmicos do público.

Ji e Ellis (1997) apresentam varias sugestões para enrijecimento de arquibancadas temporárias, aprimorando o sistema de contraventamento e a disposição geral das barras. Littler (1996) sugere uma frequência natural mínima de 4Hz na direção lateral para evitar problemas de vibração excessiva. Entretanto, escassas informações podem ser encontradas na literatura sobre o funcionamento das conexões e sua influência no comportamento dinâmico da estrutura.

Neste trabalho apresenta-se uma investigação da influência das conexões objetivando-se analisar seu comportamento e desempenho, enfocando a conexão de encaixe com parafuso de fixação, representada na Fig. (1).

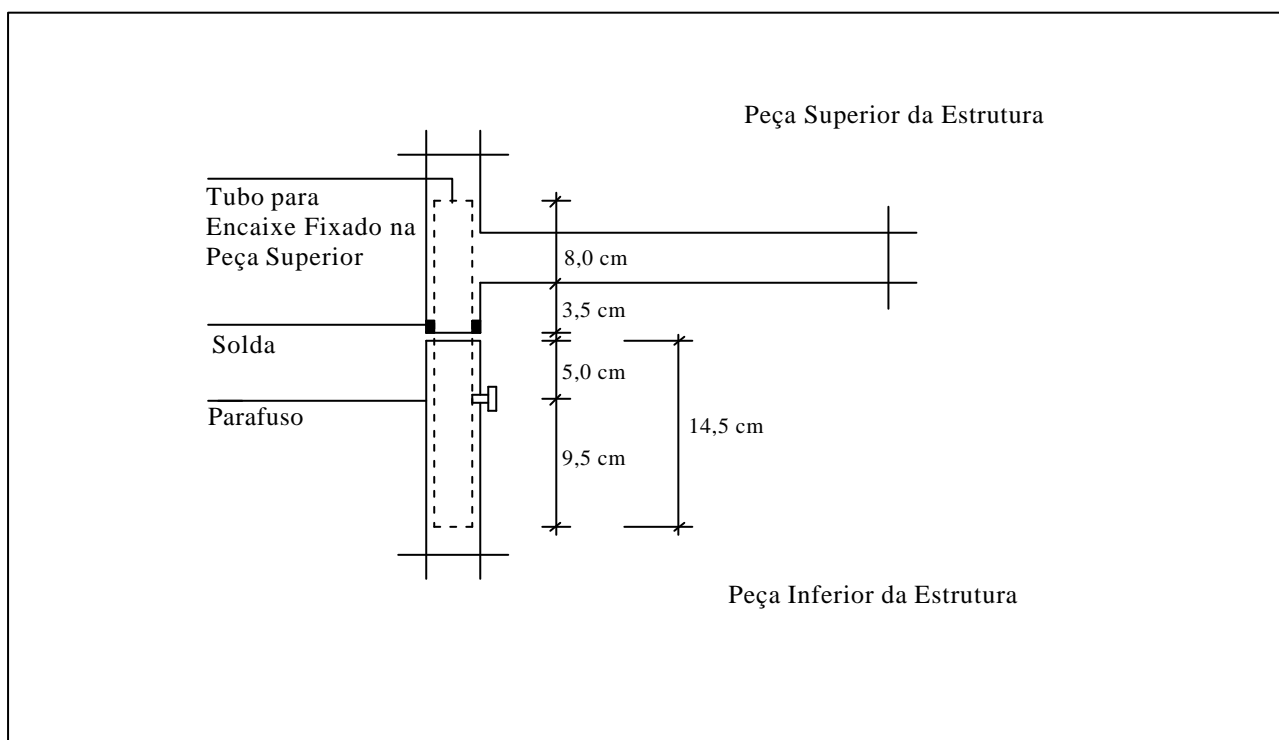


Figura 1. Representação da conexão de encaixe com parafuso de fixação.

A pesquisa desenvolvida compreendeu uma análise numérico-experimental, sendo a frequência natural o parâmetro observado.

Foram realizados testes modais em um protótipo de estrutura reticulada composto por quatro peças idênticas ligadas através de quatro elementos de conexão idênticos. Cada peça é um quadro composto de quatro barras soldadas, de seções circulares vazadas com espessuras de paredes variáveis. Inicialmente, foi ensaiada uma das peças componentes do protótipo, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas do material.

