



PARAMETRIC ANALYSIS OF VIBRATION IN REINFORCED CONCRETE FLOORS

William Ferreira Miranda

Suzana Moreira Avila

Graciela Nora Doz

williamfmiranda@gmail.com

avilas@unb.br

graciela@unb.br

Universidade de Brasília - UnB

Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília - DF, Brasil

Abstract. *In view of the need to satisfactorily provide the good performance of the structures in their service situations, it is sought to understand the influence of the various design decisions on the dynamic parameters of the structure and in its response when submitted to frequent loadings while considering the particularities of the reinforced concrete. Among the structural typologies most used in reinforced concrete floors, a study will happen regarding which ones are most susceptible to vibrations and which design decisions most affect the dynamic parameters within the same typology. Characteristics of reinforced concrete such as cracking, creep, non-constant reinforcement in the sections, time-varying resistance and modulus of elasticity are fundamental considerations in static analysis. This consideration is often used in floors through the usage of computational tools based on grillage analysis, so this type of computational modeling will be applied in the study of the dynamic parameters. It is desired to conclude if the ABNT rules are enough to avoid the occurrence of this type of phenomenon, and if excessive vibrations may be the limiting factor of dimensioning in comparison to static deformation and stress.*

Keywords: *Dynamics, Floor vibrations, Reinforced Concrete, Vibration Frequencies, Grillage analysis.*

1. INTRODUÇÃO

Os avanços da engenharia estrutural têm propiciado estruturas com grandes vãos e com dimensões que as tornam cada vez mais esbeltas, contudo, se tornam mais suscetíveis a fenômenos que até então não lhes eram comuns. É o que ocorre com casos de vibrações excessivas em estruturas de concreto armado para determinados tipos de utilização.

O desenvolver de novas técnicas matemáticas e computacionais para análise estrutural e dimensionamento, aliadas a um saber mais refinado do comportamento dos materiais e ao desenvolvimento de resistências cada vez maiores destes estão entre os referidos avanços.

Pavic (2002) atribui a ocorrência de vibrações excessivas a falta de pesquisas e interesse científico na performance desse tipo de pavimentos, uma vez que os pisos de concreto armado são notoriamente conhecidos, até então, por seu bom desempenho frente às vibrações em condições de serviço da estrutura.

Soma-se ainda o fato de que se tem verificado a frequente ocorrência de utilização de estruturas para atividades que geram carregamentos dinâmicos que, em muitos casos, não foram previstos em seu projeto original. Um caso particular dessa situação é o de edificações projetadas para atividades comerciais e de escritórios, as quais têm sido utilizadas por academias de ginástica. (Lima, 2007). Battista & Varela (2002) constataram problemas de vibração excessiva em lajes de pisos de edificações residenciais, que causam desconforto aos usuários, mesmo quando se obedece aos critérios de normas de projeto estrutural.

É importante saber que as vibrações raramente afetam a segurança da estrutura e, por conseguinte, são tratadas como um problema de serviço (Bachmann, 1992, apud Carmona, 2016).

Como exemplo de que edifícios de concreto armado têm estado mais suscetíveis a vibrações excessivas decorrentes da utilização, Lima (2007) estudou um edifício comercial localizado na cidade de Brasília, concebido em concreto armado com f_{ck} de 15MPa, lajes maciças de 7cm de espessura apoiadas em vigas de seção retangular de geometrias diversas, que teve parte da sua utilização alterada para uma academia de ginástica no decorrer de sua vida útil e no qual existem queixas de vibrações durante aulas e treinos.

Parece razoável exigir que esta matéria seja levada em consideração durante a fase de concepção da estrutura a fim de que, na medida do possível, seja viável sanar com providências adequadas em projetos, futuros problemas de vibrações, assim como é feito nas demais verificações dos Estados limites de utilização.

Dentre as características do concreto armado que devem ser consideradas nas verificações de serviço estão: o impacto na rigidez devido a presença das armaduras e da fissuração do concreto, o módulo de elasticidade de cada um dos materiais, o aumento na deformação para cargas constantes de longa duração, as datas de cada solicitação e as combinações de carregamentos levadas em consideração em cada verificação.

Alguns destes parâmetros, principalmente o módulo de elasticidade do material e a inércia a flexão das peças, naturalmente influem também no cálculo dos parâmetros dinâmicos do pavimento.

A necessidade de se levar em conta a situação já fissurada do material no momento das verificações das deformações vem do fato de nos pavimentos concebidos em concreto armado, normalmente as cargas de utilização são menores do que as cargas permanentes dessas edificações. Ou seja, as peças trabalharão preponderantemente nessa situação, mesmo em situações comuns de utilização, e não apenas nos momentos de carregamento total.

Carmona (2016) enfatiza a preocupação com a fissuração ocorrida em sua plataforma de ensaios, durante sua construção em 2011, no momento da retirada do escoramento. Um grande esforço é feito para reparar essas fissuras e tentar trazer a estrutura novamente para uma condição de maior frequência natural, apesar de o intuito de suas dimensões esbeltas ser justamente o estudo de vibrações excessivas nesta. As fissuras foram julgadas como provenientes da retração do concreto e ao processo de levantamento da laje, dado a flecha inicial no momento da retirada do escoramento. Foi constatado tanto experimentalmente quanto em simulações numéricas que a frequência natural da plataforma reduziu sensivelmente com a fissuração descrita.

Existem então questões distintas no que se refere a verificação do estado limite de vibrações excessivas em pavimentos de concreto armado: primeiramente é importante perceber se a simples verificação preconizada na norma brasileira de concreto armado é facilmente atendida pelos pavimentos usuais de concreto armado em suas mais variadas configurações e tipologias, após atendidas plenamente as demais verificações de serviço e de estado limite último. É difícil ter um histórico de tal fato uma vez que, por não ser comumente um limitante na etapa de dimensionamento do concreto armado, essa etapa é normalmente negligenciada na prática dos escritórios de cálculo.

