AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS FUNDAÇÕES E DO PORTE DA EDIFICAÇÃO NA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR SISTEMAS METROVIÁRIOS

SANTOS, Danilo Pereira dos (1); GIDRÃO, Gustavo de Miranda Saleme (2), CARRAZEDO, Ricardo (3)

(1) Mestrando, Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP, danilopereira.eng@usp.br

(2) Doutorando, Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP, gustavo.gidrao@gmail.com

(3) Professor Associado, Departamento de Estruturas da EESC/USP, carrazedo@usp.br

Resumo: *A proximidade entre os sistemas metroviários e regiões densamente habitadas impôs como etapa de projeto a verificação não só do nível de vibração nas vias permanentes, mas também a sua atenuação ou amplificação através do solo e edificações receptoras. Neste trabalho foi avaliada a qualidade de uma aproximação realizada por meio de um modelo numérico ao comportamento do solo, ao passo em que também foi examinado o comportamento de um edifício variando o seu número de pavimentos e a solução de fundação adotada. Verificou-se que a atenuação do solo calculada através do modelo numérico atingiu boa aderência às estimativas comuns ao estado da prática e que as edificações apoiadas sobre as fundações em sapata, adotadas neste trabalho, alcançaram menores níveis globais de vibração quando comparadas à solução em estacas.*

Palavras-chave: *Sistemas metroviários. Controle de vibrações. Conforto ambiental.*

Área do Conhecimento: *Engenharia Civil, Estruturas, Qualidade e desempenho de produtos e sistemas construtivos*

1 INTRODUÇÃO

A interação entre a roda e o trilho de sistemas metroviários gera ondas mecânicas que são transmitidas por meio do solo às edificações lindeiras. Esta condição excita os pisos e paredes de tais edificações induzindo estes elementos à vibração. Conforme registrado por Kurzweil (1979), o ruído secundário, promovido pelos elementos estruturais excitados, geralmente pode ser percebido pelos habitantes de uma edificação até mesmo antes dos incômodos diretamente relacionados às vibrações metroviárias. Portanto, a investigação da propagação destes ruídos através do solo constitui uma das etapas de um projeto metroviário.

Acrescenta-se que a medição destas vibrações deve ser realizada atrelada a uma escala logarítmica, em decibéis, que é definida a partir de uma base de referência. Para análises de vibração em sistemas metroviários, tanto a Federal Transit Administration (FTA), quanto a Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP) adotam a referência de 10^{-6} in/s (polegadas/segundo), ou seja, $25{,}4 \times 10^{-6}$ mm/s. Por fim, de posse desta escala são estabelecidos limites a partir dos quais o nível de vibração nas edificações não é tolerado. No contexto deste trabalho, a ordem de grandeza dos resultados apresentados pode ser comparada aos critérios estabelecidos pela CMSP, resumidos no Quadro 1 para algumas categorias habitacionais.

Quadro 1 – Níveis máximos de vibração tolerados (em dBV)

Categoria da Área da Comunidade	Unifamiliar	Multifamiliar	Hotel
Residencial de baixa densidade	70	70	70
Residencial de média densidade	70	70	75

Residencial de alta densidade	70	75	75
Comercial	70	75	75
Industrial/Rodovia	75	75	75

Para que a comparação entre os níveis auferidos e os tolerados seja possível, é calculado um valor absoluto sobre o espectro de vibrações de uma edificação (dBV x Frequência). A este valor absoluto dá-se o nome de nível global de vibração (RMS_{global}) e está indicado na equação (1).

$$RMS_{global} = 10 \cdot \log_{10}\left(\sum 10^{L_j/10}\right) \quad (1)$$

Muitos são os fatores que intervêm no nível de vibração registrado nas edificações. Portanto, deste conjunto é possível destacar as características do solo, a interação solo/estrutura e a atenuação promovida pelas características da edificação, que podem ser resumidas na sua rigidez, massa e amortecimento. Assim, neste trabalho serão estudados: (i) a influência do solo, aproximado por um meio elástico e contínuo, (ii) a natureza da fundação, se rasa ou profunda e (iii) o porte da edificação, a partir da variação do número de pisos (10, 19 e 28 pisos).

