

Análise de uma Estrutura de Concreto Armado e proposição de reforço para correção de falhas estruturais: Estudo de Caso

Gláucia Nolasco de Almeida Mello^[1], Bárbara Elisa Ferreira^[2], Marina R. B. Macedo^[3], Carolina S. Oliveira^[4], Marina X. S. Assis^[5], Luan G. Matos^[6]

[1] gnamello@pucminas.br. Prof. Dra. Depto. de Engenharia Civil – PUC Minas. [2] barbara.elisaf@gmail.com.

[3] marinareisbm@gmail.com. [4] carolina.oliveira.870796@sga.pucminas.br. [5] marina.x.assis@gmail.com.

[6] luan_gmatos@hotmail.com. Engenheiros Civis; Ex-alunos de Engenharia Civil – PUC Minas.

RESUMO

A degradação das estruturas em concreto armado, antes mesmo que cumpram sua vida útil, é um processo bastante recorrente nas edificações e que requer a necessária execução de técnicas de reforço dos elementos estruturais. Nota-se, portanto, que pesquisas nessa área são de suma importância para a construção civil. Desta forma, o presente trabalho consistiu em analisar estática e dinamicamente a edificação de uma escola que apresentava problemas estruturais, a fim de identificar as causas e propor uma solução de reforço. Através da análise estática da estrutura, realizada por meio do programa CAD/TQS, verificou-se que as lajes e as vigas da edificação, em sua maioria, foram executadas com alturas inferiores ao ideal e que, em algumas lajes, as flechas obtidas foram superiores às admissíveis. Pela análise modal, realizada através da plataforma Altair HyperWorks, verificou-se que o quarto, o quinto e o sexto modos de vibração da estrutura não atendiam ao ELS-VE, pois apresentaram frequências naturais entre a faixa crítica indicada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), mostrando-se, então, a possibilidade de vibração excessiva. Sendo assim, foi proposta uma solução de reforço, utilizando vigas de aço calculadas seguindo a metodologia da NBR 8800 (ABNT, 2008). Tal reforço foi verificado com o auxílio da plataforma Altair HyperWorks, constatando-se que os perfis de aço utilizados resolveram o problema da flecha excessiva das lajes, sem prejudicar os deslocamentos das vigas em que foram apoiados, mantendo inalteradas as frequências naturais.

Palavras-Chave: Estruturas de concreto. Análise estrutural. Durabilidade. Vibração. Reforço.

ABSTRACT

The reinforced concrete structures degradation even before reaching useful life, is a very recurrent process in buildings, and it is necessary to execute corrective techniques to strengthen the structural elements. Therefore, it is noted that research in this field is very important to civil engineering. Consequently, the present study consisted in performing a static and dynamic analysis of a school building that presented structural flaws to identify the causes of it and propose a rehabilitation solution. Through the static analysis of the structure, performed with the CAD/TQS program, it was verified that the slabs and beams of the building were mostly executed with a thickness lower than ideal and that, in some slabs, the deflection obtained were higher than allowable. Through modal analysis, performed with Altair HyperWorks program, it was verified that the fourth, fifth and sixth vibration modes of the structure did not meet the ELS-VE, since they present natural frequencies between the critical range indicated by NBR 6118 (ABNT, 2014), thus showing the occurrence of excessive vibration. As a result, a rehabilitation solution was proposed, using steel beams, which were calculated according to the methodology of NBR 8800 (ABNT, 2008) and, verified with the aid of Altair HyperWorks program. This methodology for strengthening the concrete structure was verified with the aid of the platform Altair HyperWorks, where it was concluded that the steel beam used are able to solve the problem with the excessive deflection in the slabs without harming the displacements of the beans who support them, maintaining unaltered the natural frequencies.

Keywords: concrete structures; structural analyses; durability; vibration; strengthening.

1 Introdução

Os diversos fatores que propiciam deterioração das estruturas estão relacionados ao seu desgaste natural, à imperícia e irresponsabilidade de profissionais envolvidos nas etapas de concepção, projeto e execução das estruturas, à falta de manutenção durante sua vida em serviço e aos acidentes. Estudos realizados por pesquisadores internacionais, embora divergentes quanto aos valores, apontam como a principal causa das manifestações patológicas em estruturas de concreto os erros cometidos nas fases de concepção e projeto (SOUZA; RIPPER, 1998). As falhas e erros cometidos nesta fase respondem por aproximadamente 40% do total. Em seguida estão as falhas e erros cometidos na etapa de execução (aproximadamente 28%), fatores relacionados aos materiais empregados na construção e negligência na manutenção (SOUZA; RIPPER, 1998).

As discussões acerca das causas de deterioração das estruturas de concreto surgiram há aproximadamente quatro décadas. Ainda hoje, entretanto, essas questões são bastante pertinentes, tendo em vista os crescentes problemas de degradação precoce das estruturas, estes talvez agravados pela falta de conscientização dos projetistas, construtores e usuários sobre a importância da definição do tempo durante o qual se deseja que a estrutura tenha desempenho satisfatório e da contribuição de cada um no cumprimento do parâmetro de durabilidade estabelecido para a edificação (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011; SOUZA; RIPPER, 1998).

Ainda assim, as estruturas acometidas por algum tipo de problema, patológico ou não, não devem ser condenadas imediatamente, pelo contrário, a possibilidade de reabilitação destas deve ser sempre avaliada, considerando-se os devidos cuidados. A reabilitação de estruturas de concreto envolve uma série de procedimentos necessários para a restituição dos requisitos de segurança estrutural e de durabilidade originalmente previstos. O conhecimento dos procedimentos e das técnicas a serem empregados em qualquer situação de reabilitação estrutural é extremamente importante em ambos os casos: restauração (recuperação) e ampliação (reforço) da capacidade portante original da estrutura (TIMERMAN, 2011; SOUZA; RIPPER, 1998).

Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivo principal a análise estática e dinâmica,

conjuntamente, da edificação em concreto armado de uma escola que apresentava problemas estruturais. Após a verificação dos problemas apontados por meio da análise estrutural, foi desenvolvida uma proposta de reabilitação, ou seja, recuperação da estrutura da escola, considerando-se tanto a eficiência quanto a economia.

2 Patologias em Estruturas de Concreto

Em função do aparecimento precoce de patologias e da degradação das estruturas de concreto, questões relacionadas ao desempenho das edificações vêm sendo largamente discutidas nas últimas décadas (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011; GJØRV, 2011; ANGST *et al.*, 2012; BOLINA; PERRONE; TUTIKIAN, 2015), com a finalidade de compreender melhor as causas e o processo de degradação das estruturas de concreto armado. Há, ainda, uma tendência em privilegiar os aspectos de projeto que propiciem a durabilidade e a extensão da vida útil das estruturas de concreto (BATTAGIN, 2015; CAMPOS, 2013; MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

A norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) define desempenho em serviço como a *capacidade da estrutura manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil, não podendo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetada*. Por durabilidade entende-se a capacidade da estrutura de desempenhar suas funções ao longo do tempo, resistindo às influências ambientais previstas pelo autor do projeto estrutural e contratante, e sob condições de uso e manutenção previamente especificadas (ABNT, 2014).

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011), o *fibModel Code for Service Life Design*, versão de 2006, identifica quatro métodos ou estratégias, para a verificação da vida útil de uma edificação no projeto:

- 1) Método probabilista completo (confiabilidade – ISO 2394 (ISO, 2015);
- 2) Método dos coeficientes parciais de segurança (semiprobabilista – ISO 22111 (ISO, 2007) e NBR 8681 (ABNT, 2003);
- 3) Método “por atributos” ou exigências prescritivas;
- 4) Método indireto de proteção da estrutura.

Os fatores que contribuem significativamente para o surgimento de patologias nas estruturas de concreto estão diretamente relacionados a: meio ambiente, concepção da estrutura (projeto), execução da estrutura e utilização da estrutura. Os principais fatores referentes ao meio ambiente são: temperatura, amplitude térmica, umidade relativa, chuva, vento, poluentes, insolação. Há, ainda, os fatores relacionados aos ambientes especiais, tais como: ambiente marinho (ação dos sais agressivos, corrosão das armaduras, movimentação da água – ondas, correntes e marés – e organismos encrustadores, que se fixam nas estruturas e causam danos); ambiente urbano (ocorrência de chuvas ácidas, deposição de partículas sólidas e lançamento de dióxido de carbono na atmosfera, entre outros); ambiente industrial (gases e produtos químicos); e ambiente com presença de esgoto (ação de composto de enxofre, que ataca tanto a matriz hidratada de cimento quanto as armaduras) (BATTAGIN, 2015; LIMA, 2011; SOUZA; RIPPER, 1998).

Souza e Ripper (1998) citam, como as principais falhas geradas na etapa de projeto causadoras de patologias, as seguintes: má definição das ações atuantes ou de sua combinação, deficiência no cálculo da estrutura, falta de compatibilização entre estrutura e arquitetura e outros projetos, especificação inadequada de materiais, detalhamento insuficiente ou errado, erros de dimensionamento.

Outro fator preocupante que põe em risco a segurança das estruturas e o conforto dos seus usuários é a ação de carregamentos dinâmicos, como vento e ocupação humana (LIMA, 2007; BASTOS; SILVA, 2016), que não são comumente considerados na fase de dimensionamento e podem causar níveis de vibração excessivos. No que diz respeito aos carregamentos humanos, estes ocorrem em baixas frequências, muitas vezes próximas ou iguais às frequências naturais da estrutura, podendo ocasionar o fenômeno da ressonância, o que gera desconforto aos usuários e pode levar ao colapso da estrutura. Diante disso, percebe-se a importância de se realizar uma análise do comportamento dinâmico das estruturas. Alguns autores têm se dedicado a novas pesquisas no âmbito do conforto humano em edificações, como Bastos e Silva (2016), que propôs em seu trabalho a investigação do comportamento estrutural dinâmico de um edifício alto de concreto armado, objetivando avaliar o conforto humano do modelo

estrutural, submetido à ação dinâmica das cargas de vento. Outros estudiosos – Campista, Gaspar e Silva (2016) – tiveram como foco de sua pesquisa a avaliação do conforto humano em edificações de pisos mistos, submetidos à carga dinâmica de atividades humanas rítmicas.

Na etapa de execução da edificação, os autores Souza e Ripper (1998) e Battagin (2015) identificam algumas das falhas mais comuns, quais sejam: falta de prumo, de esquadro e de alinhamento de elementos estruturais e alvenarias; desnivelamento de pisos, argamassa de assentamento aplicada de maneira inadequada, flechas excessivas em lajes e falta de controle de qualidade na utilização do concreto (lançamento, adensamento e cura). Uma prática comum que interfere qualitativamente no processo executivo é deixar os problemas construtivos para serem resolvidos pelo construtor durante a obra, quando deveriam ser analisados durante a etapa de projeto (MAYR, 2000). Essa prática propicia tomada de decisão apressada, sem possibilidades de consultas ou análises mais aprofundadas e pode ter como consequência a perda de produtividade e o comprometimento do desempenho da estrutura.

