



ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA RECUPERAÇÃO/REFORÇO ESTRUTURAL DAS LAJES TIPO “CAIXÃO PERDIDO” DO MUSEU DE ARTE DE BRASÍLIA – MAB

Marco Aurélio de Souza Bessa

bessamarco@yahoo.com.br

FATECS, Faculdade de Tecnologia - Centro Universitário de Brasília - UNICEUB

Lenildo Santos da Silva

Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

lenildo_s@hotmail.com

leinojosa@unb.br

Universidade de Brasília – UNB, Faculdade de Tecnologia, Dep. de Eng. Civil

Márcio Augusto Roma Buzar

marcio.buzar@gmail.com

Universidade de Brasília – UNB, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, PPG - FAU

Carlos Feijão

Eder Ribeiro

chlfeijao@gmail.com

ederffribeiro@gmail.com

NOVACAP, Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil , Brasília, Brasil

Resumo. *O presente trabalho apresenta a análise estrutural do Museu de Arte de Brasília. Esta edificação está inserida no conjunto urbano tombado pela UNESCO, a edificação é um representante da arquitetura moderna do período pioneiro da construção da capital do Brasil, em perfeita harmonia com a escala urbana pretendida por Lucio Costa, para a região à beira do Lago Paranoá, na qual se situa. A edificação foi convertida em museu em 1985. Em vistorias ao edifício constatou-se diversas patologias causadas por falta de manutenção e abandono. Foi elaborado um estudo de recuperação e reforço estrutural das lajes tipo Caixaão Perdido danificadas e adaptações estruturais baseadas nas indicações de uma equipe de Arquitetos e do Corpo de Bombeiros do Distrito Federal, com análises numéricas da edificação, visando à verificação dos deslocamentos, deformações e os esforços desenvolvidos pela estrutura,*

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

observando-se os critérios de estados limites de utilização e último da norma brasileira de Concreto Armado NBR 6118. Foram realizadas análises de instabilidade elástica e instabilidade inelástica da estrutura tridimensional para verificar o fator de carga de colapso, empregando-se o modelo de análise de Rankine-Marchant, com o objetivo de identificar os modos principais de instabilidade e capacidade portante da estrutura.

Palavras-chave: Fator de Carga de Colapso; Estrutura de Concreto-Armado; Vistoria Técnica; Instabilidade Elástica

INTRODUÇÃO

Marco da arquitetura e urbanismo modernos, Brasília teve, em 7 de dezembro de 1987, seu projeto urbanístico reconhecido pela UNESCO, sendo a primeira obra do século XX a ser inserida no rol do “Patrimônio Cultural da Humanidade”. Inserido no contexto da “Escala Bucólica”, definida por Lúcio Costa em seu Relatório do Plano Piloto, conforme CODEPLAN (1991), o edifício do Museu de Arte de Brasília, localizado no Setor de Hotéis de Turismo Norte, faz parte da Área de Recreação Pública da Concha Acústica, importante espaço urbano de lazer e recreação às margens do Lago Paranoá. Sua edificação de traços elegantes e simples, segue os preceitos da arquitetura modernista do período pioneiro da capital do Brasil, estando em perfeita harmonia com as premissas da escala urbana na qual está inserida. O Edifício representa, desta forma, relevante marco de um período histórico, artístico e cultural à ser preservado.

O edifício foi construído em 1960, pela NOVACAP – Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil - para servir de sede para as Forças Armadas e no final dos anos 70 passou a abrigar o “Casarão do Samba” e, somente, em 1985 passa a funcionar oficialmente como Museu, subordinado à Secretaria de Cultura do Distrito Federal. No final dos anos 90 uma vistoria realizada concluiu que, embora em situação de habitabilidade, as condições da edificação seriam impróprias para a guarda e exposição das obras. O espaço está fechado desde 2007 e em 2016 foi elaborado um projeto de reforma da Área de Recreação Pública da Concha Acústica incluindo esta edificação de aproximadamente 5.200,00m² (Fig. 1).

Para avaliação das condições da estrutura, foram realizadas vistorias na edificação e análise das patologias presentes em lajes, pilares e vedações. Foram constatadas diversas patologias causadas por falta de manutenção e abandono. Um obstáculo enfrentado neste estudo foi a carência de projetos estruturais da edificação original, assim como quaisquer documentações que pudessem colaborar com uma melhor leitura do sistema estrutural e demais disciplinas.



Figura 1. Museu de Arte de Brasília, faz parte de importante espaço urbano de lazer e recreação às margens do Lago Paranoá (Fonte: Google imagens)

1 METODOLOGIA

Pelo fato da edificação estar desocupada a quase uma década, foi estabelecido um planejamento visando superar o vácuo de informações e dados projetuais de mais de 50 anos do edifício, assim como, levantar o histórico de intervenções que possam ter contribuído, tanto na manutenção, como no deterioramento dos elementos estruturais, obtendo o maior número de informações que junto com vistoria, elencaria os principais problemas a serem corrigidos e suas patologias.

Inicialmente, portanto, se promoveu uma anamnese com os antigos gestores do museu, visando a aquisição de um histórico mais detalhado da ocupação do edifício, os principais problemas relatados e intervenções realizadas. Paralelamente, realizou-se uma inspeção detalhada no local, avaliando as condições estruturais de toda a edificação, apontando os principais problemas e patologias encontradas de forma sintetizada, para, em uma segunda etapa, elaborar análise numérica da estrutura do edifício, visando analisar a estabilidade da mesma.

1.1 Anamnese e Histórico

Em 2007 o museu foi interditado por recomendação do Ministério Público do Distrito Federal, que considerou as instalações um risco para o acervo, em virtude de alagamentos constantes, resultantes de falhas de drenagem e impermeabilização, ausência de condicionamento térmico e a total falta de um sistema de proteção contra incêndio. Em 2013 foi realizada uma concorrência que resultou na contratação de empresa que realizaria as reformas nas instalações do museu. Contudo, esta empreitada foi paralisada após alguns meses. No escopo desta reforma incluía, dentre outros serviços, os reparos na manta de impermeabilização da cobertura. O reparo iniciou-se com a remoção da manta danificada, porém, a obra foi paralisada sem a conclusão deste serviço, agravando ainda mais os problemas de infiltração que haviam se iniciado.

1.2 Inspeção no Local

Após avaliação visual, constatou-se que trata-se de edificação em estrutura de concreto armado, com fechamentos em alvenaria, painéis de elementos vazados e esquadrias. O prédio possui 3 pavimentos: subsolo, térreo livre em pilotis e um primeiro pavimento onde será o futuro salão de exposições, conforme pode-se observar na Fig. 2.

