XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE DE RODAGEM NA VIBRAÇÃO GERADA PELO TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito (1); Liu Ming (2)
(1) Professor Doutor, lapfbrito@gmail.com, Universidade de Taubaté, Programa de Pós Graduação em Planejamento e Desenvolvimento Regional, Rua Visconde do Rio Branco, 210, Centro, Taubaté-SP – Brasil, CEP: 12020-040, 12 33073431
(2), Mestre em Engenharia Ambiental, liu.tzeming@gmail.com, Flow Engenharia, Rua Arlindo Penna 167, Florianópolis-SC CEP 88037-260, 48-98834-3684

RESUMO
A vibração gerada pelas atividades urbanas pode ser avaliada sobre dois aspectos distintos: a incomodidade e o potencial para danos estruturais. Uma das principais fontes de vibração no meio urbano é o tráfego rodoviário que faz parte do dia a dia da população em geral estando bem próximo a residências diuturnamente. Os principais indutores da energia vibratória ão as condições da superfície de rolamento de uma via associada a velocidade e peso do veículos. O objetivo desse trabalho é avaliar a influência da superfície de rodagem de uma via na vibração gerada pelo tráfego rodoviário. Foram realizadas medições de PVP (pico de velocidade da partícula) em cenários diferentes com a pista em terra batida, pavimentada e com tachão e lombadas redutoras de velocidade. Os resultados indicam que com a pavimentação da pista a quantidade de PVPs acima do critério normalizado reduziu mas, devido a velocidades elevadas o critério de danos estruturais foi atingido pelo menos uma vez em cada condição. Nos cenários com tachão e lombadas redutoras de velocidade as PVPs obtidas foram menores, principalmente devido as menores velocidades. As ondas vibratórias se propagam no solo por ondas tipo Rayleigh com potencial de acoplamento aos primeiros modos de vibração das edificações, efeito que pode ser potencializado com os efeitos das intempéries.
Palavras-chave: Vibração, rodovias, edificação popular.

ABSTRACT
The artificial vibration generated by the urban activities can be evaluated on two distinct aspects: the discomfort and the potential for structural damages. One of the main sources of urban vibration is the road traffic that is part of the daily life. The main inductors of vibratory energy are the conditions of the road surface associated with the speed and weight of the vehicles. The objective of this work is to evaluate the influence of the road surface on the vibration generated by road traffic. PPV (peak particle velocity) measurements were performed in different scenarios with the unpaved surface, with asphalt surface and with stud and speed reducing spines. The results indicate that with asphalt surface the amount of PPVs above the normalized criterion was reduced, but due to high speeds, the criterion of structural damage was reached at least once in each condition. In the scenarios with studs and speed reducing spines the obtained PPVs were smaller, mainly due to the lower speeds. The vibrating waves propagate in the soil by Rayleigh waves with potential of coupling to the first modes of vibration of the buildings, effect that can be potentiated with the effects of the humidity and the age of the building.
Keywords: Vibration, highways, popular building

1. INTRODUÇÃO

A vibração artificial gerada pelas atividades urbanas pode ser avaliada sobre dois aspectos distintos: a incomodidade e o potencial para danos estruturais. A resposta da estrutura frente a energia vibratória e sua capacidade de amortecimento são fatores que influem na interação da vibração estrutural e o usuário da edificação. Características como o tipo de fundação e solo, estado de conservação estrutural e das alvenarias influenciam os modos naturais de vibração da edificação e consequentemente no seu amortecimento (BS 5828-2, 2009). Não há uma normalização nacional que regule os limites de vibração, tanto no critério de incomodidade quanto no critério de danos estruturais.

A variável utilizada para quantificação da vibração em uma superfície é o pico de velocidade da partícula (PVP) sendo esta a somatória vetorial das velocidades medidas simultaneamente nos 3 eixos ortogonais (X, Y e Z) (ISO 4866, 2010). A aceleração está relacionada com a deformação sendo adotada por sismologistas em análises de terremotos (ATTEWELL, SELBY, UROMEIHY 1989). Apesar da velocidade ser reconhecida como um parâmetro indicador de danos ou incomodidade não é ela propriamente dita que os causa, mas sim o deslocamento diferencial que origina uma torção/flexão na estrutura, ou a mudança do vetor velocidade (direção ou magnitude) que produz forças inerciais na estrutura (BS 5228-2, 2009). Na verdade os dois efeitos ocorrem ao mesmo tempo, de forma combinada, que se somarão as tensões e deformações pré-existentes (NEW, 1990). Os danos ocorrerão quando estes efeitos suplantarem os limites de tolerância da estrutura caso contrário haverá apenas incomodidade.

