

Determinação dos níveis de pressão sonora em estações da Trensurb, durante a chegada e partida dos trens¹

Günther Scherer Ott²
Juan Pablo Raggio Quintas³

Resumo

É importante monitorar os níveis de pressão sonora em estações de trem, devido ao desconforto acústico, causado em seus usuários. A origem da sensação é o ruído provocado pelos trens. Neste estudo, utiliza-se a infraestrutura da Empresa de Trens Urbanos (Trensurb), localizada no município de Porto Alegre e região metropolitana, no estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Os níveis sonoros equivalentes na escala A (L_{Aeq}) são medidos em duas estações, durante a chegada, partida dos trens e ruído de fundo. O limite máximo encontra-se estabelecido em norma: 85 dB(A). Gráficos de L_{Aeq} são elaborados por espectro de frequências dos três fenômenos citados, para se identificar as faixas significativas. Comparando-se as estações, conclui-se que o ruído de fundo é menor na estação isolada. Os níveis sonoros equivalentes são mais elevados na estação aberta, durante a chegada e partida.

Palavras-chave: Ruído. Estação de trem. Nível de pressão sonora.

Abstract

It is important to monitor the sound pressure levels at train stations, due to acoustic discomfort, caused on their users. The origin of the sensation is the noise caused by the trains. In this study, it is used the infrastructure of the Urban Trains Company (Trensurb), located in the city of Porto Alegre and its metropolitan region, in the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. The equivalent sound levels on the A scale (L_{Aeq}) are measured at two train stations during arrival, departure and background noise. The maximum limit is established in standard: 85 dB(A). L_{Aeq} graphs are plotted by frequency spectrum of the three mentioned phenomena to identify significant ranges. Comparing the stations, it is concluded that the background noise is lower in the isolated station. Equivalent sound levels are higher at the open station during arrival and departure.

Keywords: Noise. Train station. Sound pressure level.

¹ Resumo do Trabalho de Conclusão de curso apresentado no dia 25.06.2018, orientado pelo Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

² Bacharel em Engenharia Mecânica pela UFRGS. E-mail: g.s.ott@hotmail.com

³ Doutor em Engenharia Mecânica pela UFRGS, mestre em Engenharia Civil (Estruturas) pela UFRGS, especializado em Formação Pedagógica para Docentes pela Universidade Luterana do Brasil, (ULBRA), Canoas, RS, Brasil. Professor Adjunto, Nível IV, no Departamento de Engenharia Mecânica, com experiência na área de Engenharia Mecânica e ênfase em Dinâmica dos Corpos Rígidos, Elásticos e Plásticos. E-mail: pablo@mecanica.ufrgs.br

Artigo recebido em 10.08.2018 e aceito em 09.11.2018.

1 Introdução

Os transportes terrestres evoluíram com o passar do tempo. Por séculos, empregaram-se veículos com tração animal, até o surgimento das locomotivas a vapor, em meados do século XIX, durante a Revolução Industrial. Devido à velocidade das locomotivas ser maior do que a velocidade dos animais, as perspectivas de distância diminuíram e passou a ser possível percorrer quilômetros em poucas horas, ao invés de dias. Essas mudanças, apesar de serem essenciais ao desenvolvimento da humanidade, trouxeram consigo um malefício: o ruído.

Atualmente, as pessoas se expõem a altos níveis de pressão sonora. Os compromissos do dia a dia nas grandes metrópoles exigem dos meios de transporte velocidade e um grande número de veículos para atender a toda a população. Esses dois fatores estão diretamente relacionados à poluição sonora. Segundo Paozalyte, Grubliauskas e Vaitiekunas (2011), tanto mais o transporte ferroviário gerará ruído, quanto maior for a velocidade do trem e fatores como: tipo de veículo, tipo de trilho e regime de movimento (velocidade constante, movimento acelerado ou retardado) forem modificados. Quanto ao segundo fator, a geração de ruído aumenta com o aumento do número de fontes.

Uma vez que a tendência para os próximos anos é de que a população e seus compromissos diários continuem aumentando, cabe aos profissionais de Engenharia estudar os fenômenos geradores de ruído e pesquisar soluções viáveis. Este estudo aplica a ideia no contexto dos trens elétricos da empresa Trensurb, em Porto Alegre (RS) e região metropolitana.

1.1 Justificativa

Não se pode ignorar que a mobilidade dos trens é de grande importância para a população. A via de quarenta e três (43) km da Trensurb interliga vinte e dois (22) estações distribuídas por seis (6) cidades da região metropolitana de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul. A figura 1 exibe um esquema da linha sobre os municípios. As estações localizadas em Porto Alegre são as compreendidas entre as estações Mercado e Anchieta.

Segundo dados da empresa, 185.015 usuários foram transportados por dia útil, em média no ano de 2017, sendo registrados 8.403.243 embarques ao longo do período na estação Mercado, uma das estações terminais da linha, localizada no centro de Porto Alegre.



Figura 1 – Esquema da linha da Trensurb sobre as cidades da região metropolitana de Porto Alegre
Fonte: Mobilize Brasil (2012).

Devido ao fato dos trens serem considerados fontes de ruído e à evidência de que muitas pessoas utilizam os serviços da Trensurb, expondo-se à realidade acústica das estações, mostra-se necessário o mapeamento dos níveis de pressão sonora nesses ambientes. Assim, as respectivas providências poderão ser tomadas, caso os usuários se encontrem em situação desconfortável. O presente estudo também poderá servir de justificativa para o desenvolvimento de melhorias acústicas no setor e dará continuidade aos trabalhos de Strauch (2016) e de Testa (2017) que versam, respectivamente, sobre avaliação do conforto acústico dos passageiros dos trens antigos e novos da Trensurb.