Frente a necessidade de atender satisfatoriamente o bom desempenho das estruturas em suas situações de serviço, busca-se entender melhor a influência das diversas decisões de projeto nos parâmetros dinâmicos da estrutura e na resposta desta frente a seus carregamentos corriqueiros, levando em conta as particularidades do concreto armado.

No presente trabalho, partindo de estruturas de pavimentos com dimensões capazes de atender às diretrizes impostas pela norma brasileira de projetos de concreto armado em vigor, NBR6118:2014, estudar-se-á quais tipologias estruturais de pavimentos estão mais suscetíveis a vibrações excessivas. Os parâmetros dinâmicos, frequências naturais e respectivos modos de vibração, serão avaliados apenas após o pavimento em questão ser capaz de atender aos limites de deformações estáticas, considerando armações, efeitos de fissuração e fluência, que são inerentes a toda estrutura de concreto armado.

Além de se avaliar exemplos de lançamentos estruturais de tipologias usuais como lajes convencionais, nervuradas, lajes cogumelo e lajes lisas, este estudo pretende esclarecer o impacto de decisões de projeto dentro de uma mesma tipologia estrutural previamente fixada e definida pelos diversos fatores existentes na etapa de concepção. Serão avaliadas as diversas classes de resistência do concreto e seu consequente impacto no módulo de deformação do pavimento, as condições de engastamento com elementos limítrofes e seu consequente detalhamento de armações, a data de entrada de carregamentos permanentes, pequenas variações de geometria, entre outros parâmetros que se mostrarem interessantes ao entendimento da resposta da estrutura.

É preciso averiguar se após atendidas as verificações de carácter estático no que tange às deformações limites da norma brasileira, os parâmetros dinâmicos exigidos por esta também serão fáceis de se atender.

2. METODOLOGIA

Apesar de existirem diversos softwares, tanto comerciais quanto acadêmicos, capazes de analisar estruturalmente e avaliar os parâmetros aos quais o presente estudo se propõe, optou-se pela utilização do software TQS, versão 18.18.14. Nele, além de recursos voltados para o dimensionamento e detalhamento do concreto armado, pode-se realizar a análise estrutural de pavimentos com a analogia de grelha, com o método dos elementos finitos, pórticos espaciais ou métodos simplificados.

Sua escolha se deve principalmente à interface de modelagem e aos critérios de dimensionamento e análise estrutural serem totalmente voltados para o desenvolvimento de projetos em concreto armado e suas variações (estruturas moldadas *in loco*, pré-moldadas, protendidas, etc), que é exatamente o foco desta análise. Como o intuito é estudar pavimentos de edifícios com lançamentos estruturais o mais próximo possível dos casos correntes, se faz necessária a consideração de regiões peculiares como vãos dos elevadores, pilares de grandes dimensões, vazios de dutos ou *shafts*, dentre outros.

Existem centenas de critérios que este *software* permite ao usuário ajustar a fim de estudar a estrutura da forma desejada, citando-se aqui: geração automática de malha da grelha, refinamento de regiões específicas, considerações de vinculação na interface de elementos, data de entrada de parcelas de carga, considerações sobre a inércia a torção e a flexão das peças, tratamentos de fissuração e fluência, dentre vários outros.

A existência de um modelador estrutural gráfico focado nos principais elementos estruturais presentes em sistemas de concreto armado (pilares, vigas, lajes, capitéis, etc) tornará didática a apresentação das diversas tipologias estruturais das quais se pretende avaliar os parâmetros dinâmicos, sem qualquer prejuízo para o rigor matemático.

3. ESTRUTURA ANALISADA: RESULTADOS

Assim como no processo de lançamento estrutural, ao se definir as dimensões e características das peças aqui apresentadas foram realizadas etapas de pré-dimensionamento e sucessivos processamento a fim de se aproximar de valores factíveis do ponto de vista estático, para então avaliar os parâmetros dinâmicos.

Será tomada como referência para a maioria das comparações, a menos que especificado o contrário, uma laje maciça lisa com 18cm de espessura, sem capitéis na região dos pilares, e com valores comuns da modelagem de estruturas de concreto armado por analogia de grelha previamente fixados.

A forma apresentada na figura 1 representa este pavimento, que apesar de fazer parte de do pavimento tipo de um edifício comercial com 23 pavimentos, aqui foi retirado do seu contexto

para uma análise pontual do pavimento. Para isso, os pilares se comportam como elementos indeformáveis na vertical e com rigidez a flexão dada pela sua seção e pela distância piso a piso, que neste caso é de 3 metros.