Adota-se como referência ao critério de incomodidade gerada pela vibração os valores da 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, pois os limites de incomodidade não são dados na versão da ISO 2631-2 (2003), como apresentado na Tabela 1. A incomodidade dos usuários de uma edificação vem da percepção física de movimento gerada pela vibração que interfere em atividades que exigem concentração e em momentos de descanso, além da insegurança devido à movimentação de lustres e janelas (ISO 2631-2, 2003). A partir de uma PVP de 0,14 mm/s a vibração já pode ser perceptível, em 0,30 mm/s a vibração é perceptível, em 1 mm/s pode motivar reclamações e em 10 mm/s a vibração é intolerável mesmo que seja por breve exposição. Klaeboe *et al* (2003) relacionaram a PVP em edificações e o potencial de reclamações da população. Por exemplo, a possibilidade de se notar a PVP de 0,10 mm/s é de 0%, sendo esta velocidade exatamente o valor mínimo de incomodidade da norma ISO 2631-2 (1997). No caso de uma PVP de 0,40 mm/s, o limite de incomodidade para residências no período diurno da ISO 2631-2 (1997), a possibilidade de se notar a vibração é de 50%, sendo que 25% relataram interferência no sono e lazer, como assistir televisão, mas a chance de reclamação é inferior a 10%.

Tabela 1 – Limites da PVP em mm/s da norma ISO 2631-2 (1997) para incomodidade.

Tipos de Edificação	DIURNO, PVP (mm/s)	NOTURNO, PVP (mm/s)
Hospitais	0,10	0,10
Residências	0,40	0,14
Escritórios	0,40	0,40
Oficinas	0,80	0,80

Os danos estruturais em uma edificação ocorrem quando o deslocamento imposto pela vibração supera o limite de deformação da estrutura, provocando fissuras, trincas ou até mesmo danos estruturais irreversíveis. A norma DIN 4150-3 (1999) *Vibration in buildings, effect in structures* é a referência indicada que aborda os limites de PVP em uma edificação para que não haja danos estruturais sendo aceita por toda comunidade européia (BACCI *et al*, 2003). Os efeitos estruturais gerados pela vibração em uma edificação podem ser classificados como cosméticos, com o aparecimento de pequenas fissuras (da espessura de um fio de cabelo, por exemplo) no reboco 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. As deformações da estrutura devido à acomodação natural do solo, a fadiga estrutural devido a longos períodos de exposição, os efeitos da umidade, temperatura e falta de manutenção e conservação reduzem o amortecimento das edificações, assim, uma pequena velocidade induzida na estrutura pode acelerar este processo de deterioração (ISO 4866, 2010).

A norma DIN (4150-3, 1999) limita a PVP de acordo com a tipoligia das edificações sendo a Categoria 1 as edificações com estruturas de concreto armado e madeira em boas condições que possuem como criterio a PVP de 40 mm/s; a Categoria 2 que abrange edificações em alvenaria em boas condições com o critério de PVP de 15 mm/s; e a Categoria 3 que se refere a edificações de alvenaria em más condições de conservação, ou patrimônios históricos com o critério de PVP de 8 mm/s. Neste caso específico, para a faixa de frequência de 10 a 50 Hz a PVP aceira cai para 3,0 mm/s. Karantoni e Bouckovalas (1997) avaliaram os efeitos da vibração em casas de alvenaria e em edificios de concreto

armado e concluiram que na primeira tipologia os danos são mais sistemáticos e que a idade dos materiais, os próprios materiais em si e o número de andares também influenciam no processo. Chaves et al (2009) e Brito, Kamimura e Santos (2015) verificaram que edificações sujeitas a níveis de vibração inferiores ao normalizado apresentavam claros sinais de danos devido à idade, acima de 60 anos em média, e pela ação das intempéries. Brito (2013 e 2014) observou danos estruturais em edificações com fundações rasas, sem estrutura formal e com pouca rigidez, gerados por PVP da ordem de 4 a 6 mm/s. 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 (ISO 4866, 2010).

Uma das principais fontes de vibração no meio é o tráfego rodoviário e ferroviário, algumas atividades da construção civil, como o bate-estacas, rolos compactadores vibratórios, detonação de rochas e algumas atividades ligadas a indústria, como as prensas e peneiras vibratórias. No caso da construção civil a operação desse tipo de equipamento é temporária limitada ao canteiro de obras, podendo eventualmente gerar problemas ao se aproximar de edificações (BRITO, SOARES e NAZARI, 2011). No caso do bate-estacas a vibração pode ser controlada reduzindo a altura de queda do martelo de cravação, por exemplo. As atividades industriais são desenvolvidas em geral em regiões já delimitadas para isso, a uma grande distância de zonas de moradia não sendo perceptível para a população em geral. Mas o tráfego, principalmente o rodoviário, faz parte do dia a dia da população em geral estando bem próximo a residências diuturnamente (ATTEWELL, SELBY, O'DONNELL, 1992). 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. O mesmo ocorre com a velocidade, elevadas PVP podem ser geradas mesmo em pavimentos de boa qualidade (BS 7385-1, 1990).

Para quantificar a PVP (mm/s) devido a desníveis no pavimento de uma via Watts e Krilov (2000) propuseram a Equação 1, como o tachão de redução de velocidade. Sendo *a* a profundidade do desnível em mm, *g* o Fator de Solo, *v* a velocidade em Km/h, *r* distancia do leito da via em metros, *p* é o fator que indica se apenas um lado ou dois são afetados pelo desnível e *x* o coeficiente de atenuação de potência que depende do tipo de solo, argiloso ou arenoso, por exemplo. Os valores de g e x são fornecidos em Watts e Krilov (2000).

$$PVP = 0{,}028 * a * g * p * \left(\frac{v}{48}\right) * \left(\frac{r}{6}\right)^{x} \qquad 1$$

O tipo de solo influencia na forma de propagação e atenuação da energia vibratória assim como a distância entre a fonte e o receptor. As ondas que se formam no solo dependem da fonte, mas em geral são ondas de compressão ou cisalhamento (como velocidade em apenas uma direção), quando próximas do ponto de geração da vibração, que se transformam em ondas tipo Rayleigh (com velocidade em duas direções) quando refletidas pela superfície do solo. Nos solos mais rígidos a propagação da energia vibratória ocorre em maiores velocidades, sendo que a tensão gerada nas fundações, e consequentemente a vibração induzida, são inversamente proporcionais a esta, tanto para ondas de compressão quanto para as de cisalhamento. A velocidade das ondas vibratórias no solo varia de acordo com sua composição devido principalmente a impedância elástica (KIRZHNER, ROSENHOUSE E ZIMMELS, 2005).