A concepção estrutural dos pavimentos é de lajes nervuradas, do tipo “caixão perdido”. Há poucas vigas aparentes, prevalecendo as lajes de grandes vãos e pilares.

As formas de madeira usadas na sua execução permaneceram em seu interior o que, com as infiltrações crônicas resultantes da falta de impermeabilização, propiciou o apodrecimento das mesmas e consequente proliferação de fungos e bactérias nocivas ao concreto, como demonstrado na Fig. 3.



Figura 2. Situação atual do Museu de Arte de Brasília (Fonte: Relatório de Vistoria 013-2016-SEINST)

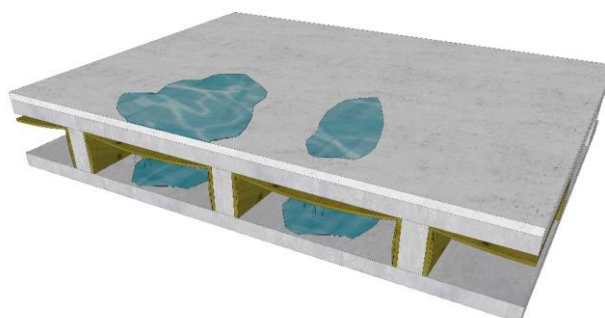


Figura 3. Apodrecimento de formas acentuada pela infiltração de águas pluviais

Segundo Verçosa (1991) a umidade não é apenas uma causa das patologias, ela age também como um meio necessário para que grande parte das patologias em construções ocorra. Ela é o fator essencial para o aparecimento de eflorescências, ferrugens, mofo, bolores, perda de pinturas, de rebocos e até a causa de acidentes estruturais.



Figura 4. Patologias encontradas na edificação. a. Eflorescências visíveis nas lajes; b e c. Fissuras na superfície inferior das lajes; d. Acumulo de umidade e lodo devido às infiltrações. (Fonte: Relatório de Vistoria 013-2016-SEINST)

O abandono e a interrupção dos serviços de impermeabilização, que deixaram a cobertura sem proteção, agravaram os problemas de infiltração resultando em danos, tais como: instalações de drenagem danificadas, furos na laje, furos na cortina externa, desagregação de concreto junto as instalações de água pluvial, ferragens aparentes e perda de material na base dos pilares. Dentre os principais danos às lajes podemos citar: eflorescências, fissuração excessiva, manchas de corrosão, infiltrações e esfoliações, conforme verificado na Fig. 4.

1.3 Mapeamento dos danos

Após a inspeção do local, foi elaborado um mapeamento de danos da edificação, que se trata de uma representação grafica, sinoptica, onde são ilustradas e discriminadas todas as manifestações de deterioração da edificação. O mapeamento de danos visa sintetizar o resultado das investigações sobre as alterações estruturais e funcionais nos componentes estruturais. As localizações dos danos na estrutura são observadas nas Fig. 5 a 7. Conforme podemos observar na Tabela 1, os danos observados, estão em sua maioria localizados nas lajes da edificação e seu agravamento ocorre nas situações de maior exposição, conforme subimos os andares. Para melhor análise das informações e dados obtidos, convencionou-se a classificação das manifestações em três categorias de danos: nível baixo, nível médio e nível alto, conforme podemos observar na Tabela 1.

Tabela 1. Mapeamento de danos da Edificação (Fonte: adaptado de Relatório de Vistoria 013-2016-SEINST)

Danos de nível baixo	Danos de nível médio	Danos de nível alto
Início de eflorescências	Eflorescências de pequena extensão	Eflorescências de grande extensão
Fissuras com aberturas menores que aquelas estabelecidas em norma.	Fissuras com aberturas maiores, em até 40 %, que aquelas estabelecidas em norma.	Fissuras excessivas e não estabilizadas
Manchas de pequena extensão.	Manchas de grande extensão e coloração clara.	Manchas de grande extensão e coloração escura.
Indícios de umidade.	Pontos com umidade excessiva.	Pontos com gotejamento de água.
Pequenas escamações.	Escamações de pequena extensão.	Escamações de grande extensão.



Figura 5. Mapeamento de danos na laje do Edifício do MAB. (Fonte: Relatório de Vistoria 013-2016-SEINST)

2 ANÁLISE NUMÉRICA

A concepção estrutural do Museu de Arte de Brasília – MAB foi realizado de forma simples e bastante usual para época de construção, que é associação de pórticos planos e lajes nervuradas. Os pórticos planos são compostos por 05 pilares e uma viga principal unindo estes pilares, as lajes nervuradas são unidirecionais perpendiculares as vigas principais. A Fig. 6 apresenta uma planta de forma mostrando a concepção estrutural do edifício já com as modificações que serão implantadas.

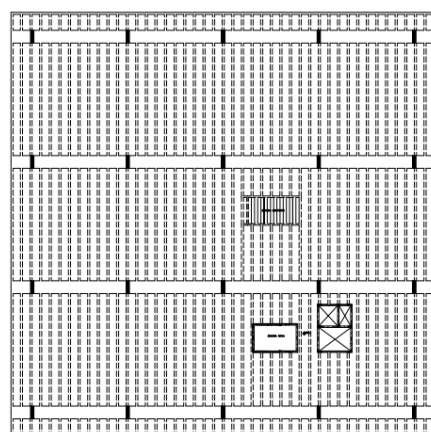


Figura 6. Planta de forma do 1º pavimento MAB

A análise numérica da estrutura foi realizada utilizando-se o software SAP2000-19, com elementos finitos tipo Shell e Frame. Foram realizadas análises elásticas, modal e instabilidade elástica. A escolha de elemento Shell se justifica pelo fato de existir uma laje cuja a estrutura tem a configuração de caixão perdido, sendo assim a modelagem pode representar de forma mais real o funcionamento estrutural já que desta maneira pode-se facilmente modelar as mesas inferiores e superiores das nervuras da laje. Para modelagem da estrutura foi necessário um total de 57676 elementos Shell (lajes e vigas) com dimensão média de 40 cm x 50 cm e 1538 elementos frames (pilares e escoramento) de acordo com as Fig. 7 e Fig. 8, os elementos foram categorizados em Pórtico Principal, Laje da Cobertura, Laje de Piso, Escadas e Elevadores.

