



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Avaliação dos Efeitos de Obstáculos e Qualidade do Pavimento na Vibração Ambiental

Brito, L. A. P. F. de¹, Manfredini, G².

¹ Programa de Mestrado em Gestão e Desenvolvimento Regional, Universidade Taubaté, Taubaté, SP, Brasil, lapfbrito@gmail.com

² Arquitetura e Urbanismo, Universidade Taubaté, Taubaté, SP, Brasil, manfredinigiulio@gmail.com

Resumo

A mobilidade urbana de qualidade é necessária para o desenvolvimento local e regional. O tráfego de veículos leves e pesados possuem o potencial de gerar incômodo e danos estruturais às edificações devido à vibração gerada e está presente em todo o meio urbano. As principais causas da vibração são as condições da superfície do pavimento, a presença de obstáculos, velocidade e peso dos veículos. Edificações que possuem fundações rasas e que não são de concreto armado são as mais impactadas pela vibração. O objetivo dessa pesquisa é avaliar a influência de obstáculos e da qualidade da superfície de rodagem na geração da vibração ambiental. Foram realizadas medições de pico de velocidade da partícula (PVP) em sete situações diferentes com pavimentos lisos, fresados, com buracos, tachões redutores de velocidade, valetas e lombadas. Os resultados indicam que no pavimento liso e rugoso a PVP atende ao critério normalizado de danos estruturais, mas nas demais condições não, com exceção da lombada devido à redução de velocidade dos veículos. Nas situações mais críticas, tachão redutor de velocidade, há o potencial de mais de 144 ocorrências acima no critério diariamente. Em todas as condições avaliadas o critério de incomodidade é superado. O pavimento rugoso é o primeiro a formar as ondas tipo *R* que são as mais danosas às edificações com fundações rasas com potencial de acoplamento aos primeiros modos de vibração de edificações, efeito que pode ser potencializado devido às intempéries. Dessa forma, a má qualidade do pavimento e o excesso de obstáculos potencializam o incômodo gerado pelo tráfego de veículos bem como podem causar danos às edificações.

Palavras-chave: vibração, tráfego, pavimento, gestão, mobilidade, desenvolvimento.

PACS: 43.40.Ng., 43.40.-r, 43.40.At

Abstract

Quality urban mobility is necessary for local and regional development. The traffic of light and heavy vehicles has the potential to generate nuisance and structural damage to buildings due to the vibration generated and is present throughout the urban environment. The main causes of vibration are the conditions of the pavement surface, the presence of obstacles, speed and weight of vehicles. Buildings that have shallow foundations and are not reinforced concrete are the most impacted by vibration. The objective of this research is to evaluate the influence of obstacles and road surface quality in the generation of environmental vibration. Peak particle velocity (PPV) measurements were performed in seven different situations: smooth surface, rough, potholed, with speed-reducing studs, ditches and speed bump. The results indicate that in the smooth and rough pavement the PPV meets the normalized criterion of structural damage, but in the other conditions it does not, with the exception of speed bump due to the reduction of vehicle speed. In the most critical situations, such as speed-reducing studs, there is the potential of more than 144 occurrences above the criterion daily. In all the conditions evaluated, the discomfort criterion is exceeded. The rough pavement is the first to form the R-type waves, which are the most harmful to buildings with shallow foundations with the potential for coupling to the first modes of vibration of buildings, an effect that can be potentiated due to the weather. In this way, the poor quality of the pavement and the excess of obstacles potentiate the annoyance generated by vehicle traffic as well as can cause damage to buildings.

Keywords: vibration, traffic, pavement, management, mobility, development

1. INTRODUÇÃO

O meio urbano possui diversas fontes de vibração que podem causar incomodidade à população em geral ou mesmo danos estruturais nas edificações. Fatores como tipo de solo, sua estratificação, tipo de fundação, estado de conservação da estrutura e alvenaria influenciam a resposta na magnitude das ondas vibratórias em uma edificação [1]. No Brasil não há uma normalização com critérios limites de vibração, tanto para incomodidade quanto para danos estruturais.

Para se quantificar a vibração utiliza-se a variável de pico de velocidade da partícula (PVP) sendo esta a somatória vetorial das velocidades medidas simultaneamente nos três eixos ortogonais X, Y e Z [2].

Dentre as diversas fontes de vibração urbanas destacam-se alguns equipamentos utilizados na construção civil, como rolos compactadores vibratórios e bate-estacas, equipamentos industriais como prensas e peneiras vibratórias, e o tráfego rodoviário e ferroviário. As fontes ligadas à indústria e construção civil, em geral, operam em locais específicos e de certa forma podem ser controladas e mitigadas, caso necessário, para evitar a incomodidade ou mesmo danos estruturais [3].

O tráfego ferroviário também se dá em locais definidos de maneira que é possível haver uma distância segura entre a fonte e o receptor em geral. Mas o tráfego rodoviário faz parte do dia a dia da população estando bem próximo a residências diuturnamente [4]. A vibração gerada pelo tráfego rodoviário é aleatória sendo influenciada pelo peso e velocidade dos veículos e condições do pavimento. A geração de energia vibratória aumenta quando há irregularidades na via, que amplificam o impacto das suspensões dos veículos, principalmente nos solos de baixo amortecimento [1].