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar a influência da vibração gerada pelo tráfego rodoviário de uma via em edificações próximas (até 10 m) da superfície de rodagem.

3. MÉTODO

Para a avaliação da influência superfície de rodagem na vibração ambiental foram executadas medidas do Pico de Velocidade da Partícula (PVP) em mm/s na condição de pista não pavimenta (M1), na condição de pista pavimentada (M2), da pista pavimentada com tachão de redução de velocidade (M3) e pista pavimentada com lombada de redução de velocidade (M4). As Figuras de 1 a 4 ilustram as características das superfícies de rolamento consideradas. Durante as medições foi realizada a contagem de veículos leves, pesados e carretas.

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. 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 30 a 60 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 a 6 m da lateral da pista como ilustrado nas Figuras 5 e 6.



Figura 1 Vista da pista com pavimento de terra (M1)



Figura 2 Vista da pista com asfáltico (M2)



Figura 3 Vista da pista com tachão de redução de velocidade (M3)



Figura 4 Vista da pista com lombada de redução de velocidade (M4)

O critério adotado para incomodidade é de PVP = 0,4 mm/s (ISO 2631-2, 1997) para residências. No caso de danos estruturais foi adotado o critério de PVP =3 mm/s na faixa de 10 a 50 Hz (DIN 4150-3, 1999). A vibração nesta faixa de frequência é condizente com a tipologia construtiva e edificações populares de baixa renda (sem uma estrutura de concreto armado, sustentada apenas pela alvenaria, retangulares, com poucas divisões internas) que tendem a gerar movimento de corpo rígido (baixas frequências). A ausência de paredes internas rígidas tende a reduzir as frequências naturais da estrutura de uma edificação (YESILYURT, ZULFIKAR, PICOZZI 2017). Considere-se também a má qualidade construtiva das edificações e a sua deterioração. Foi considerada na análise a possível percepção da vibração e motivação para reclamação segundo Klaeboe *et al* (2003).



Figura 5 Vista do equipamento de medição e da pista de rolamento ao fundo



Figura 6 Vista do equipamento de medição e da lombada ao fundo

4. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta a contagem de veículos leves, médios e pesados realizada durante as medições. As Figuras 7 a 10 ilustram o Pico de Velocidade da Partícula (mm/s) resultante da somatória vetorial das velocidades obtidas nos eixos X, Y e Z (PVP Soma).

Tabela 2 – Contagem de veículos por categoria realizada durante as medições

Medição	Veículos leves	Veículos pesados	Carretas
M1	46	16	4
M4	51	28	7
M3	30	25	7
M2	53	51	7

Nas Figuras 7 e 8 é possível fazer a comparação entre a PVP na condição de pista de terra, ilustrada na Figura 1, e pista pavimentada, ilustrada na Figura 2. No primeiro caso o limite de incomodidade de 0,4 mm/s é ultrapassado constantemente chegando a valores superiores ao critério de dano estrutural adotado (3,0 mm/s) com PVP de 3,35 mm/s. Com a pavimentação observa-se uma sensível redução, sendo mais raros os momentos que o critério de incomodidade (0,4 mm/s) é ultrapassado, comprovando o efeito da baixa rugosidade da superfície de rodagem na propagação da vibração. A despeito da melhora da rugosidade da superfície de rodagem foi obtido PVP de 3,58 mm/s, ainda maior que medido com a superfície de terra. Considere-se nesse caso que ao se pavimentar a via a velocidade dos veículos se elevou, para a pista de terra a velocidade regulamentada era de 60 km/h e para a pista asfaltada a velocidade subiu para 80 km/h, demostrando também o quão influente é a velocidade do veículo na geração da vibração rodoviária. Com PVP da ordem de 3,5 mm/s há uma expectativa de percepção de 80% da população e uma grande motivação para a reclamação de 30% da população de acordo com Klaeboe *et al* (2003) em pesquisa realizada na Europa, com os padrões de conforto da população local.