2 Objetivo

A proposta do trabalho é medir o nível de pressão sonora, em diferentes estações da empresa Trensurb, em Porto Alegre e região metropolitana, durante a chegada e partida dos trens. O nível sonoro equivalente será comparado com o limite máximo estabelecido pela norma NBR 13068/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997b), que regulamenta a operação, a fim de verificar se os usuários se sujeitam a uma condição de desconforto. Além disso, serão

estimados os espectros de frequência do som gerado pelos trens, a fim de se sugerir um tratamento acústico adequado às estações, como proposta a um trabalho futuro, caso seja necessário.

3 Fundamentação teórica

3.1 Nível de pressão sonora (NPS)

A lei de Fechner-Weber determina que a relação entre estímulo físico e sensação humana é logarítmica, representada pela equação 1:

$$S = k \log \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

onde S é a sensação, k é uma constante determinada experimentalmente, E é o estímulo e E₀ é o valor mínimo de estímulo, abaixo do qual não há sensação. A regra vale para sensações de som e outras, como luminosidade e peso (BISTAFA, 2011).

Levando em consideração que o estímulo é a pressão causada pela onda sonora, chega-se a uma expressão para as sensações sonoras, descrita pela equação 2:

$$NPS = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad \text{ou} \quad NPS = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2)$$

onde NPS é o nível de pressão sonora, P é a variação do valor instantâneo da pressão sonora, em N/m², e P₀ é a pressão de referência que corresponde ao limiar de audibilidade (2 x 10⁻⁵ N/m²). A unidade do NPS é o decibel [dB] (SALIBA, 2016).

3.2 Nível de pressão sonora equivalente (L_{Aeq})

O manual do decibelímetro, utilizado neste estudo, produzido pela empresa Brüel & Kjaer (2005), define nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}) como o nível que representaria a quantidade de energia presente no nível sonoro flutuante medido, se a estabilidade durante o período de medição tivesse sido mantida. L_{eq} é, portanto, uma medida da energia média num nível sonoro variável, ou seja, se L_{eq} ocorresse durante o intervalo de registro, geraria a mesma energia sonora produzida pelos eventos registrados.

Outra definição é apresentada por Bistafa (2011). Devido à variação, muitas vezes aleatória do ruído, usa-se o nível equivalente, que representa a média da energia sonora no tempo de observação T. A expressão para o cálculo do L_{eq} é a equação 3:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2}{P_0^2} dt \right) \quad (3)$$

sendo T o tempo total de medição do som (ou tempo de integração), P a pressão sonora instantânea ponderada e P₀ a pressão de referência (2×10⁻⁵N/m²). A unidade do L_{eq} é o decibel [dB].

O ouvido humano não escuta todas as frequências linearmente, ou seja, possui menos sensibilidade às baixas frequências e mais sensibilidade às altas. Para que um aparelho de medição forneça corretamente o valor do nível de pressão sonora efetivo, que uma pessoa escuta, é necessário fazer uma correção. Essa adequação se dá com o uso de filtros ponderadores.

Existem diversos filtros ponderadores. A figura 2 ilustra a curva dos filtros A, B, C e D. O mais comum, no entanto, é o filtro de ponderação-A que aproxima a sensação auditiva correspondente à curva isofônica 40 fones, isto é, desenfatisa baixas frequências) (BISTAFA, 2011).

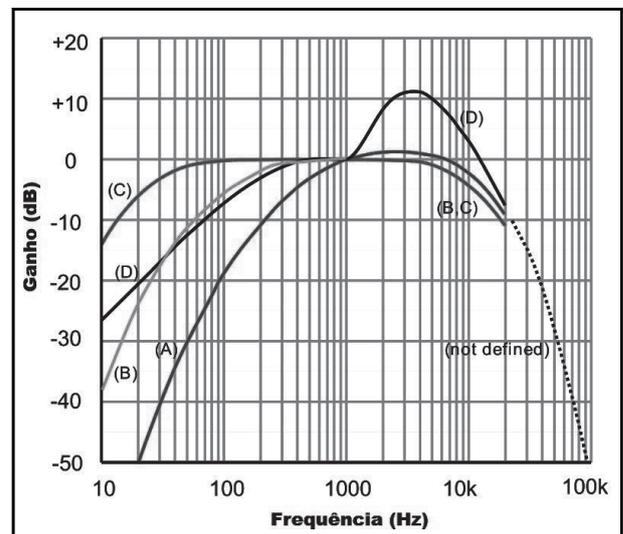


Figura 2 – Gráfico de ganho em nível de pressão sonora em função da frequência. Destaque para o filtro de ponderação-A
Fonte: Bistafa (2011).

Se for utilizado um filtro de ponderação-A, L_{eq} expressar-se-á como L_{Aeq}. Sua definição é a medida do nível sonoro contínuo equivalente, usando uma rede de filtros de ponderação-A, e sua unidade é o decibel na escala A [dB(A)].

3.3 Ruído

Segundo Saliba (2016), do ponto de vista físico, não há diferença entre som, ruído e barulho. Classificá-los é uma tarefa subjetiva, obtendo-se respostas diferentes de cada pessoa. Nesse contexto, ruído ou barulho pode ser definido como um som desagradável ou indesejável. Assim, por exemplo,

numa boate, a música pode ser considerada som para uns e ruído para outros.

3.4 Baffles

Miguel e Tamagna (2007) explicam que *baffles* são absorvedores de ruído pendurados no teto. Sua aplicação é indicada em geral para grandes ambientes, como fábricas e espaços esportivos. Nessa descrição, encaixam-se as estações de trem. Algumas de suas vantagens são: facilidade na instalação e na manutenção, reutilização e boa eficiência acústica. A absorção varia, segundo a unidade e o espaçamento, sendo determinada experimentalmente. A figura 3 ilustra um ambiente com os absorvedores instalados junto ao teto.