Os resultados experimentais foram utilizados para validar um modelo numérico em elementos finitos do protótipo, utilizando as verdadeiras propriedades mecânicas do material, e assim determinar os valores de constantes de mola que melhor representam as conexões.

2. TESTES MODAIS

Foram realizados testes modais em um protótipo composto por quatro peças idênticas com conexão de encaixe e presas por parafusos, e em apenas uma dessas peças de modo a determinar as frequências naturais de cada conjunto. Os seguintes equipamentos foram utilizados:

- 1) Acelerômetro B&K 4383 com sensibilidade de $3,22\text{pC/m.s}^{-2}$;
- 2) Amplificador de carga B&K 2635;
- 3) Analisador de espectro de dois canais modelo SIGNALCALC ACE;
- 4) PC Notebook com slot tipo PCMCIA para acoplamento do analisador de espectro.

Os seguintes parâmetros de aquisição foram adotados: Tempo de aquisição=6,4s; $\Delta t=0,015625\text{s}$. Cada estrutura testada foi fixada por borrachas flexíveis de modo a permitir o estudo da mesma como estrutura suspensa.

Com o auxílio dos equipamentos mencionados, foram determinadas as frequências naturais do protótipo. Na Figura (2), apresenta-se o arranjo dos equipamentos de teste e as características geométricas de uma peça do protótipo. Arranjo semelhante foi adotado ao ensaiar-se o protótipo. A Figura (3) apresenta um espectro de resposta típico das medições realizadas no protótipo, onde as frequências naturais podem ser identificadas como picos de respostas decorrentes da excitação, sendo esta aplicada na forma de impacto.

