



CARACTERIZAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE VIBRAÇÃO ATRAVÉS DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

Ana Carreira¹, Albano Neves e Sousa²

¹CEPAC, Universidade do Algarve, Campus da Penha, 8005-139 Faro, Portugal
ascarrei@ualg.pt

²CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal
albano.n.e.sousa@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Este artigo descreve os parâmetros que controlam a propagação da vibração através de estruturas de edifícios de betão armado para frequências abaixo de 200 Hz. A influência das propriedades dos materiais e das dimensões dos elementos estruturais foi avaliada com modelos de elementos finitos validados experimentalmente, considerando cinco tipos de funções de transferência de aceleração: i) da fundação para o primeiro piso; ii) entre pisos intermédios; iii) do último piso para a cobertura; iv) entre troços do mesmo piso intermédio; e v) entre troços da cobertura. Os resultados mostram que a transmissão de vibração depende não tanto do número de pisos mas mais de parâmetros como a espessura da laje, no caso da transmissão da vibração num pavimento, ou a esbelteza dos pilares, no caso da propagação de vibração das fundações para o primeiro piso. Observa-se que, apesar da amplitude de vibração ser maior para elementos estruturais mais flexíveis, os elementos mais rígidos transmitem efectivamente mais energia devido a um menor efeito dissipativo. Os resultados também mostram que a atenuação piso-a-piso é aproximadamente constante para todos os pisos excepto a cobertura, onde a atenuação diminui por via da redução do número de caminhos de dissipação de energia.

Palavras-chave: vibração, ruído, baixa frequência, edifícios, betão armado.

Abstract

This paper describes the parameters which control vibration propagation through reinforced concrete frame buildings for frequencies below 200 Hz. The influence of material properties and structure dimensions was assessed with experimentally validated finite element models, considering five types of acceleration transfer functions: i) from foundation to the first floor; ii) between intermediate floors; iii) from the top floor to the roof; iv) between sections of the same intermediate floor; and v) between roof sections. Results show that vibration transmission depends not so much on the number of floors but more on parameters such as the slab thickness, in the case of vibration transmission in a floor, or the columns slenderness, in the case of vibration propagation from foundations to the first floor. Although vibration amplitudes are higher for more flexible structural elements, stiffer elements actually transmit more energy due to lower dissipation effects. Results also show that floor-to-floor attenuation is roughly constant for all floors but the roof, where it decreases due to the reduction of available dissipation paths.

Keywords: vibration, noise, low frequency, buildings, reinforced concrete.

PACS no. 43.40.+s

1 Introdução

A previsão da propagação de vibrações através dos diversos elementos das estruturas de edifícios constitui, em geral, uma tarefa complexa, mas necessária para a estimativa dos campos sonoros gerados para frequências abaixo de 200 Hz nos compartimentos interiores por fontes de excitação directa da estrutura (interiores ou exteriores). Com o objectivo de ultrapassar algumas das dificuldades desta tarefa, analisa-se a transmissão de vibração de baixa frequência ao longo das estruturas de edifícios de betão armado, tentando identificar os parâmetros mecânicos e geométricos que afectam a propagação da vibração, em planta e em altura, ao longo dos elementos e entre elementos estruturais. Para o efeito, realizaram-se ensaios de vibração forçada na estrutura de um edifício com dois pisos que se encontrava em fase construtiva. Para a mesma estrutura, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos que foi ajustado ao modelo experimental, a partir do qual foram efectuadas análises de sensibilidade às características da estrutura e do material.

2 Modelo de transmissão de vibração

Apresentam-se, na Figura 1.a) e 1.b) dois esquemas simplificados do processo de transmissão da vibração ao longo da estrutura de um edifício, devido a fontes de vibração localizadas, respectivamente, no exterior e no interior dos edifícios, onde bc representa a dimensão da secção transversal dos pilares, hs a espessura da laje e Lc o comprimento do troço de pilares entre pisos. Estes esquemas mostram que a energia de vibração que se propaga ao longo dos pavimentos de um piso e entre pisos do edifício corresponde à soma de várias parcelas: i) transmissão de vibração ao longo dos elementos estruturais verticais e horizontais; ii) transmissão de vibração em planta através dos nós da estrutura; e iii) transmissão de vibração em altura através dos nós da estrutura.