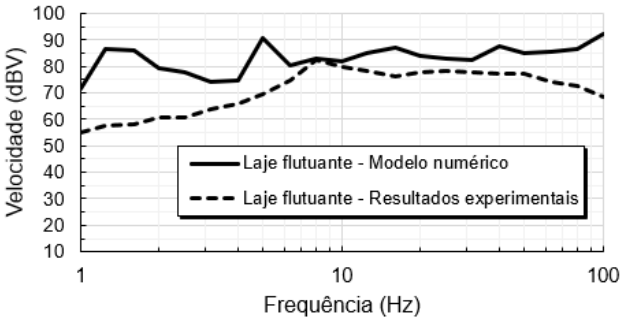
É importante salientar que outros fatores tem preponderância na atenuação do nível de vibrações oriundo de sistemas metroviários. Além das características do solo e da própria edificação, Melke (1988) destaca a influência do sistema de suspensão primária do trem, qualidade da superfície do trilho, os raios da via permanente, o afastamento entre fixadores do trilho, bem como a profundidade do túnel e suas características mecânicas. Assim, no tocante ao conforto ambiental, o controle de vibração pode se dar a partir de ajustes na fonte, no meio de transmissão ou na edificação receptora.

2 MODELAGEM NUMÉRICA

Os modelos numéricos foram desenvolvidos por meio das plataformas Abaqus/CAE 6.14 e Abaqus/Explicit 6.14, utilizando elementos finitos planos de 4 nós e com integração reduzida (CPS4R) para o solo, fundações e túnel e elementos finitos de barra geral dotados de 2 nós (B21) para os pórticos planos. O problema dinâmico foi solucionado por meio do método da diferença finita central, por meio do qual a solução em um passo de tempo só depende das condições oriundas do passo anterior, constituindo, portanto, um método de resolução explícito.

Foram construídos dois modelos distintos, o primeiro deles correspondeu a um modelo longitudinal cuja função foi fornecer o histórico de forças, F(t), em um determinado ponto da via permanente. Tal modelo foi construído e validado a partir dos dados publicados por Amaral (2011) e Carrazedo (2012). A comparação entre os níveis de vibração extraídos em um ponto da laje flutuante do modelo numérico e os resultados experimentais está reproduzida na Figura 1.

Figura 1 – Nível de vibração do modelo numérico longitudinal frente aos dados experimentais.



As forças F(t) foram aplicadas ao modelo transversal (Figura 2), responsável por representar o túnel, o seu

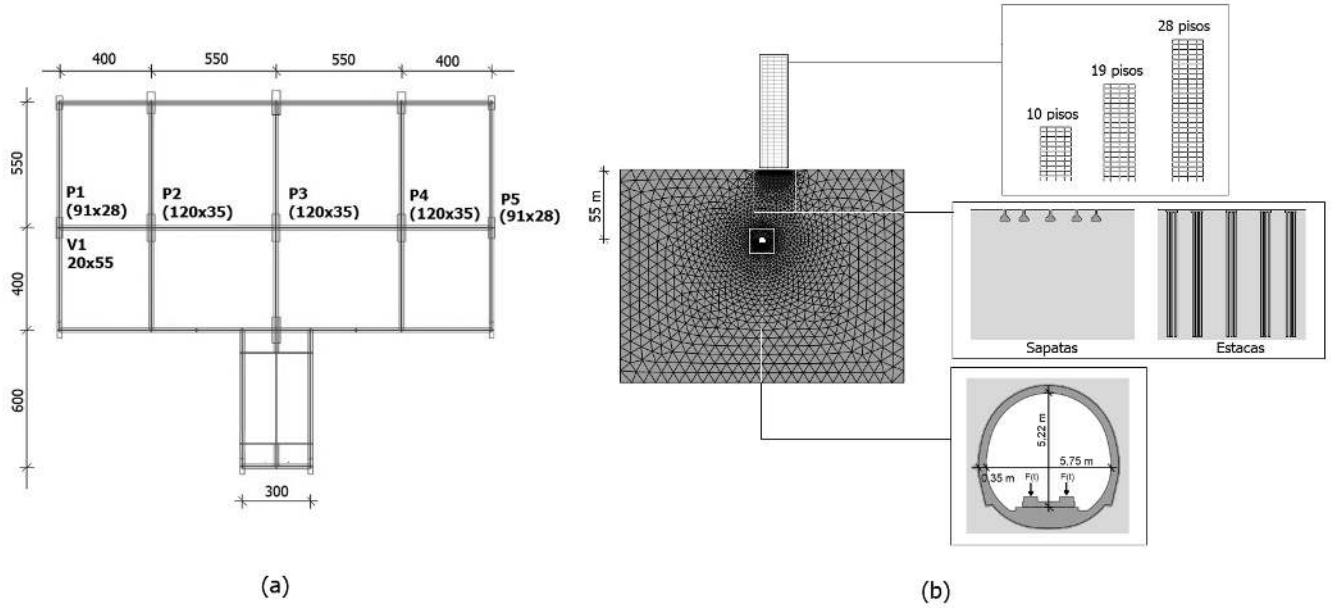
solo envolvente e a edificação. Os parâmetros físicos do solo e a razão de amortecimento atribuída ao concreto foram extraídos de Carrazedo et al. (2012) e estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo dos parâmetros físicos adotados para o modelo numérico.