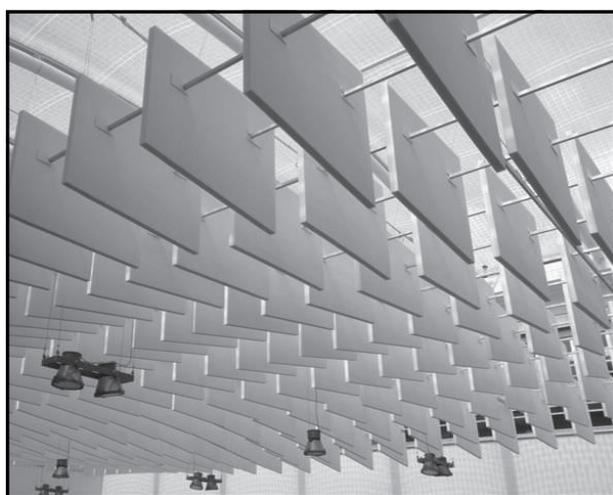


Figura 3 – Exemplo de aplicação de *baffles*
Fonte: Wave Design Solutions (2014).

3.5 Normas para análise de ruído

A norma regulamentadora de medições em carros metropolitanos no Brasil é a ABNT NBR 13067/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997a). O procedimento padrão de medição determina que os decibélímetros sejam posicionados perpendicularmente à lateral do trem, devidamente nivelados, a uma altura entre 1,2 e 1,5 m da plataforma e à distância de 3 m do centro do veículo. Algumas condições devem ser observadas e constadas no relatório. Entre elas: via em linha reta e nivelada, condições dos trilhos, ruído de fundo, representação da seção transversal da estação, ausência de chuva e ventos com velocidades inferiores a 5 m/s. Devem ser realizadas, no mínimo, quatro medições para cada ponto.

A ABNT NBR 13068/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997b), estabelece os limites quantitativos para os processos regulamentados pela anterior. Níveis confortáveis de pressão sonora em estações de trem, durante a chegada e partida dos veículos, são aqueles que não ultrapassam 85 dB(A).

3.6 Características gerais das estações da linha

Na linha da Trensurb existem duas vias: V1 e V2. Sobre a V1 operam trens no sentido interior-capital e, sobre a V2, em sentido contrário. Ambas possuem dois trechos. O mais antigo compreende o trajeto da estação Mercado, em Porto Alegre, até a estação Unisinos, em São Leopoldo. O trecho mais moderno está presente no restante do percurso, até a estação Novo Hamburgo. Os trens chegam às estações com velocidade média de 50 km/h.

A arquitetura das estações varia. As antigas são abertas ao ambiente externo, enquanto as novas assemelham-se a um túnel, parcialmente isoladas do exterior. Com relação à disposição dos trilhos, a estação Mercado possui duas plataformas, entre as quais os trens trafegam. A estação Novo Hamburgo possui apenas uma plataforma, e os trens trafegam pelos seus lados. As demais estações antigas se assemelham à de Novo Hamburgo, e o restante das novas segue o padrão da estação Mercado.

3.7 Trilhos

Segundo informações fornecidas por pessoal técnico da área de segurança do trabalho na Trensurb, cada trecho possui um tipo de trilho. A via férrea superficial terrestre está localizada no trecho antigo. A figura 4(a) ilustra o trecho em corte, e a figura 4(b) exhibe uma foto dos trilhos. As sete camadas da via são:

- 1) Solo (terraplanagem);
- 2) Plataforma (região da terraplanagem com cimento de níveis definidos);
- 3) Sublastro (saibro compactado);
- 4) Lastro (brita padrão ferroviário, definido pela ABNT);
- 5) Dormentes de concreto nas vias e de madeira nos Aparelhos de Mudança de Via (AMV) e em curvas de raio menor que 200 m;
- 6) Fixações de concreto (conjunto de fixação S75L) e dormentes de madeira (placas e parafusos de tirefão);
- 7) Trilho do sistema metroviário TR57 (57 kg/m).

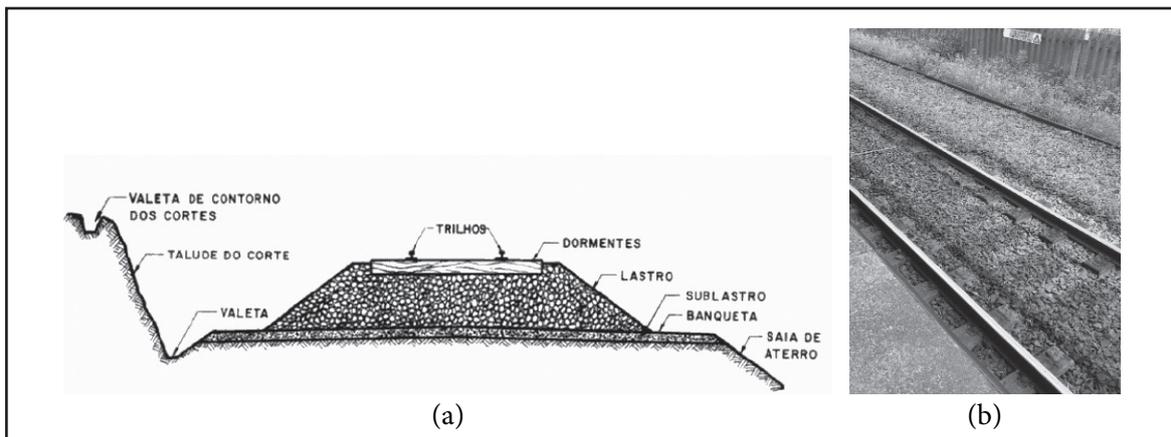


Figura 4 – Vista em corte (a) e foto da via férrea superficial terrestre (b)
 Fonte: Centro-Oeste (2018); Os autores (2018).