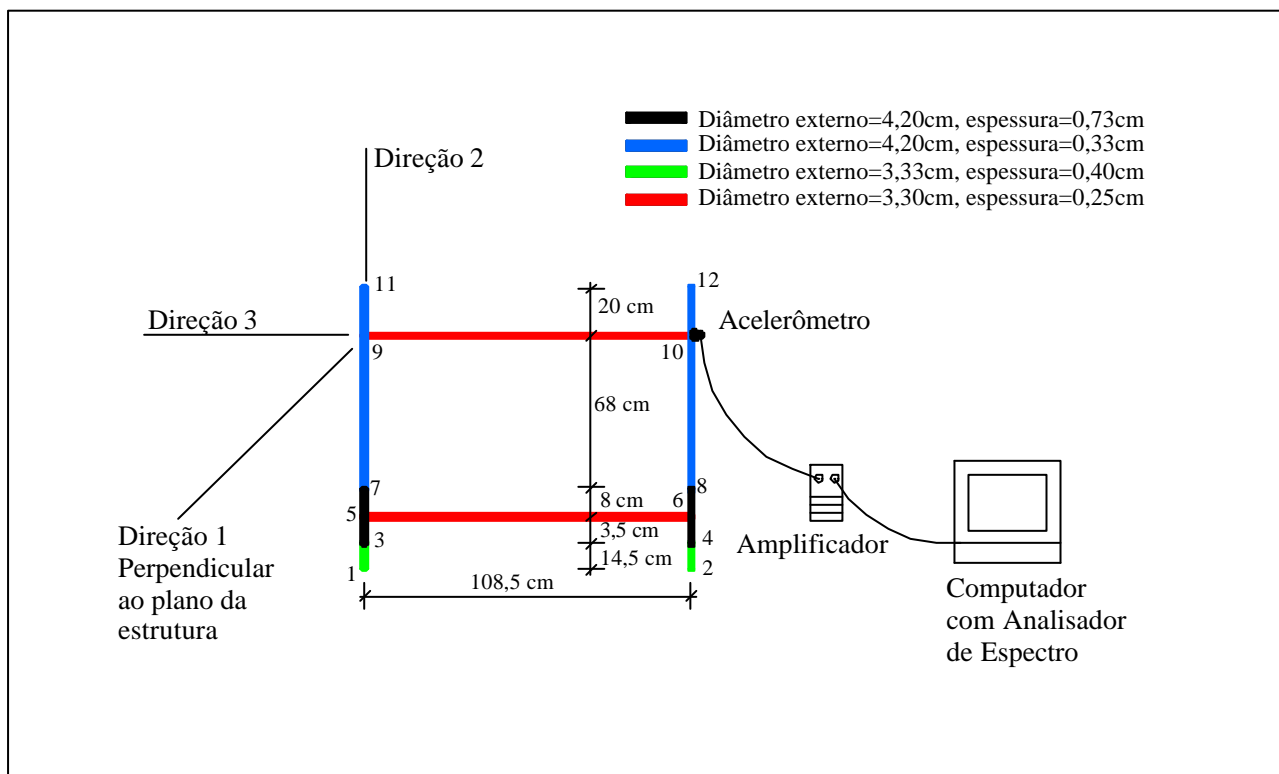


Figura 2. Arranjo dos equipamentos para a determinação das frequências naturais de uma peça do protótipo.

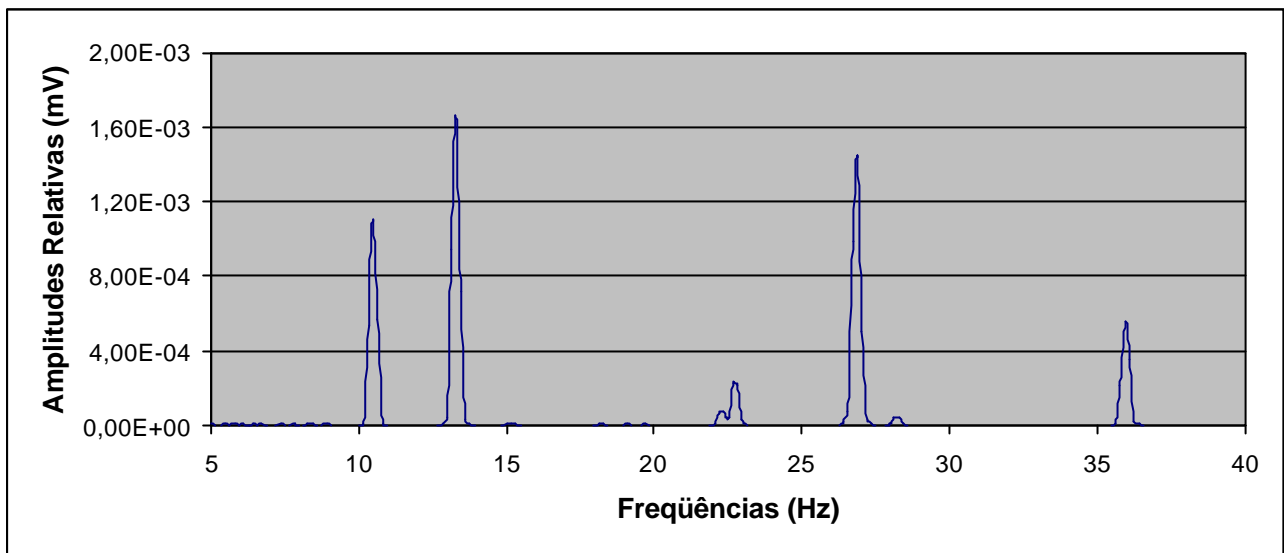


Figura 3. Espectro de resposta típico.

3. MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS

Inicialmente, foi feito um levantamento das características geométricas das peças, procurando-se inclusive identificar a extensão de eventuais obstruções de argamassa presentes no interior dos tubos de três das quatro peças do protótipo. A Figura (4) apresenta a disposição das peças e suas dimensões.

