

DYNAMIC ANALYSIS OF THE BRASÍLIA ROAD PLATFORM THROUGH NUMERICAL SIMULATION AND MONITORING

Ronaldo O. de Almeida

Lenildo S. da Silva

ronaldo.almeida@novacap.gov.br

lenildo_s@hotmail.com

University of Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília, Brazil

Marco Aurélio S. Bessa

Maruska L. S. Holanda

Marianna C. Alvarenga

bessa.novacap@gmail.com

maruskalimaholanda@gmail.com

mariannaalvarenga15@gmail.com

University of Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília, Brazil

Abstract. Brasilia, the first urban ensemble of the 20th century to be recognized as a World Heritage by UNESCO, turns 60 years since your inauguration in 2020. Given this and considering that the buildings in Brazil usually have a minimum design life of 50 years (standard reference time), routine monitoring these structures is required to carry out preventive and corrective maintenance actions, as required by the Model Code fib 2010. The Plano Piloto Bus Terminal of Brasília is composed of Ground and Upper Platforms, two squares and an extensive slab-overhang, which holds stairs, elevators, snack bars, magazine stands, taxi stand, etc. The slab-overhang, target of the test, is formed by precast beams, placed next to each other, supported on frames of beams in prestressed concrete on 28 metallic pillars. From the monitoring of vibrations, through the use of four accelerometers, two inclinometers, and one temperature gauge, it was possible to obtain the natural response frequencies of the structure. With these results, the structural behavior was evaluated by the development of the numerical model based on the finite element method, using elements in frames and shells. From this assessment, it was concluded that, despite the need to repair the slab, so that its excessive deformation is corrected - and thus providing greater visual comfort to the users - the structural performance of the slab-overhang was satisfactory as for the natural vibration, allowing the normal use defined in design, with the guarantee of user safety.

Keywords: Dynamic analysis, Numerical simulation, Monitoring of structures, Structural assessment

1 Introdução

A Rodoviária do Plano Piloto, inaugurada em 12 de setembro de 1960, foi projetada por Lúcio Costa para ser o Marco Zero da Capital do Brasil, ponto de encontro entre o eixo residencial e o monumental. Ela é composta por: plataformas térrea e superior, duas praças e uma extensa marquise (lado norte), Figura 1.

A Plataforma Superior, que liga os lados Norte e Sul do Eixo Rodoviário, é um imenso estacionamento para veículos e calçadão para pedestres, unindo os Setores Culturais e os Setores de Diversões, Figura 2.



Figura 1. Localização da Rodoviária de Brasília e da marquise da Plataforma Superior: Wikimapia

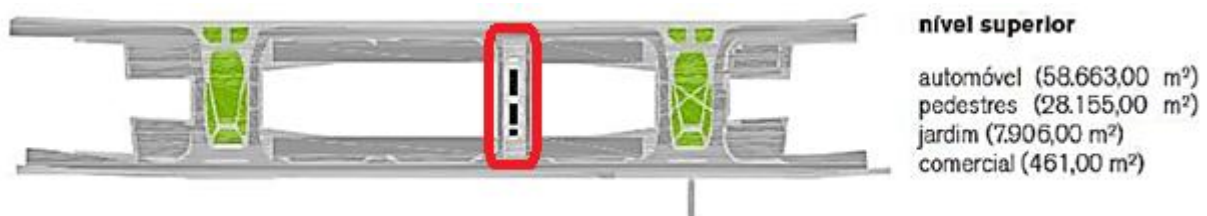


Figura 2. Localização da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília:
Autores

A marquise da plataforma superior abriga escadas, elevadores, lanchonetes, bancas de revistas, ponto de taxi, etc. e está situada entre duas travessias com semáforos, sendo passagem entre o Setor de Diversões Norte – SDN, incluindo Shopping Conjunto Nacional, e o Setor Cultural Norte – SCTN (Teatro Nacional) e por onde transitam milhares de pessoas diariamente, Figuras 3.



Figura 3. Vista panorâmica da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto: Autores

2 Sistema estrutural da marquise

2.1 Sistema estrutural

A estrutura da marquise é formada por lajes nervuradas pré-moldadas apoiadas em dentes Gerber, em 14 linhas de 2 pilares metálicos, totalizando 28 pilares, de seção 30x30cm e altura de 3m. Os pilares estão apoiados sobre a laje principal da plataforma rodoviária composta por segmentos celulares (caixão) apoiados sobre dentes Gerber e pilares, Figuras 4 e 5.