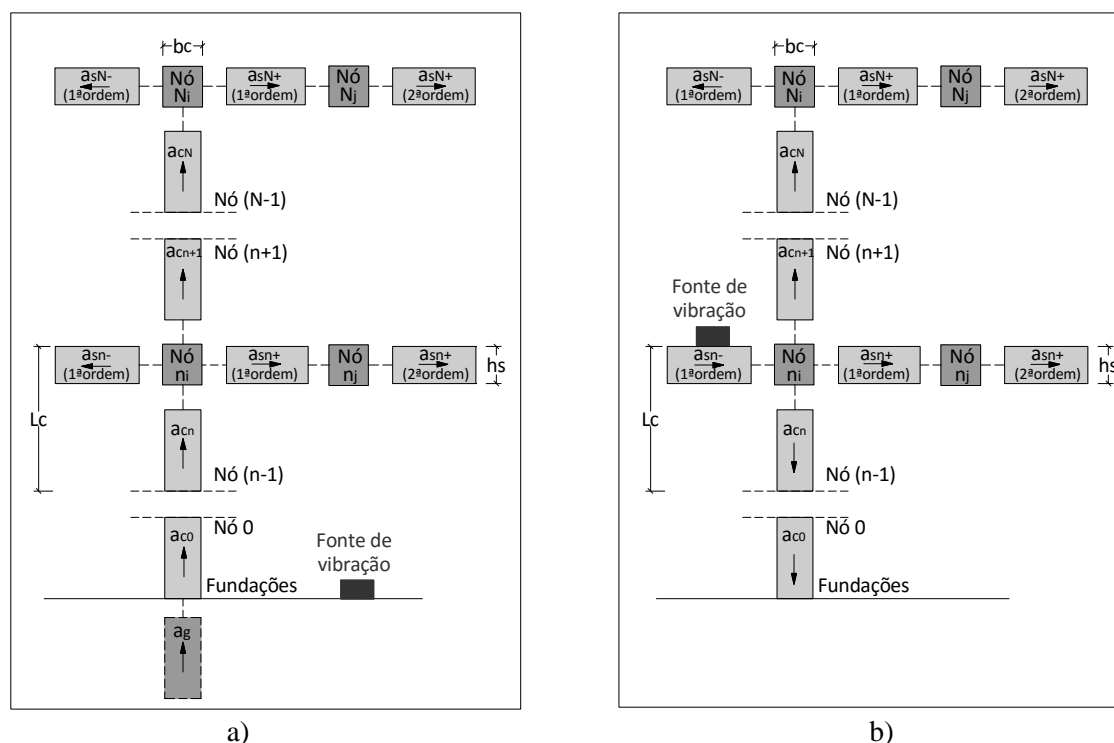


Figura 1 – Esquema da propagação da vibração numa estrutura de um edifício devido a fontes de vibração: a) exteriores; e b) interiores.

Com o objectivo de identificar, de entre os parâmetros envolvidos na modelação, aqueles que exercem menos influência na resposta da estrutura e os que mais contribuem para a variabilidade dos resultados, foram realizadas análises de sensibilidade por recurso a modelos de elementos finitos. Para o efeito, utilizou-se, como caso de estudo, a estrutura de um edifício real em construção. Desenvolveu-se um modelo de elementos finitos com as características do edifício real, o qual foi validado por comparação entre os resultados dinâmicos extraídos do modelo numérico e os registos de ensaios experimentais de vibração efetuados durante a fase construtiva do edifício.

3 Caso de estudo – edifício escolar

Na Figura 2 apresenta-se o edifício seleccionado. Trata-se de um edifício destinado a uma escola, localizado em Faro, com dois pisos e estrutura reticulada em betão armado, cuja planta está representada na Figura 3. As características do betão foram estimadas experimentalmente e ajustadas numericamente com base num modelo de elementos finitos de laje, concluindo-se que o betão mais provável pertence à classe de resistência C25/30, à qual corresponde um valor característico da resistência à compressão em provetes cilíndricos normalizados de 26 MPa, um módulo de elasticidade tangente de 34 GPa e um coeficiente de amortecimento de 5 %.



Figura 2 – Vista exterior e interior do edifício da escola.

Foram realizados ensaios *in situ*, em frequências entre 10 e 250 Hz, para avaliar a transmissão de vibração ao longo dos elementos e através dos nós da estrutura do edifício. As respostas à vibração imposta pelo impacto de um martelo foram registadas simultaneamente em duas secções do mesmo elemento ou de elementos estruturais distintos. Os elementos ensaiados são identificados na Figura 3 e as secções de registo das resposta e de aplicação da força são numeradas na Figura 4.