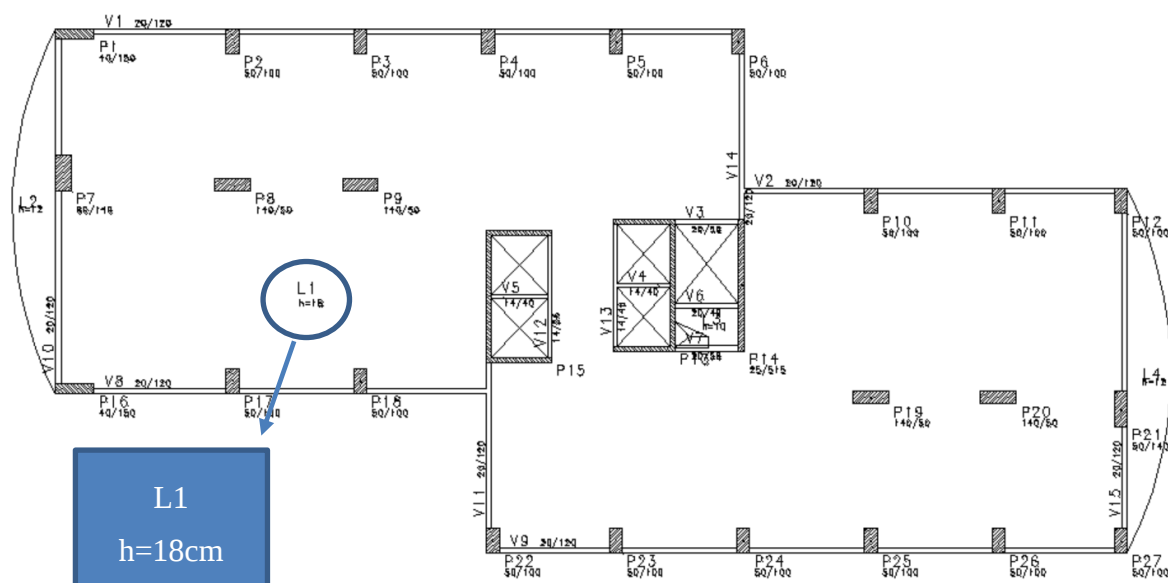


Figura 1 - Forma do pavimento de referência

Dentre os parâmetros previamente fixados destacam-se uma redução de 85% na rigidez a torção das barras da grelha e uma redução de 50% na rigidez a flexão na região dos pilares na região onde as lajes se apoiam diretamente sobre estes. Essas reduções visam aproximar a modelagem de uma situação comum das estruturas, onde picos de momentos fletores em regiões muito rígidas dão lugar a momentos mais suavemente variados entre regiões adjacentes. Fato que impacta diretamente na armação desses trechos. Assim, pretende-se levar este panorama em consideração ao se considerar essa redução na rigidez quando avaliando deformações estáticas e os parâmetros dinâmicos.

Também se mantiveram constantes em todas as análises e modelos os coeficientes de fluência, calculados de acordo com o item 17.3.2.1.2 da NBR6118:2014, e utilizados para estimar a flecha diferida em determinado tempo com base na data de entrada de cargas adotada. Considerou-se que as cargas permanentes imediatas (basicamente o peso próprio) seriam aplicadas um mês após a concretagem do pavimento (retirada do escoramento) e as demais cargas permanentes (contrapiso, alvenarias, etc) atuariam a partir de 2 meses de idade dos materiais. Assim, os coeficientes de fluência que multiplicariam as flechas imediatas para estimativa da flecha diferida adicional foram adotados como 1,32 e 1,16.

Como estabelecido na NBR6118:2014 em seu item 11.8.3.1, foi utilizada a combinação de carregamentos denominada “quase permanente” para a verificação do estado-limite de deformações excessivas. Para tal, esta combinação de serviço utilizou-se dos valores do coeficiente ponderador de ações variáveis adequados para locais em que há equipamentos fixos ou elevada concentração de pessoas (tabela 11.2 da NBR6118:2014). De maneira análoga foi

utilizada a combinação de carregamentos “frequente” para a verificação do estado-limite de abertura de fissuras de forma simplificada.

O espaçamento da malha para lajes maciças foi fixado em 20cm entre barras subsequentes, tanto na vertical quanto na horizontal, com maior refinamento em regiões de concentração de cargas, como no caso dos capitéis de todos os pilares. Já nos modelos das lajes nervuradas e pré-moldadas foi utilizado um espaçamento de barras compatível com estes, de forma que cada nervura fosse contemplada com uma barra.

Em um primeiro momento, durante o pré-dimensionamento, as deformações foram estimadas através da analogia de grelha linear, considerando a combinação de carregamentos pertinente, e majorando as deformações, a fim de estimar a flecha final após decorrida a fissuração e os incrementos da fluência devido a data de entrada de cada carregamento. Após estimado este valor e feitos todos os cálculos dos parâmetros dinâmicos, as deformações foram verificadas com uma analogia de grelha não linear, para que se considerassem os efeitos da fissuração, da fluência e das armações nas deformações do pavimento.

A figura 2 apresenta uma estimativa das deformações imediatas na analogia de grelha linear e sem a consideração de armações, fissuração e fluência. Pode-se notar que as deformações apresentam valores baixos quando comparadas com os vãos onde se inserem, sendo da ordem de $L/500$, onde L representa o vão entre pilares. Contudo, sabe-se que as deformações irão aumentar com a consideração dos efeitos previamente mencionados, principalmente a fluência.



Figura 2 – Estimativas de deformações imediatas sem consideração de armações, fissuração e fluência. Pavimento de referência.

Ainda sobre o pavimento de referência, os parâmetros dinâmicos (1º Modo de vibração e sua respectiva frequência fundamental) encontrados foram aqueles apresentados na Figura 3.