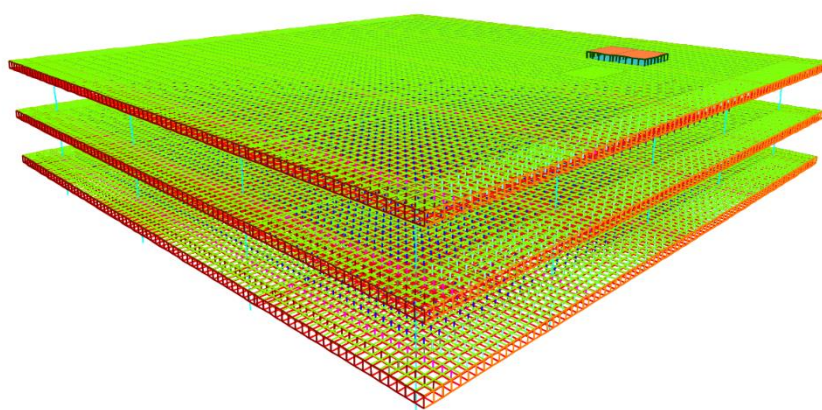


Figura 7. Discretização com 57676 elementos Shell e 1538 elementos Frames

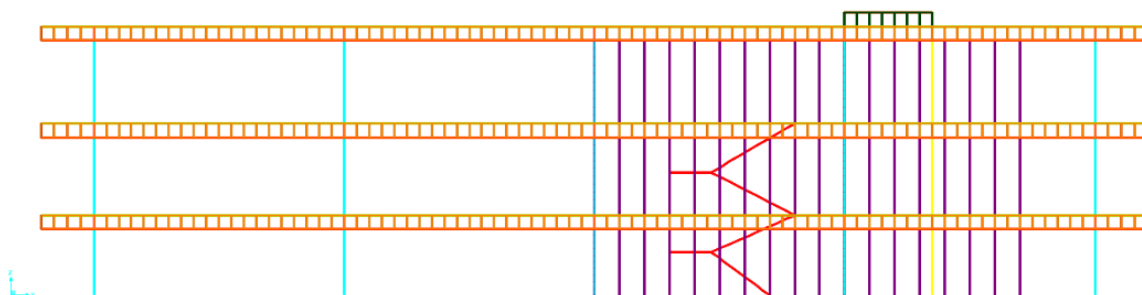


Figura 8. Vista no plano ZX da modelagem estrutural

Com objetivo de melhor representar os efeitos de construção e adaptação da estrutura para atender as exigências do corpo de bombeiros e as legislações do código de obras do Distrito Federal foi realizada uma análise modelando a estrutura com o recurso de “Nonlinear Stage Construction” disponível no Sap2000-V19. As etapas de construção estão listadas a seguir:

Etapas 1:

- a) Lançamento de todos elementos do térreo;
- b) Aplicação das ações permanentes de serviço na laje de cobertura do térreo;
- c) Lançamento dos elementos do 1º pav;
- d) Aplicação das ações permanentes na laje de cobertura do 1º pav;
- e) Lançamento dos elementos do 2º pav;
- f) Aplicação das ações permanentes na laje de cobertura do 2º pav;
- g) Aplicação das ações variáveis em todas as lajes de cobertura do 2º pav;

Etapas 2

- h) Retirada das ações variáveis de serviço de todas as lajes;
- i) Aplicação do escoramento nas lajes na região da demolição (térreo, 1º pav e 2º pav);

Etapas 3

- j) Retirada (demolição) laje superior da nervura (térreo, 1º pav e 2º pav);
- k) Retirada (demolição) da laje inferior da nervura (térreo, 1º pav e 2º pav);
- l) Retirada (demolição) da nervura (térreo, 1º pav e 2º pav);

Etapas 4

- m) Execução das vigas de suporte da escada no térreo;
- n) Execução dos pilares das escada e elevador;
- o) Execução das vigas de reforço que suportam as nervuras;

Etapas 5

- p) Execução das estruturas das escadas;
- q) Execução da laje de cobertura do elevador;

Etapas 6

- r) Retirada do escoramento;

Etapas 7

- s) Aplicação das ações variáveis;
- t) Análise não linear de buckling;
- u) Análise Modal da estrutura;

Para a estrutura em tela serão realizadas análise de vibrações livres e análise de instabilidade elástica (buckling) para três situações distintas:

- a) Estrutura original, sem abertura da laje para escada e elevador;
- b) Estrutura com execução de escadas e elevador;
- c) Estrutura com execução de escadas e elevador e retirada da mesa inferior das lajes nervuradas;

Analisou-se ainda a estrutura com o software TQS, para verificação dos estados limites de serviço e últimos. A Fig. 9 apresenta a modelagem da estrutura realizada pelo TQS.

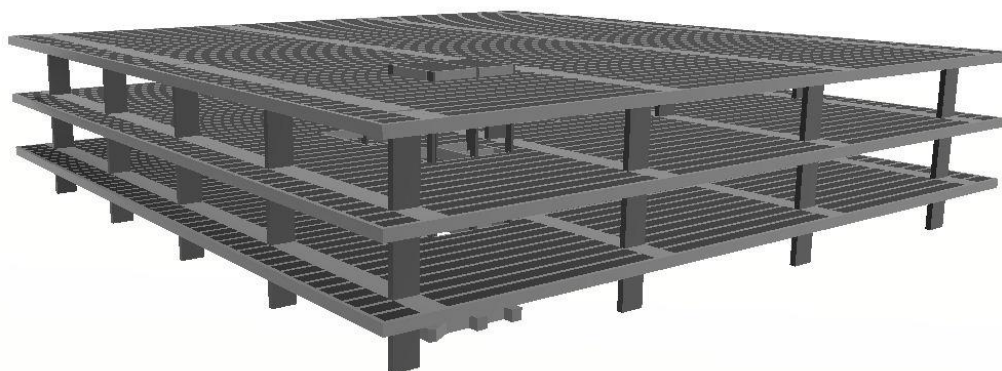


Figura 9. Modelagem estrutural utilizando o software TQS

2.1 Análise limite em serviço

Apresentam-se, na Fig. 10, os deslocamentos das lajes levando em conta a retirada da mesa inferior das lajes nervuradas, condição proposta pelos arquitetos para adequar a edificação para o uso específico como museu, evitando contaminação das peças em exposição, acervo ou manutenção.