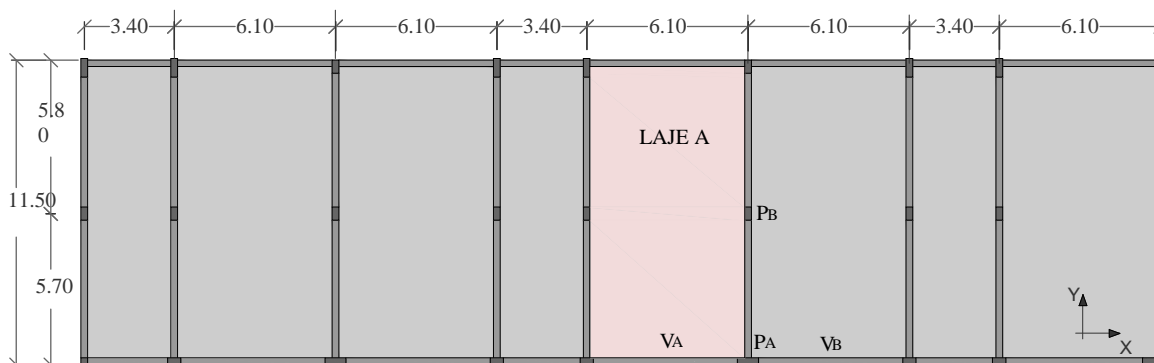


Figura 3 – Planta da estrutura do edifício da escola.

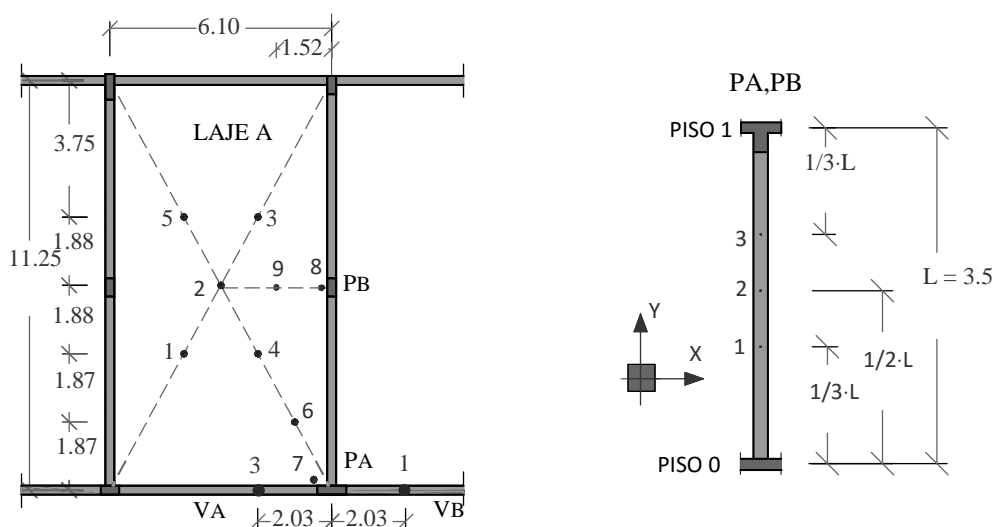


Figura 4 – Elementos estruturais do edifício da escola ensaiados.

3.1 Modelo de elementos finitos

Foi desenvolvido um modelo dinâmico de elementos finitos da estrutura do edifício (Figura 5), com recurso ao programa de cálculo automático *SAP2000.15* [1]. A malha de elementos finitos da estrutura foi definida com base no limite de aplicação da teoria de ondas de flexão. A vibração da estrutura foi gerada por forças impulsivas aplicadas nas mesmas secções que nos ensaios experimentais com discretização no domínio do tempo em 2048 instantes por segundo. As respostas foram obtidas por análises elásticas, com igual discretização no domínio do tempo, pelo método de sobreposição modal.

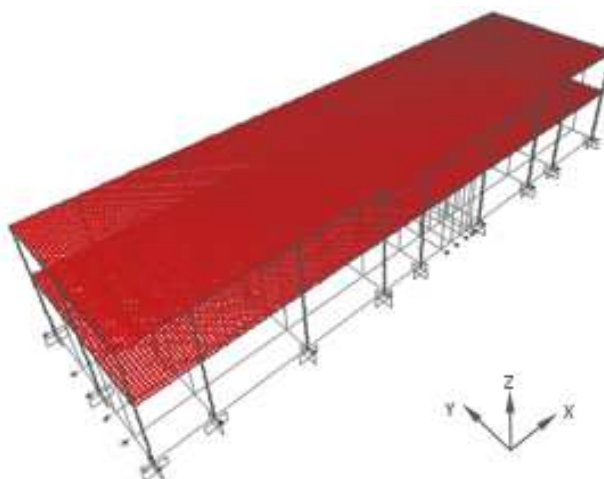


Figura 5 – Modelo de elementos finitos da estrutura do edifício da escola.

