

## São Paulo Turismo S/A

# Avaliação estrutural do Palácio das Convenções

## Ensaio Dinâmico e Modelo Numérico

---

00	22/12/2011				RT-1246-MD-05
		Rodrigo Lopes	Claudius Barbosa	Marco Juliani	
Rev.	Data	Elaboração	Verificação	Aprovação	N.º documento

## ÍNDICE

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b><u>2</u></b>	<b><u>MONITORAÇÃO DINÂMICA DA ESTRUTURA .....</u></b>	<b><u>4</u></b>
2.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	5
2.2	POSICIONAMENTO DOS ACELERÔMETROS E PROVAS REALIZADAS .....	5
<b><u>3</u></b>	<b><u>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</u></b>	<b><u>8</u></b>
3.1	ACELERAÇÃO AO LONGO DO TEMPO.....	8
3.2	FREQÜÊNCIA NATURAL .....	9
<b><u>4</u></b>	<b><u>MODELO MATEMÁTICO.....</u></b>	<b><u>10</u></b>
4.1	DADOS GEOMÉTRICOS .....	10
4.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....	12
4.3	FREQÜÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO.....	13
<b><u>5</u></b>	<b><u>ANÁLISE ESTÁTICA.....</u></b>	<b><u>18</u></b>
5.1	PACOMETRIA E ESCARIFICAÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DAS ARMADURAS NOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS .....	18
5.2	ESFORÇOS.....	19
5.3	VERIFICAÇÕES .....	20
<b><u>6</u></b>	<b><u>CONCLUSÕES.....</u></b>	<b><u>21</u></b>
<b><u>7</u></b>	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u></b>	<b><u>22</u></b>
	<b><u>ANEXO I.....</u></b>	<b><u>I</u></b>
<b><u>1</u></b>	<b><u>PROCEDIMENTO DE CÁLCULO .....</u></b>	<b><u>II</u></b>

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O Palácio das convenções (Figura 1) está localizado no Parque Anhembi, em São Paulo-SP, e possui 3600 m<sup>2</sup> de área construída, divididos entre salas, auditórios e halls que podem ser adaptados para grandes congressos ou pequenas reuniões corporativas.



Figura 1 - Localização do Palácio das Convenções



Hall Nobre

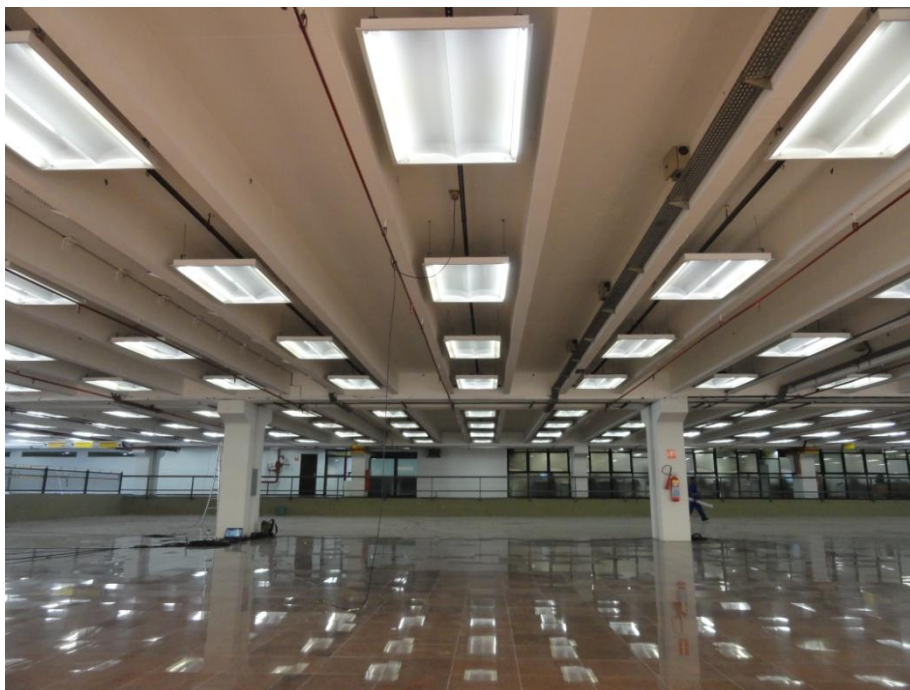


Laje do Palácio e Cúpula do Auditório

Figura 2 - Fotos do Palácio das Convenções

Elaboração Rodrigo Lopes	Data 22/12/2011	RT-1246-MD-05-00	2
-----------------------------	--------------------	------------------	---

O Palácio das Convenções trata-se de uma estrutura em concreto armado composta por alguns elementos pré-moldados e outros moldados *in loco*. A cobertura é feita por uma laje nervurada em uma direção (**Figura 3**).



**Figura 3 – Visualização da estrutura**

Uma das maneiras de avaliar o comportamento e segurança estrutural da laje é por meio da análise dinâmica, aliando metodologia experimental e teórica.

A metodologia adotada consistiu na realização de ensaios dinâmicos de vibração forçada e também análise teórica via elementos finitos. As frequências naturais experimentais serviram para calibrar o modelo matemático 3D, e depois de calibrado, foram aplicados carregamentos estáticos para a verificação do dimensionamento dos elementos em concreto armado.

Pretende-se utilizar a laje do Palácio das Convenções como um novo espaço para feiras e eventos. O objetivo das análises apresentadas neste relatório é determinar o desempenho da estrutura existente quando submetida aos carregamentos oriundos das novas atividades.

## 2 MONITORAÇÃO DINÂMICA DA ESTRUTURA

Os ensaios dinâmicos consistem em uma técnica não-destrutiva que permite avaliar a integridade de uma estrutura, mobilizando integralmente propriedades físicas e mecânicas. A metodologia mostra-se conveniente pelo caráter não-destrutivo, podendo ser repetida ao longo do tempo, utilizando seu histórico para comparações pertinentes.

Durante os ensaios é necessário impor uma excitação dinâmica na estrutura, de modo a causar sua vibração. Existem dois métodos de excitação: vibração forçada e ambiente. A vibração forçada é gerada por excitação usual enquanto a vibração ambiente é gerada por uma excitação ambiente, como por exemplo, vento e tráfego.

A partir de uma determinada solicitação dinâmica obtêm-se as acelerações da estrutura por meio de instrumentos de medição localizados em posições pré-determinadas, escolhidas em função do tipo do fenômeno a ser monitorado. As análises dos dados obtidos por esta experimentação identificam as propriedades dinâmicas da estrutura e seu comportamento, descrevendo-o por meio de parâmetros dinâmicos oportunos - frequências naturais e modos de vibração, por exemplo.

A excitação da estrutura realizou-se através do tráfego de pessoas e de uma motocicleta sobre a estrutura. Na **Figura 4**, podemos ver pessoas correndo e andando enquanto uma moto trafega sobre a laje.



**Figura 4 – Tráfego durante os ensaios**

Elaboração Rodrigo Lopes	Data 22/12/2011	RT-1246-MD-05-00	4
-----------------------------	--------------------	------------------	---

## 2.1 Equipamentos utilizados para aquisição dos dados

Para essa monitoração foram utilizados acelerômetros, do tipo piezo-resistivo, com as características dadas na **Tabela 1**.

**Tabela 1 – Características dos acelerômetros utilizados**

Fabricante:	ENDEVCO
Modelo do sensor:	7265A-HS
Range:	± 20 g
Sensibilidade a 100 Hz típica:	25 mV/g
Resposta em amplitude ± 5%:	0 a 500 Hz
Freqüência natural:	1400 Hz
Excitação:	10V (máximo 15V)
Sensibilidade transversal:	5%

Os acelerômetros foram acoplados a um sistema de condicionamento de sinais, com filtros e amplificadores da marca Iotech, modelo WBK 16, e a um sistema de aquisição de dados, modelo WAVEBOOK 516E, também da marca Iotech. Estes foram ligados a um computador permitindo o armazenamento automático dos resultados com a utilização do programa DasyLab, para posterior tratamento e análise.

## 2.2 Posicionamento dos acelerômetros e provas realizadas

Foram realizadas 4 configurações cada uma com 8 acelerômetros (Tabela 2), posicionados no teto da estrutura (Figura 5 e Figura 7). Todos os acelerômetros foram dispostos na posição vertical. As Figura 6 e Figura 8 apresentam alguns acelerômetros já fixados à estrutura.

As provas foram gravadas com uma freqüência de aquisição de 500 Hz.