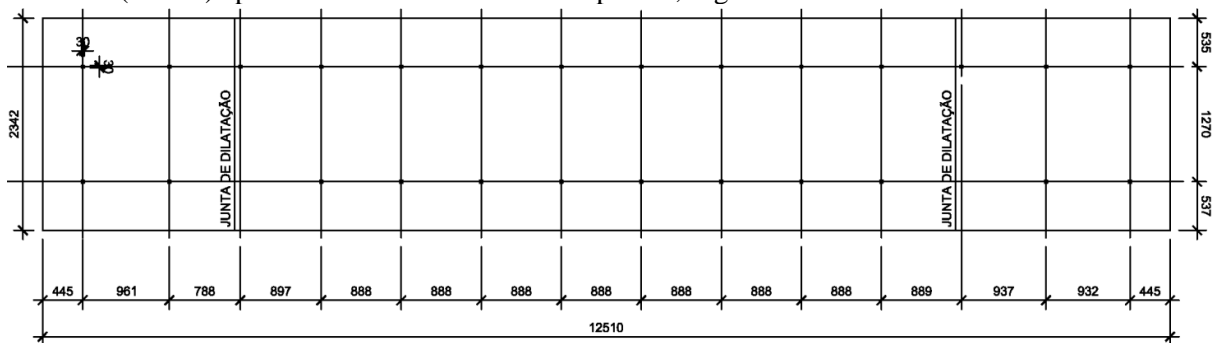


Figura 4. Planta baixa da marquise: NOVACAP

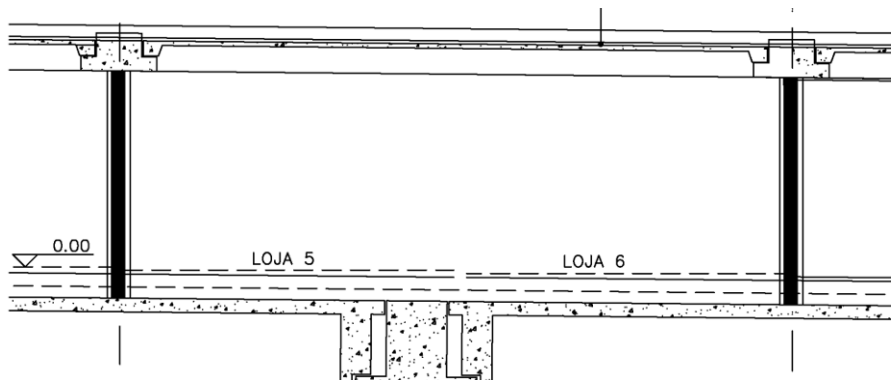


Figura 5. Corte longitudinal da marquise: NOVACAP

2.2 Aspectos de conservação

Nas Figuras 6 a 9 estão mostrados os principais aspectos encontrados na inspeção visual realizada na marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, com identificação dos elementos estruturais que a compõem.

Verificou-se que as placas de mármore que revestiam as fachadas da laje não existem mais. Que há deflexões nos balanços da laje, que há uma região da laje onde já houve a substituição das vigas em concreto armado por treliças metálicas.



Figura 6. Vista frontal da marquise: Autores



Figura 7. Detalhe de um dos vértices da marquise: Autores



Figura 8. Detalhe de um reparo feito na marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto com a substituição das vigas em concreto por treliças metálicas: Autores



Figura 9. Detalhe da viga protendida (dente Gerber) da marquise: Autores

3 Monitoração da marquise da plataforma superior da Rodoviária de Brasília

Com objetivo de avaliar o comportamento estrutural da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, foram realizadas monitorações ao longo de 2 dias (48 horas) da laje da marquise, com uso de quatro acelerômetros, dois inclinômetros e um medidor de temperatura. Os resultados estão apresentados a seguir.

3.1 Arranjo de instrumentação

Foi realizada a monitoração da estrutura da marquise por meio de seis arranjos distintos. Para efeito de análise optou-se por escolher o arranjo apresentado a seguir. Nesse arranjo, os sensores estão localizados no lado Oeste (Setor Cultural Norte) da marquise, Figura XX.

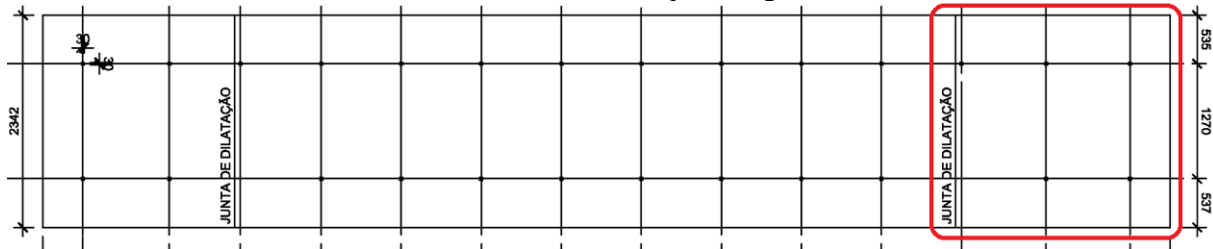


Figura 10. Localização dos sensores na marquise: Autores

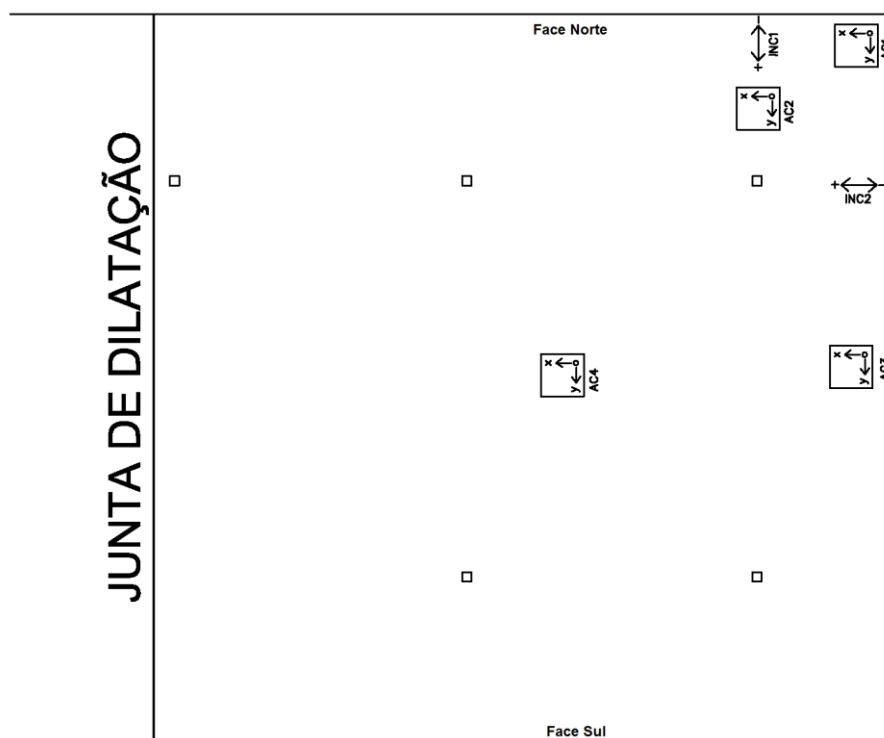


Figura 11. Detalhe da localização dos sensores na marquise: Autores

3.2 Resultados da monitoração

Verificou-se que o valores máximos pico a pico foram registrados pelo acelerômetro AC1 localizado no vértice da estrutura, 38,3 mg, 33,8 mg e 71,0 mg, nas direções longitudinal, transversal e vertical, respectivamente, conforme resultados apresentados nas Tabelas 1 a 4.