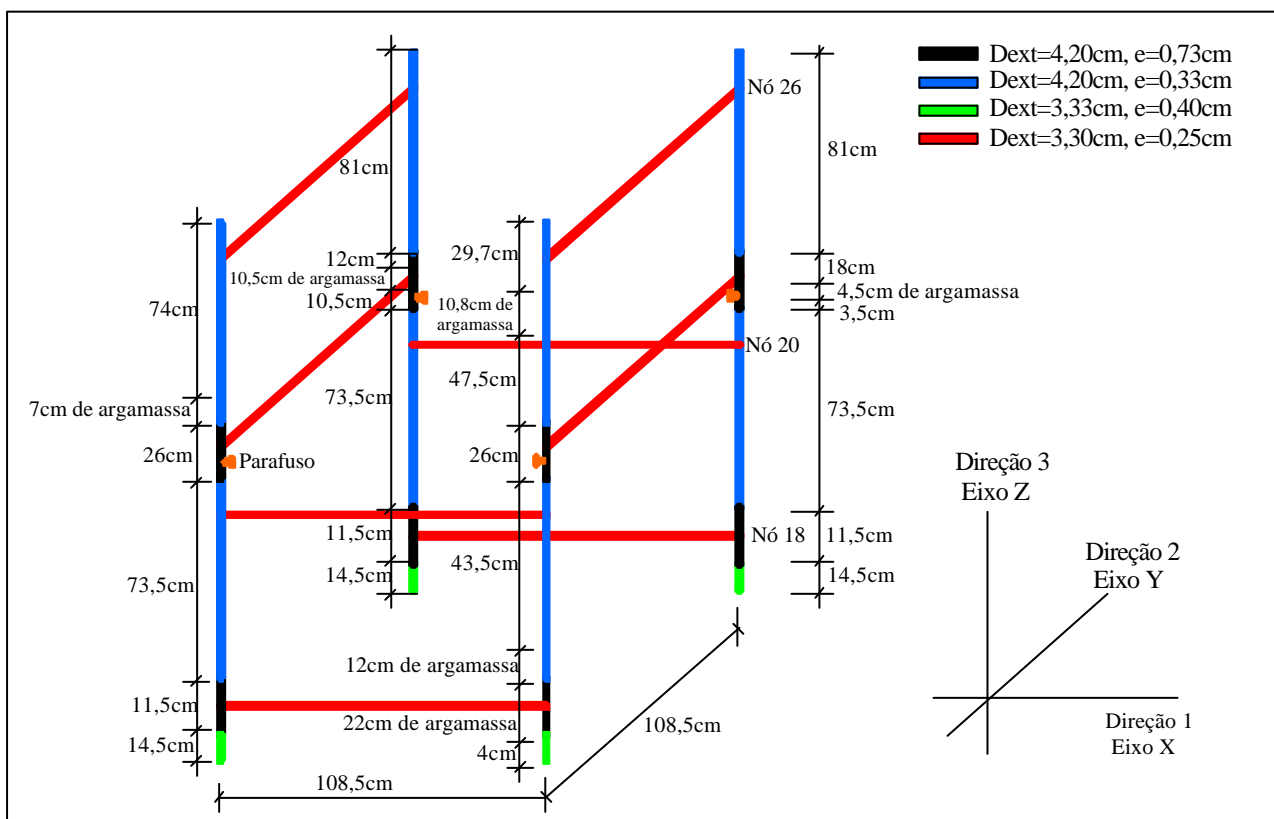


Figura 4. Protótipo composto por quatro peças.

Todas as peças foram pesadas em balança de precisão, de modo a determinar a massa específica das argamassas e do metal, sendo esta determinação o ponto de partida para a modelagem da

estrutura. Para a determinação da massa específica do metal, tomou-se a peça sem argamassa e determinou-se o volume do metal. Conhecendo-se a massa desta peça, obteve-se a massa específica do metal como sendo $\rho = 6551,87 \text{ Kg/m}^3$. Para a determinação da massa específica das argamassas de obstrução, determinou-se, para cada peça com obstruções, o volume da argamassa retida no interior de suas barras. Com a diferença entre as massas das peças com e sem obstruções, determinou-se a massa específica da argamassa contida em cada peça.

A definição da malha de elementos finitos foi tal que não produzisse variações no valor das frequências naturais. Modelagens com graus de refinamento sucessivos utilizando-se 10, 28 e 60 nós em cada peça foram realizados, verificando-se que a modelagem com 28 nós apresentou-se inteiramente satisfatória. O software de elementos finitos ANSYS foi utilizado em todas as modelagens numéricas.

4. CORRELAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

4.1. Determinação do Módulo de Elasticidade do Material

Para a determinação do módulo de elasticidade real do metal, procedeu-se da seguinte forma:

1) Com os equipamentos citados, foram obtidas experimentalmente as frequências naturais da peça sem obstruções (Tab. (1)).

Tabela 1. Resultado dos testes modais da peça sem obstruções.

Modos de vibração	Frequências naturais identificadas (Hz)	Direções detectáveis
7	41.87	1
8	56.72	2 - 3
9	96.72	1
10	121.09	2
11	150.47	1
12	181.72	2

Obs: As frequências naturais dos seis primeiros modos são nulas, pois a peça foi ensaiada suspensa.