O trecho novo de trilho é composto pela via férrea elevada. Sua composição é descrita a seguir, por ordem:

- 1) Laje de concreto armado (base);
- 2) Dormentes com sistema de baixa vibração, em inglês Low Vibration Track (LVT). O dormente é montado com galoja de borracha, palmilha e microcelular de concreto monobloco;

- 3) Fixação S75 em via corrida;
- 4) AMV padrão UIV (norma europeia);
- 5) Trilho TR57.

Na figura 5(a), pode ser visto um esquema de montagem do sistema LVT e, na figura 5(b), uma foto dos trilhos da via férrea elevada.

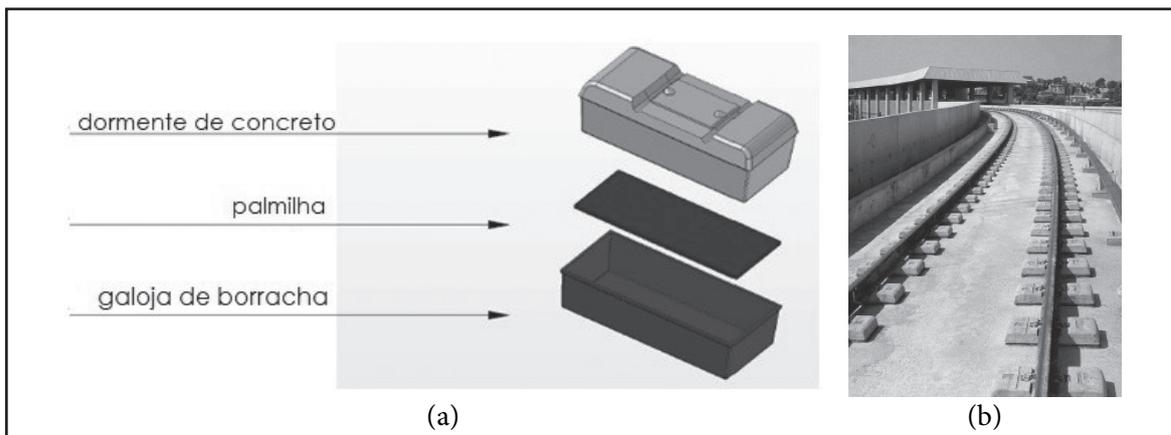


Figura 5 – Esquema de montagem do sistema LVT (a) e foto da via férrea elevada (b)
 Fonte: Sonnevile (2011).

4 Revisão bibliográfica

O estudo realizado na Croácia, por Lakušić *et al.* (2010), versou sobre a comparação entre níveis de pressão sonora calculados e medidos nas estações de Zagreb e Osijek. Os dados obtidos correspondem à média de exposição, ou seja, valores representativos de um intervalo suficientemente grande para captar o ruído de fundo e o gerado pelos trens, na mesma variável. Com decibélimetros do fabricante Brüel and Kjaer, o L_{Aeq} mínimo obtido foi 56,4 dB(A), enquanto o máximo foi de 67,5 dB(A).

Na Malásia, Shariff (2016) abordou em sua dissertação de Mestrado o levantamento dos níveis de pressão sonora em estações da linha LRT Kelana Jaya. Os equipamentos foram instalados a distâncias de 2, 4, 6, 8 e 10 metros dos trilhos. Como resultado, somente nos pontos de 2 e 4 metros houve excedência do limite estabelecido por norma local, isto é, por volta de 80 dB(A). Após análise desse estudo, percebe-se ser razoável a determinação da norma brasileira de impor a distância de 3 metros entre microfone e centro do carro.

Strauch (2016) estudou os níveis de pressão

sonora aos quais os passageiros da Trensurb se submetem no interior dos trens antigos da empresa, durante sua viagem, além da dose de ruído a que os operadores dos veículos se sujeitam. Testa (2017) deu seguimento ao estudo e analisou os níveis de pressão sonora e os valores de dose de ruído no interior dos trens novos da empresa. Ambos abordam o tema como um problema de conforto e saúde. Uma vez que os resultados de Strauch e Testa se aplicam ao período em que os passageiros se encontram em trânsito, no interior dos trens, os resultados deste estudo se aplicarão aos momentos anteriores, enquanto os usuários aguardam a chegada do veículo e, posterior, após o desembarque do carro metropolitano. Este artigo, por sua vez, aborda o tema apenas como um problema de conforto acústico.

5 Materiais e métodos

5.1 Equipamentos

Os aparelhos disponíveis na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para a realização das medições são dois decibelímetros do fabricante Brüel & Kjaer (2005), modelo Type 2250, instalados em tripés. Esses equipamentos são muito versáteis, pois, além de gravarem o L_{Aeq} , principal grandeza de interesse no estudo, gravam o som, através de um microfone e medem outras variáveis relacionadas à acústica, como nível de pressão sonora por banda de frequências. A figura 6(a) ilustra

o equipamento montado no tripé, e a figura 6(b), o seu modelo. Nota-se o protetor de vento para microfone fixado na sua extremidade, cuja função é reduzir as variações de NPS, causadas pelo vento.