A mobilidade urbana de qualidade é necessária para o desenvolvimento local e regional sendo que pavimentos inadequados e o excesso de obstáculos dificultam o tráfego. O Código Nacional de Trânsito [5] define em quais situações podem ser colocados obstáculos nas

vias de rodagem para alerta e/ou redução de velocidade. Mas ao mesmo tempo esses obstáculos, devido aos impactos gerados pela suspensão dos veículos, podem ser fonte de vibração ambiental. Esta situação, aliada a má qualidade de pavimento, o que é encontrado em vários municípios, potencializa a geração de vibração pelo tráfego de veículos leves e pesados [4].

O objetivo dessa pesquisa é avaliar a influência de obstáculos e da qualidade da superfície de rodagem na geração da vibração ambiental. Foram avaliadas por meio de medições de PVP vias com pavimentos lisos, fresados, com buracos, tachões redutores de velocidade, valetas e lombadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A vibração se propaga no solo por ondas de compressão, também chamadas de *P*, *primary*, pois chegam primeiro no receptor e de cisalhamento, também chamadas de *S*, *secondary*. Ambas são ondas de corpo que possuem a forma semi esféricas com velocidade em apenas uma direção. As ondas de compressão possuem velocidade no sentido paralelo do eixo de propagação da frente de onda por meio de contrações e dilatações. As ondas de cisalhamento possuem velocidade perpendicular ao eixo de propagação da frente de onda e inferior às ondas de compressão, pois uma parte da sua energia é direcionada para a deformação do volume do solo, apesar deste permanecer constante. A terceira forma de onda são as tipo Rayleigh, também chamadas de *R*, se originam da reflexão das duas primeiras na superfície do solo, por onde se propagam, e possui velocidade de propagação menor que as anteriores. As ondas *R* também são chamadas de ondas de superfície e possuem a forma cilíndrica com velocidade de propagação em duas direções e incorporam alteração de volume e de deformação das partículas por cisalhamento que decrescem exponencialmente com a profundidade [6]. As ondas *R* (superfície) transportam cerca de 67% da energia vibratória, sendo o restante dividido entre as ondas de *P* (compressão), 7% e *S* (cisalhamento), 26% [7].

O efeito da transmissão da vibração do solo para as fundações das edificações é inversamente proporcional à velocidade de propagação na frente de onda, ou seja, as ondas com maior velocidade induzem menor vibração na fundação da edificação [1] de forma que as ondas tipo *R* são as que mais impactam as edificações próximas às vias de tráfego [6], sendo também problemáticas para edificações que possuam fundações rasas, próximas da superfície, e que foram dimensionadas apenas para o esforço de compressão (peso da edificação) e não para os esforços de cisalhamento gerados pelas ondas *R* [8].

Um dos fatores que influenciam na propagação da vibração no solo é a sua composição. Nos solos mais coesivos e rígidos a velocidade de propagação da onda é maior o que reduz a tensão nas fundações e a transmissão direta para a edificação. No caso dos solos menos coesivos, como o saibro e a areia, a velocidade de propagação diminui o que eleva a tensão transmitida nas fundações [1]. Outro fator que também pode influenciar é a estratificação do solo que causa a dissipação de energia vibratória quando a onda passa de um tipo de solo para outro, considerando que tenham amortecimentos diferentes, que podem chegar a até 35 dB na frequência de 100Hz [9]. Mas, se a estratificação pode contribuir para o amortecimento da energia vibratória, pode também possibilitar na formação de ondas tipo Love (*L*), similares as ondas Rayleigh, mas com maiores deslocamentos verticais, o que eleva a tensão de cisalhamento na superfície sendo mais impactante ainda nas fundações rasas [6].

O amortecimento geométrico da energia vibratória se dá com o aumento da distância da frente de onda em relação ao ponto de excitação. Quanto maior a distância maior a área da frente de onda onde a energia vibratória (constante) se dissipa. A dissipação da energia vibratória das ondas de *P* e *S* (semi esféricas) se dá na razão de $1/r^2$ e as ondas *R* (cilíndricas) é dado na razão de $1/r^{0,5}$ de maneira que as primeiras predominam no campo próximo enquanto a outra no campo distante [4], podendo ainda ser mais danosas pois se propagam a maiores distâncias. As ondas *R*

decaem na razão de $1/r$ quando a fonte de vibração é linear [10], como nas vias de tráfego, de modo que possuem ainda maior potencial de danos.

A vibração pode ser classificada dentro dos critérios de incomodidade ou de danos estruturais quando da avaliação do impacto ambiental sendo que a métrica utilizadas é o pico de velocidade da partícula (PVP) sendo esta a somatória vetorial das velocidades medidas simultaneamente nos três eixos ortogonais X, Y e Z [2].