Nas Figuras 9 e 10 é possível fazer a comparação entre a PVP gerada pelos veículos ao passar pelo tachão redutor de velocidade (50 mm de altura), ilustrado na Figura 3, e uma lombada também redutora de velocidade, ilustrada na Figura 4. Nas duas situações o limite de incomodidade de 0,4 mm/s foi ultrapassado apenas seis vezes, mesmo havendo o degrau da pista, sendo que o fator prevalente na PVP foi a baixa velocidade regulamentada para o local, 60 km/h. Mas nota-se que na condição da lombada os níveis mais baixos de vibração permanecem por mais tempo sendo que os picos se dão somente em algumas condições, ao contrário da condição com tachão onde estes picos são mais constantes. Com o tachão redutor de velocidade a PVP foi da ordem de 1,0 mm/s suficiente para a percepção de 65% da população mas com motivação para reclamação de apenas 15%. No caso da lombada a percepção seria de 55% da população com uma motivação para reclamação inferior a 5% (Klaeboe *et al*., 2003)

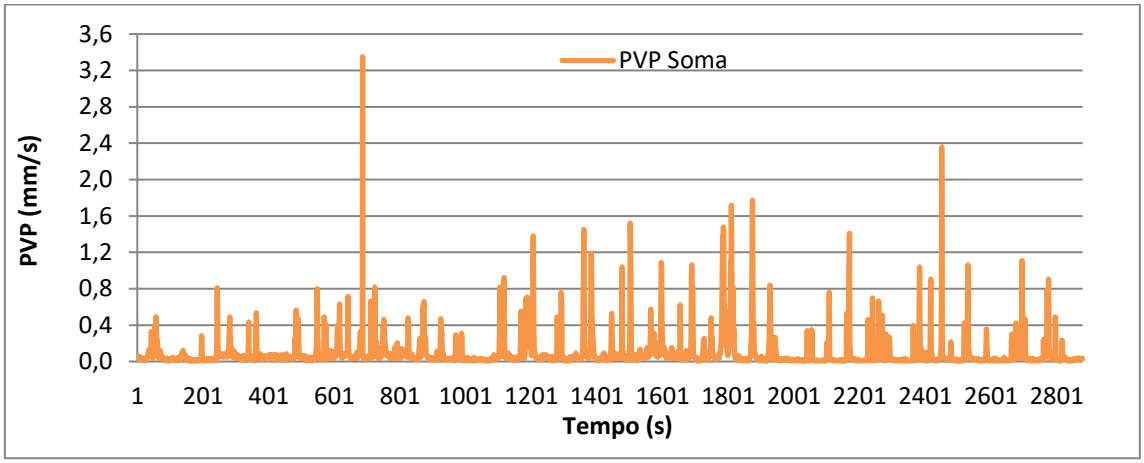

Figura 7 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em superfície de terra

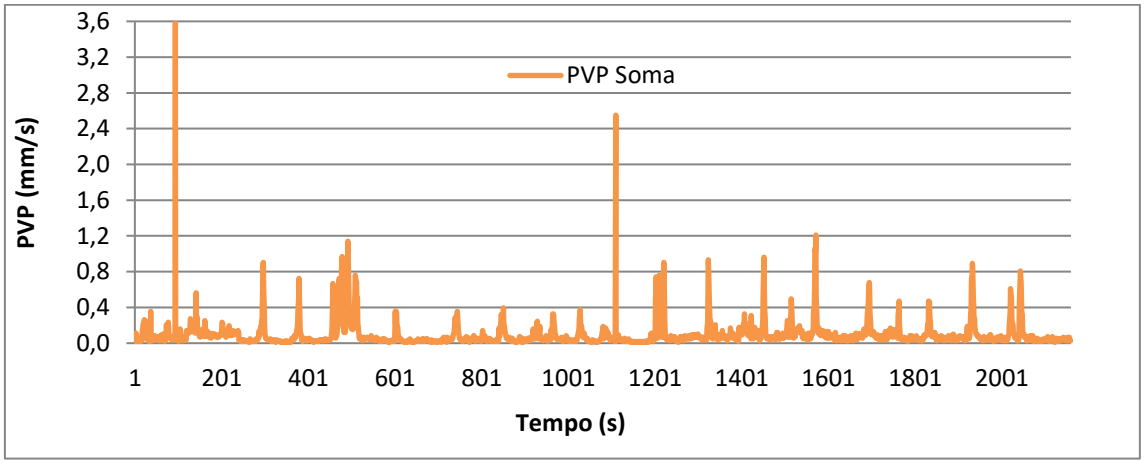

Figura 8 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico

Para a condição do tachão foi feita a previsão da PVP gerada no local por meio da Equação 1. Para a velocidade citada e considerando o solo argiloso a uma distância de 6 m a PVP prevista seria de 0,47 mm/s, representada na Figura 9 pela linha preta. Observa-se que a uma boa coerência entre o resultado previsto e o medido, mesmo havendo alguns valores superiores a este. A velocidade de 60 km/h considerada foi a permitida para o local, podendo haver situações onde esse limite foi ultrapassado. Na Figura 10 é possível observar que houve uma pequena interferência nas medições entre 800 e 1200 s e após os 2600 s gerado por um equipamento em operação no campo que não pode ser visualizado no momento das medições.