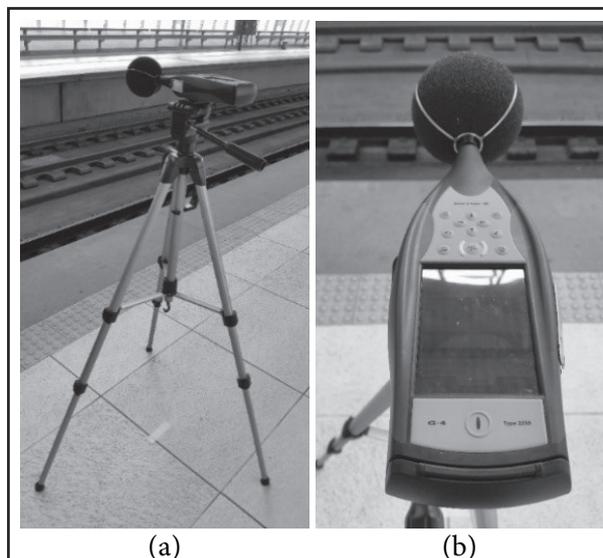


Figura 6 – Decibelímetro montado em tripé (a) e modelo do equipamento utilizado (b)
Fonte: Os autores (2018).

5.2 Estações analisadas

Foram analisadas duas estações distintas: Fátima e Santo Afonso. A figura 7 identifica as posições de cada uma sobre a linha.

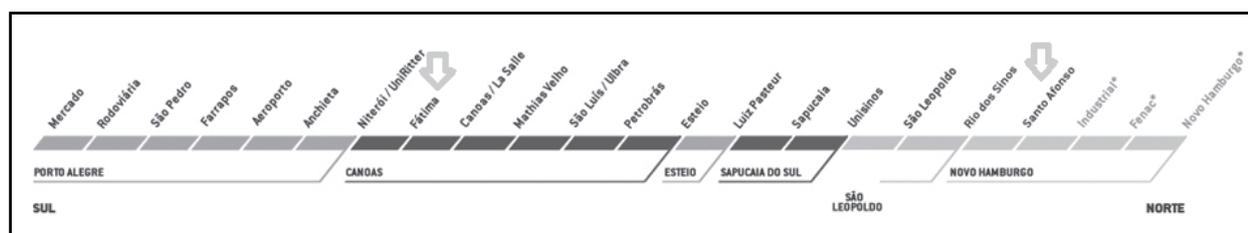


Figura 7 – Esquema da linha da Trensurb com as estações Fátima e Santo Afonso ressaltadas
Fonte: Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (2012).

As escolhas basearam-se na disponibilidade da equipe da Trensurb, com a exigência de que uma fosse antiga e a outra moderna. A primeira foi a Santo Afonso, localizada no município de Novo Hamburgo. Essa estação integra o trecho moderno da via, possui duas plataformas e sua estrutura arquitetônica é semelhante a um túnel, isolando o interior do ambiente externo. Sua cobertura estrutural foi construída com chapas metálicas e de policarbonato incolor. Nela, os trens passam pelo meio das plataformas. A figura 8(a) a ilustra.

Ao longo de todo o trecho moderno, a via e as estações são elevadas. No caso da estação Santo Afonso, são 7,8 metros de altura da Rua Primeiro de Março. A figura 8(b) mostra a estação vista de fora.

A segunda foi a estação Fátima, situada em Canoas. Ela é composta por concreto, situa-se na parte antiga da via e possui apenas uma plataforma, cuja cobertura é apoiada por séries de dois pilares. O ambiente externo não é isolado, e nela os trens passam pelos lados da plataforma. Sua configuração é mostrada na figura 9. É possível observar a Avenida

Guilherme Schell, à direita da imagem, e a Rodovia BR-116, à esquerda. Em ambos os lados, os muros

são de concreto e vazados verticalmente, o que auxilia na dissipação do som provocado pelos trens.



Figura 8 – Interior da estação Santo Afonso (a) e sua vista externa (b)
Fonte: Os autores (2018).



Figura 9 – Estação Fátima
Fonte: Os autores (2018).

5.3 Trens analisados

A Trensurb possui 2 modelos de trens. O mais antigo entrou em circulação em 1985. Na ocasião, foram fornecidos por um consórcio japonês liderado pela MITSUI & CO. Segundo Strauch (2016), cada trem tem a denominação de “Trem Unidade Elétrica” (TUE) e é constituído de quatro carros: dois deles motores, localizados nos extremos, e dois reboques.

Os trens de modelo novo entraram em circulação em 2015. Conforme Testa (2017), foram fornecidos pelo consórcio FrotaPoa, formado pelas empresas Alstom e CAF. Sua composição é a mesma dos trens antigos: quatro carros, sendo dois motores e dois reboques. Seus principais diferenciais, em relação ao modelo antigo, são a redução do consumo energético em até 30%, sistema de ar-condicionado automatizado, truques com freio a disco, pastilhas e com ABS (controle de frenagem para evitar o travamento das rodas), sistemas de tração com regeneração de energia da frenagem e a maior facilidade de circulação entre os carros, pois não possui portas entre eles. A figura 10 ilustra os dois modelos de trem.

Neste trabalho, há referências aos diferentes modelos de trem. O modelo novo é denominado “Trem Novo 2XX”, em que “2XX” representa a numeração recebida por cada veículo. Da mesma maneira, o modelo antigo é referenciado como “Trem Velho 1XX”. Perceba que os trens antigos recebem numeração de série 100, enquanto que os novos possuem numeração de série 200.



Figura 10 – Trem Novo (a) e Velho (b) da Trensurb
Fonte: Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (2015).

5.4 Metodologia

Os equipamentos foram posicionados no início e no final das plataformas, ou seja, em dois pontos, visando uma avaliação acusticamente mais completa dos fenômenos de aceleração e desaceleração. Mediram-se oito trens em cada estação.

Como existem dois tipos de estação, em relação à disposição dos trilhos, as medições foram realizadas de duas maneiras. Na estação Fátima, posicionaram-se os equipamentos para o mesmo lado da plataforma. O decibelímetro 1 mediu a chegada do trem, e o decibelímetro 2, a partida. Para fins de nomenclatura, marcou-se o ponto A no início da plataforma, para se analisar a desaceleração do trem, e o ponto B, no final, para se analisar a aceleração. Em resumo: ponto A refere-se sempre à chegada dos trens, e ponto B refere-se sempre à partida.