Por último, na etapa de utilização da estrutura, é necessário que o usuário e ou responsável por esta mantenham um programa para sua manutenção. A NBR 6118 (ABNT, 2014, item 25.3) registra a necessidade de desenvolvimento de um manual de utilização, inspeção e manutenção a ser disponibilizado para os usuários e responsáveis pela manutenção da estrutura, com a finalidade de esclarecer, sucintamente, os requisitos básicos para a utilização e a manutenção preventiva, necessários para garantir a vida útil de tal estrutura. A mesma norma ainda estabelece que este documento deve ser produzido por profissional habilitado e que, se houver partes da estrutura que mereçam consideração especial, como aparelhos de apoio, juntas de movimento etc., com vida útil diferente do todo, estas devem ser contempladas separadamente.

3 Reforço das Estruturas de Concreto

A reabilitação estrutural tem como função principal a restituição dos requisitos de segurança e de durabilidade originalmente previstos para uma estrutura existente, levando-se em consideração as novas condições de trabalho ou mudanças de finalidade

e utilização. Quando, em uma reabilitação estrutural há necessidade de execução de um reforço estrutural, este pode ser devido à mudança de uso, atuação de novos carregamentos, adaptação para efeitos sísmicos, mudanças nas normas técnicas, exigências de companhias de seguro e outros. Pode existir, ainda, a necessidade de se reforçar uma estrutura em função da ocorrência de erros nas fases de desenvolvimento de projeto e execução da edificação.

A magnitude do reforço depende da magnitude do dano provocado. Os reforços podem ser classificados em duas ordens de magnitude: (a) reforços com a inclusão e adequação de novos materiais e pequenas alterações de massa e forma (reforços leves); e (b) reforços que exigem a introdução de novos esforços e ou a redistribuição dos existentes. Nesses casos, eles podem vir acompanhados de alterações sensíveis de massa e aparência (reforços pesados) (TIMERMAN, 2011; MACHADO; MACHADO, 2016). Machado e Machado (2016) classificam como leves e moderados aqueles reforços que elevam a resistência das peças até cerca de 40%. Nessa categoria, as possíveis alternativas são: aumento da seção transversal com inclusão de novas armaduras; utilização de chapas de aço que são aderidas ao concreto externamente; utilização de compostos estruturados, como, por exemplo, a fibra de carbono. Os reforços pesados exigem introdução de novos esforços ou redistribuição dos existentes e, para essa categoria, a protensão externa ou a introdução de vigas de aço são as soluções mais comuns. Há ainda a possibilidade de associação de mais de uma alternativa de reforço.

Para os problemas decorrentes de ações dinâmicas, existem também diferentes estratégias de atenuação destes efeitos, para as quais se utilizam desde técnicas simples, baseadas na introdução de materiais amortecedores passivos, modificação e otimização do projeto estrutural, até o uso de sofisticados sistemas de controle ativo em malha fechada (MARQUES, 2000).

O controle passivo consiste na instalação de aparelhos que não utilizam energia proveniente do exterior; o controle ativo, por sua vez, necessita de fontes de energia externas ao sistema a ser amortecido, para a aplicação de forças com amplitude, frequência e fase necessárias sobre a estrutura.

As soluções mais utilizadas para controle passivo são os absorvedores dinâmicos de vibrações (ADV) e os amortecedores de massa sintonizado passivo (AMS). Segundo Marques (2000), em sua forma mais simples, um ADV é um dispositivo eficiente e econômico, de parâmetros concentrados de massa, rigidez e amortecimento que, uma vez acoplado à estrutura primária cujas vibrações se deseja atenuar, é capaz de absorver a energia vibratória no ponto de conexão. O amortecedor de massa sintonizado (AMS) é um dispositivo passivo, clássico da engenharia, constituído por um sistema de massa, mola e amortecedor, instalado no sistema principal. A frequência natural do AMS é sintonizada próxima à frequência natural do sistema principal, logo, quando a estrutura vibra, o AMS vibra com a mesma frequência e absorve parte da energia do sistema (LIMA, 2007).