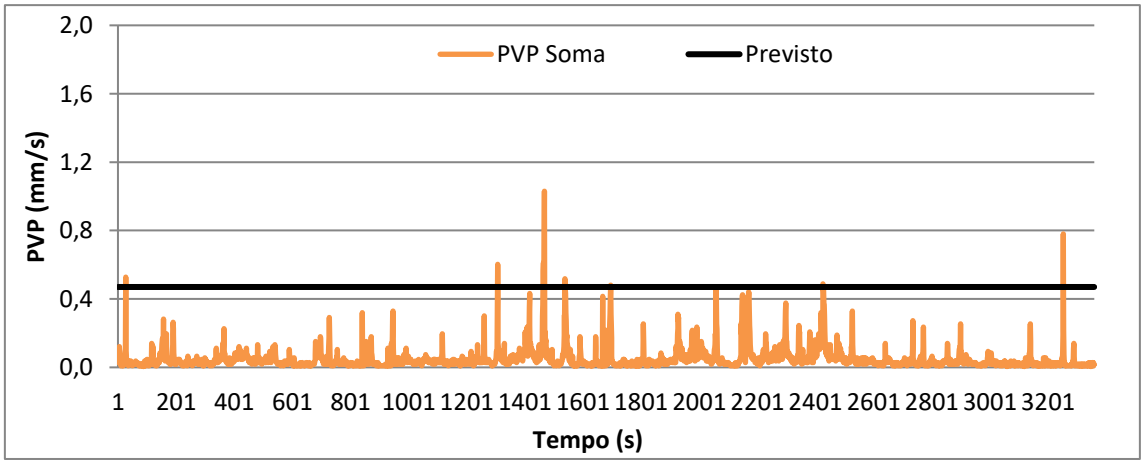

Figura 9 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico com tachão de redução de velocidade e o valor previsto pela Equação 1

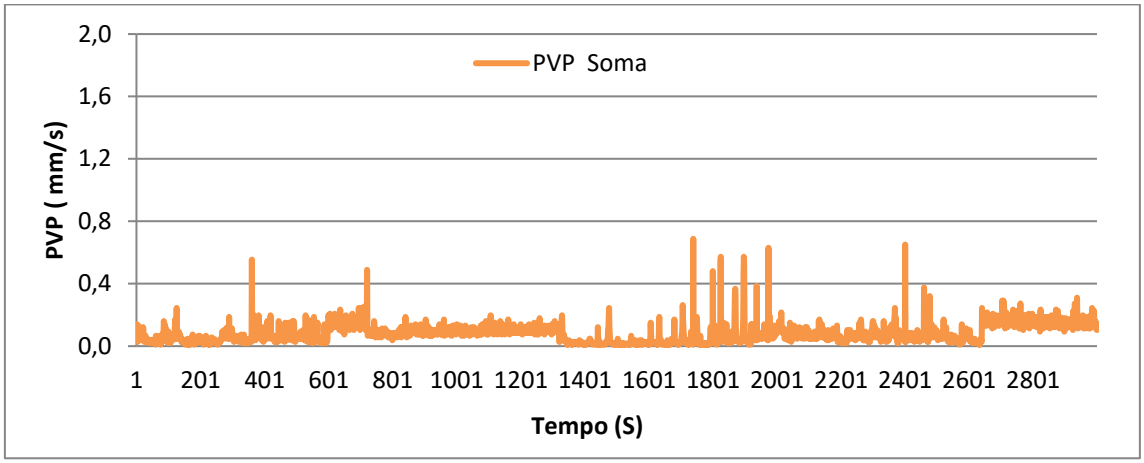

Figura 10 Histórico do tempo da PVP (mm/s) em pavimento asfáltico com lombada de redução de velocidade

Ainda por meio da Equação 1 é possível indicar uma distância mínima entre as vias de tráfego com redutores de velocidade (50 mm) para que o limite de PPV de 0,40 mm/s da ISO 2531 -2 (1997) seja atendido. As distâncias mínimas são apresentadas para solos argilosos e arenosos na Tabela 3.

Tabela 3 – Distância mínima entre os receptores e a uma via de tráfego com tachão (50 mm) para solos argilosos e arenosos para atender o critério de incomodidade de 0,40 mm/s da norma ISO 2631-2 (1997)

Velocidade (km/h)	Distância Solos argilosos (m)	Distância Solos arenosos (m)
40	5	12
50	6	17
60	7	21
70	9	26
80	10	31

Nas Figuras 11 a 14 são apresentados os resultados obtidos para cada eixo ortogonal, X, Y e Z individualemte. Na condição de superfície de terra e superfície pavimentada, Figuras 11 e 12 observa-se uma predominância de PVP no plano paralelo a superfície de rodagem, X e Y, indicando a propagação da energia vibratória por meio de ondas de superfície tipo Rayleigh como já previsto na literatura (KIRZHNER, ROSENHOUSE E ZIMMELS, 2005). As PVP perpendiculares à superfície de rodagem são as menores, indicando menos concentração de energia nessa direção.

Observa-se também que com a pista de terra há uma alternância dos picos de velocidade entre os eixos X e Y, originado pelas imperfeições da superficie de rodagem já que em cada passagem os veículos tocavam de maneira diferente as ondulaçãoes da pista. Fato que não se repete com a pista pavimentada onde os picos de velocidades nos eixos X e Y possuem valores próximos indicando que a pista homogenea gera energia vibratórias nas duas direções em magnitute próxima.

Na condição da pista com tachão e lombadas redutoras de velocidade, Figuras 13 e 14 a situação descrita permanece, com a predominância de ondas de superfície tipo Rayleigh e também com alternância na geração de energia nos eixos X e Y, que nesse caso dependem da suspensão dos veículos e a forma com que os pneus tocam no tachão e lombada. Observa-se uma predominância de energia sonora na direção do eixo Y, que é paralelo ao sentido da velocidade dos veículos.