**Tabela 2 – Configurações dos ensaios**

Config.	Provas	Acelerômetros
1	1 e 2	A1V, A2V, A3V, A4V, A5V, A6V, A7V e A8V
2	3 e 4	A9V, A10V, A11V, A12V, A13V, A14V, A15V e A16V
3	5 e 6	A17V, A18V, A19V, A20V, A21V, A22V, A23V e A24V
4	7 e 8	A25V, A26V, A27V, A28V, A29V, A30V, A31V e A32V

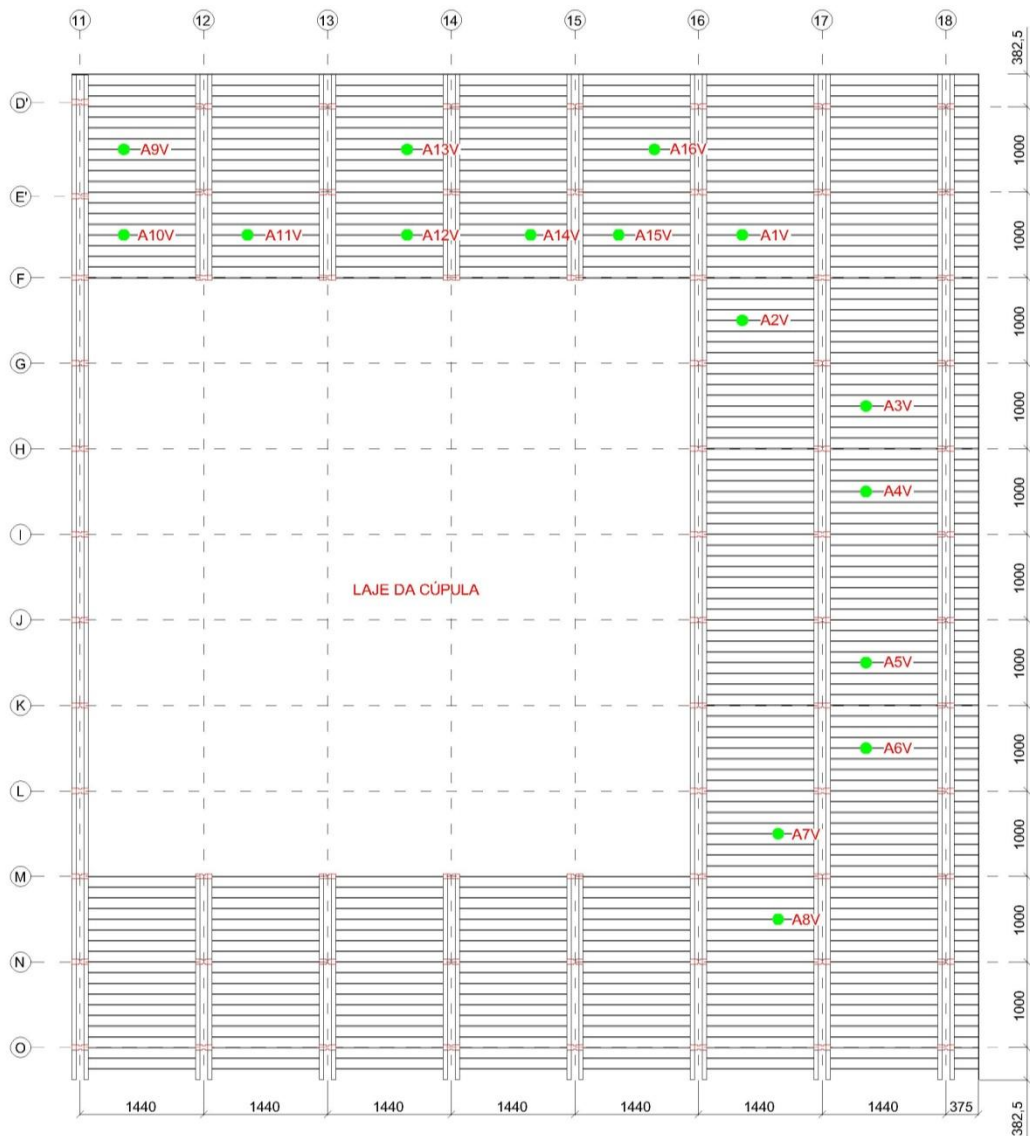


Figura 5 – Localização dos acelerômetros – Configurações 1 e 2

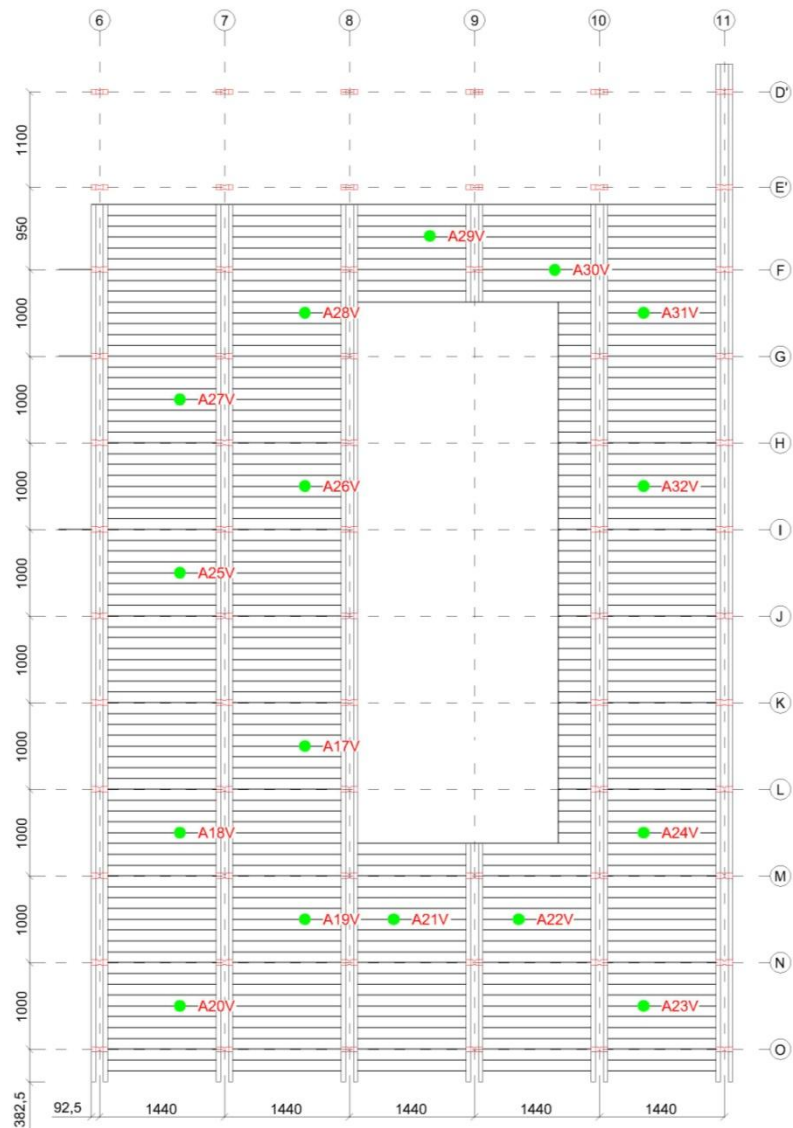


Acelerômetro – Configuração 1



Acelerômetro – Configuração 2

Figura 6 – Posições de alguns acelerômetros



**Figura 7 – Localização dos acelerômetros – Configurações 3 e 4**



**Acelerômetro – Configuração 3**



**Acelerômetro – Configuração 4**

**Figura 8 – Posições de alguns acelerômetros**

### 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como resultado dos ensaios, tem-se diagramas de aceleração em função do tempo para cada uma das posições instrumentadas e gráficos de auto densidade espectral.

#### 3.1 Aceleração ao longo do tempo

Por meio dos acelerômetros foram medidas as acelerações ao longo do tempo em cada uma das posições instrumentadas. Apresentam-se a seguir os resultados da Prova 1 (Figura 9).