O modelo de elementos finitos foi ajustado ao modelo experimental com base na comparação das respostas numéricas com os registos experimentais, em termos de frequências próprias de vibração dos elementos de barra e de funções de transferência em aceleração nos elementos e através dos nós da estrutura. Os métodos de ajuste utilizados para este efeito foram a comparação gráfica, complementada com o método de comparação estatística FDAC (*frequency domain assurance criterion*), o qual correlaciona as respostas por frequência medida [2]. Apesar do ajuste entre os

modelos numérico e experimental não ser perfeito – o que se deve às simplificações adoptadas no modelo numérico e às limitações do equipamento de medição utilizado nos ensaios –, em geral, os resultados extraídos do modelo numérico aproximam-se dos experimentais, pelo que o modelo de elementos finitos desenvolvido é adequado para avaliação da transmissão da vibração no edifício.

4 Casos de estudo teóricos – variantes ao edifício escolar

Com o objectivo de realizar análises de sensibilidade, foram desenvolvidos 15 modelos de elementos finitos de estruturas variantes resultantes de alterações à estrutura real do edifício escolar analisado. Pretende-se perceber de que forma a vibração se propaga localmente ao longo dos elementos estruturais, nomeadamente ao longo de pavimentos vigados e entre pisos dos edifícios através dos pilares, avaliando também a influência das características da estrutura e dos materiais neste processo. Para os pilares foi avaliada a influência do número de pisos do edifício, do módulo de elasticidade do material, das dimensões da secção transversal e do tipo de nó de extremidade. Neste último caso, foram comparados os resultados da vibração de pilares com as mesmas características físicas e geométricas, mas com diferentes localizações em planta e diferentes tipos de ligação a elementos de viga, de acordo com a Figura 6: a) pilares de canto; b) pilares de bordo tipo T; c) pilares de bordo tipo I; d) pilares interiores tipo I; e e) pilares interiores tipo +. O efeito da tipologia dos nós dos pilares na transmissão da vibração longitudinal está ilustrado na Figura 7, através das funções de transferência da aceleração, na direcção vertical, obtidas, com modelos de edifícios de dois pisos, entre os pisos 0 e 1.

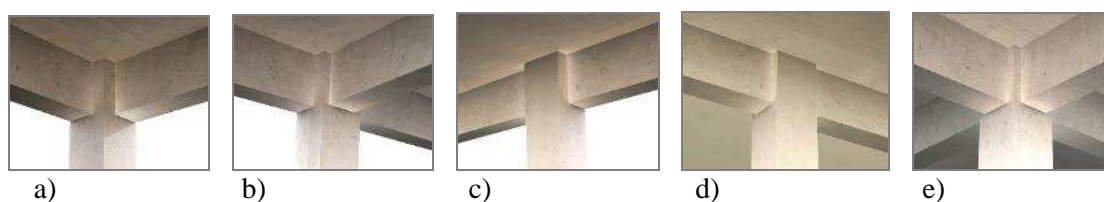


Figura 6 – Ilustração de alguns tipos de nós de pilares.

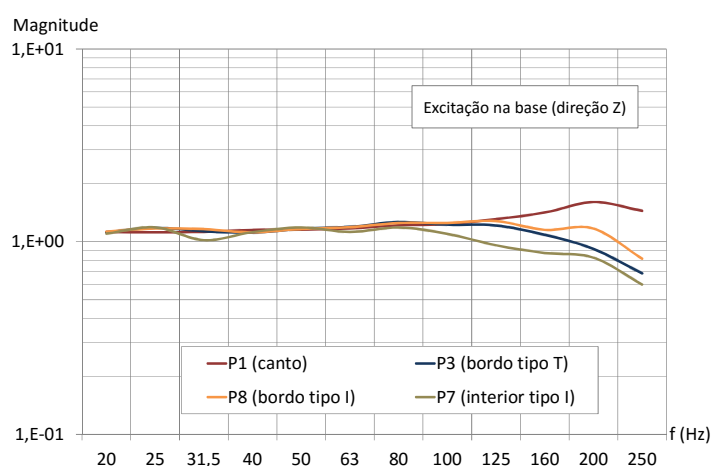


Figura 7 – Influência do tipo de nó de extremidade dos pilares na transmissão da vibração longitudinal ao longo dos mesmos.

Conclui-se que, na gama de frequências acima dos 80 Hz, ocorre, nos pilares de canto, uma amplificação das vibrações longitudinais ao longo do comprimento do pilar, em oposição aos pilares interiores.