Em muitas situações as faixas de dominio de rodovias e ferrovias são tomadas por ocupação irregulares sujeitas a niveis de vibração elevados como já demontrado por Hajek e Hein (2006) e Chaves et al (2009), o que aproxima a fonte de vibração do receptor. Brito, Kamimura e Santos (2015) diagnosticaram edificações, como as descritas, com trincas devido a PVP de 5,5 mm/s a 10 m da fonte de vibração e devido a PVP de 2,0 mm/s a 30 m da fonte, e com fissuras devido a PVP 1,0 mm/s a 50 m da fonte. Os tachões redutores de velocidade geram PVP acima de 3,0 mm/s em solos argilosos e arenosos a distâncias de 1,5 a 3,0 m respectivamente, valores obtidos por meio da Equação 1 considerando veloscidades de 70 a 80 km/h. Tais valores são proximos aos obtidos por Mhanna, Sadek, Shahrour (2012). Mas deve-se ainda considerar que em um período de 35 minutos de análise em uma pista irregular de terra batida ou em um pista pavimentada de boa qualidade foram obtidos pelo menos uma PVP acima de 3,0 mm/s, algo aproximado com duas ocorrências por hora, ou vinte por dia, considerando 10 horas diárias de tráfego intenso, ou 400 por mês, considerando cerca de 20 dias úteis, ou ainda cerca de 4800 ao ano. Ou seja algo que não pode ser desprezado quando se considera a condição temporal da análise.

As ondas tipo Rayleigh, predominante em todos os cenários avaliados, com concentração de velocidade nos eixos X e Y, tendem a se acoplar a esse tipo de edificação onde os primeiros modos de vibração estrutural são os do eixo X (modo 1), eixo Y (modo 2) e o torcional no eixo X e Y (modo 3). Estas edificações em geral não possuem uma estrutura de sustentação ligada a fundação, as próprias paredes se auto sustentam, assim como também sustentam a conbertura. Internamente existem poucas divisões, o que reduz a rigidez do conjunto (YESILYURT, ZULFIKAR, PICOZZI 2017).

A norma DIN 4150-3 (1999) limita a PVP em edificações sem estrutura de concreto armado em 3,0 mm/s na faixa de frequência de 10 a 50 Hz sendo que está próxima da faixa de frequência da indução da vibração no solo pelo tráfego de veiculos, 10 a 20 Hz (JU, 2009).

Desta forma, existem vários elementos simultâneos que podem elevar os efeitos da vibração rodoviária em edificações de baixa renda. Não se compara aqui a incomodidade devido a vibração a outras deficiências dessas edificações como a ausência de saneamento básico e outros itens mínimos para a salubridade dos ocupantes dessas edificações como ventilação e insolação. Mas os primeiros efeitos dos danos estruturais são as fissuras no reboco e alvenaria. A ação das intempéries nestas fissuras, principalmente o acúmulo de umidade, reduzem o amortecimento da edificação, o que aumenta o deslocamento das paredes, e consequentemente torna uma fissura em trinca (ISO 4866, 2010). As trincas por sua vez permitem mais acúmulo de umidade alimentando o processo de deterioração estrutural, fomentado pela continuidade da excitação devido a vibração, e gerando outras consequências insalubres como ser abrigo para insetos e local de acúmulo de fungos o que demanda mais investimentos na saúde pública devido as doenças crônicas associadas a esse tipo de situação. Assim o que pode parecer apenas um problema de incomodidade pode se tornar um problema de salubridade de moradores pois a vibração potencializa alguns efeitos já existentes, se juntando a outros, também ligados as mesmas causas, como a poluição do ar e excesso de ruído.

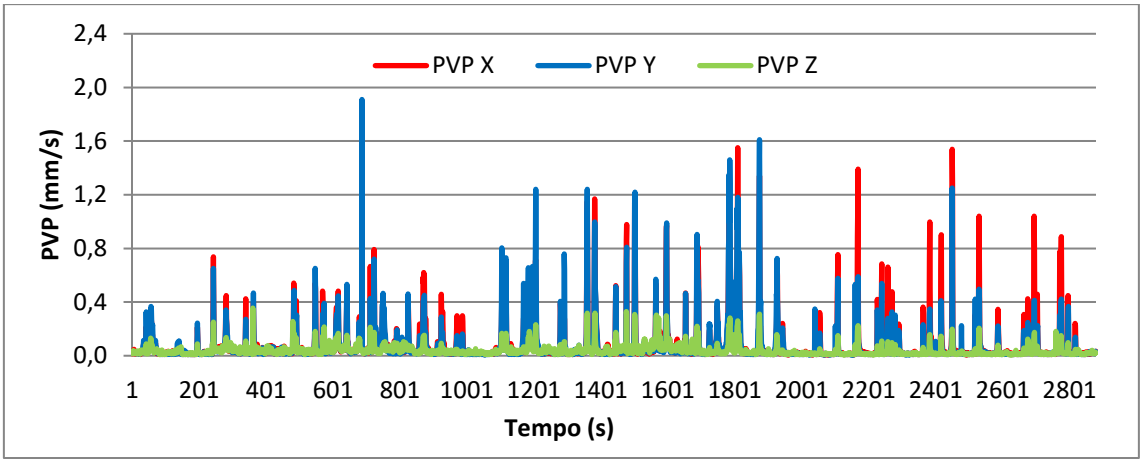

Figura 11 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em superfície de terra