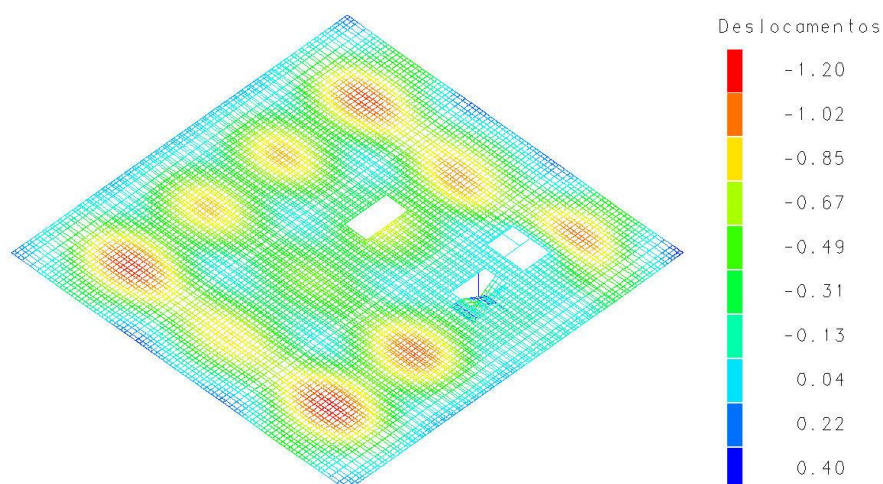


Figura 10. Flechas nas Lajes utilizando o software TQS

Verifica-se pelas isolinhas e isovalores apresentados na figura acima que os valores das flechas máximas da laje estão nos painéis que estão nos cantos superior e inferior do lado esquerdo da edificação, onde o maior valor encontrado foi de 1,23cm imediato e 3,02 cm no infinito, considerando como carregamento a combinação quase-permanente. Na região onde ocorreu o reforço da estrutural com a inclusão da escada e do elevador os valores foram mínimos (inferiores a 0,15 cm). A NBR 6118-2014 Tabela 13.3 preconiza que o deslocamento vertical máximo δ para esse tipo de estrutura de ver ser de:

$$\delta = \frac{l}{350} \quad (1)$$

Onde:

l = Vão teórico entre apoios na direção considerada

O vão entre os apoios das nervuras é de 1180 cm o que teoricamente poderíamos chegar a uma flecha admissível, levando-se em conta a fluência e fissuração, de:

$$\delta_{max} = \frac{1180}{350} = 3,37cm \quad (2)$$

O valor da flecha admissível é superior ao encontrado no modelo teórico, mas devido a questões construtivas limita-se o deslocamento das vigas e lajes a 1cm para evitar fissuras em paredes e pisos ou mesmo o deslocamento de pisos cerâmicos devido as forças de tração e/ou compressão que surgirão ao longo do tempo na interface piso/estrutura.

A estrutura do Mab foi construída em 1960 as deformações devido a fluência e a fissuração já estão praticamente estabilizadas, então podemos acreditar que apesar do deslocamento do modelo desenvolvido no TQS ser superior a 1cm, não ocorrerá problemas e podem ser aceitos como valores admissíveis para utilização da estrutura.

2.2 Análise de Vibrações Livres (Análise Modal)

Considera-se na análise de vibrações livres não amortecidas um modelo no qual utiliza-se as matrizes de rigidez e de massa, realizada automaticamente pelo Software SAP2000-19, conforme apresentado na equação de equilíbrio dinâmico da expressão 3.

$$\mathbf{K}\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{M}\ddot{\bar{\mathbf{u}}} = 0 \quad (3)$$

onde $\mathbf{K}$ é a matriz de rigidez, $\mathbf{M}$ a matriz de massa, $\bar{\mathbf{u}}$ o vetor de deslocamentos e $\ddot{\bar{\mathbf{u}}}$ o vetor de acelerações nodais.

A solução da equação 3 fornece como solução um conjunto de autovalores e autovetores, no qual os autovalores são as frequências de vibração da estrutura e os autovetores representam os modos de vibração da estrutura. Cabe ainda ressaltar que o menor autovalor representa a frequência natural de vibração da estrutura.

O comportamento do público em ambientes como de museus não sofrem modificações ao longo do tempo apresentando um caminhar lento e pausado, de modo que as pessoas que frequentam esses locais apresentam hábito diferentes daquelas que estão em ambientes como

de estádios de futebol, ginásios de esportes, salões danças e academias. As formas de se manifestar de pessoas nos locais anteriormente citados induzem vibrações e acelerações diferentes nas estruturas.

No caso presente as frequências e modos de vibração representam informações importantes tanto da flexibilidade da estrutura quanto da direção de cargas que pode excitar as frequências correspondentes. Assim, com estas informações têm-se indicativos se a melhor opção é reforçar a estrutura ou demolir a mesma para a construção de uma estrutura com rigidez mais adequada.

A Tabela 2 apresenta os valores das primeiras sete frequências na análise de vibrações livres das estruturas original, com mesa inferior e sem mesa inferior.

Os cinco primeiros modos de vibração são tipicamente laterais e/ou torsionais para todas as análises, mostrando que estão relacionados diretamente com a inércia dos pilares e no caso da torção não só com os pilares, mas também com a rigidez a torção das lajes/nervuras.

Tabela 2. Frequências e modos de vibração

Modo	Frequência (Hz)					
	Sem Mesa	Vibração	Com mesa	Vibração	Original	Vibração
1	1,44	Lateral	1,37	Lateral	1,24	Lateral
2	2,36	Torsional	2,49	Torsional	2,45	Torsional
3	2,75	Lateral	2,99	Lateral	2,97	Lateral
4	3,55	Lateral	3,29	Lateral	2,99	Lateral
5	5,05	Lateral	4,57	Lateral	4,03	Lateral
6	5,91	Vertical	7,18	Torsional	7,11	Torsional
7	6,31	Vertical	8,67	Vertical	8,62	Vertical

O gráfico da Fig. 11 mostra que para os quatro primeiros modos de vibração não apresentam grandes variações, as mudanças de valores se acentuam a partir do 5º modo, sendo que no 6º e 7º essas mudanças são mais evidentes.

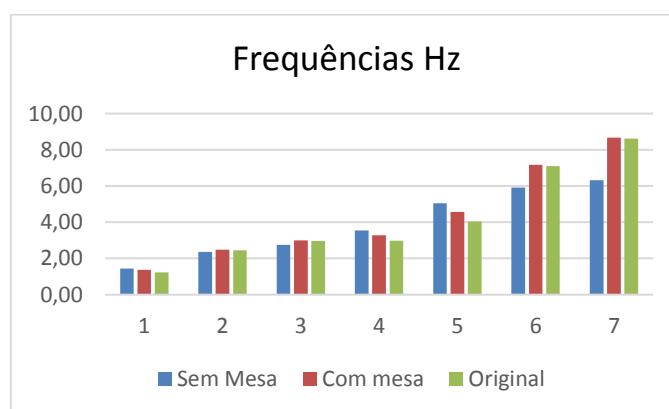


Figura 11. Análise comparativa dos modos de vibração livre das estruturas

Para o 1º modo de vibração a estrutura original apresenta uma menor frequência de vibração, fato facilmente constatado, já que as duas outras estruturas apresentam mais pilares devido a inserção da escada e do elevador, fazendo com que a estrutura apresente uma maior rigidez lateral. As Figs 12, 13 e 14 mostram a disposição dos pilares da estrutura.