Os efeitos dos danos estruturais são categorizados pela norma DIN 4150-3 *Vibration in buildings, effect in structures* [11] que aborda os limites de PVP em uma edificação. Os danos estruturais gerados pela vibração em uma edificação podem ser classificados como cosméticos, com o aparecimento de pequenas fissuras no reboco (da espessura de um fio de cabelo, por exemplo) ou acabamento em gesso das paredes; de pequena monta com o aparecimento de trincas (ou evolução de uma fissura para trinca) e queda de revestimentos, reboco ou gesso; e de grande monta com trincas estruturais em pilares, vigas e lajes [11].

A PVP indicada para as edificações da Categoria 1 (edificação com estrutura de concreto armado ou aço) é de 40 mm/s, para a Categoria 2 (edificações de alvenaria), 15 mm/s e Categoria 3 (edificações em má condição de conservação ou patrimônio histórico), 8 mm/s. No caso de geração de energia vibratória entre 10 e 50 Hz os valores de PVP permitidos decaem para 20, 5 e 3 mm/s para cada categoria respectivamente [11], sendo estas mais adequadas para avaliação da vibração gerada pelo tráfego rodoviários cujas frequências se dão entre 10 a 80 Hz aproximadamente [12]. A *Federal Transit Administration* (FTA) [13] dos Estados Unidos da América limita a PVP em 13 mm/s para edificações com estruturas reforçadas, 8 mm/s para as edificações com projeto de engenharia, 5 mm/s para edificações sem projeto de engenharia e 3 mm/s para edificações frágeis [13]. Os critérios da FTA [13] são similares aos critérios entre 10 e 50 Hz da DIN 4150-3 [11]. Hajek e Hein [14], Chaves et al [15],

Brito, Soares e Nazari [16], Brito, Kamimura e Santos [8] observaram danos estruturais em edificações com fundações rasas, sem estrutura formal e com pouca rigidez, devido a PVP da ordem de 3 a 6 mm/s gerada por fontes lineares. Estas velocidades são compatíveis com os critérios dados pela DIN 4150-3 [11] e FTA [13], PVP de 3 e 5 mm/s.

Os danos estruturais também são relacionados à idade e estado de conservação da edificação. Karantoni e Bouckovalas [17] avaliaram os efeitos da vibração em casas de alvenaria e em edifícios de concreto armado e concluíram que a idade e o tipo dos materiais construtivos influenciam na resistência a vibração. A fadiga estrutural e os efeitos das intempéries como infiltrações são um potencializador dos danos gerados pela vibração. Outra forma de dano estrutural é a possibilidade de recalques diferenciais nas fundações ocasionadas pelo adensamento do solo, principalmente os arenosos [2].

Os efeitos de incomodidade são dados pela norma ISO 2631-2 *Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)* [18] na versão de 1997, sendo que a PVP começa a ser perceptível a partir da PVP de 0,14 mm/s, com PVP de 0,30 mm/s é claramente percebida, com 1 mm/s já há motivação para reclamações e com 10 mm/s é intolerável mesmo por breves períodos. Os critérios de incomodidade dados pela ISO 2631-2 [18] para áreas residenciais são de 0,14 mm/s no período noturno e 0,40 mm/s no diurno e para áreas hospitalares 0,10 mm/s sendo esta inferior a capacidade de percepção humana (0,14 mm/s).

Além dos danos estruturais e incomodidade a vibração gerada pelos obstáculos e má qualidade do pavimento pode também prejudicar a atividade econômica, e consequentemente o desenvolvimento local e regional, como os observados em equipamentos de precisão em laboratórios, hospitais e a indústria eletrônica. Por exemplo, laboratórios com microscópios ópticos e salas de metrologia devem ter no máximo uma PVP de 0,05 mm/s, em salas de microcirurgias neurológicas uma PVP de no máximo 0,025

mm/s [19]. Já para microscópios com resolução de 20x devem estar sujeitos a PVP de no máximo 0,20 mm/s, resolução de 100x PVP de 0,10 mm/s e resolução de 200x PVP de 0,05 mm/s [13].

Outras atividades também podem ser prejudicadas. Costa et al. [20] e Carlesso et al. [21] demonstraram que frutas sensíveis perdem a qualidade devido a redução de massa e firmeza da polpa e o escurecimento da casca, e por consequência valor de mercado, quando submetidas a vibrações excessivas durante o transporte, o que pode até inviabilizar uma rota. O transporte de carga viva também é afetado como no de aves onde vibração pode gerar lesões e tensão muscular, endurecendo a carne, como apontado por Innocencio e Nääs [22], ou gerando lesões e quedas de bovino como apresentou Vilaroell et al [23]. Donofre [24] concluiu que a exposição à vibração durante o transporte de ovos fertilizados reduz a eclodibilidade e aumenta a taxa de mortalidade de pintos nas fases iniciais da vida.