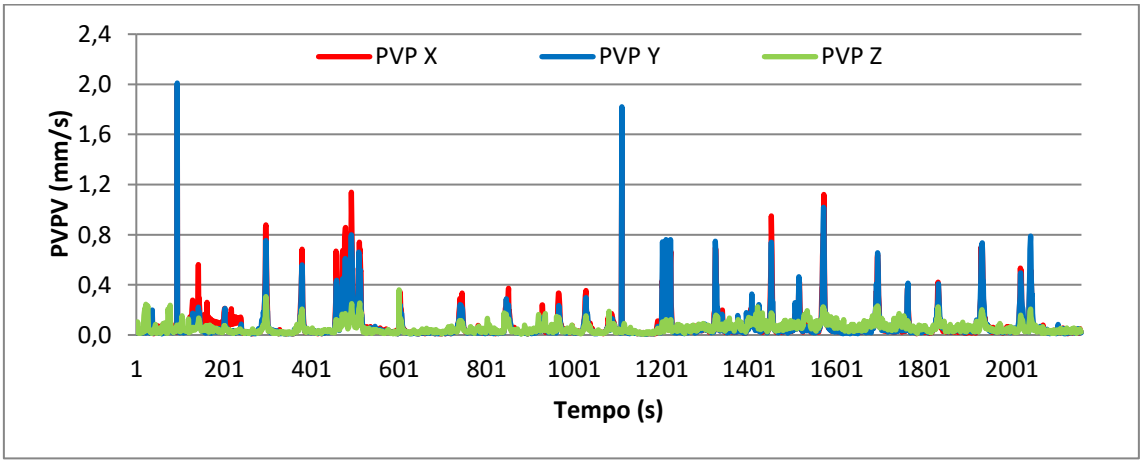

Figura 12 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico

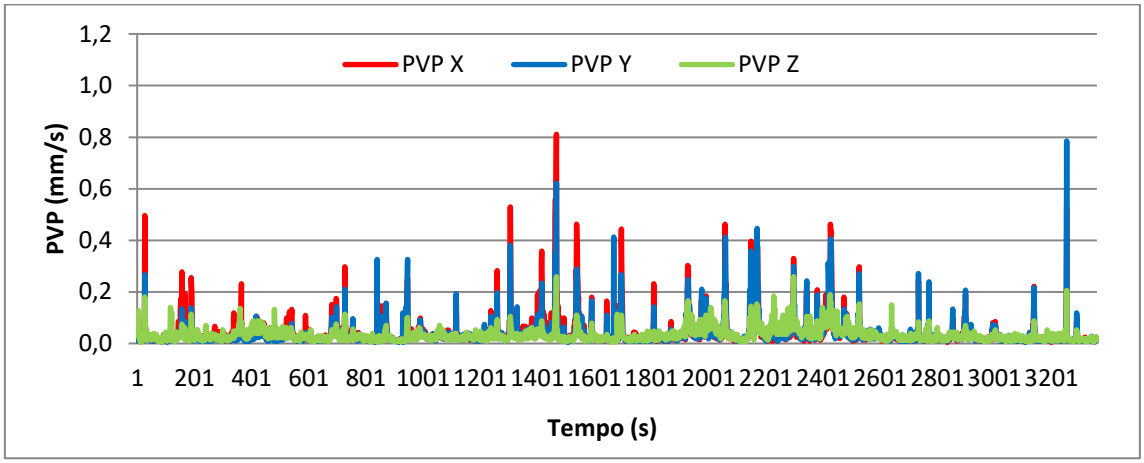

Figura 13 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico com tachão de redução de velocidade

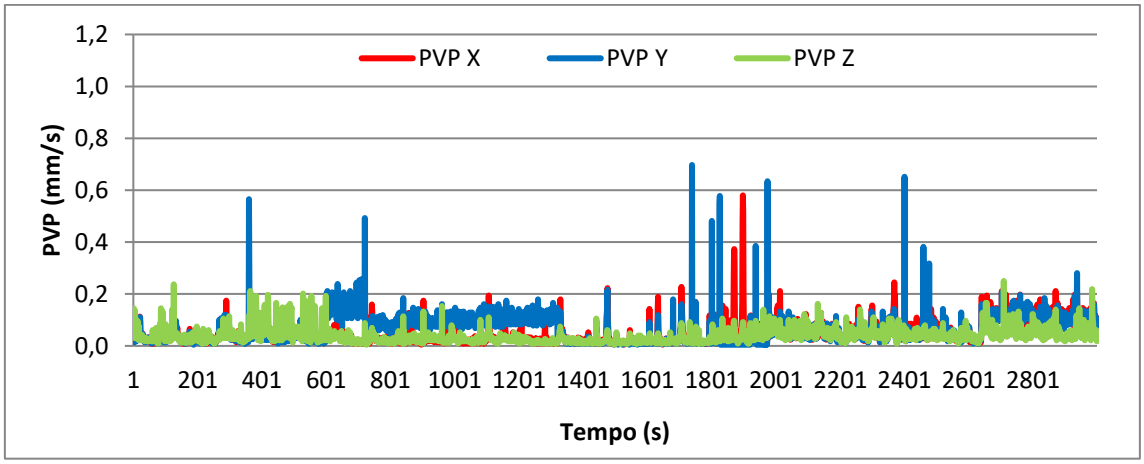

Figura 14 Histórico do tempo da PVP (mm/s) nos eixos X, Y e Z em pavimento asfáltico com lombada de redução de velocidade