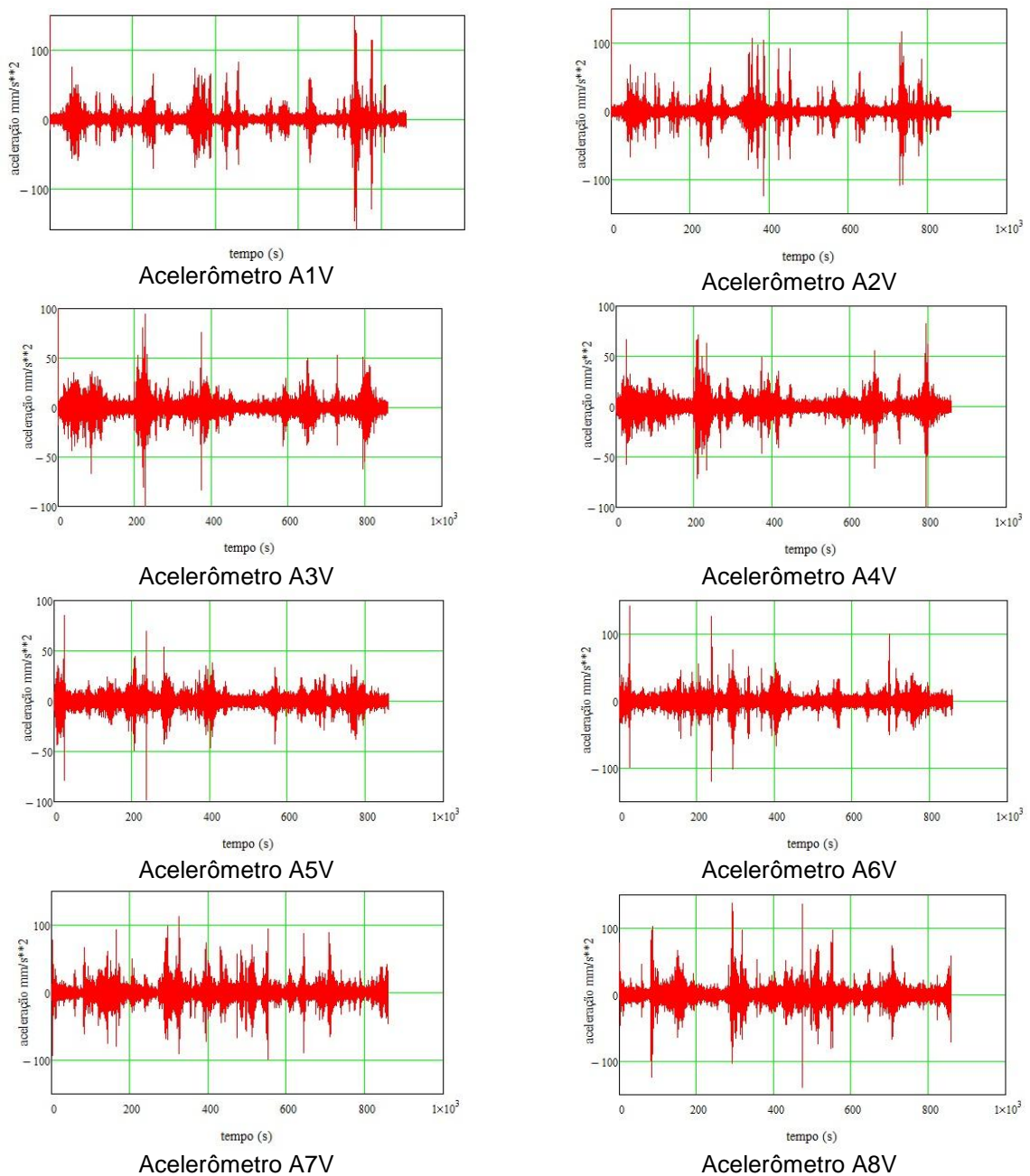


Figura 9 – Aceleração ao longo do tempo

### 3.2 Freqüência natural

A partir da análise dos ensaios de vibração forçada pelo software ARTeMIS (Figura 10) foi possível determinar as freqüências naturais e a deformada modal das estruturas instrumentadas, agrupadas na Tabela 3.

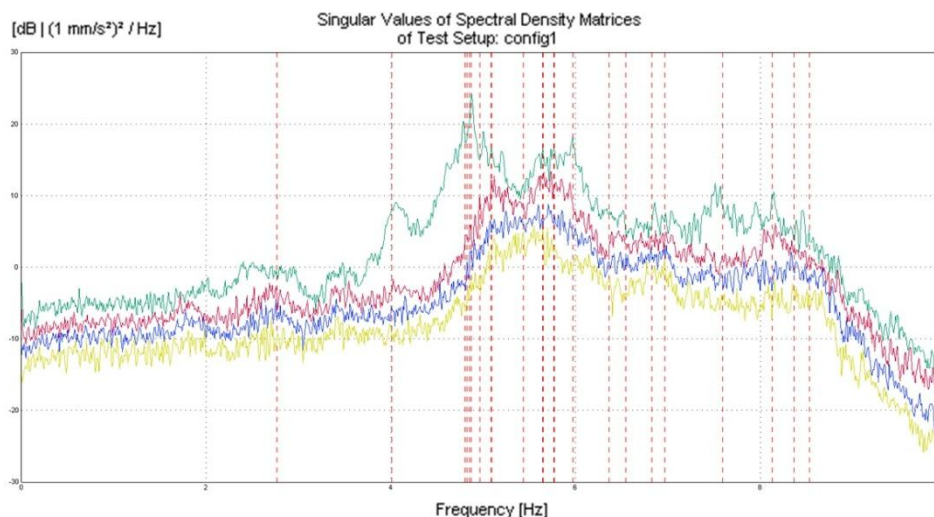


Figura 10 – Identificação das freqüências naturais utilizando o software ARTeMIS.

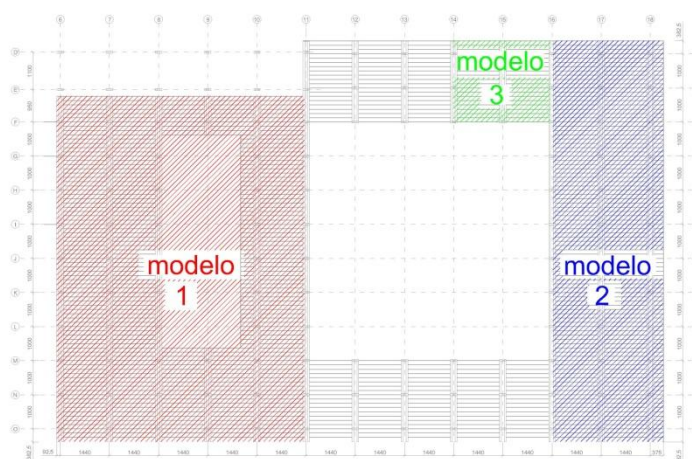
Tabela 3 - Freqüências naturais

Freqüência (Hz)	Descrição	Sensores
4,6	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 6 e 11)	A20V, A22V, A24V
5,1	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 6 e 11)	A17V, A18V, A20V, A24V, A27V, A32V
5,4	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 6 e 11)	A25V, A26V, A28V, A29V, A30V, A31V, A32V
6,13	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 6 e 11)	A17V, A19V, A20V, A21V, A22V
5,11	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 16 e 18)	A1V, A2V, A3V, A4V, A5V, A6V, A7V, A8V
5,68	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 16 e 18)	A1V, A3V, A4V, A5V, A6V
6,11	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 16 e 18)	A1V, A5V, A6V, A7V
5,76	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 11 e 16)	A16V
6,22	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 11 e 16)	A14V, A15V, A16V
6,7	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 11 e 16)	A14V, A16V
8,27	Modo caracterizado por uma flexão (entre os eixos 11 e 16)	A14V

## 4 MODELO MATEMÁTICO

Para a elaboração do modelo matemático do Palácio considerou-se 3 regiões da laje (**Figura 11**).

O modelo numérico desenvolvido, baseado no Método dos Elementos Finitos, foi elaborado com elementos de casca (laje, vigas e nervuras) e barras (pilares). Ele foi calibrado em função dos resultados obtidos experimentalmente. Para isso foi utilizado o programa computacional SAP 2000, versão 14.