4 Metodologia

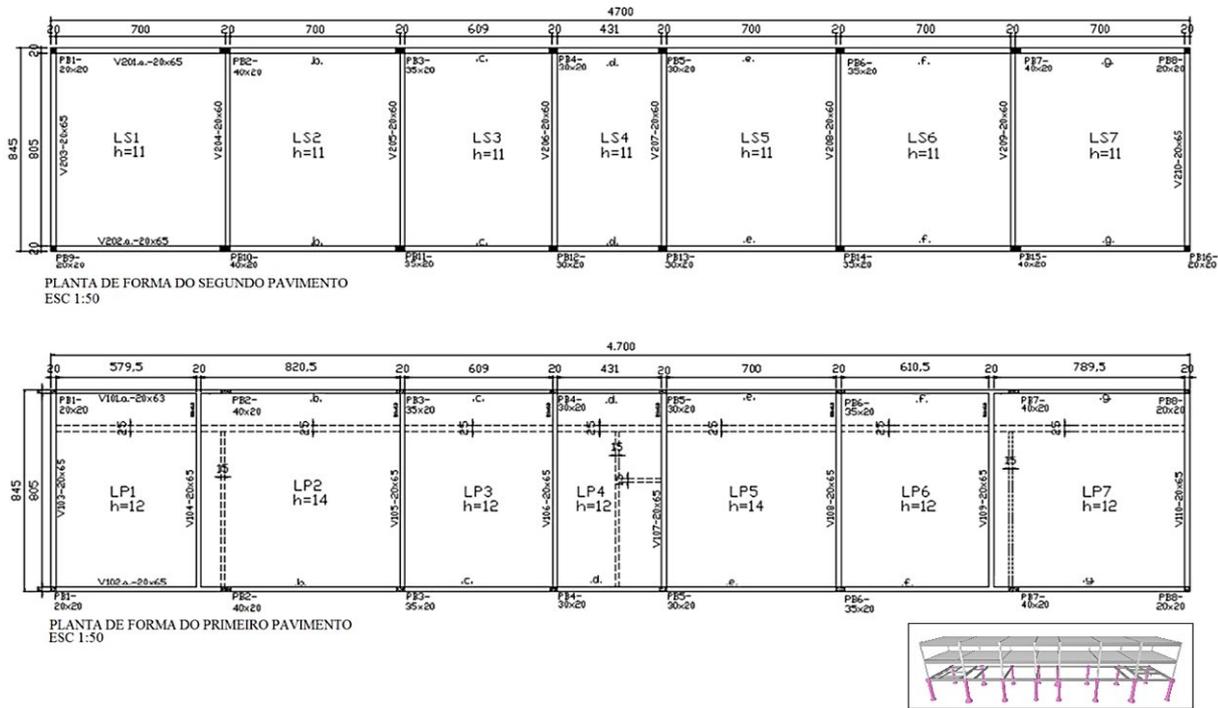
4.1 Descrição da Edificação

A edificação em estudo neste trabalho corresponde a um prédio de uma escola, situada na cidade de Belo Horizonte, cuja estrutura é constituída por pilares, vigas e lajes maciças em concreto armado. O projeto estrutural foi finalizado em 2006, a obra foi finalizada em 2013 e a necessidade de reforço foi verificada em 2015. O edifício em questão possui dois pavimentos, com altura de 7,27 metros, largura de 8,45 metros e comprimento de 47 metros.

4.2 Dados Considerados na Análise Estrutural

Os dados adotados na análise estrutural foram coletados do projeto estrutural original da escola, assim sendo: concreto com resistência à compressão (f_{ck}) igual a 25 MPa, módulo de elasticidade secante (E_{cs}) igual a 24,15 GPa, coeficiente de poisson igual a 0,3 e peso específico (γ_c) de 25 kN/m³. As lajes do primeiro pavimento (LP) possuem espessuras variadas, sendo que LP2 e LP5 possuem espessura de 14cm e as demais de 12cm, e todas as lajes do segundo pavimento (LS) possuem espessura de 11cm, conforme Figura 1.

Figura 1 – Planta de forma do primeiro e segundo pavimentos



Fonte: Acervo dos autores.

A Tabela 1 apresenta as ações verticais usuais de projeto que foram adicionadas às lajes dos dois pavimentos, seguindo as recomendações da NBR 6120 (ABNT, 1980). O peso das alvenarias existentes sobre as lajes LP1 a LP7 foi distribuído linearmente.

Tabela 1 – Ações verticais consideradas na edificação

Pavimento	Carga acidental (kN/m ²)	Carga permanente (kN/m ²)
Primeiro pavimento	3,0	1,0
Segundo pavimento (Forro)	0,5	1,2

Fonte: Elaboração própria.

O carregamento atuante nas estruturas deve ser definido por uma combinação de ações que durante um período preestabelecido têm a probabilidade de atuarem simultaneamente sobre a essa estrutura. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), as combinações de ações devem ser estabelecidas para determinar

os efeitos mais desfavoráveis que podem ocorrer na estrutura e para verificar a segurança em relação aos estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS).

No projeto da escola, foi verificada a segurança para o ELS, considerando-se a combinação quase permanente de serviço (CQP) (equação 1). Na equação 1, as ações permanentes se mantêm inalteradas e as ações variáveis são minoradas por um fator de redução ψ_2 .

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \sum \psi_{2j} F_{qjk} \quad (1)$$

Assim, $F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço, F_{gik} representa o valor das ações permanentes, F_{qjk} representa o valor das ações variáveis e ψ_{2j} é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

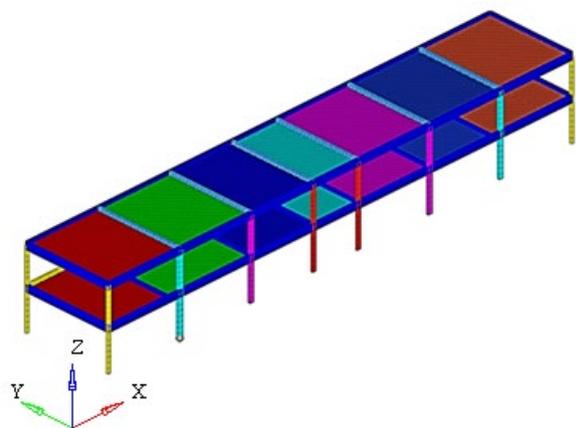
Por se tratar de uma edificação onde há elevada concentração de pessoas, adotou-se um ψ_2 igual a 0,4, conforme tabela 11.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

4.3 Modelo Estrutural em Elementos Finitos

A modelagem numérica da edificação (ver Figura 2) foi realizada com base em técnicas usuais de discretização, utilizando-se o método dos elementos finitos (MEF), por meio do uso da plataforma Altair HyperWorks. As vigas e pilares foram representados por elemento de barra BAR2, que é um elemento unidimensional composto por dois nós, cada nó com 6 graus de liberdade: translação em X, Y e Z e rotação em X, Y e Z. As lajes foram simuladas utilizando-se elemento de casca THINSHELL, bidimensional, composto por quatro nós, possuindo 6 graus de liberdade por nó, sendo três de translação e três de rotação das direções: X, Y e Z.