As variações dos inclinômetros ficaram em 0,1° e 0,3°, nas direções transversal e longitudinal, respectivamente. E a temperatura média registrada foi 28,5°C.

Tabela 1. Estatística dos sinais dos acelerômetros na direção longitudinal (X) do Arranjo A3

Arranjo A1	AC1-X (mg)	AC2-X (mg)	AC3-X (mg)	AC4-X (mg)
Máximo	16,0	-44,4	6,3	-20,7
Mínimo	-22,3	-52,1	-10,9	-28,5
Máx - Mín	38,3	7,6	17,2	7,9

Tabela 2. Estatística dos sinais dos acelerômetros na direção transversal (Y) do Arranjo A3

Arranjo A3	AC1-Y (mg)	AC2-Y (mg)	AC3-Y (mg)	AC4-Y (mg)
Máximo	-20,0	40,0	17,8	-9,4
Mínimo	-53,8	31,9	3,1	-18,8
Máx - Mín	33,8	8,1	14,7	9,4

Tabela 3. Estatística dos sinais dos acelerômetros na direção vertical (Z) do Arranjo A3

Arranjo A3	AC1-Z (mg)	AC2-Z (mg)	AC3-Z (mg)	AC4-Z (mg)
Máximo	1013,5	984,1	1032,0	1001,6
Mínimo	979,0	965,6	961,0	960,3
Máx - Mín	34,4	18,4	71,0	41,3

Tabela 4. Estatística dos sinais da temperatura ambiente e dos inclinômetros do Arranjo A3

Arranjo A3	Inc.1 (°)	Inc.2 (°)	Temp. Amb. (°C)
Máximo	1,5	-2,1	29,2
Mínimo	1,4	-2,4	27,7
Máx - Mín	0,1	0,3	1,5

3.3 Freqüências naturais de resposta

Os resultados dos cálculos para as freqüências naturais de resposta da estrutura, a partir da transformada de Fourier (FFT), estão apresentados nas Tabelas 5 a 7 e mostrados nas Figuras 13 a 15.

Tabela 5. Freqüências de resposta da estrutura, Arranjo A3, direção longitudinal (X)

Arranjo A3		Freqüência (Hz)					
Sensor	Direção	3,53	3,90	4,90	7,16	10,73	11,48
AC1-X	longitudinal		x		x		x
AC2-X			x		x		x
AC3-X		x		x	x	x	
AC4-X		x		x	x	x	

Tabela 6. Freqüências de resposta da estrutura, Arranjo A3, direção transversal (Y)

Arranjo A3		Freqüência (Hz)			
Sensor	Direção	3,90	4,80	6,55	11,40
AC1-Y	transversal	x	x	x	x
AC2-Y		x	x	x	x
AC3-Y		x	x	x	x
AC4-Y		x	x	x	x

Tabela 7. Frequências de resposta da estrutura, Arranjo A3, direção vertical (Z)

Arranjo A3		Frequência (Hz)						
Sensor	Direção	2,97	4,03	6,37	8,38	11,90	12,75	13,70
AC1-Z	vertical	x	x	x	x			
AC2-Z		x	x	x	x	x		
AC3-Z		x	x	x	x			
AC4-Z		x	x	x	x	x	x	x