**Figura 11 – Regiões analisadas**

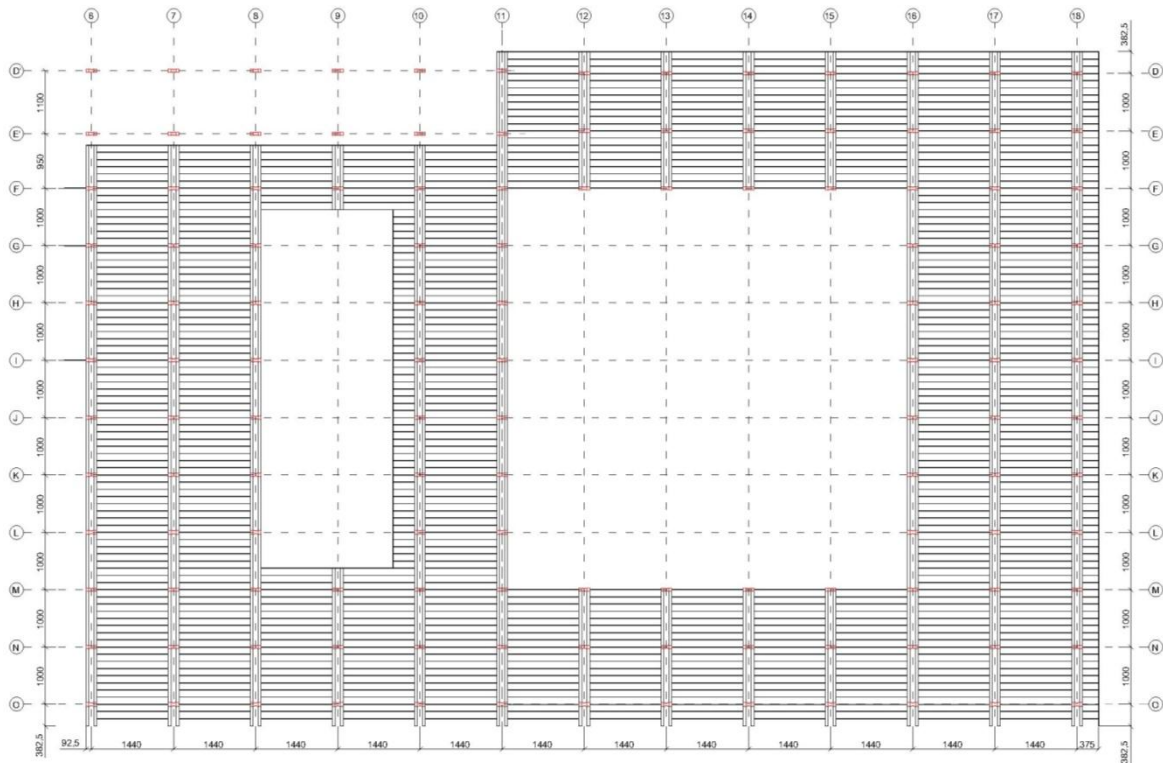
### 4.1 Dados geométricos

A modelagem numérica foi baseada nos desenhos fornecidos pelo setor de Engenharia da São Paulo Turismo S/A e por levantamentos de campo. A lista com os desenhos utilizados encontra-se na Tabela 4.

**Tabela 4 – Desenhos utilizados**

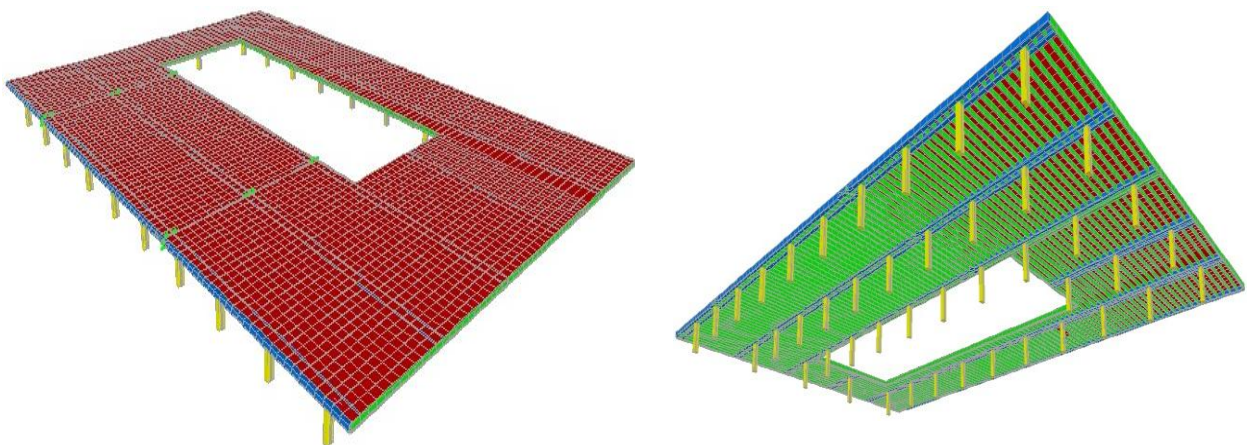
Código do desenho	Título do desenho
1001-D	PARQUE ANHEMBI – ESPLANADA E CÚPULA
1001-E	PARQUE ANHEMBI – FORMAS DA CÚPULA, VISTA INFERIOR
1001-F	PARQUE ANHEMBI – FORMAS DA CÚPULA, VISTA SUPERIOR
1001-I	PARQUE ANHEMBI – FORMAS DA PLATEIA INFERIOR
1001-J	PARQUE ANHEMBI – FORMAS NOS NIVEIS +718,46 E +717,05
1001-K	PARQUE ANHEMBI – FORMAS DA PLATEIA SUPERIOR
--	PARQUE ANHEMBI- PALÁCIO DAS CONVENÇÕES – MEMÓRIA DE CÁLCULO

Na **Figura 12** temos a planta de formas do Palácio das Convenções.



**Figura 12 – Planta de formas do Palácio das Convenções**

Os modelos numéricos podem ser vistos na **Figura 13**, **Figura 14** e **Figura 15**.



**Figura 13 – Visualização do modelo 1**

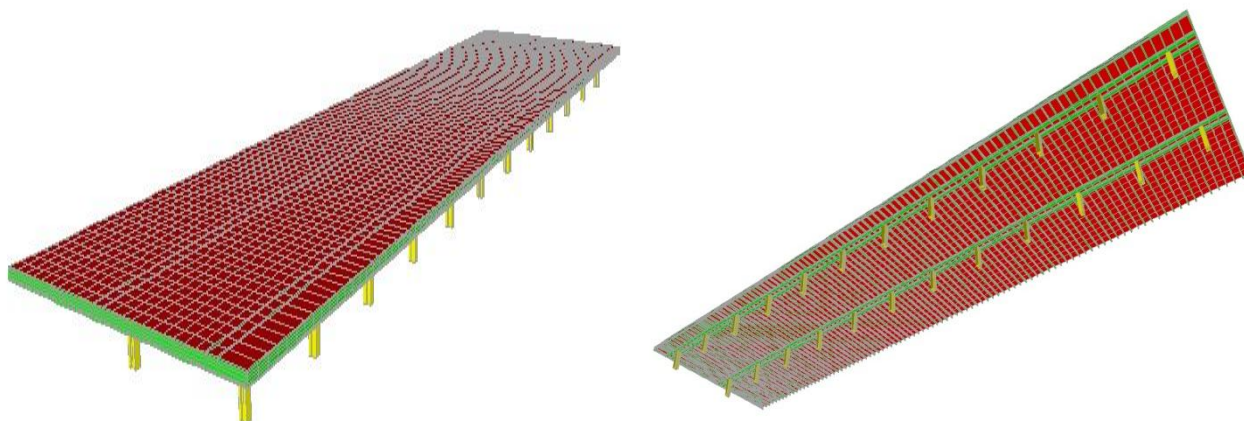


Figura 14 – Visualização do modelo 2

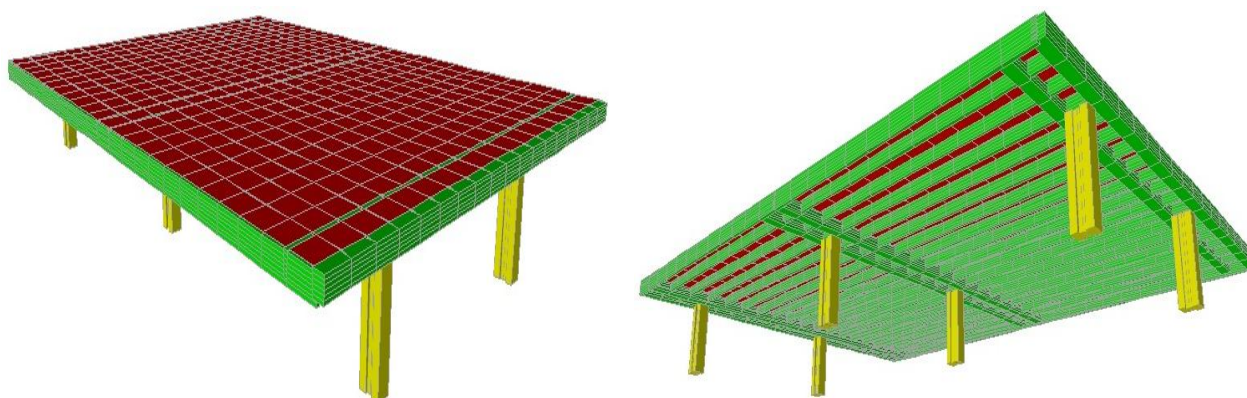


Figura 15 – Visualização do modelo 3

#### 4.2 Propriedades dos materiais

Adotaram-se as propriedades mecânicas apresentadas na **Tabela 5** para o concreto. As propriedades mecânicas do aço estão baseadas em valores médios para o material.