2) As barras foram modeladas, determinando-se inicialmente as frequências naturais para esta mesma peça (Tab. (2)), utilizando a massa específica já obtida do metal, $\rho = 6551,87 \text{ Kg/m}^3$, e com o valor do módulo de elasticidade do aço $E = 210 \text{ GPa}$, tomado como valor de referência para este material.

Tabela 2. Resultado da análise numérica da peça sem obstruções.

Modos de vibração	Frequências naturais (Hz) calculadas com $E = 210 \text{ GPa}$ e $\rho = 6551,87 \text{ Kg/m}^3$	Frequências naturais (Hz) calculadas com $E = 181,64 \text{ GPa}$ e $\rho = 6551,87 \text{ Kg/m}^3$
7	43.95	40.87
8	59.91	55.05
9	101.66	94.55
10	131.88	122.65
11	168.15	156.38
12	199.19	185.26

3) Dividiram-se as frequências calculadas pelas respectivas frequências identificadas e em seguida efetuou-se a média do resultado dessas divisões. O valor médio encontrado, $(W_{\text{calculado}} / W_{\text{experimental}})^2 = (1,0752)^2$, foi utilizado para corrigir o módulo de elasticidade do material, chegando-se ao valor de 181,64 GPa, que resultou em boa correlação com os resultados experimentais (Tab. (2)). Observou-se que, tanto a massa específica como o módulo de elasticidade obtido são inferiores aos valores de referência para o aço.

4.2. Identificação de Frequências Naturais

Para a estrutura mostrada na Fig. (4), foram feitos ensaios, colocando o acelerômetro nos nós 18, 20 e 26, indicados na figura, nas direções 1 e 2. As Tabelas (3), (4) e (5) apresentam as frequências naturais identificadas em cada ensaio.

Tabela 3. Teste realizado com acelerômetro no nó 26.

Modos de vibração	Frequências naturais identificadas (Hz)	
	Acelerômetro na direção 1 e excitação na direção 1.	Acelerômetro na direção 2 e excitação na direção 2.
7	10.47	10.47
8	13.28	-
9	-	15.40
10	22.30	22.30
11	22.70	-
12	26.87	26.87
13	28.12	28.12
14	29.38	29.38
15	35.94	35.94

Tabela 4. Teste realizado com acelerômetro no nó 18.

Modos de vibração	Frequências naturais identificadas (Hz)	
	Acelerômetro na direção 1 e excitação na direção 1.	Acelerômetro na direção 2 e excitação na direção 2.
7	10.47	10.47
8	13.28	13.28
9	15.40	-
10	22.30	22.30
11	22.70	22.70
12	26.87	26.87
13	28.12	28.12
14	-	-
15	35.94	35.94

Tabela 5. Teste realizado com acelerômetro no nó 20.

Modos de vibração	Frequências naturais identificadas (Hz)	
	Acelerômetro na direção 1 e excitação na direção 1.	Acelerômetro na direção 2 e excitação na direção 2.
7	10.47	10.47
8	13.28	13.28
9	15.40	-
10	22.30	22.30
11	22.70	22.70
12	26.87	-
13	28.12	-
14	-	-
15	35.94	35.94

4.3. Determinação das Constantes Elásticas das Conexões

A introdução dos elementos de ligação e a investigação da influência destas ligações no protótipo constituíram a etapa seguinte. Estes elementos, representados por molas, foram introduzidos para representar o encaixe aparafusado entre as barras do protótipo.

Tabela 6. Resultado da análise numérico-experimental.

Modos de vibração	Frequências naturais identificadas (Hz)	Frequências naturais calculadas com ligações rígidas (Hz)
7	10.47	10.97
8	13.28	15.37
9	15.40	17.64 / 18.88
10	22.30	23.96
11	22.50	24.56
12	26.87	27.93
13	28.13	30.37
14	29.38	31.50
15	35.94	36.74

A Tabela (6) apresenta os resultados obtidos considerando os elementos de conexão como rígidos, isto é, com valores elevados para as constantes de mola, utilizando-se os valores já determinados do módulo de elasticidade e da massa específica do metal.