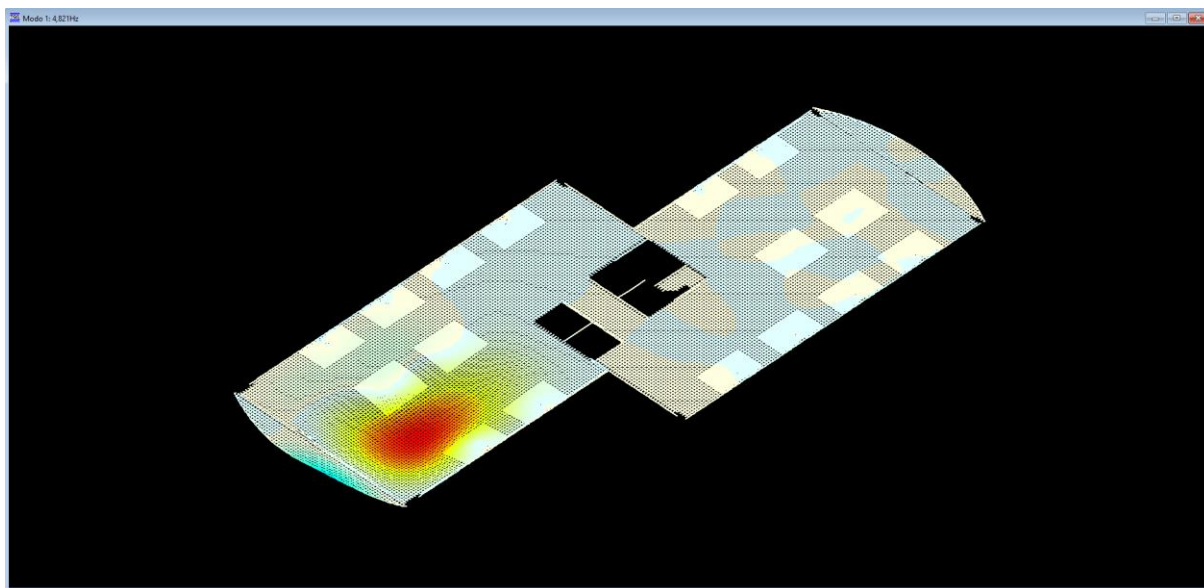


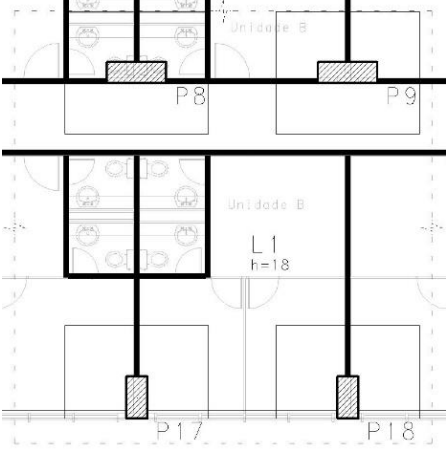
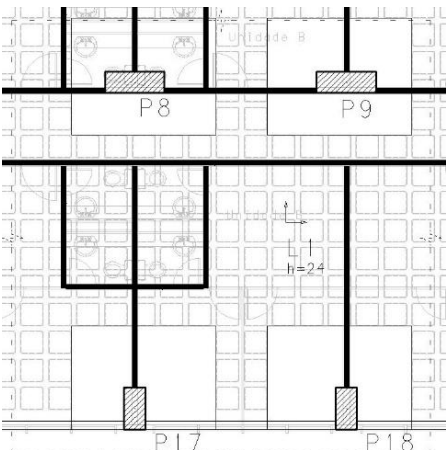
Figura 3 – Frequência fundamental do pavimento de referência: 4,821Hz

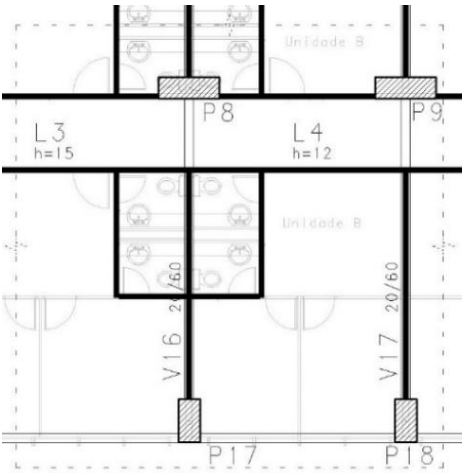
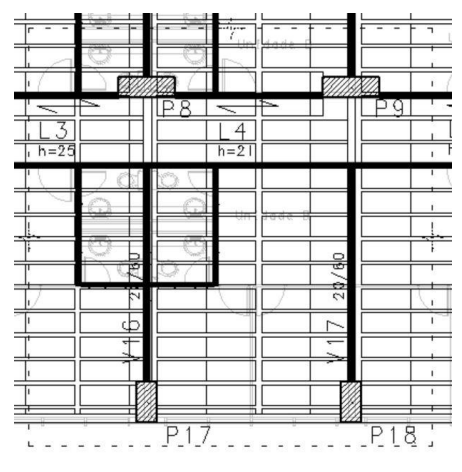
A região que apresenta a menor das frequências é justamente a região com maior vão, dado que a espessura da laje principal é constante em toda sua área, e a frequência natural do pavimento (4,821Hz) está no limite preconizado pela NBR 6118, como será confirmado adiante e comparado com outras tipologias.

3.1 Parâmetros dinâmicos em diferentes tipologias estruturais

A fim de compararmos as frequências naturais do mesmo pavimento já apresentado, mas com diferentes tipologias estruturais para a laje principal, a tabela 1 lista e especifica diferenças e similaridades entre tipologias de modelos analisados e os codifica para organizar futuras análises e referências. É importante notar que a maioria dos itens se mantêm constante entre os modelos, variando basicamente sua tipologia estrutural e alguns detalhes inerentes a cada uma destas.

Tabela 1 – Tipologias analisadas e os principais parâmetros adotados

MOD	TIPOLOGIA ESTRUTURAL DO PAVIMENTO	PARÂMETROS ADOTADOS
1.1	 Laje Maciça apoiada sobre pilares	• $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$; • Módulo de elasticidade – NBR6118:2014; • Espessura da laje principal = 18cm; • Blocos cerâmicos dividindo unidades e contorno; • Capitéis com a mesma espessura da laje e com redução de inércia (divisor igual a 2); • Carga Perm e Sobrecarga: 2 e 3 kN/m²;
2.1	 Laje Nervurada apoiada sobre pilares	• $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$; • Módulo de elasticidade – NBR6118:2014; • Espessura da laje principal = 24cm; • Bl. cerâmicos dividindo unidades e contorno; • Capitéis com a mesma espessura da laje e com redução de inércia (divisor igual a 2); • Carga Perm e Sobrecarga: 2 e 3 kN/m²;

3.1	 Lajes Maciças apoiadas sobre vigas	• $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$; • Módulo de elasticidade – NBR6118:2014; • Bl. cerâmicos dividindo unidades e contorno; • Carga Perm e Sobrecarga: 2 e 3 kN/m²; • Vigas na vertical; • Vigas pouco deformáveis (h=60cm); • Lajes contínuas (h=15cm e 12cm);
4.1	 Lajes Pré-moldadas unidirecionais	• $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$; • Módulo de elasticidade – NBR6118:2014; • Bl. cerâmicos dividindo unidades e contorno; • Carga Perm e Sobrecarga: 2 e 3 kN/m²; • Vigas na vertical; • Vigas pouco deformáveis (h=60cm); • Lajes contínuas (h=25cm e 20cm) com capa de 5cm; • Nervura de enrijecimento transversal com 15cm;

Para cada um dos modelos supracitados, foram realizadas as verificações preconizadas na norma brasileira (estado-limites de deformações, fissuração, armações, alvenarias, etc), para que os parâmetros dinâmicos fossem calculados em pavimentos que já atendem às verificações da parte estática, ou que estivessem no limite para tal.