No caso dos elementos de laje, avaliou-se a influência do número de pisos do edifício, do módulo de elasticidade do material, das dimensões das lajes em planta, da espessura das lajes e do tipo de apoios, tendo-se concluído que a vibração transmitida ao longo dos pavimentos vigados aumenta, em geral, com o incremento do valor da espessura das lajes. Apesar dos elementos mais rígidos possuírem uma maior capacidade para transmitir as vibrações, os elementos com espessuras inferiores e, por isso, mais flexíveis são mais sensíveis à vibração.

5 Transmissão de vibração em altura

5.1 Vibração gerada por fontes exteriores

Os estudos descritos nesta secção têm como objectivo analisar a propagação da vibração ao longo da altura dum edifício e perceber se existe algum padrão no processo de transmissão da energia entre os diferentes pisos. Para cada um dos modelos variantes de quatro e seis pisos referidos em 4, quantificou-se a vibração transferida do pilar excitado para cada um dos pisos dos edifícios, tendo-se utilizado, para o efeito, a numeração das secções dos pilares e das lajes indicada na Figura 8.

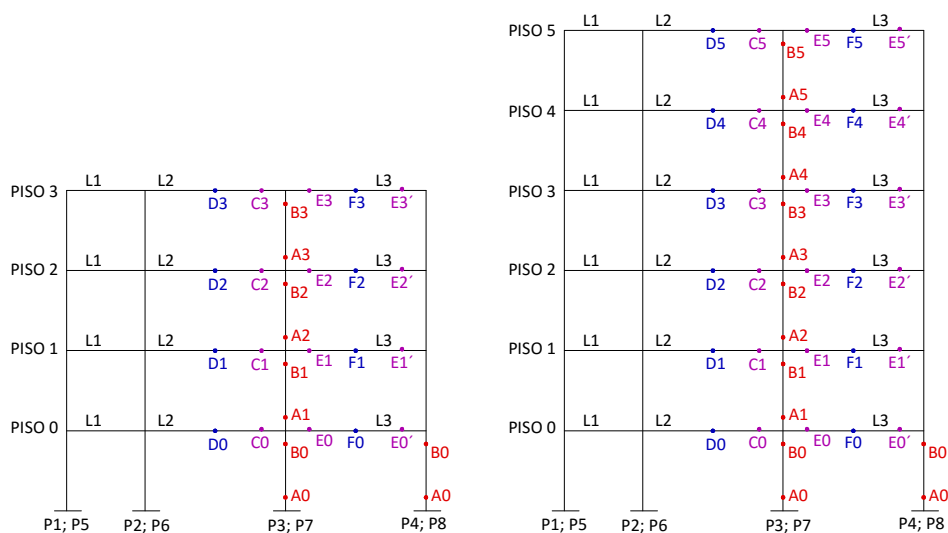


Figura 8 – Numeração das secções dos elementos estruturais dos modelos de: a) quatro pisos; e b) seis pisos.

Verificou-se que em todas as estruturas, dum modo geral, a vibração das lajes de piso diminui ao longo da altura do edifício, existindo, no entanto, uma inversão deste padrão no último piso. Efetivamente, conforme ilustrado na Figura 9, onde se representam as funções de transferência da aceleração entre o pilar P3 e a laje L2 do modelo de seis pisos, o último piso (secções D5 e F5) está sujeito a vibrações com intensidade superior à das vibrações do piso inferior e, em algumas frequências, atinge, mesmo, vibrações superiores à dos pisos mais baixos.

Apresenta-se, na Figura 10, a vibração transmitida entre o penúltimo piso e o último piso do modelo de seis pisos, para os casos de excitação aplicada num pilar de canto, num pilar de bordo ligado a três vigas (tipo “T”) e num pilar interior ligado a duas vigas (tipo “I”). As funções de transferência da vibração entre pisos são semelhantes para a excitação de pilares constituídos por nós de extremidade do mesmo tipo e distintas se os pilares excitados possuem nós de extremidade de tipologias diferentes.

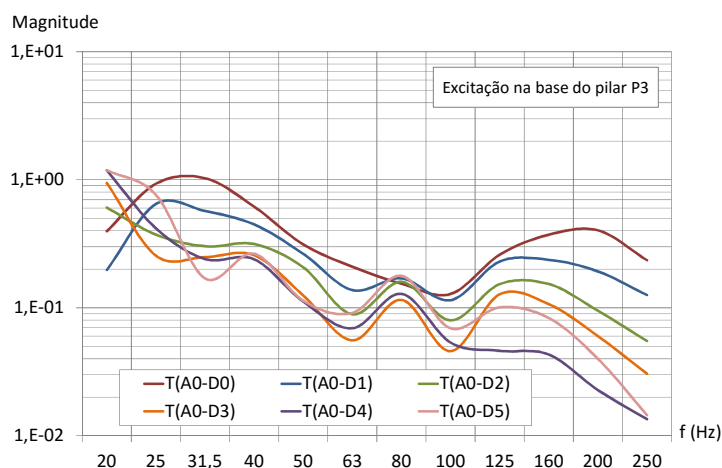


Figura 9 – Funções de transferência entre a aceleração vertical na base do pilar excitado P3 e a aceleração vertical na laje L2 dos pisos do modelo de seis pisos.