Conforme se pode observar na coluna das frequências calculadas do nono modo, apareceram dois valores correspondendo a modos de vibração quase simétricos, que não foram possíveis de distinguir experimentalmente.

Cada constante elástica representa uma conexão de deslocamento ou rotação. Observou-se que sendo a estrutura firmemente aparafusada, na região de união de duas peças, os deslocamentos lineares nas direções dos eixos X, Y e Z praticamente inexistem. Com isso, admitiu-se apenas as três constantes de rotação como incógnitas. Para o protótipo em análise, verificou-se que constantes elásticas maiores que 10^8 N/m resultam em indeslocabilidade.

As Tabelas (7), (8) e (9) apresentam o efeito isolado da variação de cada uma das constantes de mola que representam as rotações em torno dos eixos X, Y e Z, respectivamente.

Tabela 7. Resultados com todas as constantes rígidas, exceto a $ROTX = 10^5$ N/m.

Modos de vibração	Frequências naturais calculadas. Conexões rígidas (Hz)	Frequências naturais calculadas. Conexões com molas (Hz)
7	10.97	10.76
8	15.37	15.36
9	17.64 / 18.88	15.54 / 18.87
10	23.96	22.21
11	24.56	24.54
12	27.93	27.78
13	30.37	28.64
14	31.50	31.49
15	36.74	36.85

Obs: ROTX altera principalmente os modos 9, 10 e 13.

Tabela 8. Resultados com todas as constantes rígidas, exceto a $ROTY = 10^5$ N/m:

Modos de vibração	Frequências naturais calculadas. Conexões rígidas (Hz)	Frequências naturais calculadas. Conexões com molas (Hz)
7	10.97	10.96
8	15.37	14.65
9	17.64 / 18.88	17.64 / 18.87
10	23.96	23.94
11	24.56	24.54
12	27.93	27.42
13	30.37	30.28
14	31.50	31.49
15	36.74	36.73

Obs: ROTY altera principalmente os modos 8 e 12.

Tabela 9. Resultado com todas as constantes rígidas, exceto a $ROTZ = 10^5$ N/m:

Modos de vibração	Frequências naturais calculadas. Conexões rígidas (Hz)	Frequências naturais calculadas. Conexões com molas (Hz)
7	10.97	10.69
8	15.37	15.36
9	17.64 / 18.88	16.65 / 17.64
10	23.96	23.28
11	24.56	23.98
12	27.93	27.90
13	30.37	30.35
14	31.50	30.79
15	36.74	36.43

Obs: ROTZ altera principalmente os modos 9, 10, 11 e 14.

Estando os parafusos na direção do eixo X (Fig. (4)), a rotação em torno deste eixo ocorre com menor facilidade que as demais, pois o aperto do parafuso pressiona a barra encaixada contra a parede da barra que a recebe, fazendo aparecer um atrito que dificulta este tipo de rotação. Por isso, constante elástica em torno deste eixo tende a ter maior valor que as demais. Por outro lado, a rotação em torno do eixo Y tende a ser menor que as demais, pois o aperto do parafuso cria menos impedimentos a esta rotação.

Utilizando estas diretrizes foram obtidos os seguintes valores para as constantes, que aproximaram bastante os resultados calculados dos identificados: $ROTX = 1,05 \times 10^5$ N/m; $ROTY = 0,35 \times 10^5$ N/m e $ROTZ = 0,60 \times 10^5$ N/m. A Tabela (10) apresenta as frequências naturais finais, observando-se que as perdas de rigidez variam de acordo com a posição do parafuso na ligação, resultando em diferentes constantes elásticas de mola para cada direção.

Tabela 10. Frequências naturais finais determinadas utilizando valores corrigidos das constantes elásticas.

Modos de vibração	Frequências naturais identificadas (Hz)	Frequências naturais calculadas. Conexões rígidas (Hz)	Frequências naturais calculadas. Conexões com molas (Hz)
7	10.47	10.97	10.31
8	13.28	15.37	13.49
9	15.40	17.64 / 18.88	15.62 / 15.87
10	22.30	23.96	22.32
11	22.50	24.56	22.55
12	26.87	27.93	26.62
13	28.13	30.37	28.43
14	29.38	31.50	30.22
15	35.94	36.74	35.61

Comparando os resultados apresentados na Tab. (10), pode-se afirmar que a conexão afeta os modos da estrutura de forma diferenciada.