Realizou-se um estudo de convergência de malha, que teve como objetivo identificar quais os melhores parâmetros de malha a se utilizar para garantir o melhor resultado em função do custo computacional. Testaram-se malhas quadradas de 480mm, 240mm e 120mm, chegando-se à conclusão que a dimensão satisfatória para as malhas dos elementos (lajes e vigas) seria de 120mm, sendo esse valor referente ao lado do elemento. Assim, obteve-se um modelo numérico apresentando 56042 nós e 58603 elementos.

Figura 2 – Modelo estrutural em elementos finitos



Fonte: Acervo dos autores.

4.4 Análise Estática

Na análise estática, usualmente, calculam-se os efeitos dos carregamentos permanentes e acidentais em uma estrutura, sem considerar os efeitos de amortecimento e de inércia que são causados por cargas dinâmicas. Faz-se esse tipo de análise para verificação de tensões, deslocamentos e deformações, assumindo condições de carregamento e de

resposta permanentes, ou seja, com variação lenta durante o tempo.

Nesta etapa do trabalho, foram conferidos todos os valores das cargas atuantes, as dimensões dos elementos estruturais (lajes e vigas) e as flechas admissíveis e efetivas.

Para o pré-dimensionamento dos elementos estruturais, foram utilizadas as equações 2 e 3, sugeridas por Pinheiro *et al.* (2007). As alturas das vigas foram estimadas por meio da equação 2, e para lajes maciças retangulares com bordas apoiadas ou engastadas, as estimativas para as alturas foram obtidas utilizando-se a equação 3.

$$h_{viga} = \frac{l}{10} \quad (2)$$

$$h_{laje} = [(2,5 - 0,1n)l^*] + c + \frac{\phi_l}{2} \quad (3)$$

sendo l o comprimento do vão da viga, n o número de bordas engastadas, l^* o menor vão da laje, c o cobrimento da armadura e ϕ_l o diâmetro da barra longitudinal na laje.

Após a realização do pré-dimensionamento das vigas e lajes, as flechas efetivas imediatas foram verificadas por intermédio do software CAD/TQS.

Os deslocamentos admissíveis para lajes e vigas foram calculados aplicando-se a equação 4, conforme recomendação da tabela 13.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014), para o caso de efeito de aceitabilidade sensorial para deslocamentos visíveis em elementos estruturais.

$$f_{lim} = \frac{l}{250} \quad (4)$$

sendo l o comprimento do menor vão da laje ou da viga.

4.5 Análise Modal

A análise modal tem como objetivo a determinação das frequências naturais (autovalores) e os respectivos modos de vibrar (autovetores) da estrutura. A análise modal reflete o comportamento dinâmico básico da estrutura, indicando como esta responderá ao carregamento atuante sobre ela (CAMPISTA; GASPARG; SILVA, 2016).

As frequências naturais e os modos de vibrar da estrutura da escola foram obtidos através da análise modal por elementos finitos na plataforma Altair

HyperWorks, onde foram analisados os 10 primeiros modos de vibrar.

Para garantir um comportamento satisfatório de uma estrutura sujeita a vibrações, a NBR 6118 (ABNT, 2014) indica que a frequência natural do pavimento (f) não deve estar compreendida na faixa entre 20% para mais e para menos da frequência crítica (f_{crit}), que depende do tipo de atividade a qual o piso se destina, ou seja, deve ser um valor menor que $0,8 f_{crit}$ ou maior que $1,2 f_{crit}$.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta valores para a frequência crítica referente à ação humana em algumas estruturas especiais, para o caso de ausência de ensaios experimentais para sua determinação. Como essa norma não informa, no entanto, um valor de frequência crítica para estruturas destinadas a escolas, e como não foram realizadas análises experimentais para se chegar a esse valor, adotou-se a frequência crítica para a estrutura em questão igual à de projetos de escritório, ou seja, entre 3Hz e 4 Hz, por ser, entre as apresentadas na norma, a que mais se assemelha a salas de aula.

5 Resultados e Discussões

O resultado do pré-dimensionamento das vigas e lajes apresentou valores ideais para suas respectivas alturas maiores que as especificadas no projeto original. Os menores vãos das lajes do primeiro e segundo pavimentos variam de 451 cm a 825 cm, o que indica que as alturas mínimas deveriam variar entre 11 cm e 21 cm. Ao se analisar a altura efetiva das

lajes, nota-se, porém, que todas se apresentam com altura inferior aos valores mínimos, com exceção das lajes LP4 e LS4, ambas com menor vão (451 cm), que apresentam altura efetiva igual ou superior à ideal. As maiores diferenças ocorrem nas lajes LP2, que possui altura efetiva de 14 cm, enquanto a ideal deveria ser de 21 cm; LP7, com altura real de 12 cm e ideal de 20 cm, e em todas as lajes do segundo pavimento, cujas alturas reais são de 11 cm, enquanto a ideal gira em torno de 18 cm, exceto LS4.

O mesmo acontece para as vigas dos dois pavimentos onde os vãos variam de 451 cm a 825 cm, o que mostra que as alturas ideais deveriam variar entre 45 cm e 83 cm, porém observou-se que apenas as vigas V101c, V101d, V102c, V102d, V201c, V201d, V202c e V202d apresentam altura real superior à ideal. Nestes casos, a maior diferença acontece nas vigas mais solicitadas do edifício, que são: V103 a V110, as quais possuem altura efetiva de 65 cm, e V203 a V210, cujas alturas reais são de 60 cm e 65 cm, enquanto a ideal para todas elas seria de 83 cm.