As tabelas 2 e 3 (NBR 6118:2014) são as principais referências de limites para frequências críticas para vibrações verticais e para limites de deformações utilizadas neste estudo. Lembrando que no caso das frequências de vibração, a frequência do pavimento deve no mínimo superar em 20% sua correspondente frequência crítica tabelada.

Tabela 2 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (NBR 6118:2014)

Caso	f_{crit} Hz
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

Tabela 3 - Limites para deslocamentos (NBR 6118:2014)

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$\ell/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell/600$
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento

Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell/500$ ^c e 10mm e $\Theta=0,0017$ rad ^d
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell/250$ ^c e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\Psi_1=0,30$)	$H/1700$ e $H/850$ ^e entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell/400$ ^g e 15 mm
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_i/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$\ell/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$\ell/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

^a As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.

^b Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $\ell/350$.

^c O vão ℓ deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.

^d Rotação nos elementos que suportam paredes.

^e H é a altura total do edifício e H_i o desnível entre dois pavimentos vizinhos.

^f Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_i representa o comprimento do lintel.

^g O valor l refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

NOTAS

- 1 Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão l suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.
- 2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor l é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.
- 3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11.
- 4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

A Tabela 4 lista as frequências naturais encontradas para cada modelo. O modo de vibração correspondente se assemelha sempre ao apresentado para o pavimento de referência na figura 3. A tabela apresenta ainda valores das flechas estudadas em cada modelo para a combinação Quase Permanente. A verificação das deformações não se limitou a essa comparação de valores, pois estudou inclinações, deformações em diferentes instantes, isovalores, entre outros.

Tabela 4 – Frequências naturais dos pavimentos

Modelo	Flecha imediata (cm)	Flecha final (cm)	Limite para Aceitabilidade sensorial (cm)	Frequência Natural (Hz)
1.1	1,54	2,35	3,08	4,821
2.1	1,16	1,87	3,08	5,441
3.1	1,20	2,23	2,73	4,992
4.1	1,57	2,58	2,73	4,444

Vale mencionar que em alguns dos modelos, dado suas dimensões e complexidade, os pontos críticos das deformações por vezes variaram de posição. Contudo, para manter a comparação entre os sistemas estruturais, optou-se em focar a análise e a apresentação de valores na mesma região (ver região em destaque na figura 3).

Apesar de a análise direta da flecha final em comparação com o limite de aceitabilidade sensorial apresentar certa distância entre o valor calculado e seu limite normatizado (tabela 4), o que se observou durante a verificação estática do estado de utilização é que outros itens estavam sendo os verdadeiros limitantes para o dimensionamento.

Na laje maciça com 18cm apoiada diretamente sobre os pilares (modelo 1.1), mesmo atendendo com certa facilidade aos limites de aceitabilidade sensorial, abertura de fissuras e

possibilidade de detalhamento de armações, o pavimento não atendia a verificação de flecha máxima após a construção de alvenarias, sendo este seu fator limitante de dimensionamento. Contudo, este limitante é bem específico do nosso caso em estudo e sofre influência de diversos fatores, como a existência de alvenarias nessa região e a data de sua execução frente a data de concretagem e de retirada do escoramento. Enquanto isso, conforme já apresentado, a frequência natural do pavimento (4,821Hz) está próximo ao limite de 4,8Hz (20% acima do valor apresentado na tabela 2) para o caso de escritórios. Logo, em um caso pouco diferente, a verificação de vibrações poderia ter sido o fator limitante do dimensionamento deste pavimento.

Este mesmo fenômeno ocorreu em todos os 4 modelos apresentados, nos quais sempre o limitante foi flecha após a execução das alvenarias, algumas vezes em seu valor de deformação e outras devido à rotação desta. O modelo 4.1 (lajes pré-moldadas unidirecionais), apesar de pouco comum em obras de edificações multipavimentos ou de grandes vãos, foi capaz de atender todos os limites estáticos com os parâmetros mencionados, sem, contudo, atingir os 4,8Hz preconizados para sua utilização como escritório. Sua frequência natural foi calculada como 4,444Hz, referente ao seu primeiro modo de vibração, cuja região caracterizada por este é semelhante àquela apresentada na figura 3.

Em modelos adicionais, elaborados nas etapas de pré-dimensionamento e validação dos *softwares* pôde-se perceber qualitativa e quantitativamente que os mais variados ajustes impactam nos valores das frequências naturais, ao mesmo tempo que influem na análise estática. A simples retirada alvenarias para abrir vãos, ou sua substituição por divisórias mais leves já altera significativamente a frequência. Apesar da frequência de vibração e seus respectivos modos serem uma propriedade intrínseca da estrutura, independente do carregamento imposto, no caso das estruturas estudadas parte dessa carga fica vinculada às cargas permanentes e deve ser tratada como massa desta, e assim, altera suas propriedades dinâmicas.

O modelo 2.1 (laje nervurada) chama atenção por apresentar sua frequência natural 13,8% acima do limite preconizado mesmo enquanto a flecha após a execução das alvenarias é seu limitante de dimensionamento. Atribui-se este fato a principal característica desta tipologia, que busca um ganho de rigidez ao mesmo tempo que reduz sua massa/peso próprio por meio da inclusão de material inerte ou formas plásticas removíveis nas regiões onde o concreto pouco contribui para seus parâmetros.