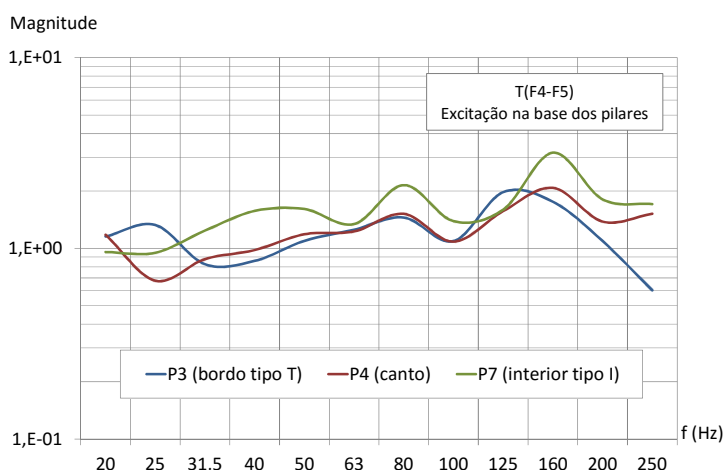


Figura 10 – Funções de transferência da aceleração vertical entre as lajes L3 dos pisos 4 e 5, devido a excitações em pilares distintos (modelo com seis pisos).

Para avaliar a transmissão de vibração através dos nós, apresenta-se, nas Figuras 11 e 12, a energia de vibração transmitida ao nível do nó do piso 4 do modelo de seis pisos, entre os troços de pilar inferior e superior e entre o pilar e as lajes. Observa-se que a tipologia do pilar excitado condiciona significativamente a transmissão de vibração para as lajes, $T(B4-E4)$, enquanto a propagação da vibração do pilar para o piso superior, $T(B4-A5)$, é pouco sensível ao tipo de nó de ligação pilar/laje. Pelo exposto, é possível afirmar que a tipologia dos nós de extremidade dos pilares submetidos a vibração condiciona o processo de transmissão da vibração ao nível do elemento (pilar) e ao nível do nó (entre o pilar e a laje), o que se reflete na transmissão da vibração entre os pisos do edifício.

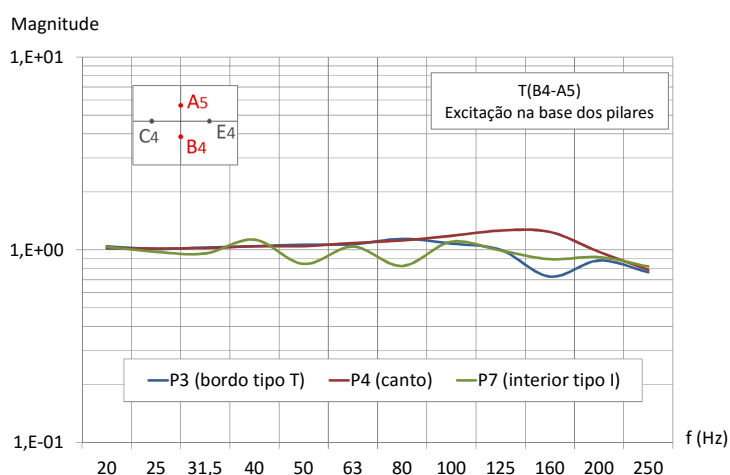


Figura 11 – Funções de transferência da aceleração vertical no nó do piso 4, entre os troços inferior (B4) e superior (A5) dos pilares excitados (modelo com seis pisos).