Foi realizada a verificação dos deslocamentos limites impostos com o auxílio do software CAD/TQS, seguindo as orientações da NBR 6118 (ABNT, 2014), para o caso de ELS em lajes e vigas. Para o caso das vigas, os deslocamentos admissíveis devem estar entre 1,80 cm e 3,30 cm, e observou-se que todas as vigas atendiam a esses limites. Com relação às lajes, a Tabela 2 apresenta a comparação entre os deslocamentos limites e efetivos verificados no CAD/TQS.

Tabela 2 – Comparação entre os deslocamentos admissíveis e efetivos das lajes

Primeiro pavimento					Segundo pavimento				
Laje	Menor vão (cm)	δ_{adm} (cm)	δ_{ef} (cm)	$\frac{\delta_{ef}}{\delta_{adm}}$	Laje	Menor vão (cm)	δ_{adm} (cm)	δ_{ef} (cm)	$\frac{\delta_{ef}}{\delta_{adm}}$
LP1	599,5	2,40	2,57	1,07	LS1	720	2,88	2,83	0,98
LP2	825	3,30	3,02	0,92	LS2	720	2,88	2,78	0,97
LP3	629	2,52	2,13	0,85	LS3	629	2,52	2,46	0,98
LP4	451	1,80	1,61	0,89	LS4	451	1,80	1,74	0,97
LP5	720	2,88	2,43	0,84	LS5	720	2,88	2,97	1,03
LP6	631	2,52	2,21	0,88	LS6	720	2,88	2,77	0,96
LP7	810	3,24	3,94	1,22	LS7	720	2,88	2,79	0,97

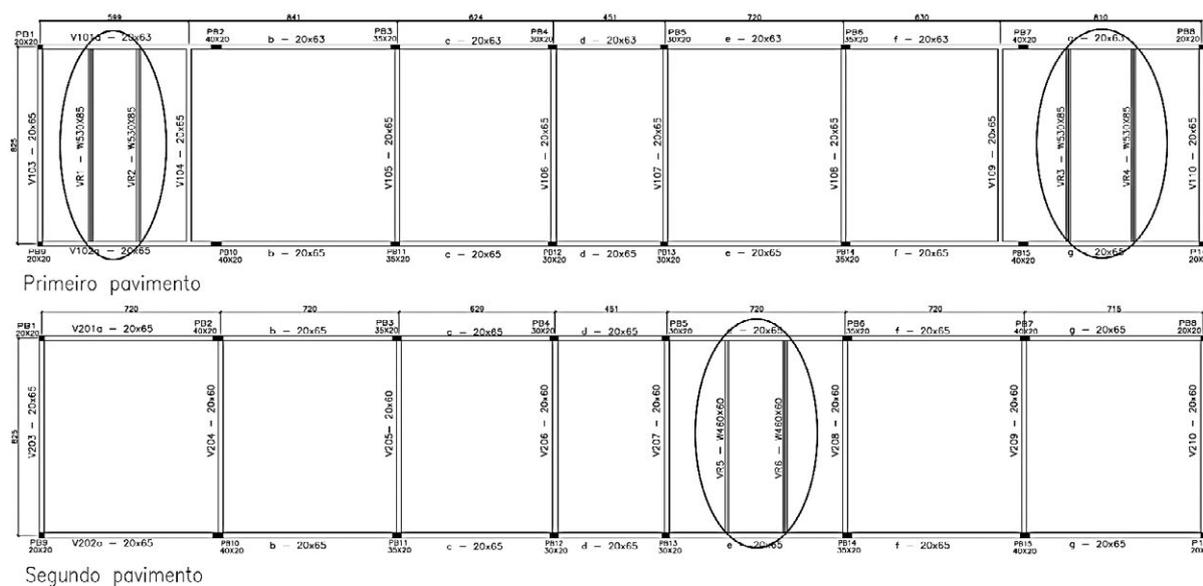
Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que as lajes LP1, LP7 e LS5 apresentam flecha acima da permitida. Para essas lajes, foram calculadas vigas de aço para reforçá-las. Seguindo a metodologia de dimensionamento de perfis de aço, apresentada na NBR 8800 (ABNT, 2008), chegou-se aos perfis que seriam utilizados para reforçar as três lajes. Para as lajes LP1 e LP7, determinaram-se dois perfis W530x85 em cada uma, e, para a laje LS5, foram determinados dois perfis W460x60. A Figura 3 apresenta a disposição das vigas de reforço nas lajes.

A Tabela 3 apresenta os valores das dez primeiras frequências naturais do edifício em estudo e o Quadro 1 apresenta os respectivos modos de vibração. A frequência crítica causada por ação humana em

edificações varia entre 3 Hz e 4 Hz, conforme descrito no item 3.4.1 deste trabalho; entretanto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) indica que a frequência natural do pavimento não deve apresentar um valor que esteja compreendido entre 20% para mais e para menos em relação à frequência crítica, ou seja, a estrutura não deve possuir frequências entre 2,4 Hz e 4,8 Hz. Analisando-se os resultados percebe-se, entretanto, que o quarto, quinto e sexto modos de vibração não atendem a essa condição e, além disso, o sexto modo apresenta uma frequência natural praticamente igual à frequência crítica de 4 Hz, o que poderia ocasionar o efeito da ressonância.

Figura 3 – Localização das vigas de reforço.