Ainda na estação antiga, espelharam-se as posições dos medidores para as medições no outro trilho. Com isso, o decibelímetro 1 passou a ocupar

o ponto B, e o 2 passou a ocupar o ponto A. Com essa disposição, analisaram-se os trens operando em sentido interior-capital. Os que passavam em sentido contrário, isto é, atrás dos decibelímetros, foram desconsiderados.

Na estação Santo Afonso, os procedimentos foram mais simples. Mediu-se apenas em uma plataforma, pois a estação é simétrica, em relação ao ruído ambiente, e esperam-se os mesmos resultados em ambos os lados. Com isso, o decibelímetro 2 foi instalado no ponto A, e o 1, no ponto B. Apenas os trens que operavam em sentido interior-capital foram medidos. Os que transitavam em sentido contrário, pela outra via, novamente foram desconsiderados.

As figuras 11 e 12 esquematizam as posições dos decibelímetros nas plataformas das estações analisadas. Na estação Fátima, o projeto capital-interior foi denominado Trem002; o interior-capital, Trem003. Na Santo Afonso, o projeto único denomina-se Trem001. O sentido de tráfego dos trens é indicado pela seta cinza vazada.

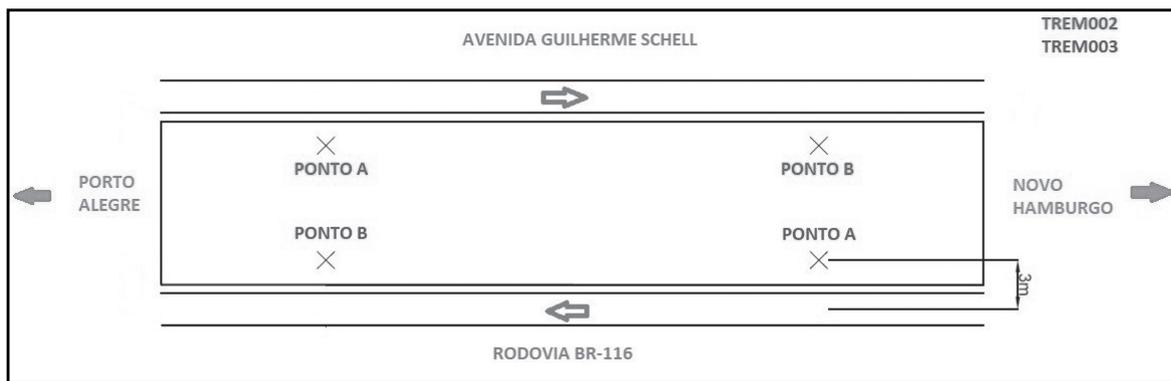


Figura 11 – Esquema da plataforma da estação Fátima
Fonte: Os autores (2018).

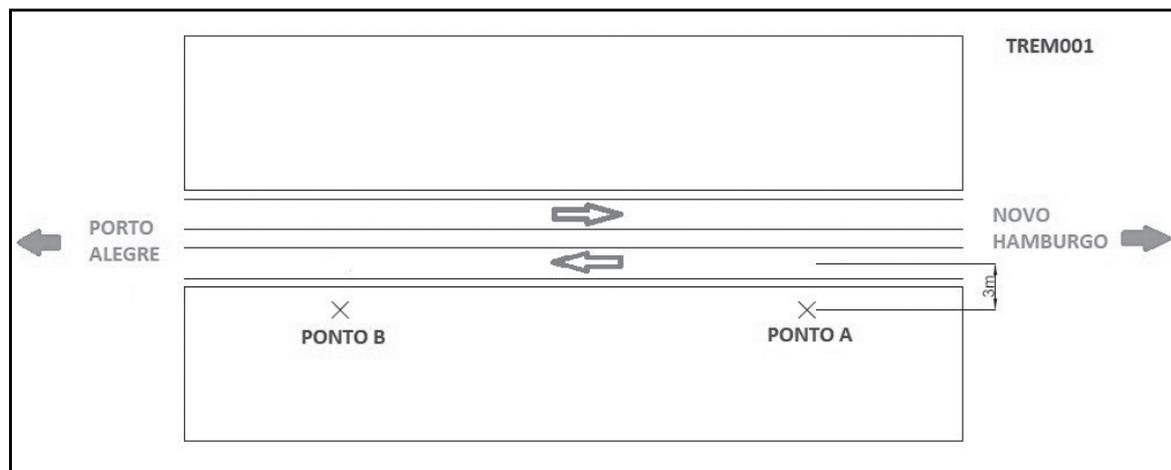


Figura 12 – Esquema das plataformas da estação Santo Afonso
Fonte: Os autores (2018).

Durante as medições, foram anotados em tabelas os horários e eventos ocorridos. A cada vez que um trem passava pelo trilho de interesse, seu número de série e a informação “novo/velho” eram registrados. Ruídos ambientes excepcionais, como buzinas, também foram contabilizados.

Antes da primeira medição ser realizada, observou-se a necessidade de criar um padrão de posição dos veículos que marcasse o início do intervalo de dados para a chegada e o final do intervalo para a partida. Assim, em ambas as estações, estabeleceu-se que a marcação de “início da chegada” corresponderia ao horário exato de passagem da frente do trem pela borda de início da plataforma, antes de passar pelo ponto A. Da mesma maneira, o rótulo “fim da partida” seria atribuído ao momento exato em que a traseira do veículo cruzasse a seção transversal da estação na extremidade da plataforma, depois de passar pelo ponto B. O intervalo de parada do trem tem início no primeiro segundo, em que ele se encontra em repouso, e termina no segundo que antecede seu deslocamento de partida.