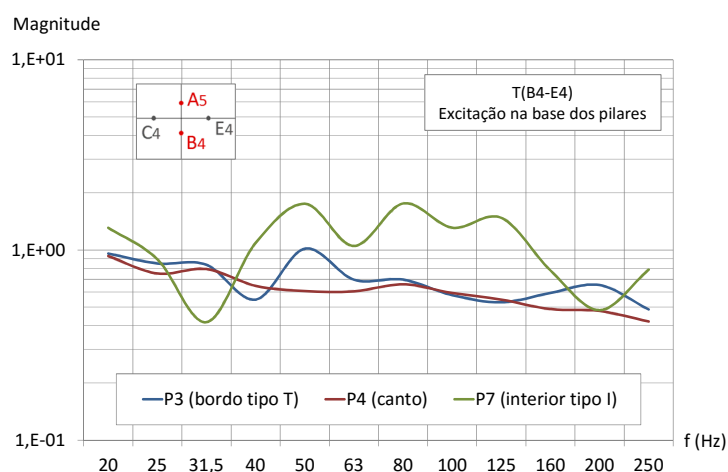


Figura 12 – Funções de transferência da aceleração vertical no nó do piso 4, entre o pilar excitado (B4) e a laje L3 (E4) do piso (modelo com seis pisos).

5.2 Vibração gerada por fontes interiores

Estimou-se a transmissão da vibração entre os pisos das estruturas dos modelos de quatro e seis pisos devido a uma força de excitação aplicada, na direção vertical, a meio vão da laje L2 do piso 0, mantendo-se a numeração das secções da estrutura definidas na Figura 8. Os resultados obtidos assinalam a atenuação da vibração dos pisos com o afastamento destes ao piso excitado, à exceção do último piso do edifício, onde se verifica um aumento dos níveis de vibração relativamente ao piso anterior. Apresentam-se na Figura 13 as funções de transferência da aceleração obtidas, no modelo de seis pisos, entre a laje onde se localiza a fonte (L2 do piso 0) e as lajes dos restantes pisos. Na Figura 14 apresentam-se as funções de transferência entre pisos do modelo de seis pisos, observando-se que a maior atenuação da vibração acontece entre o piso onde se localiza a fonte de excitação e o piso subsequente. Entre os restantes pisos intermédios, a vibração transmitida é da mesma ordem de grandeza. Ao nível do último piso, como já se referiu, ocorre amplificação da vibração relativamente ao piso inferior.

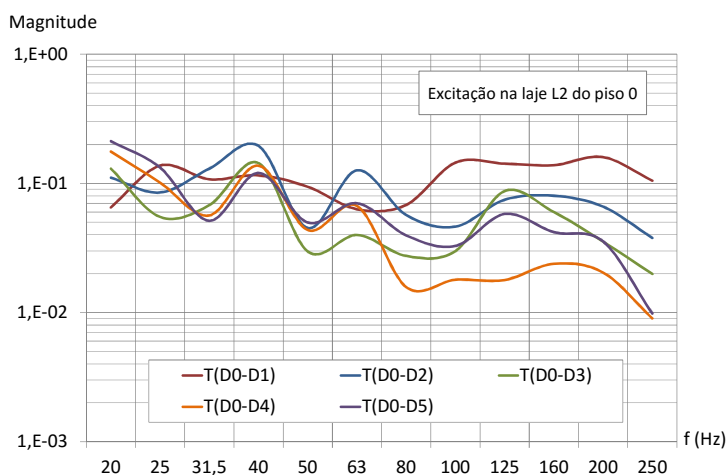


Figura 13 – Funções de transferência da aceleração vertical entre a laje L2 do piso 0 (elemento excitado) e as lajes L2 dos restantes pisos do modelo de seis pisos.

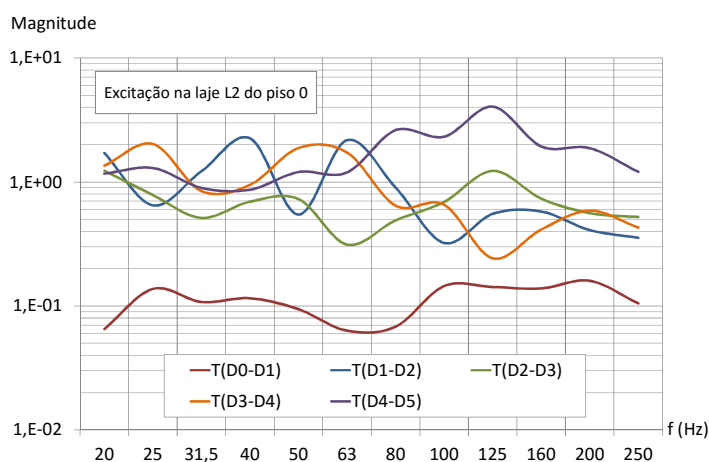


Figura 14 – Funções de transferência da aceleração vertical entre as lajes L2 do piso “i” e do piso “i+1”, do modelo de seis pisos, devido a uma excitação na laje L2 do piso 0.

5.3 Influência das dimensões dos elementos estruturais e das propriedades dos materiais

Mais uma vez, foi analisada a influência na propagação estrutural da vibração do módulo de elasticidade do material e das dimensões das lajes, vigas e pilares.