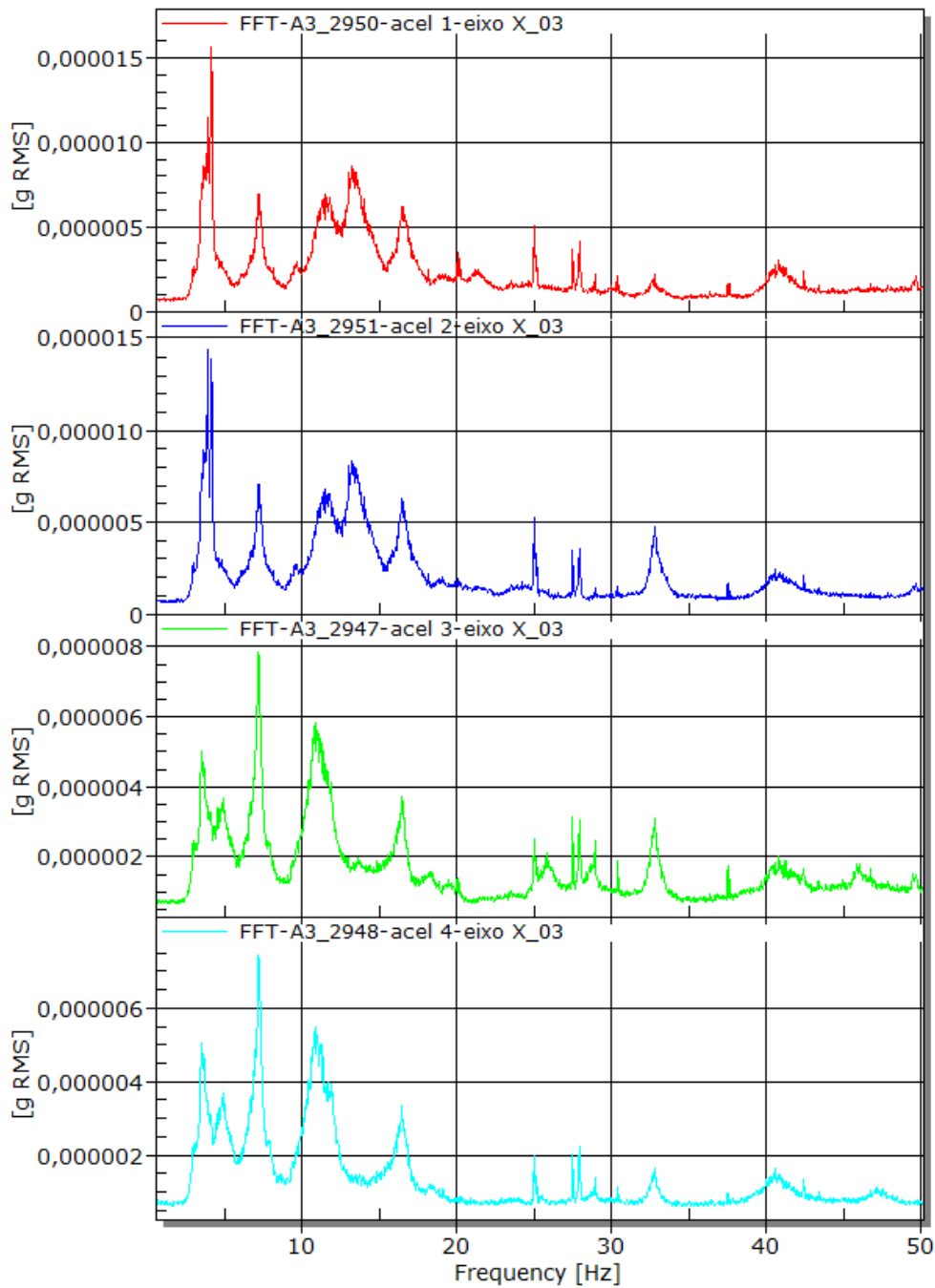


Figura 12. Frequências naturais de resposta obtidas por FFT a partir dos acelerômetros da direção longitudinal (X): Autores

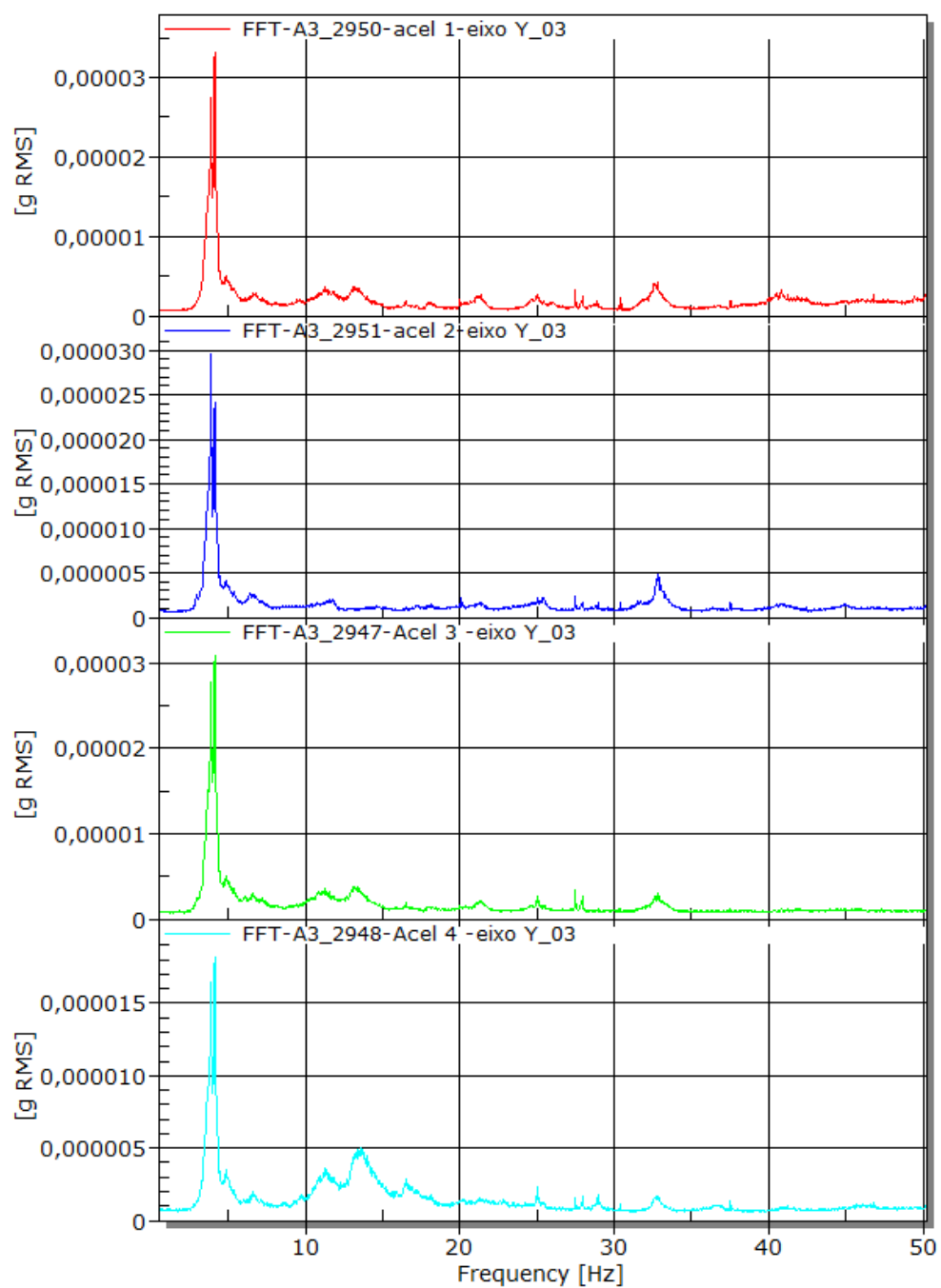


Figura 13. Frequências naturais de resposta obtidas por FFT a partir dos acelerômetros da direção transversal (Y): Autores