Elaboração Rodrigo Lopes	Data 22/12/2011	RT-1246-MD-05-00	12
-----------------------------	--------------------	------------------	----

**Tabela 5– Propriedades físicas e mecânicas iniciais adotadas para os materiais**

Concreto	
$E_c$ (MPa)	30672
$\nu$	0,20
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2400
$\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	23520

$E_c$ : módulo de resistência do concreto

$\nu$ : coeficiente de Poisson

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>): massa específica do concreto

$\gamma$  (N/m<sup>3</sup>): peso específico do concreto

### 4.3 Freqüências naturais e modos de vibração

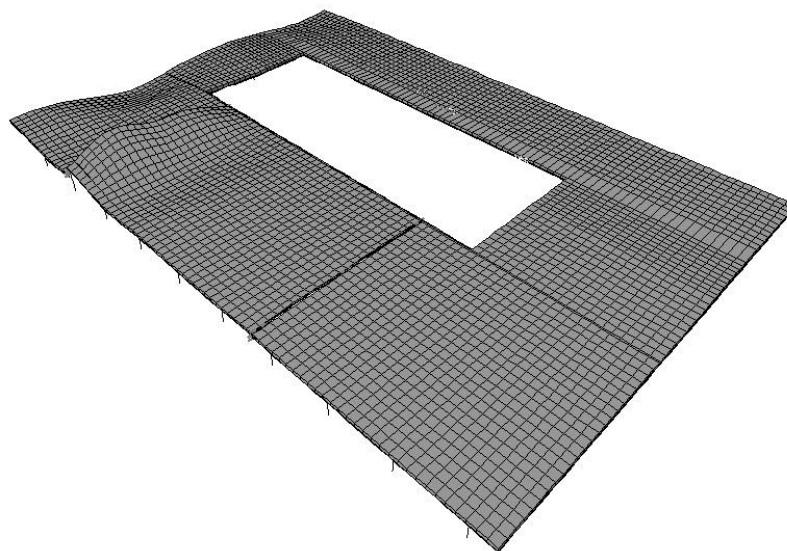
A calibração do modelo numérico foi baseada nos valores usuais para o concreto. A comparação entre o comportamento experimental e teórico permite detectar possíveis anomalias estruturais.

A partir do modelo numérico obtiveram-se valores referentes às freqüências naturais da estrutura e seus principais modos de vibração. Na **Tabela 6** e na **Figura 16** à **Figura 26** são apresentados as freqüências naturais e os modos de vibração que mais influenciam o comportamento da estrutura.

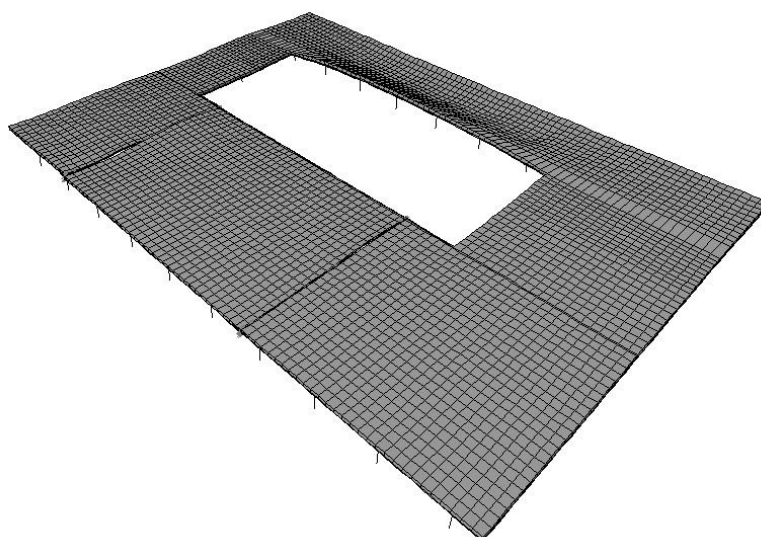
**Tabela 6 – Freqüência natural da estrutura – Experimental e Teórico**

Modelo	Freqüência Teórica (Hz)	Modo de vibração	Freqüência Experimental (Hz)
1	4,84	<b>Figura 16</b>	4,6
	5,07	<b>Figura 17</b>	5,1
	5,35	<b>Figura 18</b>	5,4
	6,08	<b>Figura 19</b>	6,13
2	5,12	<b>Figura 20</b>	5,11
	5,8	<b>Figura 21</b>	5,68
	6,09	<b>Figura 22</b>	6,11
3	5,68	<b>Figura 23</b>	5,76
	6,1	<b>Figura 24</b>	6,22
	6,79	<b>Figura 25</b>	6,7
	8,37	<b>Figura 26</b>	8,27

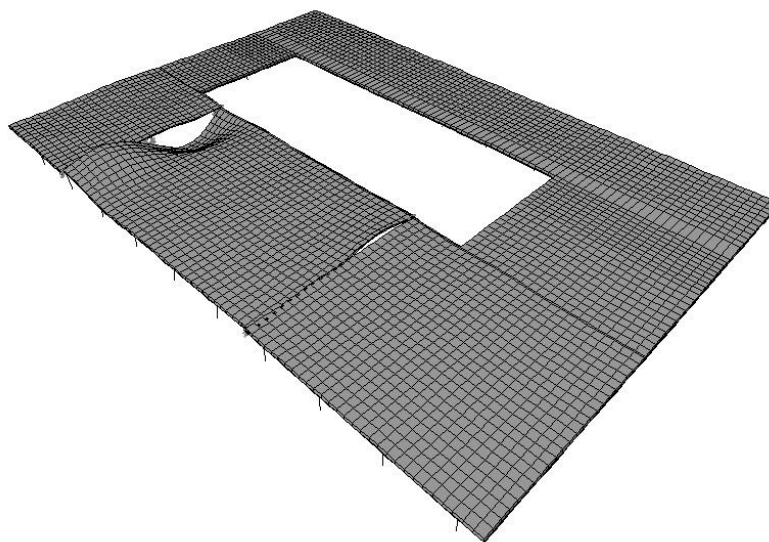
Observa-se que os valores experimentais são próximos aos obtidos pela análise matemática da estrutura, indicando que a estrutura possui comportamento similar ao previsto teoricamente, que assegura a integridade estrutural.



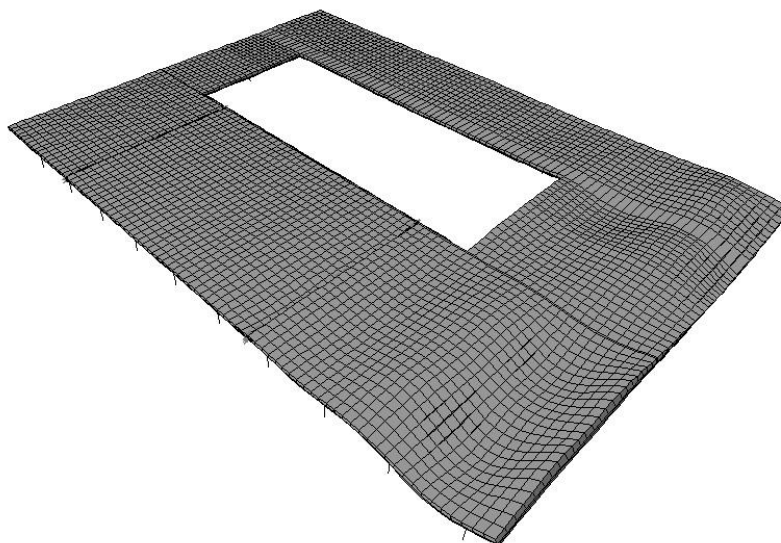
**Figura 16 – Modelo 1 - Flexão (4,84 Hz)**



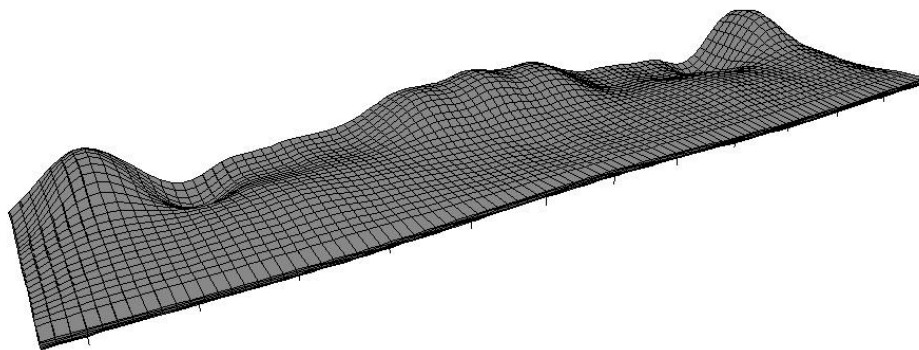
**Figura 17 – Modelo 1 - Flexão (5,07 Hz)**