Parâmetros físicos	Valor	Parâmetros físicos	Valor
Módulo de elasticidade do concreto do túnel	43GPa	Módulo de elasticidade do solo	1,95GPa
Módulo de elasticidade do concreto da edificação	33GPa	Densidade do solo	1,75g/cm³
Densidade do concreto	2,5g/cm³	Razão de amortecimento ao solo	0,03
Razão de amortecimento ao concreto	0,02		

Para a edificação modelada foi estabelecido um pé direito de 3 m cujo pavimento tipo está registrado na Figura 2. Destaca-se que o pré-dimensionamento da viga e dos pilares foi realizado conforme metodologia indicada por Pinheiro (2007). Para as fundações rasas foi estimada uma área para as sapatas igual a 1,29 m² (1,95x6,60m), enquanto as fundações profundas foram descritas por 9 estacas com 35 cm de diâmetros e 20 m de profundidade por bloco.

Figura 2 – (a) Planta de forma com destaque para os elementos estruturais do pórtico construído no modelo numérico transversal (em cm). (b) Modelo transversal: geometria e variações aplicadas.



As propriedades de amortecimento do modelo foram calculadas por meio dos coeficientes de amortecimento de Rayleigh, que podem ser determinados a partir da solução do sistema linear resumido na equação (2).

$$\xi_k = 1/2\left(\alpha/\omega_k + \beta\omega_k\right) \quad (2)$$

Portanto, foram executadas análises modais tanto para o edifício de 19 pisos, isoladamente, quanto para o conjunto solo/túnel e, a partir desta análise, foram determinados os dois primeiros modos de vibração que mobilizaram a maior massa de cada modelo. Assim, a avaliação do edifício isolado e do solo/túnel forneceram dois pares (ω_1 , ω_2) por meio dos quais, utilizando a equação (2), foram calculados os coeficientes α e β relacionados a cada material, a saber: concreto do edifício, solo e concreto do túnel. Acrescenta-se que foi assumida a simplificação de que a razão de amortecimento permanece constante para qualquer frequência, tal prática é usual conforme indicado por Soriano (2014).