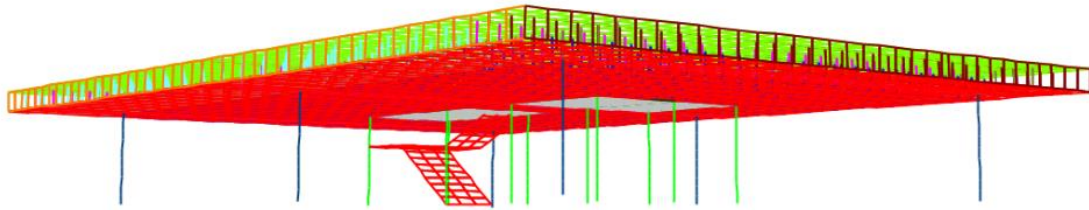


Figura 12. Vista inferior da Laje do 1 Pavimento da Estrutura Com Mesa Inferior

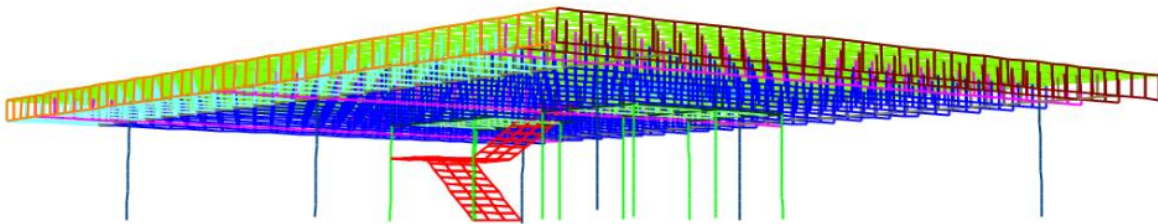


Figura 13. Vista inferior da Laje do 1 Pavimento da Estrutura Sem Mesa Inferior

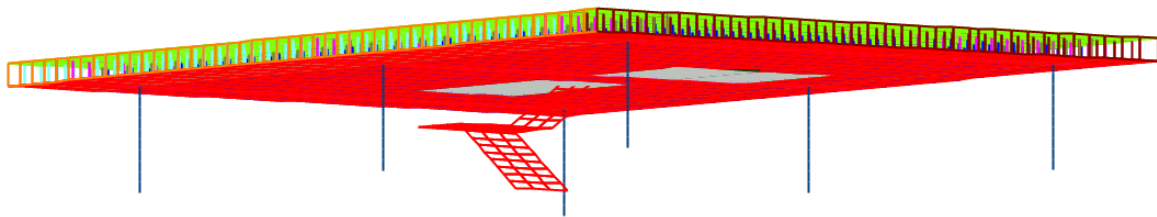


Figura 14. Vista inferior da Laje do 1 Pavimento da Estrutura Original

No 2º modo de vibração constatamos que os modos de vibração da estrutura apresentam uma configuração torsional e a estrutura sem mesa inferior apresenta a menor frequência, pois estrutura com nervuradas com “caixões perdidos” apresentam uma maior rigidez a torção do que estruturas com nervuradas apenas com a mesa superior. A rigidez oferecida pela inclusão dos pilares não é significativa para compensar a perda de rigidez da laje com a demolição da mesa inferior. Os modos de vibração desta etapa apresentam configurações semelhantes como podem ser vistos nas Fig. 15, 16 e 17.

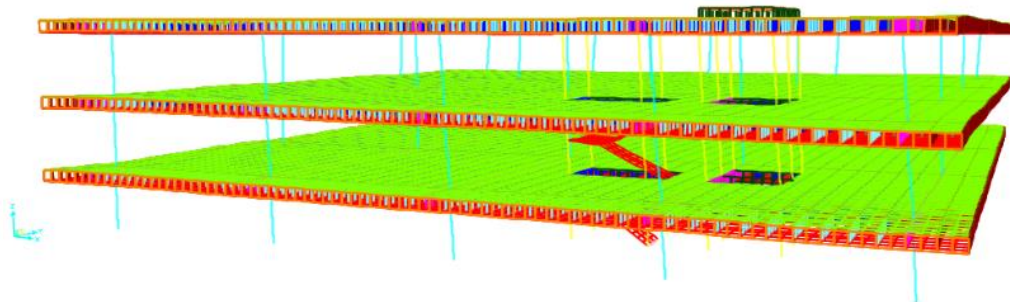


Figura 15. 2º modo de Vibração da Estrutura Com Mesa Inferior

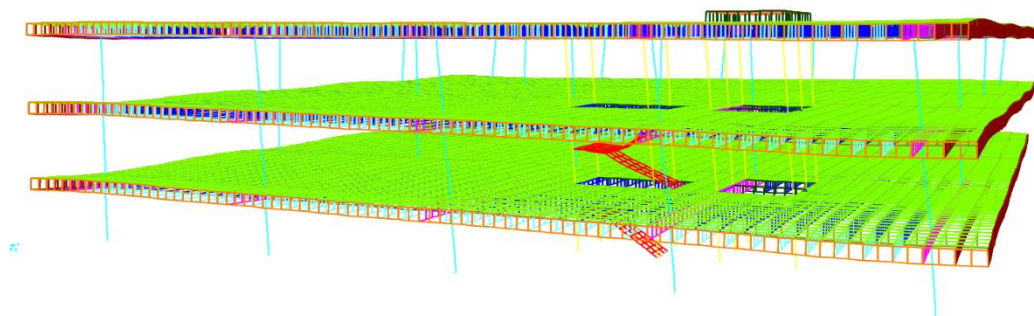


Figura 16. 2º modo de Vibração da Estrutura Sem Mesa Inferior

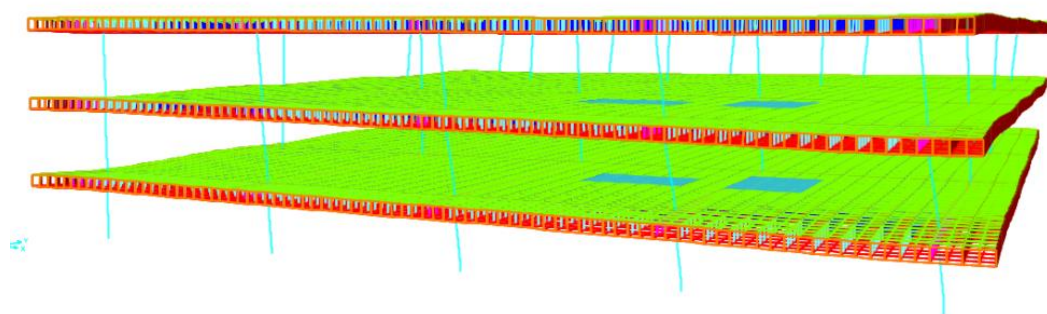


Figura 17. 2º modo de Vibração da Estrutura Original

Observa-se que a frequência natural de vibração do modo 6 da estrutura sem mesa inferior, apresenta um comportamento diferente das outras duas estruturas, enquanto a modo de vibração desta é vertical as outras apresentam um comportamento de vibração Torsional. As Figs. 18, 19 e 20 mostram os modos de vibração de cada estrutura.