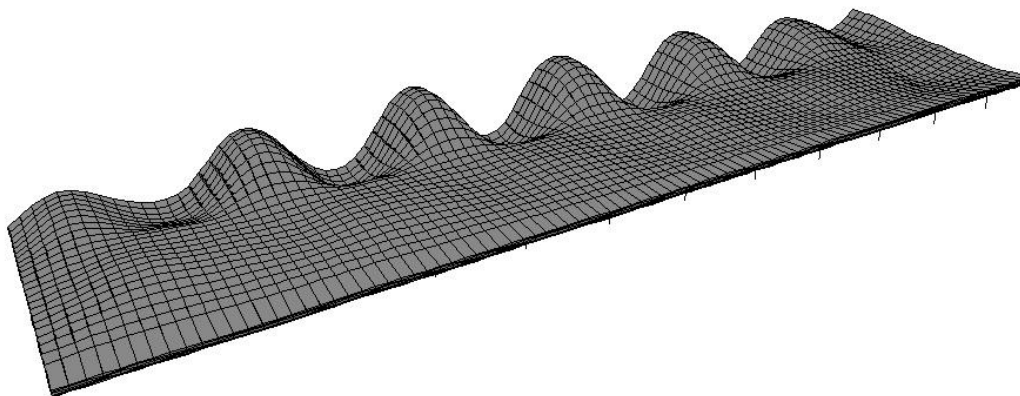
**Figura 18 - Modelo 1 - Torção (5,35 Hz)**



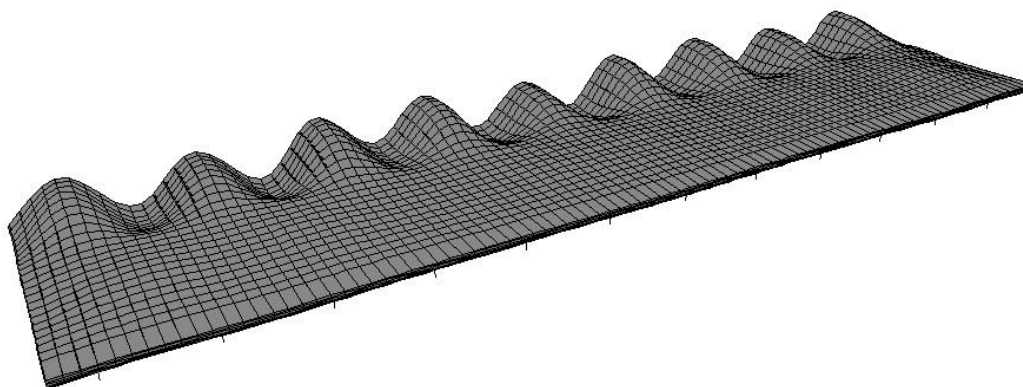
**Figura 19 - Modelo 1 – Flexão (6,08 Hz)**



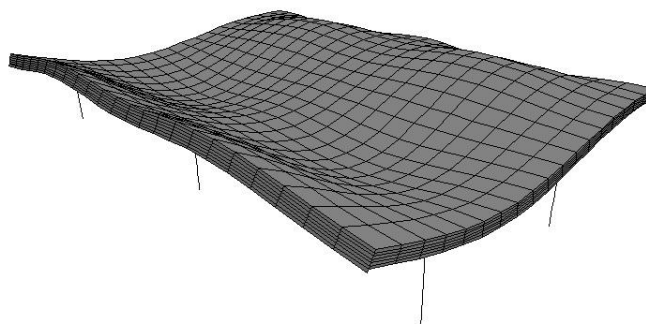
**Figura 20 – Modelo 2 - Flexão (5,12 Hz)**



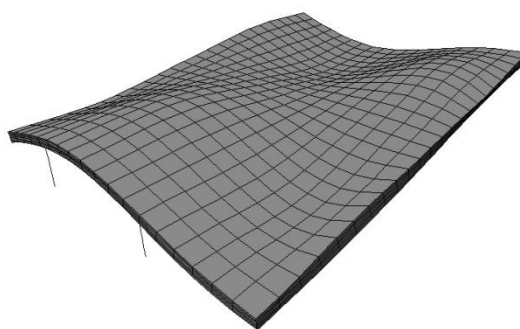
**Figura 21 – Modelo 2 - Flexão (5,80 Hz)**



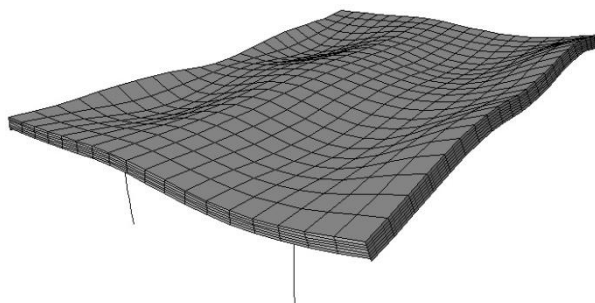
**Figura 22 – Modelo 2 - Flexão (6,09 Hz)**



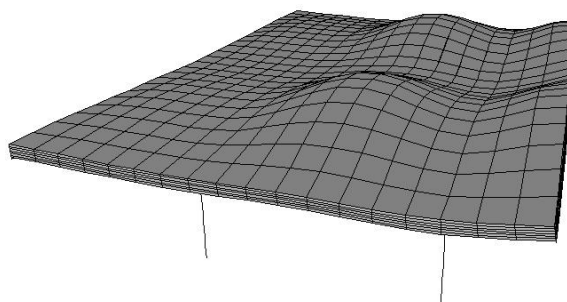
**Figura 23 – Modelo 3 - Flexão (5,68 Hz)**



**Figura 24 – Modelo 3 - Torção (6,10 Hz)**



**Figura 25 – Modelo 3 - Flexão (6,79 Hz)**



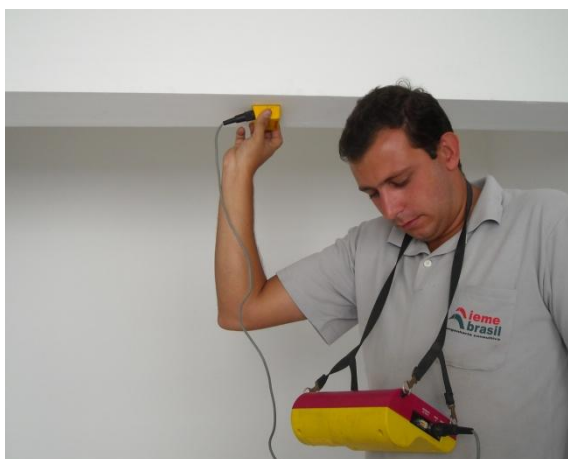
**Figura 26 – Modelo 3 - Flexão (8,37 Hz)**

## 5 ANÁLISE ESTÁTICA

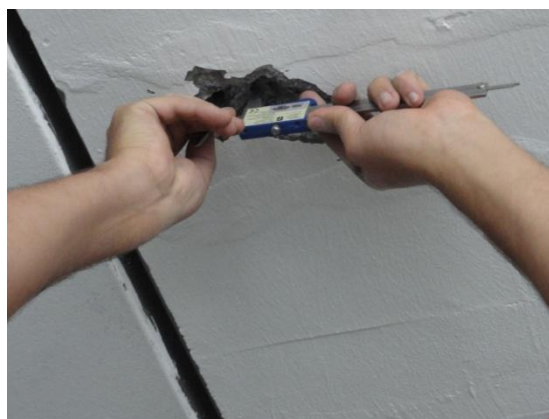
Pretende-se utilizar a laje do Palácio das Convenções como um novo espaço para eventos. Em virtude disto, verificou-se a sobrecarga máxima suportada pela estrutura. Para isto, foram realizados ensaios para identificação das armaduras e resistência do concreto (pacometria, escarificação e resistência a compressão do concreto (ver relatório RT-1246-AV-05)). A partir dessas informações e com o auxílio do modelo matemático, avaliou-se o desempenho da estrutura.

### 5.1 Pacometria e escarificação para a identificação das armaduras nos elementos estruturais

Por falta de documentação referente à estrutura, foram necessárias a escarificação de algumas vigas e a realização de ensaios de pacometria em vigas, lajes e pilares (**Figura 27**).