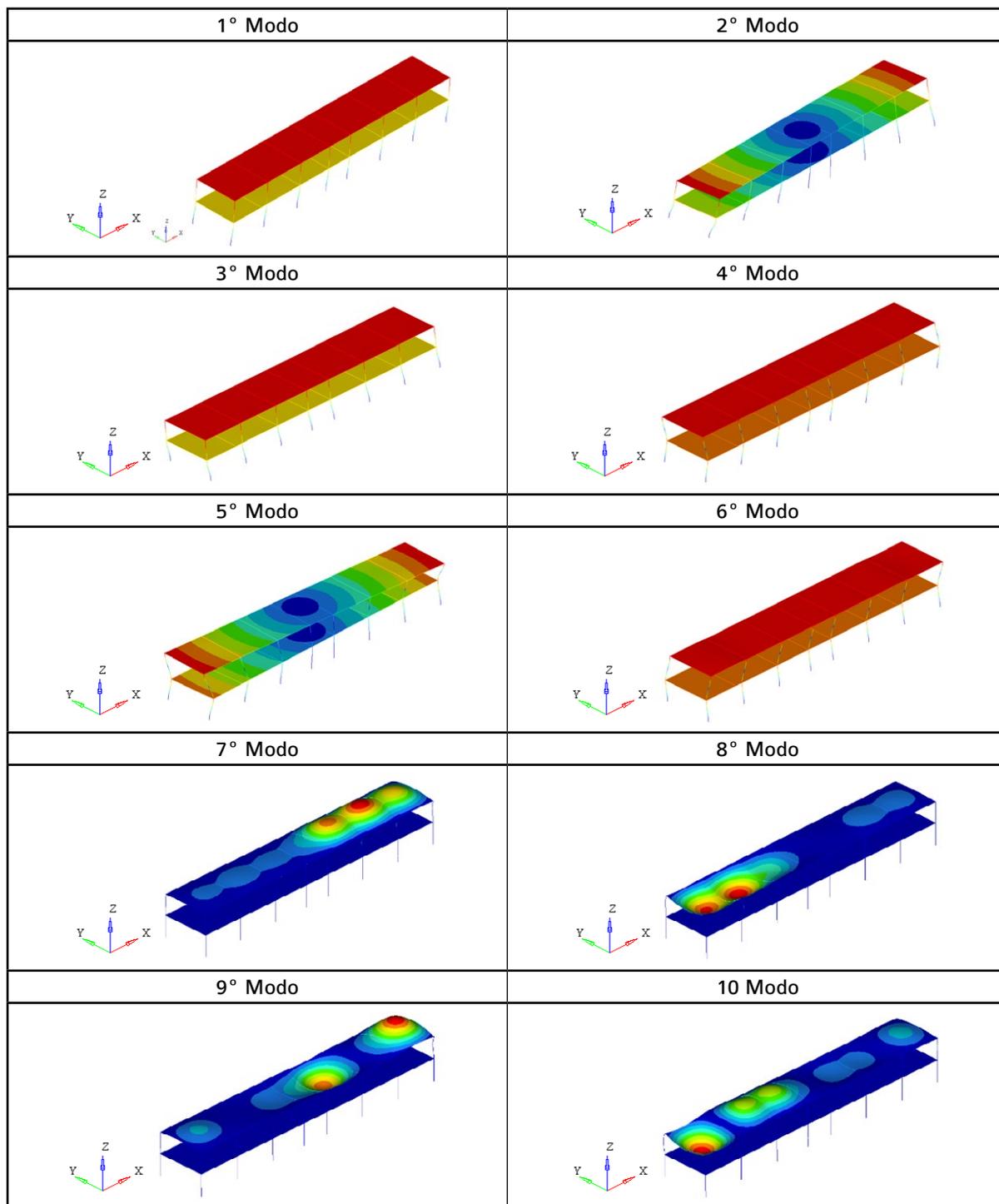
Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 3 – Frequências naturais do modelo estrutural

Modo	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Frequência [Hz]	0,93	1,02	1,54	2,42	2,67	3,99	5,07	5,13	5,39	5,58

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 1 – Dez primeiros modos de vibrar da estrutura



Fonte: Elaboração própria.

Visando à implantação de uma solução de reforço que fosse ao mesmo tempo mais econômica e eficiente, optou-se por reforçar as lajes, utilizando-se vigas de aço dispostas no sentido transversal, apoiando-as nas vigas superiores e inferiores existentes (vigas menos solicitadas), dispensando-se a necessidade de implantação de novos pilares. Optou-se também por usar duas vigas por laje, gerando-se duas cargas pontuais em dois trechos no vão das vigas existentes, o que acarreta uma diminuição do momento, se comparado ao momento que seria gerado por uma carga pontual concentrada no meio do vão, para o caso de se utilizar apenas uma viga.

Seguiu-se a metodologia apresentada na NBR 8800 (ABNT, 2008), para o cálculo das vigas de aço que seriam responsáveis por reforçar a estrutura em estudo. Os perfis calculados foram inseridos na estrutura da escola e foi realizada uma nova análise, utilizando-se as plataformas CAD/TQS e Altair HyperWorks para a verificação dos deslocamentos efetivos e da vibração, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os deslocamentos e a Tabela 6 apresenta a comparação entre as frequências, antes e após a inserção das vigas de reforço.

Tabela 5 – Comparação entre as flechas das lajes antes e depois do reforço

Primeiro pavimento				Segundo pavimento			
Laje	δ_{ef_i} (sem reforço) (cm)	δ_{ef_f} (com reforço) (cm)	$\frac{\delta_{ef_f}}{\delta_{ef_i}}$	Laje	δ_{ef_i} (sem reforço) (cm)	δ_{ef_f} (com reforço) (cm)	$\frac{\delta_{ef_f}}{\delta_{ef_i}}$
LP1	2,57	1,71	0,67	LS1	2,83	2,83	1,00
LP2	3,02	3,02	1,00	LS2	2,78	2,78	1,00
LP3	2,13	2,13	1,00	LS3	2,46	2,46	1,00
LP4	1,61	1,61	1,00	LS4	1,74	1,74	1,00
LP5	2,43	2,43	1,00	LS5	2,97	1,57	0,53
LP6	2,21	2,21	1,00	LS6	2,77	2,77	1,00
LP7	3,94	1,98	0,50	LS7	2,79	2,80	1,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 6 – Comparação entre as frequências naturais antes e depois do reforço