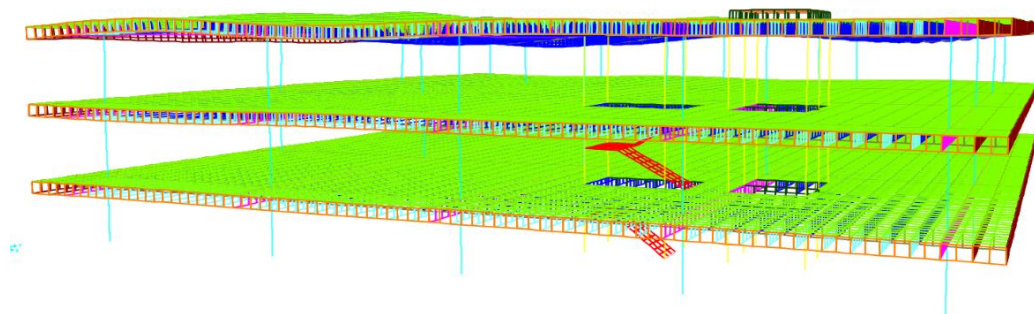


Figura 18. 6º Modo de Vibração Vertical da Estrutura Sem Mesa Inferior

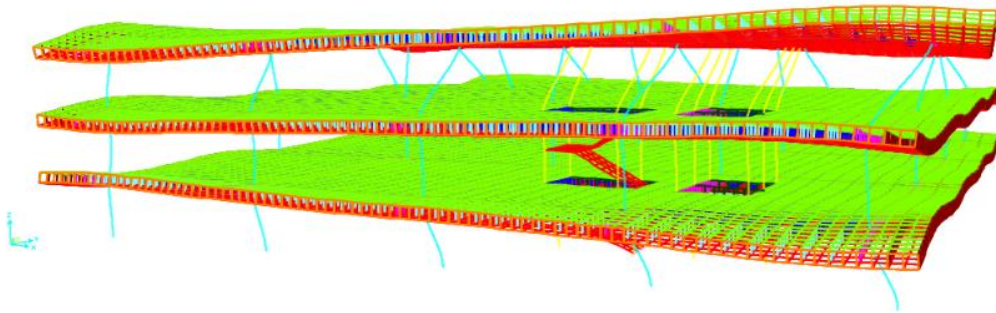


Figura 19. 6° Modo de Vibração Torsional da Estrutura Com Mesa Inferior

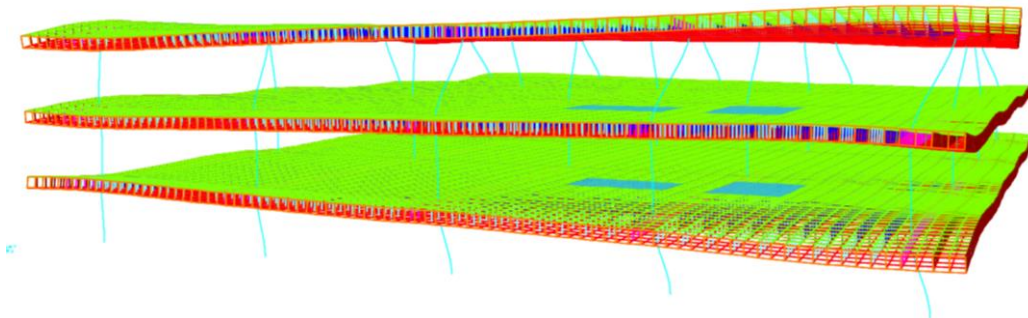


Figura 20. 6° Modo de Vibração Torsional da Estrutura Original

A menor frequência de vibração associada à modos de vibração na laje tem valor 5,91 Hz (laje sem mesa inferior) e o modo de vibração apresentado na Fig. 21. Esta frequência é importante porque traduz a frequência que produz o modo de vibração na direção das solicitações de pessoas caminhando ao longo da laje do museu. De acordo com a NBR 6118:2014, item 23.3, usando o caso de escritórios (o caso da norma que mais se aproxima de museu) a frequência de vibração na arquibancada deve ser:

$$f > 1,2 f_{crit} \quad (4)$$

onde f é a frequência de vibração na direção da solicitação do carregamento (pessoas em escritórios) e f_{crit} é a frequência crítica fornecida pela NBR 6118:2014 que depende do uso da estrutura.

No caso presente a frequência crítica é 4 Hz (escritório), assim,

$$f = 5,91\text{Hz} > 1,2 f_{crit} = 4,8\text{Hz} \quad (5)$$

As Figs. 22 e 23 apresentam os modos de vibração vertical que estão associados ao caminhar das pessoas, podemos observar que estas análises são para lajes que possuem a mesa inferior e que valores obtidos são bem superiores, por volta de 45%, demonstrando que a rigidez da mesa inferior é um elemento importante no comportamento global da estrutura quanto a análise de vibração.

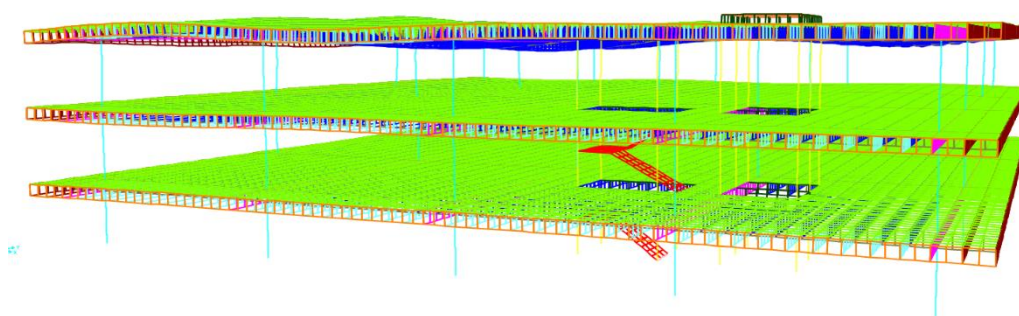


Figura 21. 6° Modo de vibração associado à laje 5,91 hz – Estrutura sem laje inferior