A figura 4 mostra uma vista inferior da laje nervurada estudada no modelo 2.1, enquanto a figura 5 apresenta sua distribuição de formas plásticas em planta.

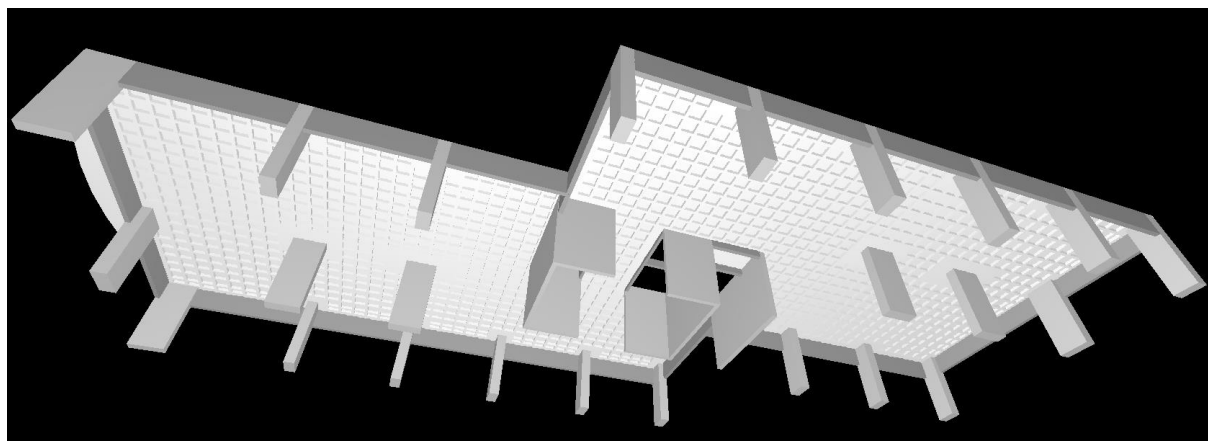


Figura 4 - Modelagem de laje nervurada, com capitéis com a mesma espessura da laje (nervuras) e com viga de bordo rígida.

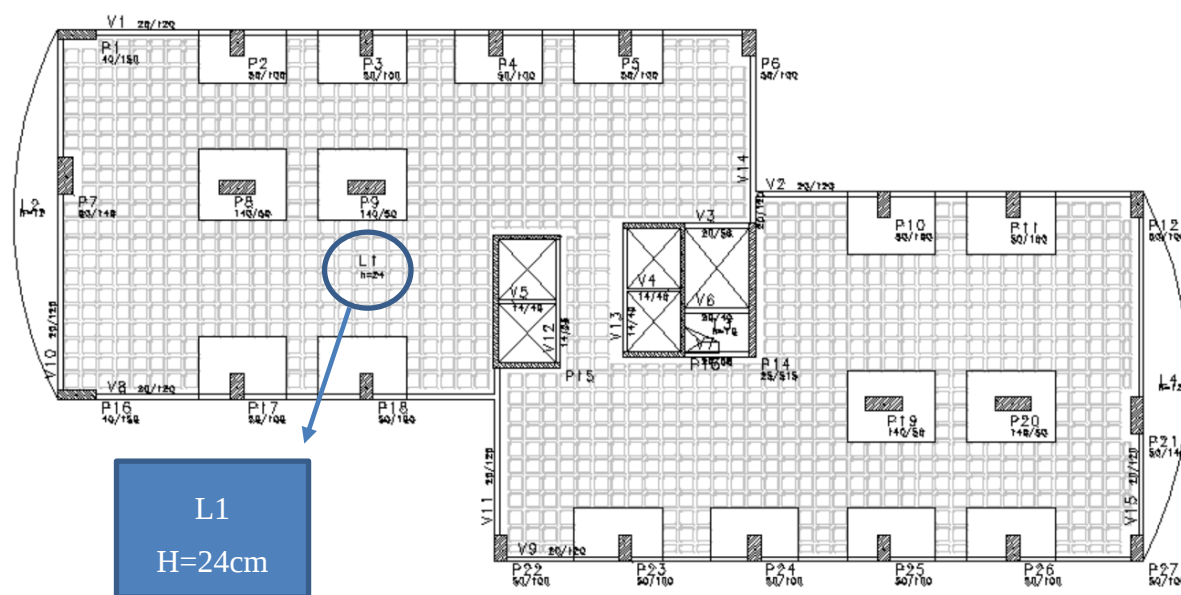


Figura 5 – Forma do pavimento com laje nervurada

3.2 Variação de parâmetros dentro de uma mesma tipologia estrutural

Diversas variações do pavimento de referência (modelo 1.1) foram estudadas a fim de verificar quais decisões de projeto eram as mais impactantes nos parâmetros dinâmicos dentro desta mesma concepção e tipologia estruturais (laje maciça lisa apoiada diretamente sobre pilares).

A inclusão de capitéis pode ter as mais diversas finalidades, e, apesar de tornar a execução deste tipo de pavimento um pouco mais complicada, garante mais rigidez ao sistema do pavimento como um todo. Conforme o esperado, isso ocorreu quando foram incluídos capitéis

de 35cm de espessura junto aos pilares centrais e àqueles de bordo que de adentravam a laje em si, conforme apresentado nas figuras 6 e 7.