Modo	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Frequência sem reforço (Hz)	0,93	1,02	1,54	2,42	2,67	3,99	5,07	5,13	5,39	5,58
Frequência com reforço (Hz)	0,93	1,02	1,53	2,41	2,66	3,98	5,13	5,19	5,57	5,75

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados mostraram que a inserção dos perfis de aço solucionou o problema das flechas excessivas mantendo as frequências naturais da estrutura praticamente inalteradas. Nas vigas que serviram de apoio para as vigas de reforço, houve um aumento das flechas em torno de 23%, o que não representa problema algum, pois a flecha máxima admissível é ainda superior à nova flecha encontrada.

6 Conclusão

Concluiu-se com esse trabalho que a proposta de reforço utilizada foi capaz de solucionar o problema das flechas excessivas, mas as frequências naturais se mantiveram próximas às determinadas antes da inserção do reforço.

Após analisar os resultados da implantação do reforço, chegou-se à conclusão de que, com relação à

parte estática, os perfis de aço utilizados resolveram de forma satisfatória o problema da flecha excessiva das lajes sem prejudicar a deformação das vigas em que foram apoiados, vigas estas que tiveram um aumento em torno de 23% da flecha efetiva, ficando, porém, ainda abaixo da admissível.

Pela análise dos autovalores (frequências naturais), constatou-se que a estrutura apresentava três modos de vibração com frequências situadas dentro da faixa crítica imposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014), mostrando, assim, a probabilidade de ocorrência de vibração excessiva, gerando desconforto aos seus usuários. Como o problema dinâmico não foi, no entanto, resolvido com a técnica de reforço utilizada, percebeu-se a necessidade de se realizarem mais estudos acerca deste assunto, como: avaliação experimental da resposta desta estrutura para se obter a correta frequência de excitação causada por ação humana em edificações escolares; avaliação da resposta dinâmica da estrutura com relação a normas internacionais; e estudo da implantação de uma técnica de reforço específica para tal problema, se este persistir.

Convém chamar a atenção para a importância e relevância de se considerarem os efeitos das ações dinâmicas no dimensionamento estrutural, visando garantir conforto aos seus usuários. Além disso, é também muito importante dedicar tempo, atenção e cuidado na elaboração e conferência de projetos estruturais, objetivando-se a construção de uma edificação que atenda aos requisitos de segurança atrelada ao melhor custo possível, buscando-se, dessa forma, minimizar a probabilidade de gastos com intervenções e reforços. A não conformidade da estrutura, além de propiciar o surgimento de manifestações patológicas, compromete a durabilidade da estrutura, além do conforto e da segurança do usuário.

REFERÊNCIAS

ANGST, U. M. *et al.* Present and future durability challenges for reinforced concrete structures. **Materials and Corrosion**, v. 63, n. 12, p. 1047-1051, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980. 5 p.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 18 p.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 221 p.

BASTOS, L. S.; SILVA, J. G. S. Modelagem numérica do comportamento estrutural dinâmico e análise de conforto humano de edifícios altos submetidos à ação de cargas de vento não determinísticas. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING (CILAMCE), 37., 2016, Brasília. **Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. Brasília, DF: ABMEC, 2016.

BATTAGIN, Inês. A Durabilidade das Estruturas de Concreto como Parâmetro de Sustentabilidade. **Revista Concreto & Construções**, n. 79, p. 58-64, 2015.

BOLINA, Fabrício; PERRONE, Vitor; TUTIKIAN, Bernardo. Discussão sobre as ações variáveis de projeto segundo os requisitos mínimo, intermediário e superior de desempenho da ABNT NBR 15575. **Revista Concreto & Construções**, n. 79, p. 65-70, 2015.

CAMPISTA, F. F.; GASPAR, C. M. R.; SILVA, J. G. S. Avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) de edificações com base no emprego de modelos biodinâmicos. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING (CILAMCE), 37., 2016, Brasília. **Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. Brasília, DF: ABMEC, 2016.

CAMPOS, Paulo Eduardo Fonseca. Norma de desempenho de edificações: uma contribuição para o desenvolvimento do conceito de normativa exigencial aplicado à construção civil. **Revista Concreto & Construções**, n. 70, p. 26-31, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 22111**: Bases for design of structures – General requirements. Genebra: ISO, 2007. 23 p.

_____. **ISO 2394**: General principles on reliability for structures. Genebra: ISO, 2015. 111 p.

GJØRV, Odd E. Durability of Concrete Structures. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 36, n. 2, p. 151-172, 2011.

LIMA, Daniel Valença Fiuza. **Controle de vibrações induzidas em uma laje de academia de ginástica com a utilização de amortecedores de massa sintonizados**. 2007. 170 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

LIMA, Maryangela Geimba. Ações do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 733-772.

MACHADO, Ari de Paula; MACHADO, Bruno Alberto. Reforços de estruturas de concreto armado: um resumo das alternativas disponíveis. **Revista Concreto & Construções**, n. 82, p. 23-30, 2016.

MARQUES, Rodrigo França Alves. **Estudo teórico e numérico de absorvedores dinâmicos de vibrações ativos e adaptativos**. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

MAYR, Luiz Roberto. **Falhas de projeto e erros de execução: uma questão de comunicação**. 2000. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 773-808.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Paulo: USP, 2007. 380 p.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TIMERMAN, Júlio. Reabilitação e Reforço de Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1175-1209.