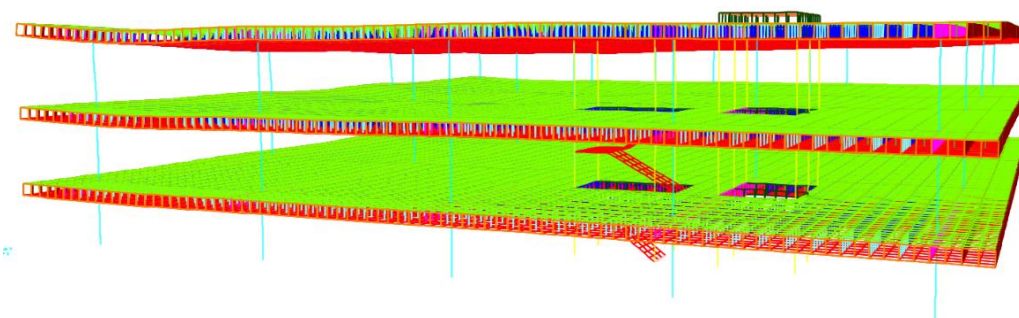


Figura 22. Modo de vibração vertical associado à laje 8,67 hz – Estrutura com laje inferior

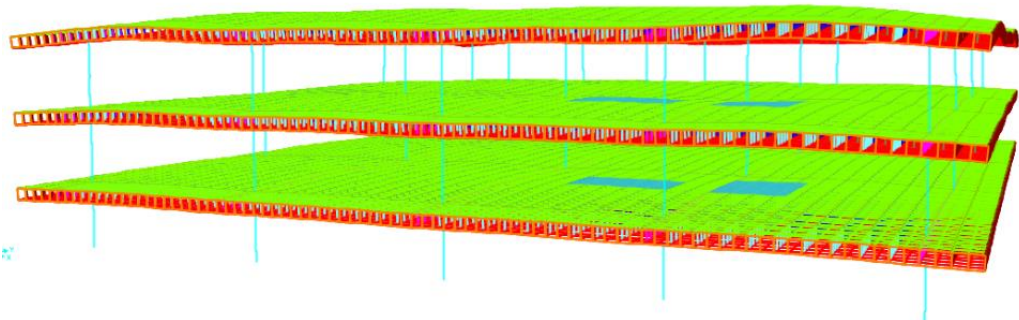


Figura 23. Modo de vibração vertical associado à laje 8,62 hz – Estrutura Original

2.3 Análise de Instabilidade elástica

A análise de instabilidade foi realizada utilizando-se o método de Rankine-Merchant o qual é uma aproximação para se obter a carga de ruína de uma estrutura levando-se em conta os efeitos de não linearidade geométrica e a não linearidade física do material. Assim, a partir da carga de colapso plástico de primeira ordem e da carga crítica de instabilidade elástica, também de primeira ordem, estima-se a carga de ruína da estrutura. Toda a análise numérica é realizada por meio do software SAP2000-19, o qual fornece o valor de λ_{cr} , medida que representa quantas vezes tem-se que multiplicar a carga de serviço para se chegar à carga de instabilidade elástica (buckling).

O valor de λ_{cr} , para o qual a estrutura é considerada flexível, medianamente flexível ou rígida sofre ligeira variação dependendo da norma considerada. No presente trabalho adota-se o critério do Eurocode 3, para o qual a estrutura com λ_{cr} para menor que 4,6 é considerada flexível, com valor entre 4,6 e 10 é uma estrutura medianamente flexível e para valores maiores que 10 tem-se uma estrutura rígida.

Para a grande maioria de estruturas de concreto a instabilidade se dá em elementos lineares sujeitos a esforços normais de compressão expressivos em relação a sua seção transversal. As instabilidades podem acontecer de maneira local – em um só elemento, bem como de forma global atingindo vários elementos ao mesmo tempo. Para as estruturas em questão, todos os modos de instabilidades analisados ocorreram nos elementos verticais -Pilares.

A Tabela 3 apresenta os seis primeiros fatores de λ_{cr} , para análise de instabilidade elástica das estruturas original, com mesa inferior e sem mesa inferior.

Tabela 3. Valores de λ_{cr}

TABLE: Buckling Factors			
	SEM MESA	COM MESA	ORIGINAL
1	21,0	19,4	15,1
2	23,8	23,0	19,5
3	25,8	24,3	29,5
4	28,0	24,8	45,5
5	28,2	26,1	45,5
6	31,1	27,7	45,9

Podemos observar nas Figs. 24, 25 e 26 que para o primeiro modo de instabilidade se dá de forma lateral em torno do eixo de menor inercia dos pilares para todas as estruturas, ou seja, flambagem global dos elementos verticais.