3. MÉTODO

Para a avaliação da influência de obstáculos e da qualidade da superfície de rodagem na geração da vibração ambiental foram executadas medições do Pico de Velocidade da Partícula (PVP) em mm/s na condição de pista pavimentada (A), na condição de pista com pavimento fresado (B), pista com pavimento fresado e degrau (C), pista pavimentada com tachão de redução de velocidade (D), pista pavimentada com buraco (E), pista pavimentada com valeta (F) e pista pavimentada com lombada (G). As Figuras de 1 a 7 ilustram as características das superfícies de rolamento consideradas.

Para a avaliação dos resultados obtidos utilizou-se o critério de danos estruturais para patrimônio histórico com excitação entre 10 e 50 Hz da DIN 4150-3 [11] e para edificações frágeis da FTA [13] de 3 mm/s. As edificações construídas em alvenaria, sem estrutura de concreto armado, com fundações rasas não apresentam resistência adequada as ondas tipo R que geram esforços de cisalhamento, e se

assemelham na tipologia construtiva aos patrimônios históricos.

O critério de incomodidade foi o de áreas residências com PVP de 0,14 e 0,40 mm/s para os períodos diurno e noturno respectivamente.



Figura 1 Vista da pista com asfáltico (A)



Figura 2 Vista da pista com pavimento fresado (B)



Figura 3 Vista da pista com tachão de redução de velocidade (C)

Os equipamentos utilizados para a medição foram medidor de vibração HVM100, marca Larson Davis, um acelerômetro triaxial (capaz de fazer a leitura nos 3 eixos simultaneamente)

DYTRAM modelo 3233AT e o software BLAZE para tratamento dos dados sendo todos calibrados por laboratórios pertencentes a Rede Brasileira de Calibração do INMETRO.



Figura 4 – Vista do degrau gerado pela fresagem do pavimento (D)



Figura 5 Vista da pista com buracos (E)



Figura 6 Vista da pista com valeta (F)



Figura 7 Vista da pista com lombada (G)

Para coleta de dados o acelerômetro foi acoplado em um *POD* metálico por meio de um parafuso de modo que este transmitisse a aceleração ao equipamento que integrou o sinal para obtenção da velocidade.

Os dados foram obtidos nos eixos X (perpendicular a via), Y (paralelo a via) e Z (perpendicular ao plano formado pelos eixos X e Y) e calculado o valor resultante final pelo software, sempre considerando o valor de pico. O tempo de coleta de dados foi de 35 minutos para cada uma das situações descritas. A faixa de frequência de medição foi entre 6,3 a 100 Hz. O *POD* metálico com o acelerômetro foi posicionado no passeio público ao lado da via analisada.

As PVPs em cada um dos eixos ortogonais X, Y e Z também foram utilizadas para avaliação da formação de ondas tipo R para cada condição pesquisada.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

As Figuras de 7 a 13 ilustram os resultados obtidos da PVP resultante para as condições analisadas. A condição de pavimento asfáltico liso, Figura 7, foi a que apresentou a menor PVP, abaixo do critério de danos estruturais de 3 mm/s mas acima do limite de incomodidade de 0,4 mm/s somente no momento da passagem de veículos pesados.

Na condição de pavimento fresado, Figura 8, observa-se que a ocorrência de velocidades de pico aumenta assim como também se eleva os valores das velocidades mais baixas, consequência da rugosidade da pista.

Novamente o limite de incomodidade é superado, mas não o de danos estruturais.

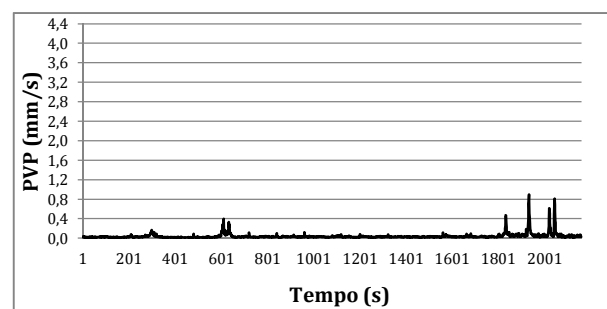


Figura 7 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico (A)

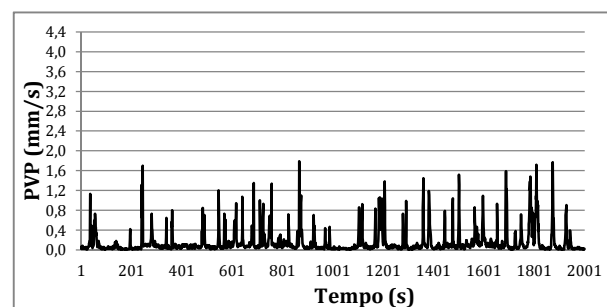


Figura 8 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em superfície fresada (B)

Na condição de pista pavimentada com tachão redutor de velocidade, Figura 9, os picos de velocidade aumentaram, sendo próximos ou superiores a 4,0 mm/s com cinco ocorrências acima do critério em 35 min. Esses picos estão associados à velocidade com que os veículos passam pelo tachão. Quando há redução de velocidade do veículo, motivo do tachão ser colocado na pista, a PVP é inferior a 1,0 mm/s, caso contrário são gerados os picos já apresentados.