Os resultados adquiridos pelos decibelímetros foram processados pelo *software* do fabricante, o *Measurement Partner Suite*. Sua interface permite exportar os dados de segundo a segundo para uma planilha *Excel*. As grandezas de interesse são o L_{Aeq} e o L_{Aeq} por espectro de frequências, além do instante de tempo em que os valores foram adquiridos. Como os registros foram feitos em uma única gravação por projeto e duraram mais do que os fenômenos estudados (aproximadamente uma hora), foi necessário separar as gravações em intervalos e calcular os níveis de pressão sonora, equivalentes para cada fenômeno de ruído de fundo, chegada e partida de cada trem. Posteriormente, calcularam-se as médias dos níveis sonoros equivalentes das operações de chegada, partida e ruído de fundo por projeto, ou seja, foram feitas médias de L_{Aeq} dos intervalos de tempo de ruído de fundo, chegada e partida dos trens. Para isso, utilizou-se a equação 4, retirada da norma NBR 10151/2000 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000):

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{Aeqi}/10} \right) \quad (4)$$

onde L_{Aeqi} representa os níveis sonoros registrados de segundo a segundo, e n é o número de dados contabilizados.

Com a funcionalidade de reproduzir o áudio gravado, durante a medição e os instantes de tempo de cada evento registrados manualmente, separaram-se os intervalos. Os resultados

foram comparados com o limite disposto na NBR 13068/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997b): 85 dB(A). Os valores acima desse indicam desconforto acústico. Para uma análise mais visual, os dados de L_{Aeqi} foram dispostos em gráficos pelo tempo. Neles é possível identificar eventuais pontos que ultrapassaram o limite e verificar a que se deveu o ocorrido.

De maneira semelhante, calculou-se o nível sonoro equivalente por espectro de frequência do ruído de fundo e dos fenômenos de chegada e partida, plotando-se os resultados em gráficos. Assim, com os valores de L_{Aeq} conhecidos para as frequências de bandas de oitava de 63 a 16.000 Hz, pôde-se avaliar em qual frequência ocorreu maior contribuição de ruído do trem, por comparação dos gráficos.

Finalmente, foi possível sugerir, para um trabalho futuro, um tratamento acústico com *baffles* nas estações, uma vez que foram identificadas as faixas de frequência significativas dos sons provocados pelos trens. É importante salientar, contudo, que os valores de contribuição dos veículos são apenas estimativas, pois o L_{Aeq} de ruído de fundo e o L_{Aeq} dos trens referem-se a intervalos de tempo diferentes.

6 Resultados e discussões

6.1 Estação Santo Afonso

A tabela 1 mostra os valores de L_{Aeq} para os fenômenos de chegada, partida e para o tempo em que o trem permaneceu parado, necessário ao embarque e desembarque dos passageiros. É esperado que, durante a partida, os valores coletados com o decibelímetro 1 sejam mais elevados do que os coletados com o decibelímetro 2, visto que aquele foi posicionado perto da extremidade de saída da plataforma, no ponto B. Da mesma maneira, durante a chegada, o decibelímetro 2 registrou níveis de pressão sonora maiores, pois foi colocado perto da extremidade de entrada, no ponto A.

Dos oito trens medidos, dois apresentaram resultados maiores de 85 dB(A) em valores de partida, enquanto seis extrapolaram o limite na chegada. Em termos de valores globais para os fenômenos, observa-se que a operação de chegada representa uma situação de desconforto acústico, segundo a NBR 13068/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997b). A operação de partida, marcada em *itálico*, está de acordo com a norma, mas também pode ser considerada desconfortável, pois por apenas 0,1 dB(A) não atingiu o limite.

Ao final da tabela 1, são listados os L_{Aeq} de ruído de fundo calculados para cada decibelímetro e sua

respectiva média. Referem-se a intervalos de tempo em que não houve a passagem de nenhum trem, em ambos os sentidos da via. Os valores reduzidos ocorrem, devido à arquitetura enclausurada da estação, o que dificulta a penetração do ruído ambiente externo. Essa mesma característica, no entanto, promove a reflexão do ruído gerado pelos trens, no interior do recinto, diminuindo sua dissipação. Isso explica a realidade acústica desconfortável, quando se observa um

veículo chegar à estação Santo Afonso ou partir dela.

O pior caso registrado foi o do Trem Velho 104, com 2,1 dB(A) acima do limite, durante a chegada e 3,1 dB(A), durante a partida. Cabe salientar que o NPS depende de muitas variáveis, entre elas as condições mecânicas do trem e o modo de condução do piloto. Assim, existem diferenças de L_{Aeq} de um veículo para outro, mesmo sem alterar as outras condições de medição.

Tabela 1 - L_{Aeq} Trens e L_{Aeq} Ruído de Fundo para o projeto Trem001 [dB(A)]

Projeto	Trem	Decibelímetro 1 – Ponto B			Decibelímetro 2 – Ponto A		
		Chegada	Parado	Partida	Chegada	Parado	Partida
Trem001	Velho 111	83,0	73,7	82,1	86,3	71,1	75,1
	Velho 104	79,6	72,0	88,1	87,1	73,7	81,2
	Novo 234	80,5	74,4	85,9	85,3	68,9	80,6
	Velho 123	77,8	72,2	81,6	86,4	69,4	75,1
	Velho 112	76,8	74,7	82,4	84,0	72,1	76,9
	Velho 107	81,3	76,0	82,3	85,1	72,7	74,9
	Velho 109	83,6	74,0	84,0	85,9	72,5	76,4
	Velho 102	75,3	71,5	81,2	84,7	71,6	75,7
	Média	80,5	74,1	84,9	85,5	70,8	79,2
Ruído de fundo		61,5			62,2		
Média		61,9					

Fonte: Os autores (2018).