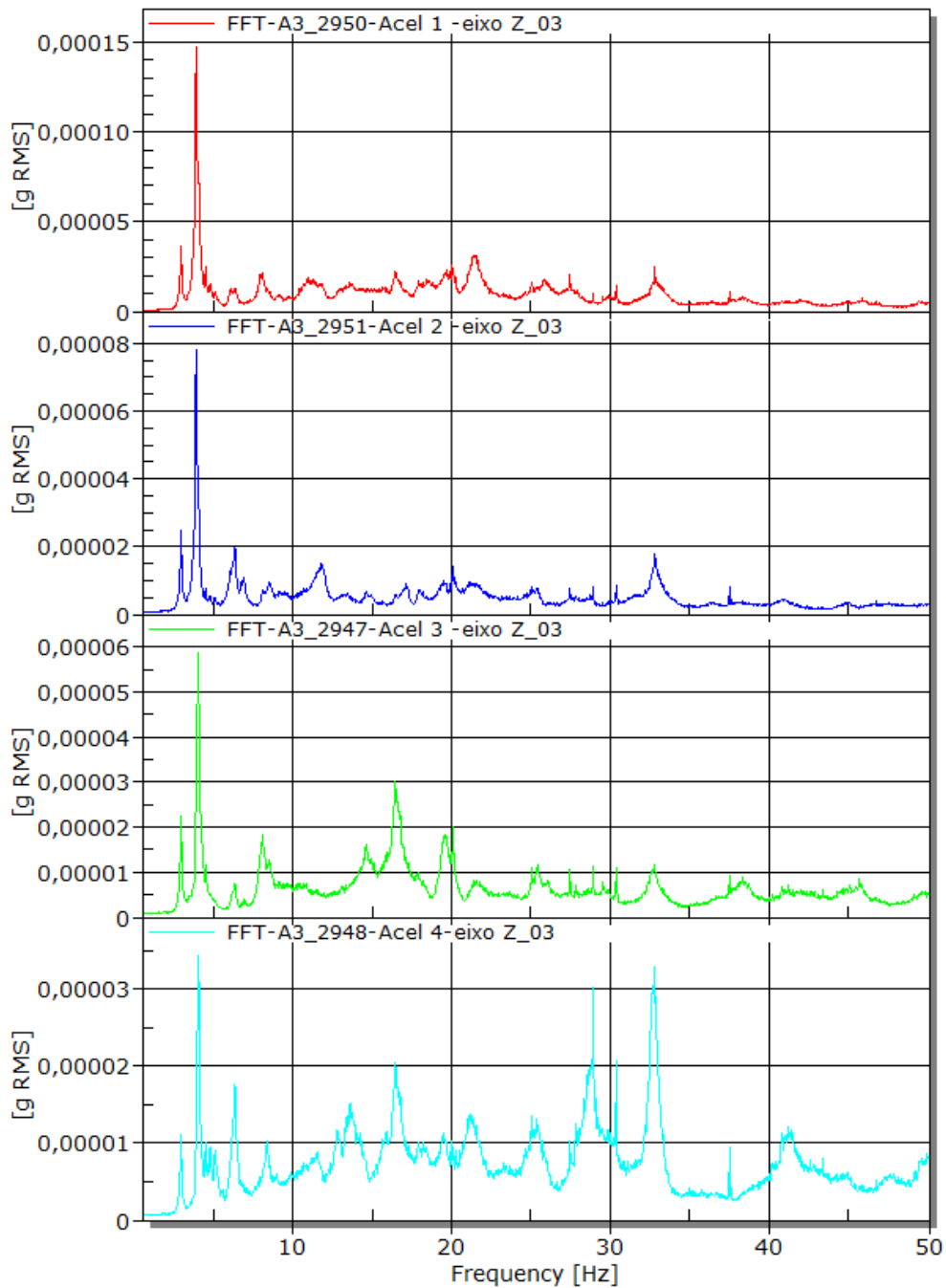


Figura 14. Frequências naturais de resposta obtidas por FFT a partir dos acelerômetros da direção vertical (Z): Autores

4 Modelo numérico da marquise da plataforma superior da Rodoviária de Brasília

4.1 Características do modelo numérico

O comportamento estrutural da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto foi avaliado a partir do desenvolvimento de um modelo numérico – denominado de modelo espacial – baseado no método dos elementos finitos, com a utilização de elementos em barras (frame) e cascas (shell) no ambiente do programa SAP2000 v.17, Figuras 15 a 20.

A laje nervurada pré-moldada foi representada por elementos tipo casca e barra. Os pilares e as

vigas foram representados por elementos tipo barra. Todas as dimensões foram extraídas dos projetos *as built* fornecidos pela empresa NOVACAP.

A estrutura foi considerada simplesmente apoiada em razão de ela estar apoiada sobre a estrutura principal da Plataforma Rodoviária do Plano Piloto.

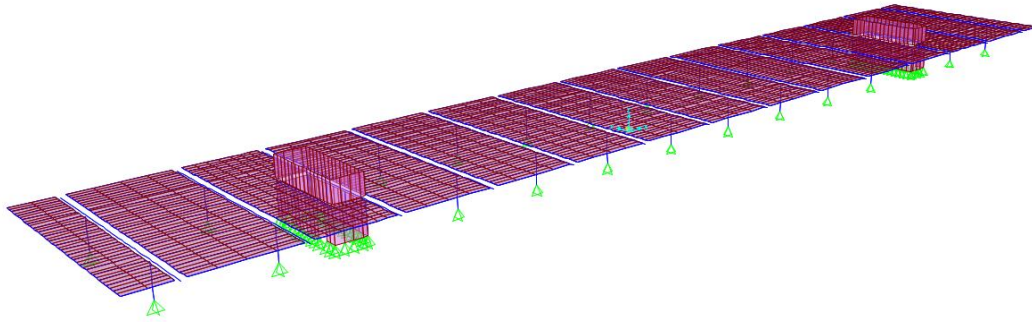


Figura 15. Modelo numérico espacial da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, vista em perspectiva: Autores

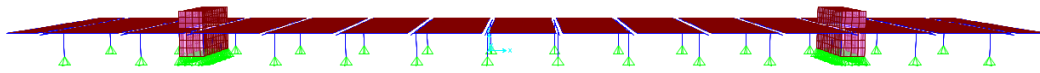


Figura 16. Modelo numérico espacial da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, vista frontal em perspectiva: Autores