5. CONCLUSÕES

A melhoria da rugosidade da superfície de uma via de tráfego reduz a quantidade de ocorrências de PVPs acima do normalizado para o critério de incomodidade mas não para o critério de danos estruturais já que basta uma passagem em excesso de velocidade para a essa ocorrência

No caso de tachão e lombadas redutoras de velocidades as PVP s são de menor intensidade devido a baixa velocidade de passagem dos veículos, o que pode se alterar com a elevação da velocidade.

As ondas de vibração geradas pelo tráfego de veículos são predominantemente do tipo Rayleigh com grande potencial de acoplar aos primeiros modos de vibração de edificações populares, principalmente quando essas não respeitam o recuo mínimo estabelecido.

Os efeitos da vibração em uma edificação, como pequenas fissuras e/ou trincas, podem ser potencializados pelas intempéries, como a umidade, se tornando foco de fungos, bactérias e insetos, elevando a condição insalubre do local. Dessa forma faz-se necessário uma normalização que atenda a realidade da tipologia construtiva e condições climáticas do Brasil que esse efeito seja mitigado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATTEWELL, P. B., SELBY, A. R. UROMEIHY, A, Appraisal of ground vibration form civil engineering construction, **International Journal of Mining and Geological Engineering**, 1989, vol. 7, pp 183 - -208, 1989

ATTEWELL, P. B., SELBY, A. R. O'DONNELL, L., Estimation of ground vibration form driving piling based on statistical analyses of recorded data, **Geotechnical and Geological Engineering**, vol. 10, pp 41- -59, 1992

BACCI, D. L. C., LANDIM, P. M. B., ESTON, S. M., IRAMINA, W. S. Principais normas e recomendações existentes para controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas, parte I. **Revista Escola de Minas,** v 56, n 1, 2003

BRITO, L. A. P. F. de, SOARES, A. M de SOUZA, NAZARI, B. Avaliação da Vibração Gerada pelo Tráfego Rodoviário e Ferroviário no Hospital Universitário de Taubaté, In XI ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, ANTAC, Búzios, 2011, **Anais,** 2011

BRITO, L. A. P. F. de, Vibração, fonte de incômodo a população e danos ás edificações no meio urbano**, Revista Ambiente Construído**, ANTAC, v13(1) 129 a 141, 2013

_____, Avaliação do Tráfego Rodoviário com Fonte de Vibração e Incômodo no Meio Urbano**,** In XXV ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, SOBRAC, Campinas, 2014, **Anais,** 2014

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, v. 5(2), p. 31. 2015

BRITSH STANDARD **BS 7385-2**. *Evaluation and measurement for vibration in building, Part 2:Guide to damage levels from ground borne vibration.* 1993.

_____ **BS 5228-2**. *Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites Vibration.* 2009

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.** v. XVII, N 1, pp 39 – 45, 2009

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG**, DIN 4150-3**, *Vibration in buildings, effect in structures*, 1999.

HAJEK, J. J., HEIN, D. K. Mitigation of Highway Traffic-Induced Vibration. In 2006 CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA. Charlottetown, Canada. 2006

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.

_____, **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).* 2003

_____, ISO 4866 *Mechanical vibration and shock - Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibration and evaluation of their effects on buildings*, 2010

JU, Shen-Haw. Finite element investigation of traffic induced vibrations. **Journal of Sound and Vibration.** v**.** 321, p. 837–853, 2009

KARANTONI, F. e BOUCKOVALAS. G., Description and analysis of building damage, due to Pyrgos, Greece earthquake, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. v. 16, p. 141-150, 1997.

KIRZHNER , F., ROSENHOUSE, G., ZIMMELS, Y., Attenuation of noise and vibration caused by underground trains, using soil replacement, **Tunneling and Underground Space Technology**, v. 21, p. 561 -567, 2006.

KLAEBOE, R., TURUNEN-RISE I.H., HARVIK L., MADSHUS C., Vibration in dwellings from road and rail traffic — Part II: exposure–effect relationships based on ordinal logistic regression models, **Applied Acoustics,** v. 64, p. 89 – 109, 2003.

MHANNA, M., SADEK, M., SHAHROUR, I.. Numerical modeling of traffic-induced ground vibration. **Computers and Geotechnics**, v. 39, p. 116–123. 2012

NEW, B. M., Ground Vibration Caused by Construction Works, **Tunneling and Underground Space Technology,** vol 5 (5) p. 179 – 190, 1990.

WATTS, G. R., KRYLOV, V., Ground borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions, **Applied Acoustics**. v. 59, p. 221 – 236, 2000.

YESILYURT., A. , ZULFIKAR, A. C., PICOZZI, M.. Ambient Vibration Testing On Typical Residential Buildings with and without Infill Walls. In 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING AND SEISMOLOGY. Anadolu University, Eskisehir – Turkey. 2017