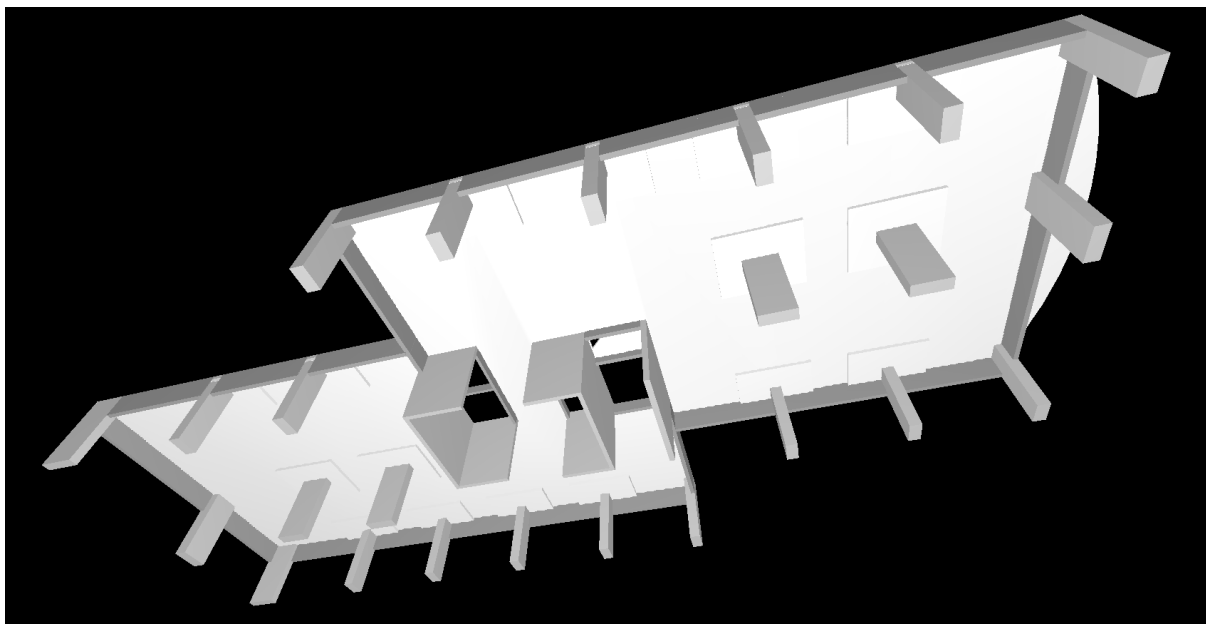


Figura 6 – Perspectiva inferior do pavimento com a inclusão de capitéis de 35cm de altura.

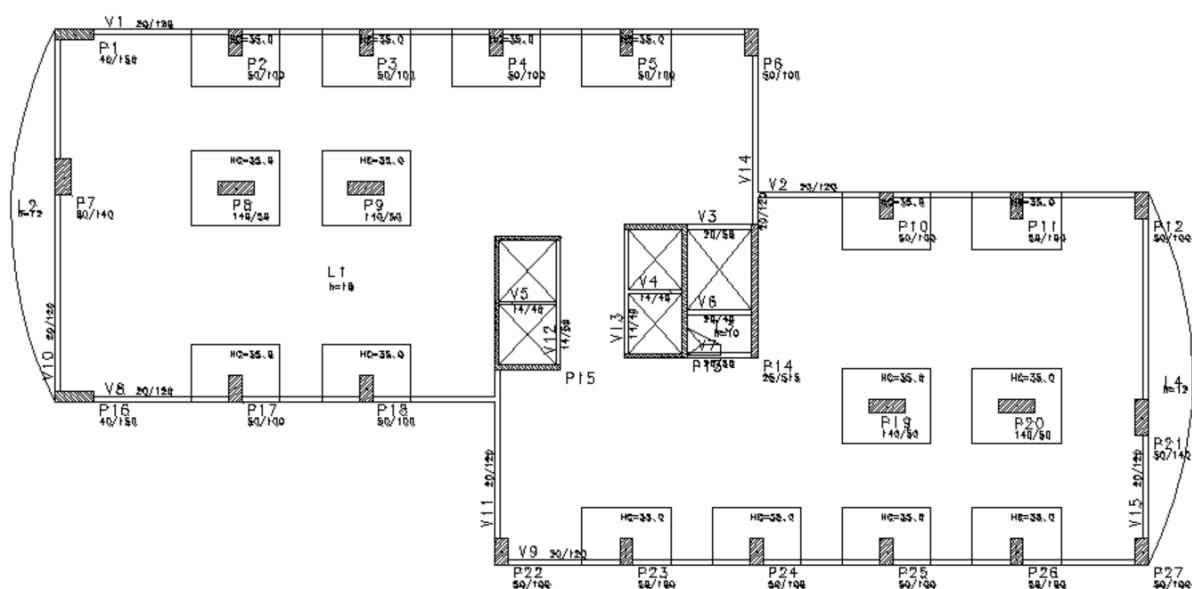


Figura 7 - Forma do pavimento com a inclusão de capitéis.

Com esse pequeno ajuste, sem praticamente qualquer impacto arquitetônico caso se presuma a utilização de forro nos ambientes, a frequência fundamental do pavimento aumentou em cerca de 30% (6,246Hz), com impacto direto também na deformação do pavimento, conforme esperado.

Outro ajuste que influi diretamente nos parâmetros dinâmicos, assim como na resposta estática, sem qualquer prejuízo arquitetônico para a esbeltez do pavimento é o ajuste da resistência do concreto, que impacta diretamente em seu módulo de elasticidade, segundo as equações preconizadas na NBR 6118.

Em nosso pavimento de referência foi adotado um concreto de f_{ck} igual à 30MPa.

Alterando este valor para 40MPa e 50MPa, a frequência natural do pavimento atingiu 5,254Hz e 5,632Hz respectivamente. Um ganho considerável para um ajuste tão simples e de baixo custo, quando este for o limitante de dimensionamento de um pavimento, caso a frequência mínima de norma não esteja sendo atendida para o uso previsto, ainda em fase de projeto.

Como previamente mencionado, alterando-se a alvenaria das salas para sistemas mais leves como o gesso acartonado (dry-wall), observa-se um significativo aumento na frequência natural do pavimento.