5. CONCLUSÕES

Testes modais foram realizados em protótipo de estrutura reticulada composta por peças encaixáveis com parafuso de fixação.

Foi realizado um estudo da influência dos elementos de ligação considerando que a presença de ligações rígidas entre as peças não corresponde inteiramente à situação real, pois várias destas ligações são conexões encaixadas e/ou aparafusadas, restringindo de forma diferenciada os diferentes graus de liberdades da conexão. Elementos de mola foram introduzidos para representar a conexão e os resultados obtidos permitiram compreender como esta conexão estudada se comporta. Com a realização dos testes de forma consecutiva, determinaram-se inicialmente as propriedades do material para numa segunda etapa determinar as constantes de mola das conexões, permitindo a utilização da frequência natural como único parâmetro para validar os modelos numéricos.

Os valores das constantes elásticas encontradas não podem ser generalizados para outras estruturas do gênero, pois o tipo da conexão poderá diferir da aqui estudada. Entretanto os resultados permitem concluir que o projeto das conexões tem influência significativa nas propriedades dinâmicas deste tipo de estrutura, produzindo, por vezes, variações de cerca de 15% nas frequências naturais.

6. REFERÊNCIAS

- Batista, R. C. and Magluta, C., 1993, "Spector-induced vibration of Maracanã Football Stadium", Structural Dynamics – EURODYN'93, Balkema, Rotterdam, pp. 1545-1547.
- Kasperski, M., 1996, "Actual Problems with Stand Structures due to Spectator-Induced Vibrations", Structural Dynamics – EURODYN'96, Balkema, Rotterdam, pp. 455-461.
- Ji, T. And Ellis, B. R., 1999, "The Evaluation of Sports Stadia Grandstands for Dynamic Crowd Loads at Pop Concerts in the United Kingdom", Structural Dynamics – EURODYN'99, Balkema, Rotterdam, pp. 937-942.
- Littler, J. D., 1999, "The Dynamic Response of a Three Tier Cantilever Grandstand", Structural Dynamics – EURODYN'99, Balkema, Rotterdam, pp. 623-628.
- Littler, J. D., 1996, "Measuring the Dynamic Response of Temporary grandstands", Structural Dynamics – EURODYN'96, Balkema, Rotterdam, pp. 907-913.
- Juliani, M. e Becocci, L., 1998, "Estádio do Morumbi: Fim de Jogo", Revista Técnica maio / junho, No. 34, pp. 38-41.
- Ji, T. And Ellis, B. R., 1997, "Effective Bracing Systems for Temporary Grandstands", The Structural Engineer, Vol. 75, No. 6, pp. 95-100.

MODAL TESTS FOR THE ANALYSIS OF CONNECTIONS IN TEMPORARY FRAMED STRUCTURES

Rozemberg de Carvalho Finizola

Research Student - PIBIC / CNPq.

Centro de Tecnologia - UFPB.

Campus Universitário, s/n - CEP: 58059-900, João Pessoa, PB.

Roberto Leal Pimentel

Lecturer, Departamento de Tecnologia da Construção Civil – Centro de Tecnologia – UFPB

Seyyed Said Dana

Professor, Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – UFPB

Abstract. Temporary framed structures, such as grandstands and raised platforms used in public events usually employ metallic members in their assembly, having rigid connections as well as loose connections having fixing elements. These structures are subject to dynamic actions due to the movement of spectators on them.

Site inspections of grandstands allowed two of these structures to be modelled in a finite element computer code. There are potential problems of excessive vibration due to closeness between the natural frequencies of the structure and the frequencies of the excitation. It could also be noted that the modelling of the connections affects the natural frequencies.

In this paper it is aimed to investigate the actual behaviour of the connections in more detail, focusing attention on loose connections having fixing bolts. To do that, modal tests were carried out in a prototype framed structure the members of which have this type of connection. The experimental results were used to calibrate a finite element model of the prototype and thus to determine the best values of the elastic constants of the spring elements introduced to model the connections.

The test results and numerical analyses made it possible to conclude that the introduction of spring elements to model the connections instead of rigid connections made the model very close to the actual test structure and that the design of the connection has a significant role in the dynamic behaviour of the structures under investigation.

Keywords: Temporary structures, connections, modal tests.