Quando se avalia a pista fresada com degrau, Figura 10, há uma interação das condições B e C de avaliação. Da mesma forma que na condição B houve elevação dos valores mais baixos de PVP devido à rugosidade do pavimento o degrau gerou uma situação similar ao tachão, condição C, com seis ocorrências de PVP acima do critério. Em valores brutos na condição C a maior PVP foi de 4,245 mm/s e na condição D, 3,105 mm/s justificado pela maior altura do tachão e por o degrau possuir uma inclinação da face de contato mais suave que o tachão. O critério de incomodidade é superado nessa condição.

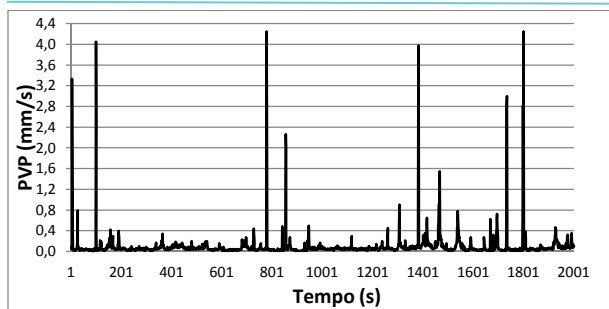


Figura 9 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico com tachão de redução de velocidade (C)

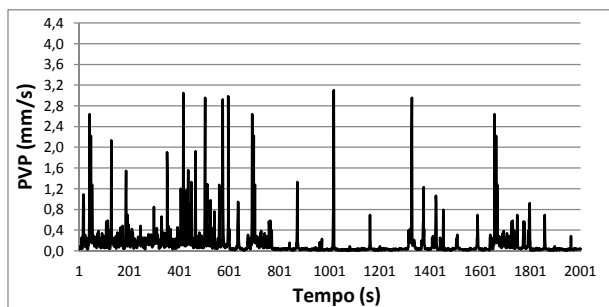


Figura 10 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico fresado e degrau na pista (D)

Na condição de pista asfaltada com buraco, Figura 11, há uma semelhança de comportamento com a pista asfaltada com tachão redutor de velocidade, sendo a maior PVP na primeira condição de 4,245 mm/s e na segunda 4,140 mm/s. As velocidades mais baixas mantiveram a característica encontrada em pavimento liso. O limite de incomodidade também foi ultrapassado.

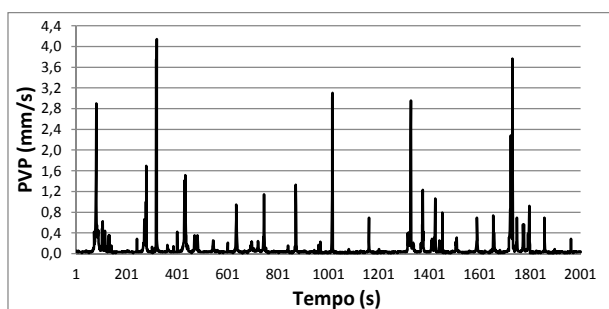


Figura 11 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico com buraco (E)

A presença de valetas na pista, Figura 12, gerou uma vibração semelhante à presença do tachão redutor de velocidade, mas com PVPs menores, sendo o valor máximo 3,320 mm/s com apenas uma ocorrência acima do critério. Assim como no caso do tachão redutor de velocidade, os valores elevados de vibração dependem da velocidade dos veículos, e neste

caso é menor devido ao risco de acidentes. O critério de incomodidade é superado nessa condição.

As lombadas, comumente encontradas nas ruas brasileiras, geram valores menores de PVP devido à velocidade reduzida dos veículos, novamente por risco de acidentes, Figura 13, sendo o critério de danos estruturais atendido e o de incomodidade ultrapassado poucas vezes

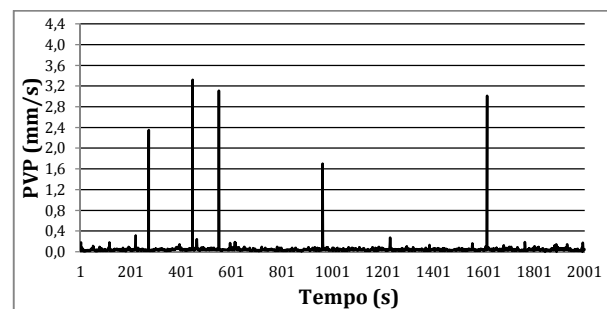


Figura 12 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico com valeta (F)

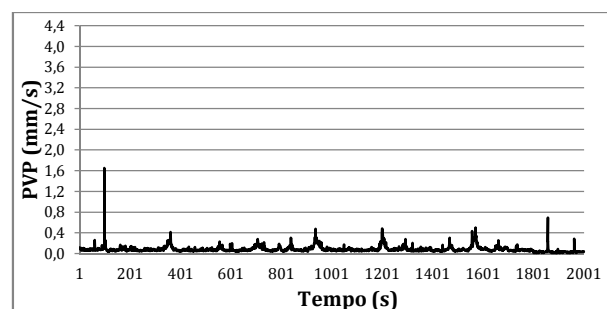


Figura 13 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico com lombada (G)