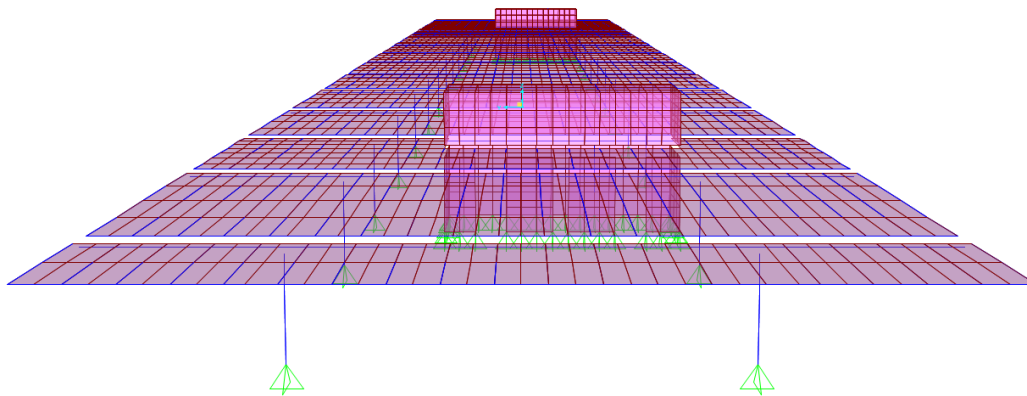


Figura 17. Modelo numérico espacial da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, vista lateral em perspectiva: Autores

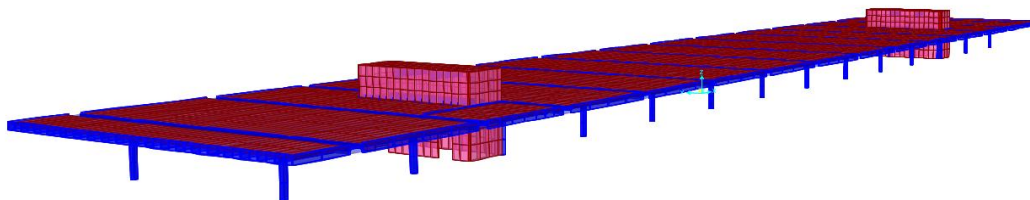


Figura 18. Modelo numérico espacial da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, vista em perspectiva extrudada: Autores

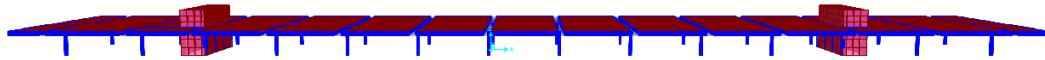


Figura 19. Modelo numérico espacial da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, vista frontal em perspectiva extrudada: Autores

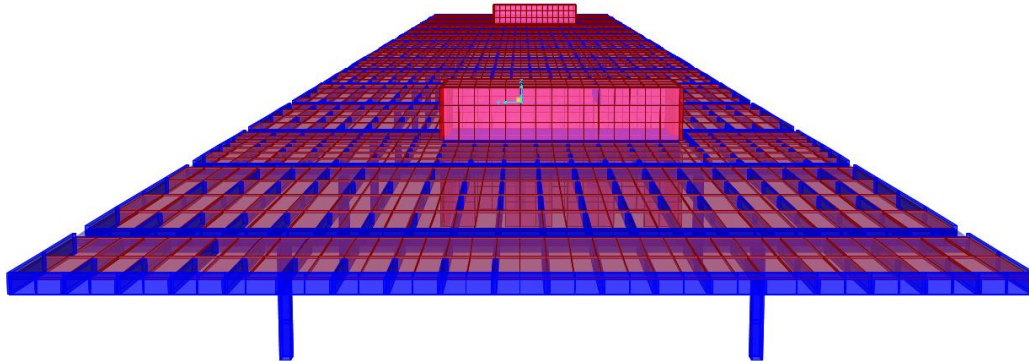


Figura 20. Modelo numérico espacial da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, vista lateral em perspectiva extrudada: Autores

5 Análise dos resultados

As principais frequências naturais de resposta e respectivos modos de vibração da estrutura da marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, determinados a partir da análise do modelo numérico no ambiente do programa computacional SAP2000, estão mostrados nas Figuras 21 a 26, a seguir.

Tabela 8. Principais frequências naturais de resposta da estrutura da marquise determinadas pelo modelo numérico

Found mode	1 of	12:	EV= 3.3935247E+02,	f=	2.931876,	T=	0.341079
Found mode	2 of	12:	EV= 3.6276804E+02,	f=	3.031340,	T=	0.329887
Found mode	3 of	12:	EV= 3.6341936E+02,	f=	3.034060,	T=	0.329591
Found mode	4 of	12:	EV= 3.6830997E+02,	f=	3.054407,	T=	0.327396
Found mode	5 of	12:	EV= 4.2789646E+02,	f=	3.292225,	T=	0.303746
Found mode	6 of	12:	EV= 4.9462835E+02,	f=	3.539644,	T=	0.282514
Found mode	7 of	12:	EV= 5.2463770E+02,	f=	3.645439,	T=	0.274315
Found mode	8 of	12:	EV= 5.4852343E+02,	f=	3.727501,	T=	0.268276
Found mode	9 of	12:	EV= 5.5428967E+02,	f=	3.747042,	T=	0.266877
Found mode	10 of	12:	EV= 5.6155874E+02,	f=	3.771531,	T=	0.265144
Found mode	11 of	12:	EV= 6.0225970E+02,	f=	3.905818,	T=	0.256028
Found mode	12 of	12:	EV= 6.2678345E+02,	f=	3.984546,	T=	0.250970

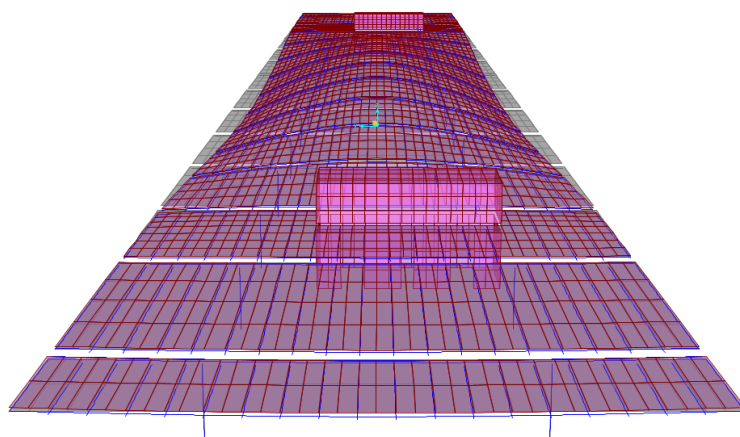


Figura 21. 1º modo de vibração modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 2,93\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