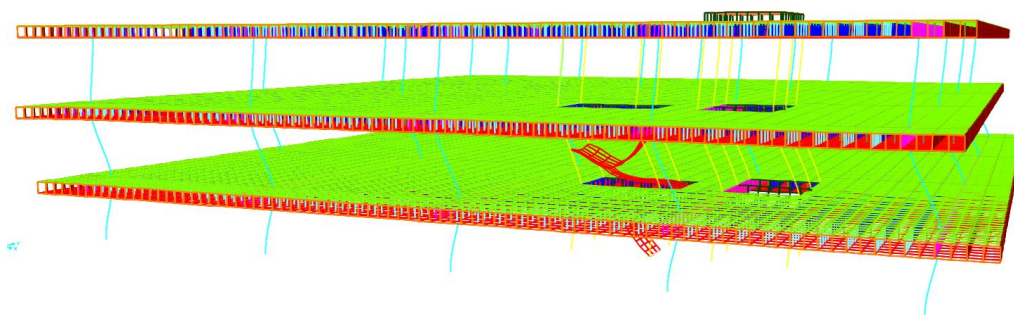


Figura 24. 1º modo de Instabilidade – Estrutura com Mesa inferior

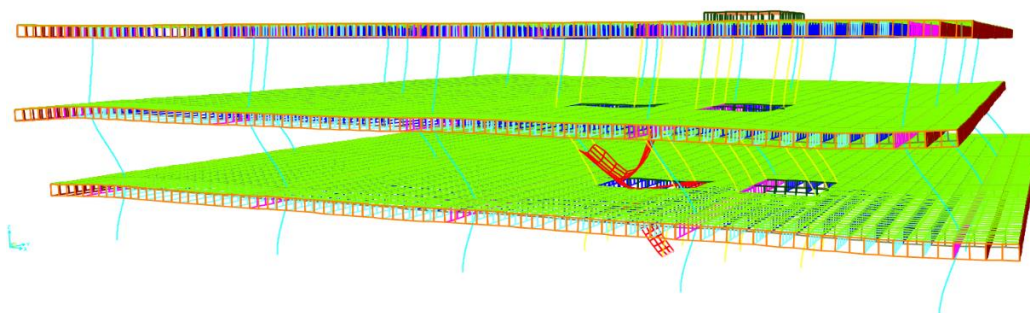


Figura 25. 1º modo de Instabilidade – Estrutura Sem Mesa inferior

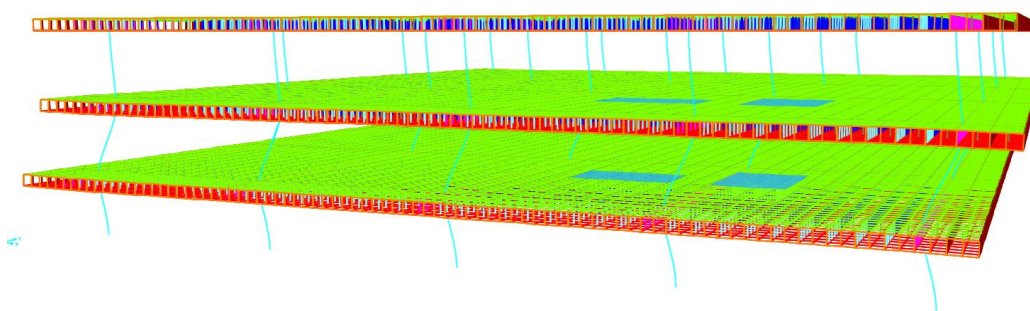


Figura 26. 1º modo de Instabilidade – Estrutura Original

Para as estruturas com mesa inferior o 2º, 4º, 5º e 6º modo de instabilidade ocorreram localmente em um dos pilares do elevador. O mesmo fato ocorreu também para estruturas com mesa inferior. Para a estrutura original os modos 4,5 e 6 ocorreram de forma local nos pilares internos da estrutura.

As Figs. 27 e 28 mostram um exemplo de flambagem local do pilar para estrutura original.

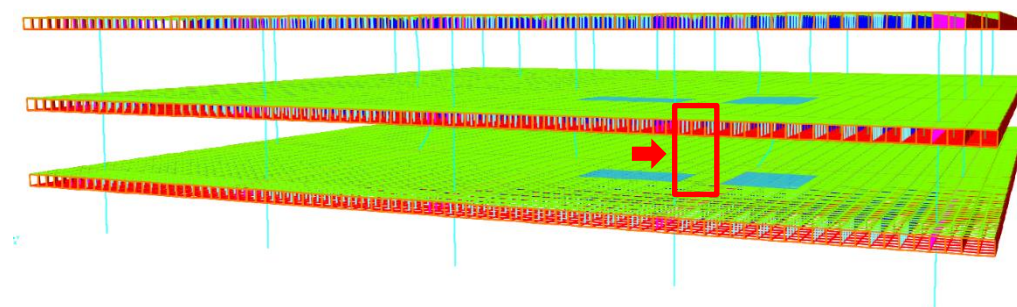


Figura 27. Instabilidade local do pilar – Estrutura Original

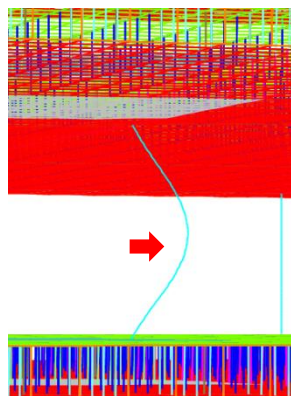


Figura 28. Detalhe da Instabilidade local do pilar – Estrutura Original

O valor de λ_{cr} associado ao menor modo de instabilidade já permite afirmar que a estrutura é suficientemente rígida. Indicando que a mesma não possui risco de colapso por flambagem elástica para cargas no estado limite último qualquer um dos casos analisados.

3 CONCLUSÕES

As patologias resultantes da ação da umidade estão presentes em todas as fases da vida de uma edificação. É fato que uma impermeabilização bem escolhida e executada, aliada a um sistema de drenagem eficiente garantem uma maior segurança e durabilidade da estrutura.

O Museu de Arte de Brasília é um exemplo de como o abandono e decisões erradas podem acelerar de forma desastrosa a ação da umidade em toda a estrutura. A retirada da impermeabilização da cobertura, a falta de vedações e esquadrias, a falta de um sistema de drenagem operante e a ausência total de manutenção contribuíram para a deterioração dos elementos estruturais, principalmente das lajes “caixão perdido”.

No que se refere à análise modal a frequência de vibração associada com a laje do museu, na direção do carregamento de pessoas a estrutura apresenta rigidez aceitável do ponto de vista dos critérios normativos preconizados pela NBR 6118:2014. Cabe ainda ressaltar que a estruturas com laje inferior (Original e com pilares da escada e elevador) apresentam valores bem mais altos que estrutura sem a laje inferior.

A análise de instabilidade elástica mostra que se trata de uma estrutura rígida, com valores de fator crítico de colapso alto (menor valor de $\lambda_{cr} = 15,1$) quando se usa como parâmetros tanto o Eurocode 3 quanto outras normas como a Inglesa (BS-5059/2000) ou a Chinesa (GB-50017).

Um ponto interessante na análise é que a estrutura sem laje inferior apresenta maior estabilidade global em relação as outras com laje inferior. Esse fato ocorre devido a diminuição das forças de compressão nos pilares devido a retirada da laje inferior da laje.

Com a retirada da laje inferior em termos estruturais perde-se rigidez estrutural para questões de vibração e aumenta-se o grau de segurança da estrutura ao rompimento por instabilidade global/local da estrutura. Sendo assim é possível então as retiradas da mesa inferior para verificar se existem patologias dentro dos caixões perdidos da laje.

Também se conclui que a estrutura é suficientemente rígida para que se recomende sua recuperação ao invés de demolição.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118, 2004. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 221p.

CODEPLAN, 1991. *Relatório do Plano Piloto de Brasília*. Brasília, GDF, 76p.

IPHAN, 2016, *GT Brasília: memória da preservação do patrimônio cultural do Distrito Federal*. Brasília, GDF, 168p.

_____, 2016. *Projeto Executivo de Reforma do Museu de Arte de Brasília – PROJ-DE-031-16*, Novacap, Brasília, 2016. 38p.

Souza, L. S., 2016. *Relatório de Vistoria 013-2016-SEINST*, Novacap, Brasília, 36p.

Verçoza, E. J., 1991. *Patologia das Edificações*. Porto Alegre, Editora Sagra, 172p.