3 RESULTADOS

A primeira investigação disse respeito ao nível de atenuação proporcionado pelo solo (C_g). Neste trabalho, o solo foi representado como um meio elástico e contínuo cujo amortecimento foi determinado conforme discutido no item anterior. Portanto, uma comparação foi realizada entre a atenuação obtida a partir do modelo numérico e aquela calculada analiticamente por meio da aproximação realizada pela equação (3), que foi proposta por Ungar et al. em 1975 (KURZWEIL, 1979). Os parâmetros aplicados à equação (3) estão registradas no

Quadro 3, e a comparação entre as atenuações calculadas entre o túnel e a superfície a partir destes dois modelos está reproduzida na

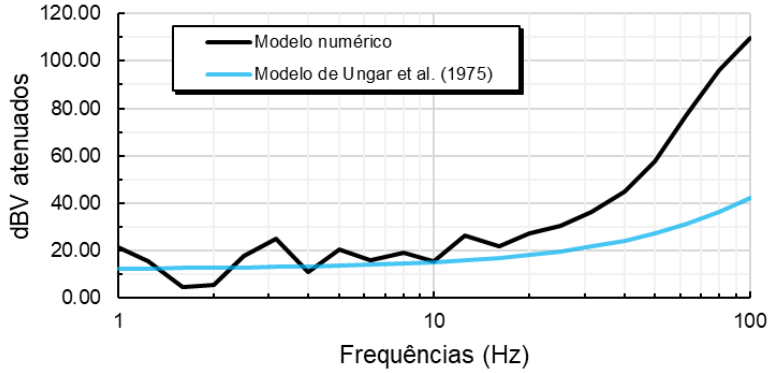
Figura 3.

$$C_g = 10\log\left\{\left(R_o + X\right)/R_o\right\} + 10\log e\left(2\pi f X\, n/c\right) \quad (3)$$

Quadro 3 – Parâmetros adotados no modelo de Ungar et al. (1975)

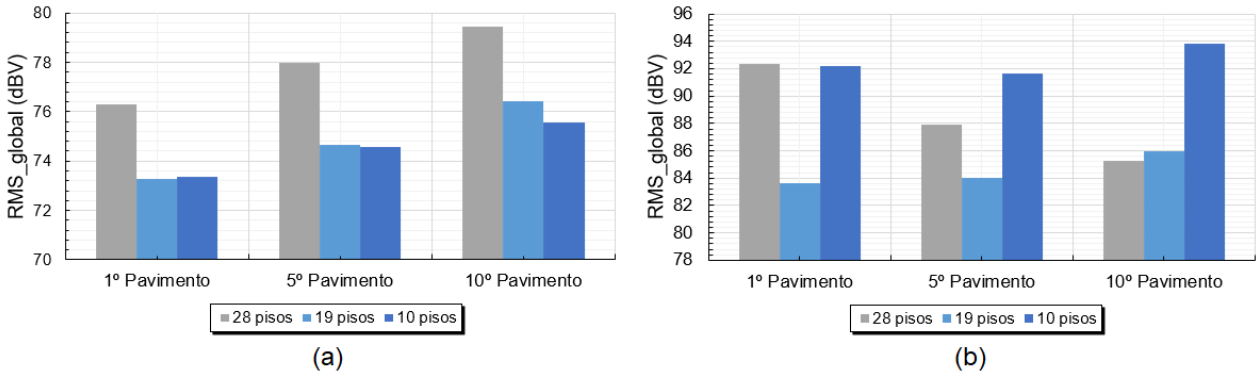
Parâmetros	Valores
Distância do centro do túnel à parede externa (R_o)	3,66 m
Distância da parede externa ao ponto de interesse (X)	55 m (superfície)
Frequências de vibração avaliadas (f)	Freq. centrais das bandas de 1/3 de oitava de 1 à 100Hz
Fator de perda do solo (n)	0,3
Velocidade da onda no solo (c)	1490 m/s

Figura 3 – Atenuação obtida entre o túnel e a superfície do solo expressa em bandas de 1/3 de oitava.



Já o desempenho das fundações rasa e profunda foram comparados para as edificações com 10, 19 e 28 pisos. A Figura 4 mostra o nível de vibração nos 1º, 5º e 10º pavimento para cada um destes edifícios.

Figura 4 – Nível de vibração para edificação apoiada sobre (a) sapadas e (b) estacas.