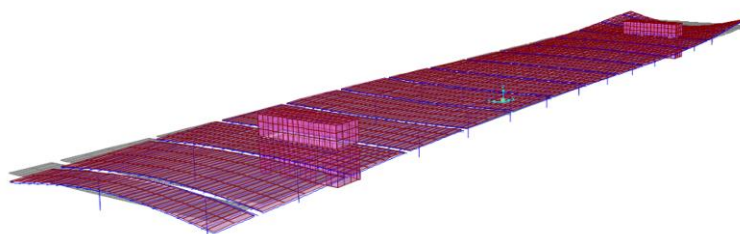


Figura 22. 2º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,03\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

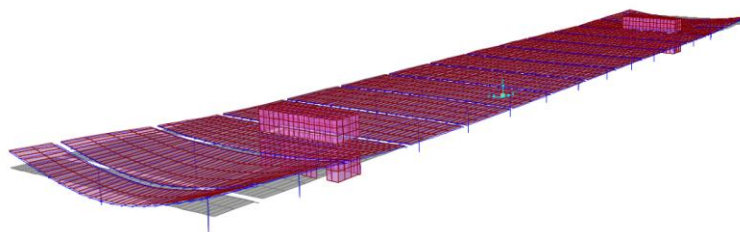


Figura 23. 3º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,03\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

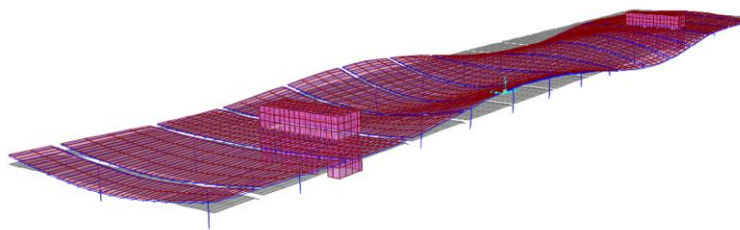


Figura 24. 4º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,05\text{Hz}$, flexão da laje no plano XZ: Autores

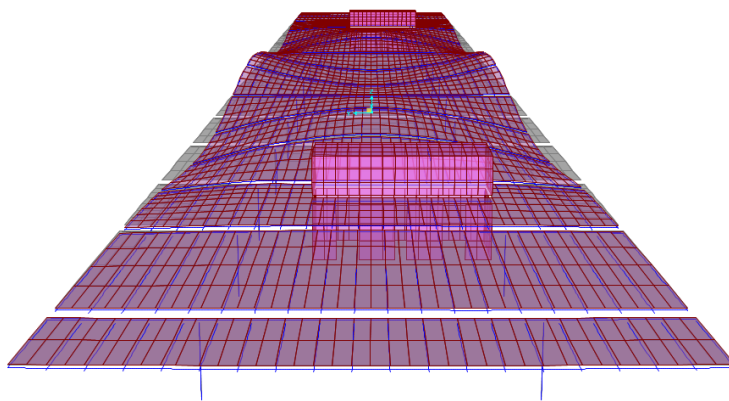


Figura 25. 5º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,29\text{Hz}$, flexão da laje no plano XZ: Autores

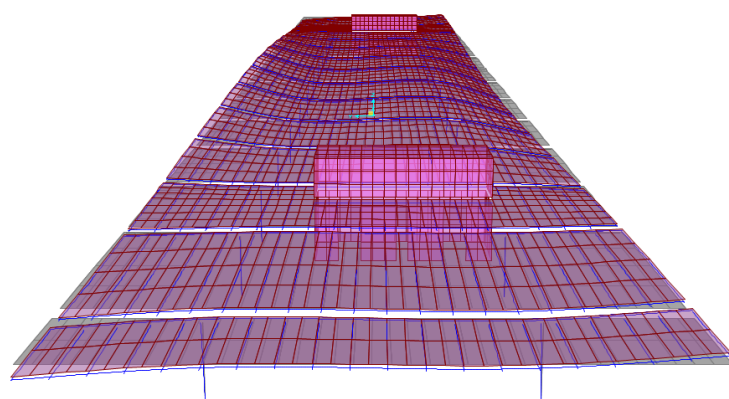


Figura 26. 6º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,54\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ

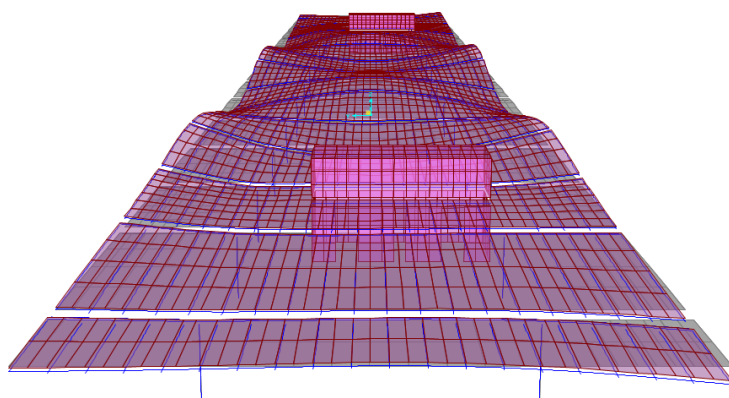


Figura 27. 7º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,65\text{Hz}$, flexão da laje no plano XYZ: Autores

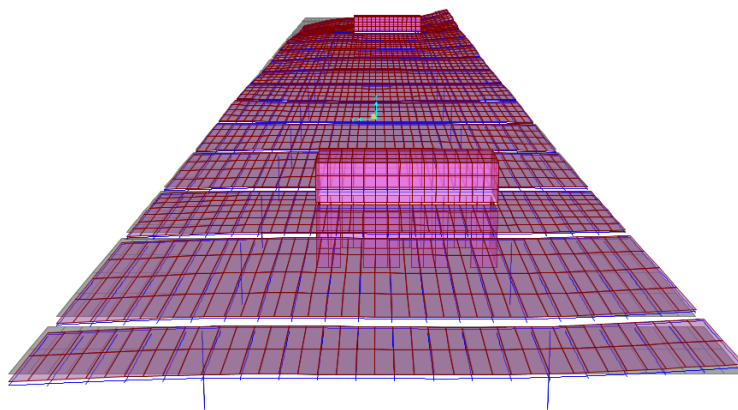


Figura 28. 8º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,73\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