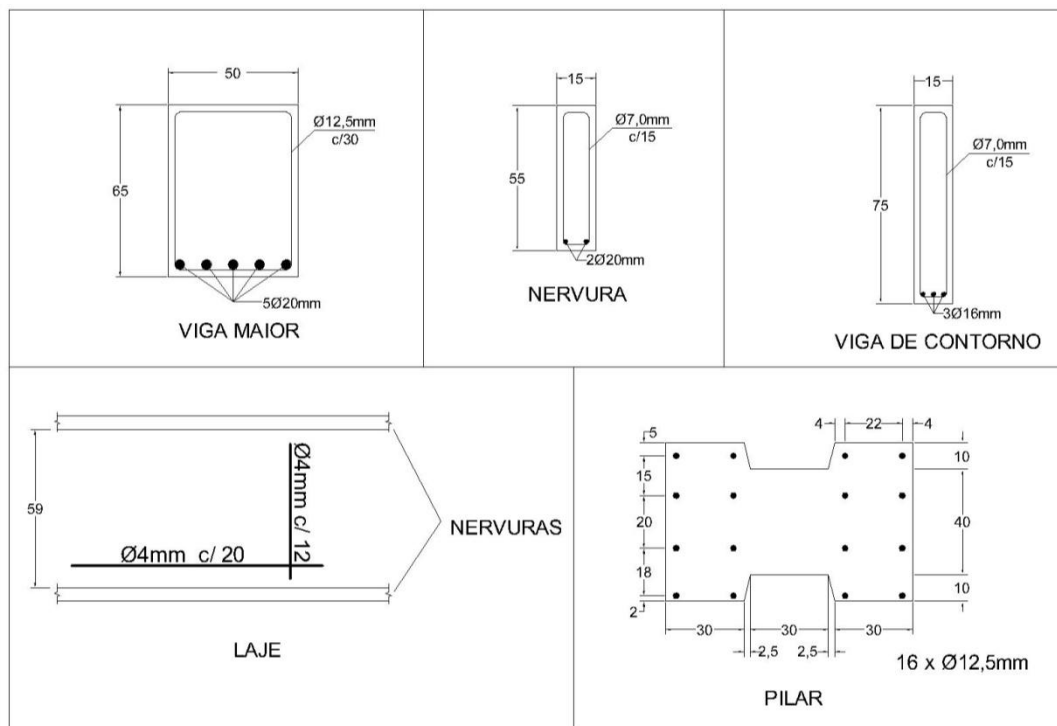
**Figura 27 – Ensaio de pacometria**



**Figura 28 – Medição do diâmetro da barra após escarificação**

Elaboração Rodrigo Lopes	Data 22/12/2011	RT-1246-MD-05-00	18
-----------------------------	--------------------	------------------	----

O resultado desses ensaios pode ser visto na **Figura 29**



**Figura 29 – Resultados da pacometria e escarificação**

## 5.2 Esforços

A **Tabela 7** apresenta os valores dos esforços atuantes nos elementos mais solicitados. Para a sobrecarga foi atribuído um carregamento de  $4 \text{ kN/m}^2$ , que é compatível com a atividade desejada.

**Tabela 7– Esforços Atuantes**

Pilares	Momento XX		Momento YY		Normal	
	Mg (kN.m)	Mq (kN.m)	Mg (kN.m)	Mq (kN.m)	Ng (kN)	Nq (kN)
Centro	15,18	0,80	212,45	1,20	833,45	525,96
Borda	57,28	150,88	204,66	1,76	790,50	238,40
Canto	39,82	67,80	83,505	182,12	669,76	116,00
Vigas e Laje	Momento Positivo		Cortante			
	Mxg (kN.m)	Mxq (kN.m)	Vg (kN)	Vq (kN)		
Viga maior	128,48	110,64	165,43	107,56		
Nervura	52,95	44,20	47,16	39,20		
Laje	0,59	0,52	-	-		

### 5.3 Verificações

As verificações foram feitas a partir dos esforços apresentados no modelo numérico (Tabela 7). Calculou-se o esforço resistente para cada elemento e depois comparou-se com o esforço solicitante. Para os pilares, verificou-se se a seção (aço + concreto) resiste ao carregamento. O resumo da análise está apresentado na Tabela 8 e Tabela 9. O procedimento para o cálculo pode ser visto no ANEXO I.

**Tabela 8 – Verificação das vigas e lajes**

Viga Maior		
	Momento (+) (kN.m)	Cortante (kN)
Esforço Resistente	405,6	488,6
Esforço Solicitante	334,8	382,1
Verificação:	<b>OK</b>	<b>OK</b>
Nervura		
	Momento (+) (kN.m)	Cortante (kN)
Esforço Resistente	142,4	394,6
Esforço Solicitante	136,1	120,9
Verificação:	<b>OK</b>	<b>OK</b>
Nervura		
	Momento (+) (kN.m)	
Esforço Resistente	2,18	
Esforço Solicitante	1,56	
Verificação:	<b>OK</b>	

**Tabela 9 – Verificação dos Pilares**

Pilares	Desempenho	
Centro	<b>OK</b>	<b>Figura 30</b>
Borda	<b>OK</b>	<b>Figura 31</b>
Canto	<b>OK</b>	<b>Figura 32</b>

## 6 CONCLUSÕES

Com base nas análises apresentadas pode-se concluir que:

- As frequências naturais obtidas por meio de excitação dinâmica da estrutura são condizentes com sistema estrutural avaliado;
- Os modelos matemáticos representaram bem o comportamento dinâmico da laje de cobertura do Palácio das convenções, e as frequências naturais teóricas da estrutura são próximas às obtidas experimentalmente, indicando a sua integridade estrutural;
- Através da análise estática, e atendendo a normalização atual, verificou-se que a laje do Palácio das convenções está apta a receber sobrecargas até 4,0 kN/m<sup>2</sup>.
- No relatório RT-1246-AV-05 são apresentados os detalhes da inspeção visual na estrutura. Não foi observado indícios de colapso ou ruptura até o momento, entretanto medidas de correção e conservação das estruturas devem ser realizadas com maior brevidade, visando sanar deficiências construtivas da época de concepção e execução da estrutura, bem como sua compatibilização para atual normalização vigente.

Elaboração Rodrigo Lopes	Data 22/12/2011	RT-1246-MD-05-00	21
-----------------------------	--------------------	------------------	----

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bachmann, H. et al. (1995). *Vibration problems in structures: Practical guidelines*. Birckhäuser: Berlin. 234p.

DIN 4150 part 3 (1999): **Structural vibration - Effects of Vibration on Structures.**

NBR 6118 (2003): **Projeto de estruturas de concreto.**

Libânio M. Pinheiro (2006): **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios.**

Elaboração Rodrigo Lopes	Data 22/12/2011	RT-1246-MD-05-00	22
-----------------------------	--------------------	------------------	----

# ANEXO I

Elaboração Rodrigo Lopes	Data 22/12/2011	RT-1246-MD-05-00	i
-----------------------------	--------------------	------------------	---

## 1 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

As tabelas e imagens a seguir ilustram o procedimento de cálculo utilizado.

- VIGAS

As verificações das vigas são apresentadas na **Tabela 10** e **Tabela 11**. Ressalta-se que foram escolhidas as vigas que apresentaram os maiores momentos positivos, e que o valor de  $b_w$  foi definido a partir da colaboração da laje (viga "T").

**Tabela 10 – Verificação das vigas maiores (65 x 50 cm)**

VIGA MAIOR								
Momento (+)			Cortante					
Mg=	128,48	kN.m	Vg=	165,4	kN	Vc=	290,09	kN
$\gamma_g$ =	1,4		$\gamma_g$ =	1,4		Vsw=	198,55	kN
Mq=	161,222	kN.m	Vq=	183,6325	kN	fywd=	43,50	kN/cm <sup>2</sup>
$\gamma_q$ =	1,4		$\gamma_q$ =	1,4		asw=	0,08180	cm <sup>2</sup> /cm
Md=	40558,33	kN.cm	Vd=	488,65	kN	$\rho_{sw,min}$ =	0,088	%
$b_w$ =	110	cm	$b_w$ =	50	cm	$\rho_{sw}$ =	0,164	%
d=	62	cm	d=	62	cm			
kc=	10,43		fck=	30	Mpa			
$\beta_x$ =	0,09	d2	$\alpha_v$ =	0,88				
ks=	0,024		VRd2=	18414,00	kN			
As=	15,70	cm <sup>2</sup>	Vsd=	488,65	kN			

**Tabela 11 – Verificação das nervuras (55 x 15 cm)**

NERVURA								
Momento (+)			Cortante					
Mg=	52,955	kN.m	Vg=	47,16	kN	Vc=	290,09	kN
$\gamma_g$ =	1,4		$\gamma_g$ =	1,4		Vsw=	104,48	kN
Mq=	48,7841	kN.m	Vq=	234,6755	kN	fywd=	43,50	kN/cm <sup>2</sup>
$\gamma_q$ =	1,4		$\gamma_q$ =	1,4		asw=	0,05132	cm <sup>2</sup> /cm
Md=	14243,48	kN.cm	Vd=	394,57	kN	$\rho_{sw,min}$ =	0,088	%
$b_w$ =	125	cm	$b_w$ =	15	cm	$\rho_{sw}$ =	0,342	%
d=	52	cm	d=	52	cm			
kc=	23,73		fck=	30	Mpa			
$\beta_x$ =	0,04	d2	$\alpha_v$ =	0,88				
ks=	0,023		VRd2=	4633,20	kN			
As=	6,30	cm <sup>2</sup>	Vsd=	394,57	kN			

- LAJES

Para a verificação das lajes foi escolhida a laje que apresentou o maior valor de momento positivo (**Tabela 12**).