É fato que a frequência natural de um elemento é uma propriedade inerente a este dado sua geometria e material, contudo, esses elementos têm caráter permanente e não podem ser considerados como um simples carregamento (o que de fato não afetaria no valor da frequência natural), mas sim como parte da massa da estrutura, e neste caso, afeta seus parâmetros.

Neste caso em específico o aumento na frequência natural foi de mais de 15%, passando de 4,821Hz para 5,573Hz, mantendo todos os demais parâmetros do pavimento de referência constantes.

Ainda com respeito às lajes lisas, verificou-se o esperado aumento nos parâmetros dinâmicos quando se aumenta a espessura das lajes. É importante perceber que ao mesmo tempo em que se aumenta consideravelmente a inércia das peças (tendência a aumentar a frequência natural), aumenta-se também a massa da estrutura (tendência a diminuir a frequência natural).

Das análises feitas pôde-se construir a tabela 5, que relaciona a espessura da laje principal, com a flecha final da combinação de carregamento quase permanente e com a frequência natural do pavimento (com modo de vibração sempre na mesma região).

Tabela 5 - Relação entre espessura, flecha final e Frequência natural no pavimento de referência

Espessura da laje principal (cm)	Flecha final (cm)	Frequência natural (Hz)
18	2,35	4,821
20	1,82	5,430
22	1,45	6,036
24	1,26	6,648

Assim, durante a etapa de projeto, caso seja arquitetonicamente viável, esse tipo de ajuste pode aumentar consideravelmente a frequência do pavimento, assim como é comumente feito para se adequar as deformações aos limites da norma. De acordo com a norma, a simples alteração na natureza do agregado graúdo já pode contribuir positiva ou negativamente no valor de seu módulo de elasticidade.

4. CONCLUSÕES

As exigências da norma brasileira para projetos de estruturas de concreto armado são aparentemente muito mais rígidas no que tange às verificações estáticas do que às dinâmicas. De fato, uma vez atendidas plenamente às regulamentações da parte estática, a tendência é que, para estruturas correntes e para os usos mais comuns, a frequência fundamental do pavimento atinja os valores considerados críticos sem grande dificuldade.

Contudo, não é razoável negligenciar esta verificação, uma vez com pequenos ajustes de concepção é possível adequar pavimentos já bem resolvidos nos quesitos estáticos (deformações, fissuração, armação, esforços, dimensionamento, etc) também aos requisitos dinâmicos da NBR 6118, sem prejuízos para o partido arquitetônico e/ou financeiro.

Isso não significa dizer que uma vez atendidas as verificações preconizadas na norma brasileira o pavimento está livre de vibrações causadas por sua utilização. Outras normas internacionais e diversos autores mencionam técnicas para se avaliar de forma mais precisa a suscetibilidade de uma estrutura a vibrações induzidas pelo homem. Uma maneira simples de se avaliar este item em trabalhos futuros seria tomando estruturas de pavimentos capazes de atender plenamente a norma brasileira e submetendo-as a normas internacionais. Normalmente, no que diz respeito a normas de engenharia, quanto mais simples a verificação de um fenômeno, maior o coeficiente de segurança embutido nesta verificação.

Cabe salientar que as mesmas características do concreto armado que são de consideração exigida nas verificações estáticas preconizadas pela NBR 6118, também estão presentes e influenciam nos parâmetros dinâmicos, sendo razoável que se estude seu impacto na resposta e

nos parâmetros dinâmicos, mesmo que fossem alterados os limites a serem atendidos frente a uma análise mais refinada da questão.

REFERÊNCIAS

- Aalami B. O., 2008. *Vibration design of concrete floors for serviceability*. ADAPT Corporation. San Francisco State University – USA.. 20p.
- ABECE, 2012. *Notas de aula: Projeto de Estruturas de Concreto para edifícios*. ABECE, FESP, TQS. São Paulo, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. *NBR 6118: Projeto e Execução de estruturas de Concreto*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Carmona, J. E., 2016. *Proposta de um amortecedor para atenuação de vibrações em pisos de concreto: análise numérica e experimental*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-1A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 287p.
- Carmona, J. E. C., 2011. *Plataforma de ensaios dinâmicos: estudos preliminares, projeto e construção*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM- 008A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142p.
- Carvalho, R. C., 1994. *Análise não-linear de pavimentos de edifícios de concreto através da analogia de grelha*. Tese de Doutorado em Engenharia, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 208 p.
- Clough, Ray W., 2003. *Dynamics of structures – Third Edition* / Ray W. Clough, Joseph Penzien. Computers & Structures, Inc. Berkeley, CA – USA. 730p.
- Dietrich, M. Z., 2013. *Vibrações em pisos de estruturas de aço devido à atividade humana*. Matheus Z. Dietrich, Felipe B. Teixeira, Adenilcia F. G. Calenzani, Walnório G. Ferreira. CILAMCE 2013, 20p.
- Kimura, A., 2007. *Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais*. São Paulo: Pini. 624p.
- Lima, D. V. F., 2007. *Controle de Vibrações Induzidas em uma Laje de Academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados*, Publicação: E.DM – 010A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xxii, 148 p.
- Murray, M. T., 1997. *Floor Vibrations Due to Human Activity*. Thomas M. Murray, David E. Allen, Eric E. Ungar. AISC/CISC – Design Guide Series, 71p.
- Pavic, A., 2002. *Vibration serviceability of long-span concrete building floors. Part 1: review of background information*. Aleksandar Pavic, Paul Reynolds. University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering, 81p.
- Santos, M.D.S., 2009. *Análise Numérica do Controle de Vibrações em Lajes de Edifícios Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados*, Publicação: EDM – 011A/09,

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xxi, 171p.

Tedesco, J. W., 1998. *Structural Dynamics: Theory and Applications 1st Edition*. Joseph W. Tedesco, William G. McDougal, C. Allen Ross. 816p.

TQS Informática, 2009. *Análise dinâmica – CAD/TQS. Biblioteca Digital. Acervo de artigos online sobre análise estrutural com o sistema CAD/TQS.*