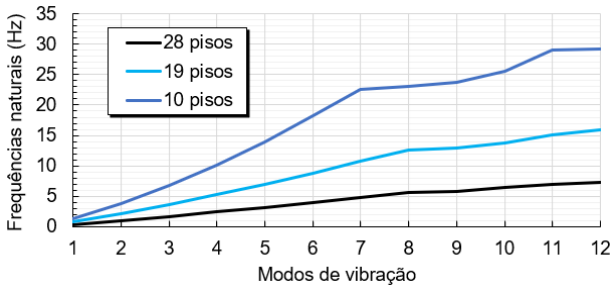
Também foi estudada a atenuação entre pisos adjacentes. Esta análise está resumida no Quadro 4, no qual está indicada a diferença entre os níveis globais de vibração entre os 1º e último, 1º e 10º e 1º e 5º pisos.

Quadro 4 – Diferença do nível de vibração entre pisos.

Modelo		Atenuação (dBV)		
		1º ao último	1º ao 10º	1º ao 5º
Sapatas	28 pisos	+6,4	+3,2	+1,7
	19 pisos	+4,8	+3,1	+1,4
	10 pisos	+2,2	+2,2	+1,2
Estacas	28 pisos	-7,8	-7,0	-4,4
	19 pisos	+6,4	+2,3	+0,4
	10 pisos	+1,6	+1,6	-0,5

Por completude, na Figura 5 estão indicadas as frequências naturais calculadas para os 12 primeiros modos das edificações sobre bases rígidas com 28, 19 e 10 pisos.

Figura 5 – Frequências naturais da edificação sobre base rígidas.



4 CONCLUSÕES

Algumas simplificações aplicadas à construção do modelo numérico tiveram impacto direto nas respostas dinâmicas colhidas. Neste sentido destacam-se a massa do edifício e sua rigidez, que assumiram valores inferiores aos usuais uma vez que o estudo se restringiu ao plano. No tocante ao solo é importante frisar as aproximações adotadas, uma vez que estas desconsideraram a característica multifásica e porosa do solo. Ainda assim, não obstante às simplificações, é possível constatar que:

- As vibrações foram mais acentuadas para as edificações com frequências fundamentais mais baixas, o que indica que vibrações em frequências elevadas provenientes do sistema metroviário não serão as críticas para o estudo de controle de vibrações.
- A atenuação gerada pelo meio elástico contínuo representativo do solo se aproximou das estimativas comumente empregadas nas etapas de anteprojeto, isto é, das estimativas propostas por Ungar et al. (1975) para um nível de vibração de até 30Hz.
- Nas edificações apoiadas sobre fundações profundas foi verificado um nível de vibração superior àqueles registrados para as fundações em sapata, sugerindo que a adoção de estacas próximas à fonte da excitação constitui um caminho preferencial de propagação das ondas.
- Por fim, verificou-se amplificações da vibração quando comparados o 1º ao último piso. Este resultado também é verificado em determinadas estruturas reais, entretanto há de se observar que a rigidez e a massa do modelo numérico aqui estudado foram subestimados o que altera a frequência fundamental da edificação tornando-a mais suscetíveis às vibrações.

5 REFERÊNCIAS

CARRAZEDO, R.; CARVALHO, J. T. de; TAKEUTI, A. R. Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Floating Slabs. In: International Conference On Railway Technology: Research, Development And Maintenance, 1., 2012, Las Palmas de Gran Canaria. Proceedings.Stirlingshire: Civil-comp Press,, 2012. p. 108.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (São Paulo). Especificação técnica desempenho da superestrutura de via permanente- ET-2.00.00.00/3U9-001. São Paulo, 2008. 91 p

FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. Transit Noise and Vibration Impact Assessement: FTA-VA-90-1003-06. Washington, 2006.

KURZWEIL, L. G. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems. Journal of Sound and Vibration, v. 66, n. 3, p. 363-370, 1979.

MELKE, J. Noise and vibration from underground railway lines: proposals for a prediction procedure. Journal of Sound and Vibration, v. 120, n. 2, p. 391-406, 1988.

PINHEIRO, L. M. Fundamentos do concreto e projeto de edifícios. 2007.

SORIANO, H. L. Introdução à dinâmica das estruturas. 1ª Ed. Elsevier. Brasil, 2014.

6 AGRADECIMENTO

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).