As funções de transferência da aceleração entre o pilar excitado e o piso 1 e entre o piso 0 e o piso 1 apresentadas Figura 15 mostram que quanto maiores são as secções transversais dos pilares, menor é a atenuação da vibração entre o pilar excitado e os pisos e entre os pisos dos edifícios. As dimensões dos pilares exercem uma influência mais significativa na transmissão da vibração ao longo da altura dos edifícios quando as fontes de vibração se localizam no exterior. Verificou-se que, em geral, a propagação da vibração ao longo da altura do edifício é tanto maior quanto mais rígidos forem os elementos verticais, o que se deve ao facto de, apesar destes elementos mais rígidos vibrarem com menor intensidade, também dissipam menos energia, transmitindo assim mais energia nas ligações.

O mesmo efeito é observado nas lajes, pelo que quanto mais elevada é a sua espessura, mais vibração se transmite para os pisos superiores. Na Figura 16 ilustra-se este aspecto com as funções de transferência da aceleração entre os pisos 0 e 1 e os pisos 2 e 3 das estruturas em que as lajes possuem espessura respectivamente igual a 0,19 m e 0,30 m.

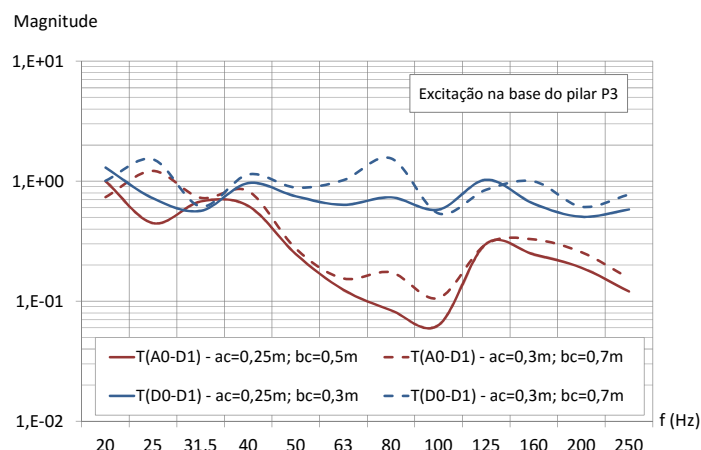


Figura 15 – Influência das dimensões da secção transversal dos pilares na transmissão da vibração entre o pilar excitado P3 e a laje L2 do piso 1 e entre lajes L2 do piso 0 e do piso 1.

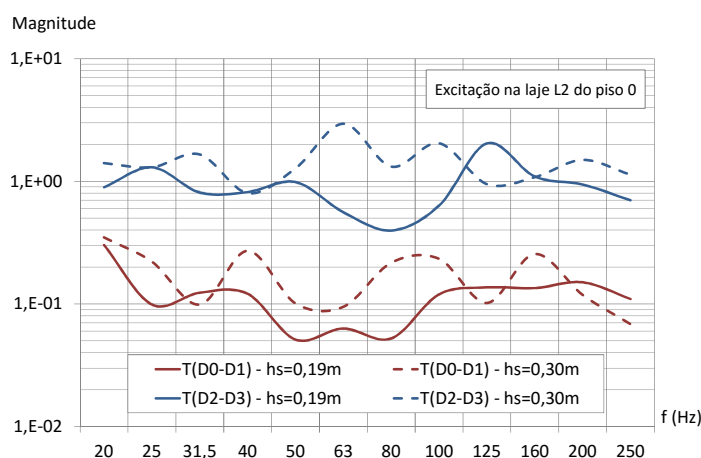


Figura 16 – Influência da espessura das lajes na transmissão da vibração entre pisos do edifício, devido a uma excitação na laje L2 do piso 0.

6 Conclusões

Foi avaliada a influência das propriedades dos materiais e das dimensões dos elementos estruturais na propagação da vibração através de estruturas de edifícios de betão armado e concluiu-se que a espessura da laje ou a esbelteza dos pilares são parâmetros importantes, observando-se maior transmissão de energia nos elementos mais rígidos devido a um menor efeito dissipativo nas ligações. A atenuação piso-a-piso é aproximadamente constante para todos os pisos excepto para a cobertura, onde a atenuação diminui por via da redução do número de caminhos de dissipação de energia.

Referências

- [1] Computers & structures inc. *CSI Analysis reference manual for SAP2000*. California, EUA: 2011.
- [2] Fotsch D, Ewins DJ. Application of MAC in the frequency domain. *18th Int. Modal Anal. Conf.*, EUA: 2000, p. 1225–31.