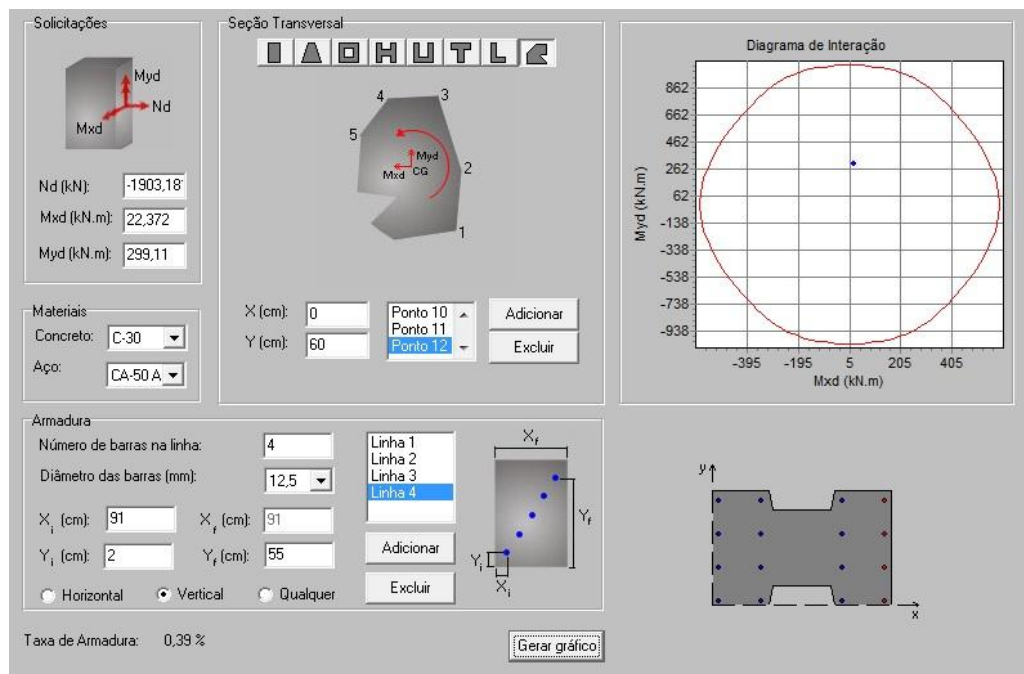
**Tabela 12 – Verificação da Laje**

Laje		
Momento (+)		
Mg=	0,382	kN.m
$\gamma_g$ =	1,4	
Mq=	1,1805	kN.m
$\gamma_q$ =	1,4	
Md=	218,75	kN.cm
bw=	100	cm
d=	5	cm
kc=	11,43	
$\beta_x$ =	0,11	d2
ks=	0,024	
As=	1,05	cm <sup>2</sup>

- PILARES

A verificação dos pilares foi realizada para 3 tipos de

- Pilar central (**Figura 30**):



**Figura 30 – Verificação do pilar central.**

- Pilar de borda (**Figura 31**):

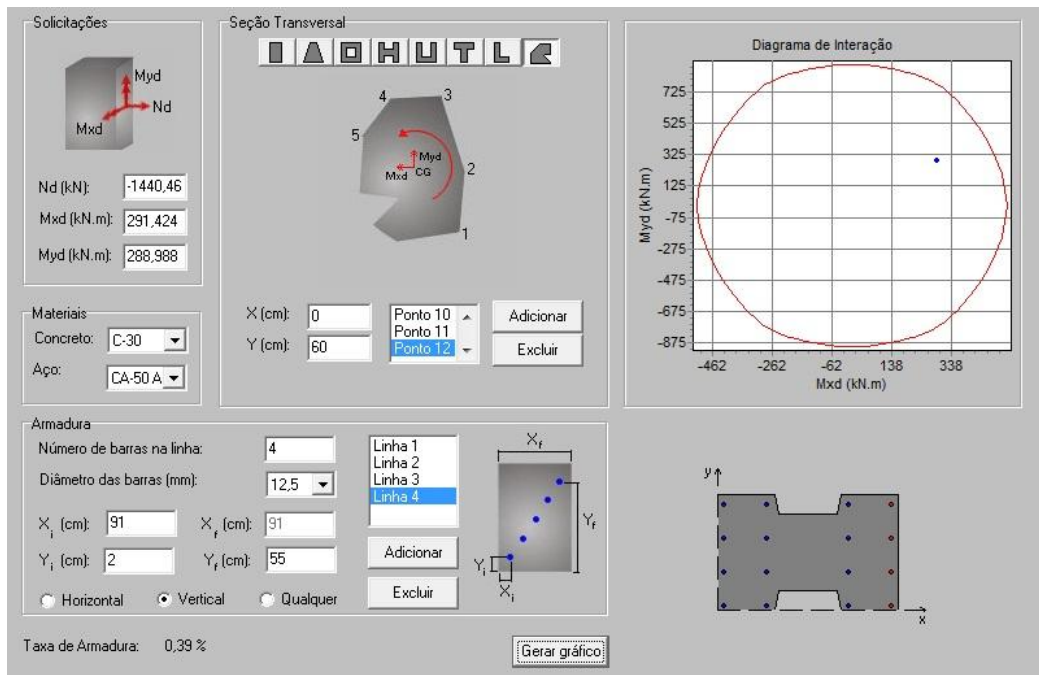


Figura 31 – Verificação do pilar de borda.

- Pilar de canto (Figura 32):

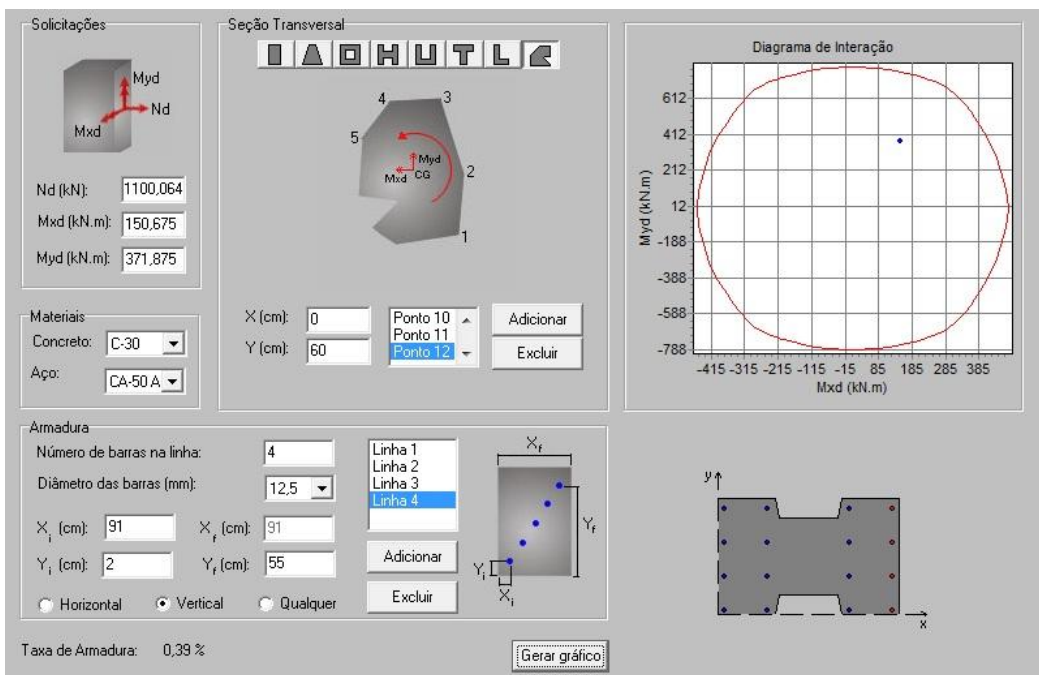


Figura 32 – Verificação do pilar de canto.