Dentre todas as condições avaliadas o pavimento asfáltico liso, o pavimento fresado, que pode representar outras situações de pavimentos rugosos, e a lombada não geraram PVPs acima do critério de 3 mm/s, mas as demais condições sim. Nestes casos houve de 2 a 6 ocorrências para um período de avaliação de 35 minutos, que na média, gera 8 por hora, ou cerca de 144 para um período de tráfego de 18 horas/dia. Esta condição pode potencializar os danos em edificações já deterioradas pelas intempéries e mal estado de conservação, fazendo fissuras evoluir para trincas e trincas para fendas. Tais PVPs são capazes de danificar patrimônios históricos como demonstrado por Gevú, Varela e Niemeyer [25] e Mendes [26].

Nas Figuras de 14 a 20 são apresentadas as PVPs nos eixos X, Y e Z utilizadas para avaliar

em qual dos eixos a velocidade é mais representativa.

No caso do pavimento asfáltico liso, Figura 14, há uma pequena predominância da velocidade no eixo Y, sentido de deslocamento dos veículos. Na situação de pista fresada, Figura 15, as velocidades nos eixos X e Y predominam, típicas das ondas tipo R, que como já demonstrado, são as mais danosas para edificações com fundações rasas por se propagarem superficialmente, por terem menor velocidade de propagação e assim ter maior interação com as fundações e transportarem quase 2/3 da energia vibratória da onda [7].

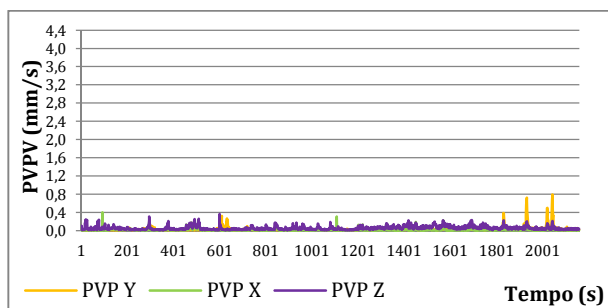


Figura 14 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico (A).

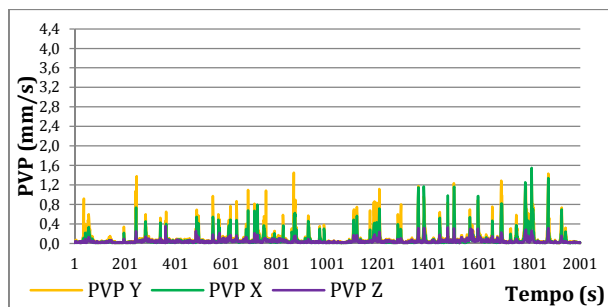


Figura 15 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento fresado (B).

Os tachões redutores de velocidade, Figura 16, também geram ondas tipo R, mas com uma forte predominância no eixo Y devido ao impacto da suspensão dos veículos com o obstáculo. No caso do pavimento fresado com degrau na pista há um comportamento semelhante, Figura 17. Os buracos na pista, Figura 18, elevam as velocidades no eixo Z devido ao movimento vertical da suspensão do veículo durante o impacto. As valetas na pista geram vibração de forma similar ao tachão e degrau, mas em menor magnitude, Figura 19.

As lombadas, Figura 20, apresentam pequenas PVP mas com características de ondas tipo R,

com velocidades predominantes nos eixos X e Y, sendo neste último os maiores valores.

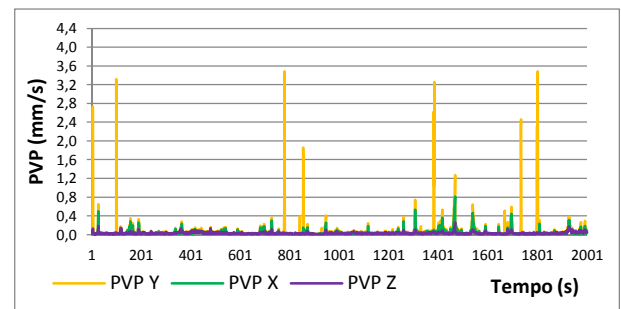


Figura 16 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico com tachão de redução de velocidade (C).

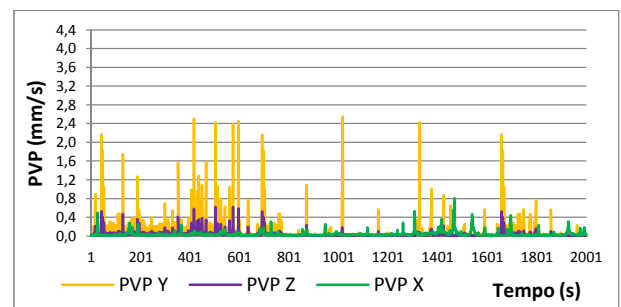


Figura 17 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico fresado degrau na pista (D).