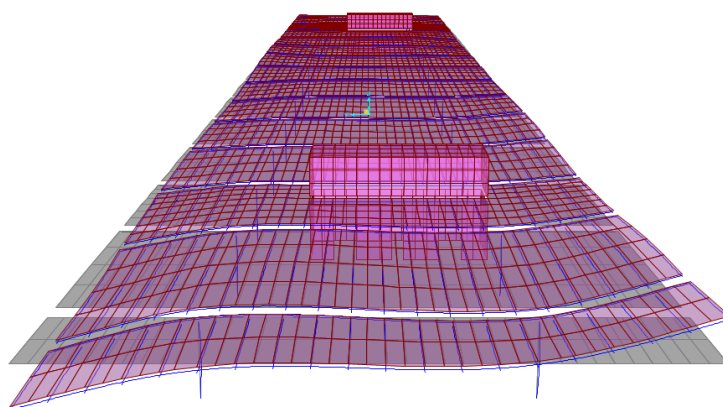


Figura 29. 9º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,75\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

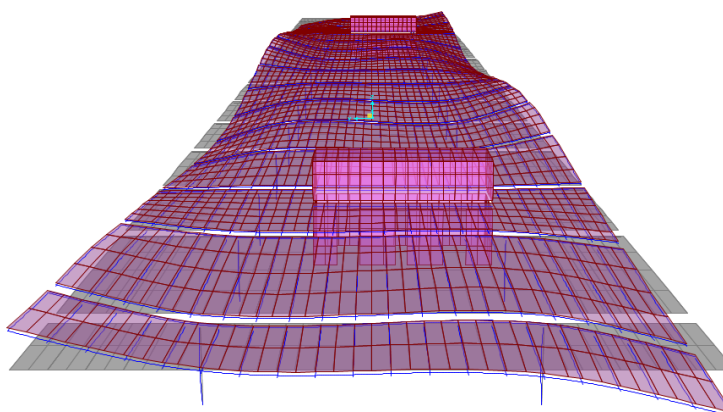


Figura 30. 10º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,77\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

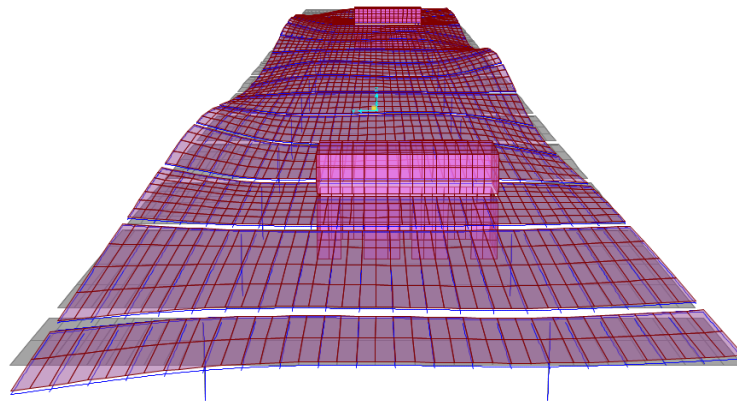


Figura 31. 11º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,91\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

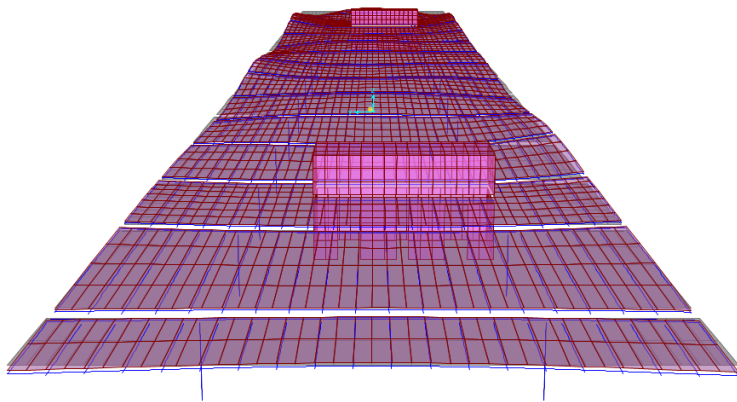


Figura 32. 12º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Marquise, $f = 3,98\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ: Autores

6 Conclusões

Verificou-se que as frequências de resposta da estrutura obtidas experimentalmente foram bastante aderentes aos calculados pelo modelo numérico.

Concluiu-se da avaliação do desempenho estrutural da marquise da plataforma superior da Rodoviária do Plano Piloto que as respostas estruturais foram satisfatórias quanto à vibração ambiente, habilitando-a, naquele momento, para sua utilização normal para qual foi projetada, com garantia da segurança dos usuários.

No entanto, verificou-se a necessidade de se realizar uma recuperação da laje visando corrigir a deformação excessiva, dando mais conforto visual aos usuários que por ali transitam, além de uma reforma completa na fachada.

Ressalta-se que este estudo foi realizado em 2016. De lá pra cá, sem a realização dos devidos serviços de manutenção, a estrutura vem se degradando.

Hoje, o complexo da Rodoviária de Brasília passa por uma reforma geral de suas estruturas, inclusive as do objeto estudado neste artigo.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio da Diretoria de Edificações da Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil – NOVACAP, que nos permitiu que apresentássemos e divulgássemos este estudo.

Referências

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 14931 (2003): Execução de estruturas de concreto - Procedimento – Rio de Janeiro;
- [2] CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph - Dynamics of Structures - McGraw-Hill International Editions - Estados Unidos, 1993.
- [3] Fédération Internationale du Béton (fib), Model Code 2010 – final draft, vols. 1 e 2, fédéation internationale du béton, Bulletins 65 e 66, Lausanne, Switzerland; 2012. p. 350 e p. 370.