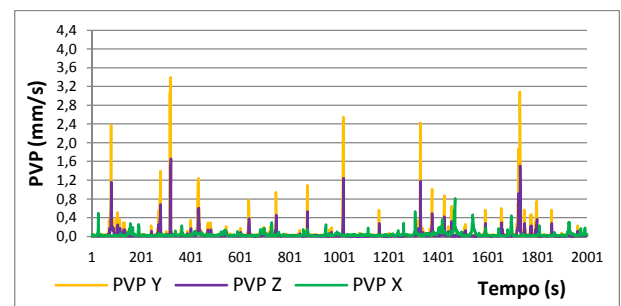


Figura 18 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico com buraco na pista (E).

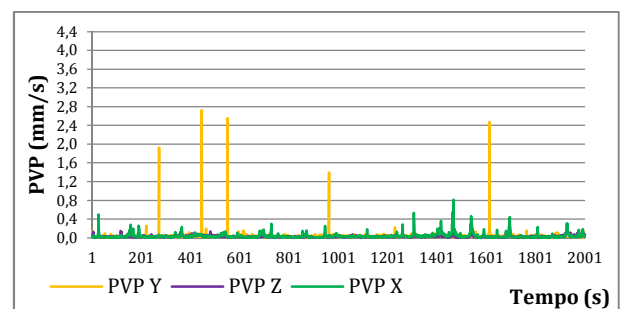


Figura 19 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico com valeta (F).

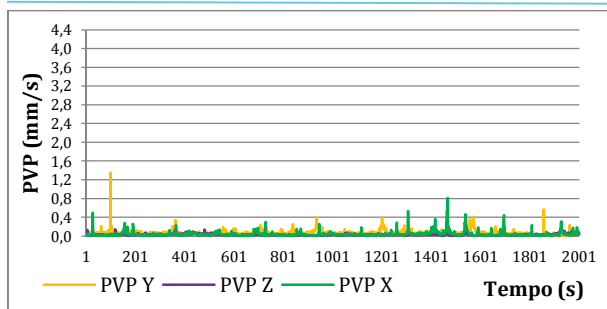


Figura 20 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico com lombada (G).

O pavimento fresado, que representa o pavimento danificado com superfície rugosa, e com lombadas, geram ondas tipo *R* mais definidas que as demais formas analisadas, mas com PVPs abaixo do critério de danos estruturais. Na condição de pavimento com buracos há a predominância de velocidades no eixo Z. Nas demais formas de pavimento e obstáculos há a predominância de PVPs no eixo Y, sentido de deslocamento dos veículos, devido ao impacto da suspensão com o obstáculo. Nesses casos a PVP é diretamente proporcional à velocidade e ao peso do veículo.

O tráfego de veículos leves e pesados é necessário para o desenvolvimento das cidades, mas ao mesmo tempo, impactam negativamente na qualidade de vida urbana [27]. A má conservação dos pavimentos e o excesso de obstáculos potencializam essa condição gerando incomodidade na população e criando situações propícias ao dano nas edificações próximas a vias de tráfego.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vibração gerada pelo tráfego de veículos leves e pesados devido à má qualidade do pavimento e obstáculos gera PVP acima do critério de incomodidade nos períodos diurno e noturno com potencial de prejudicar várias formas de atividades econômicas.

A presença de degraus na pista, tachões redutores de velocidade e valetas são os que apresentaram maior potencial de danos, que pode ser agravado com o aumento da velocidade dos veículos.

As superfícies rugosas geram ondas tipo *R* ainda próximas à fonte de vibração. As demais condições avaliadas possuem características próprias de geração de ondas, mas já indicando a tendência de formação de ondas tipo *R* que ocorrerão em maiores distâncias.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ a bolsa para financiamento desta pesquisa e o apoio da UNITAU.

REFERÊNCIAS

- [1] British Standard BS 7385-2. Evaluation and measurement for vibration in building, Part 2: Guide to damage levels from ground borne vibration. 1993.
- [2] International Organization For Standardization, ISO 4866. Mechanical vibration and shock - Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibration and evaluation of their effects on buildings, 2010
- [3] Attewell, P. B., Selby, A. R. O'donnell, L., Estimation of ground vibration from driving piling based on statistical analyses of recorded data, *Geotechnical and Geological Engineering*, 10, 41-59, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF00881970>
- [4] Brito, L. A. P. F. de. Avaliação do Decaimento da Vibração Gerada por Rolos Compactadores Vibratórios. *Brasilian Journal of Development*, 8(5), 40177 – 40194, 2022. ISSN 2525-8761 <https://doi.org/10.34117/bjdv8n5-484>
- [5] Brasil. Código Nacional de Trânsito. Brasília, 1998. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503/compilado.htm
- [6] Costa, Pedro Miguel Barbosa Alves. Vibrações do sistema via-macizo induzidas por tráfego ferroviário. Modelação numérica e Validação experimental. Tese Doutorado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61470>
- [7] Bayraktar, M. E., Kang, Y., Svinkin, M., Arif, F., Evaluation of vibration limits and mitigation techniques for urban construction – Final Report. Florida Department of Transportation, 2013. Disponível em <https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/research/reports/fdot-bdk80-977-22-rpt.pdf>
- [8] Brito, L. A. P. F. de, Kamimura, Q., Santos, A. P.. Influência da vibração gerada pelo tráfego ferroviário no meio urbano. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, UNICAMP, 5(2), 2015. Disponível em <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8634536/2457>

- [9] Kirzhner, F., Rosenhouse, G., Zimmels, Y., Attenuation of noise and vibration caused by underground trains, using soil replacement. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21, 561-567, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.009>
- [10] Chen, A., Cheng, F., Wu, Di, Tang, X.. Ground vibration propagation and attenuation of vibrating compaction, *Journal of Vibroengineering*: 21(5), 1342 – 1352, 2019. <https://www.jvejournal.com/article/20388/pdf>
- [11] Deutsches Institut für Normung, DIN 4150-3, Vibration in buildings, effect in structures, 2016.
- [12] Ju, Shen-Haw. Finite element investigation of traffic induced vibrations, *Journal of Sound and Vibration*: 321, 837–853, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.10.031>
- [13] USA. Federal Transit Administration - FTA, Transit Noise and Vibration Impact Assessment, 2018. Disponível em https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/research-innovation/118131/transit-noise-and-vibration-impact-assessment-manual-fta-report-no-0123_0.pdf
- [14] Hajek, J. J., Blaney, C. T., Hein, D. K. Mitigation of Highway Traffic-Induced Vibration. In Conference of the Transportation Association of Canada, 2006. Charlottetown, Canada. 2006. Disponível em <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2006/docs/s016/hajek.pdf>
- [15] Chaves, G. V. A., Pimentel, R. L., Melo, R. A., Farias, J. P. Faixa de domínio e sua relação com a redução de vibrações produzidas por trens de superfícies em áreas urbanas. *Revista Transportes*, 17(1), 39 – 45, 2009. <https://doi.org/10.14295/transportes.v17i1.74>
- [16] Brito, L. A. P. F. de, Soares, A. M. S., Nazari, B.. Vibração, fonte de incômodo a população e danos às edificações no meio urbano, *Revista Ambiente Construído*: 13(1), 129 - 141, 2013 <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000100009>
- [17] Karantoni, F. E., Bouckovalas, G., Description and analysis of building damage, due to Pyrgos, Greece earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*: 16, 141-150, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(96\)00035-8](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(96)00035-8)
- [18] International Organization for Standardization, ISO 2631-2 Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 1997.
- [19] British Standard BS 5228-2. Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites Vibration. 2009
- [20] Costa, J. D. de S., Neto, A. F., Olivier, N. C. O., Irmão, M. A. da S., Costa, M. de S., Gomes, J. P.. Road transport vibration stress impact on ‘Palmer’ mangoes quality and shelflife. *Revista Brasileira de Fruticultura*: <https://doi.org/10.1590/0100-29452021641>
- [21] Carlesso, G. C., Grando, M. T., Bacca, A. B., Dall’Acqua, C., Luvizão, G., Trichês G.. Influência da Irregularidade das Vias na Perda de Qualidade das Uvas de Mesa Durante o Transporte. Em 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Disponível em http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Infraestrutura/Dimensionamento.%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20IV/2_48_AC.pdf
- [22] Innocencio, C. M., Nääs, I. de A.. Impacto da Condição da Estrada na Vibração Durante o Transporte Simulado de Frangos de Corte. *Energia na Agricultura*, 34(4), 491-500, 2019. : <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2019v34n4p491-500>
- [23] Villarroel, M.; Maria, G.A.; Sanudo, C.; Olleta, J.L.; Gebresenbet, G. Effect of transport time on sensorial aspects of beef meat quality. In *Meat Science*, 63, 353–357, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00093-1)
- [24] Donofre, A. C.. Vibrações no transporte de ovos fertilizados: efeitos no nascimento e na qualidade de pintos de corte. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Sistemas Agrícolas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2014. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-20032014-105707/pt-br.php>
- [25] Gevú, N., Varela, W., Niemeyer, M. L.. As Fachadas Históricas da Rua Primeiro de Março: O Impacto das Vibrações Geradas pelo Tráfego Intenso no Centro da Cidade do Rio De Janeiro. Em VI Encontro Nacional de Pesquisa e Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Brasília, 2020. Disponível em <http://enanparq2020.s3.amazonaws.com/MT/22257.pdf>
- [26] Mendes, F. D. L.. Análise Exploratória dos Efeitos de Vibrações Induzidas por Tráfego no Patrimônio Integrado de Edifícios Históricos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, 2018. Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/115962>
- [27] Machado, L., Piccinini, L. S. Os desafios para a efetividade da implementação dos planos de mobilidade urbana: uma revisão sistemática. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 10(1), 2018. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.010.001.AO06>