Os valores de L_{Aeq} por instante de tempo do pior caso, Trem Velho 104, são mostrados nos gráficos das figuras 13 e 14. Ao longo das séries de dados, foram marcados pontos com losango que indicam valores acima de 85 dB(A) e cuja fonte de ruído são os trens.

Analisando-se mais a fundo os resultados do Trem Velho 104, identifica-se o valor de 93,5 dB(A) na partida, na figura 13, e de 95,6 dB(A) na chegada, na figura 14. O áudio da medição revela o motivo de tais ocorrências: na partida, barulho de origem

elétrica, devido ao acionamento dos motores; na chegada, ruído oriundo dos motores associado ao apito agudo dos freios.

Nota-se que os níveis de pressão sonora começam a aumentar mesmo antes da chegada do trem, e param de diminuir, depois da sua partida. Isso ocorre porque o som gerado por ele pode ser ouvido na estação, antes da passagem pela seção transversal que marca o início da chegada, e depois da passagem pela seção que indica o fim da partida.

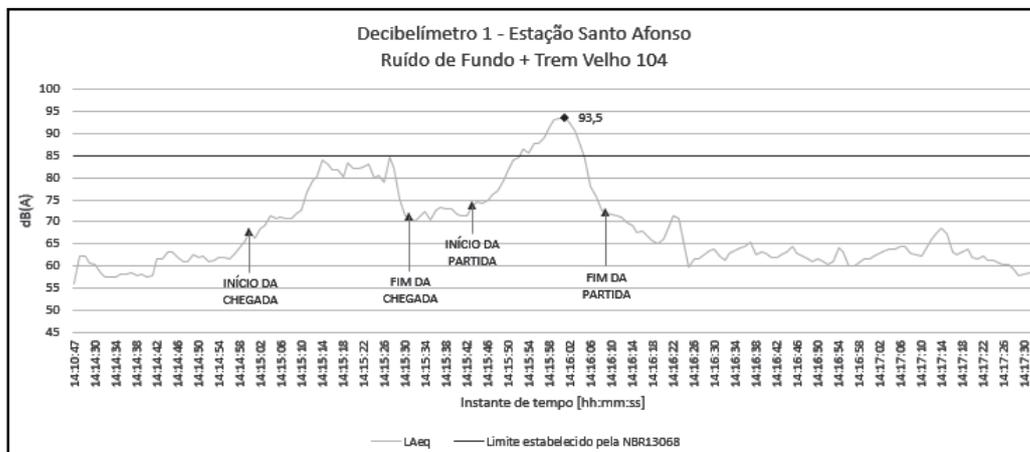


Figura 13 – Evolução dos níveis de pressão sonora gerados pelo Trem Velho 104 e medidos pelo decibelímetro 1, durante o projeto Trem001
Fonte: Os autores (2018).

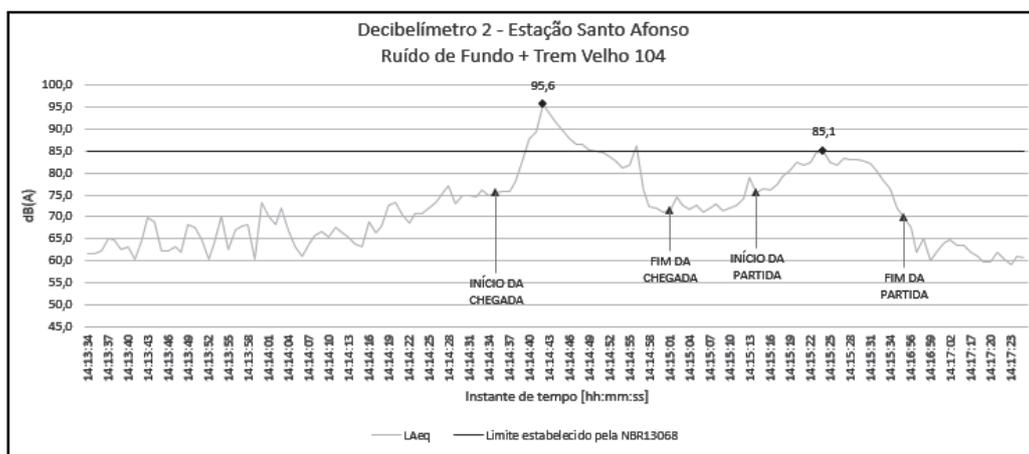


Figura 14 – Evolução dos níveis de pressão sonora gerados pelo Trem Velho 104 e medidos pelo decibelímetro 2, durante o projeto Trem001
Fonte: Os autores (2018).

6.2 Estação Fátima

O padrão obtido na estação Fátima é diferente do obtido na Santo Afonso em vários aspectos. Na estação antiga, em nenhum caso ocorreram níveis sonoros equivalentes acima de 85 dB(A). Registraram-se ruídos de fundo maiores no projeto Trem003, devido à proximidade dos equipamentos ao tráfego da Rodovia BR-116. O fato da

estação possuir uma arquitetura aberta ao ambiente externo favorece a participação do ruído de fundo nas medições. Em contrapartida, a mesma configuração permite a dissipação do som gerado pelos trens, diminuindo, assim, os valores de NPS registrados para os carros metropolitanos. As tabelas 2 e 3 resumem os valores de L_{Aeq} dos trens e de ruído de fundo para os projetos Trem002 e Trem003, respectivamente.

Tabela 2 - L_{Aeq} Trens e L_{Aeq} Ruído de Fundo para o projeto Trem002 [dB(A)]

Projeto	Trem	Decibelímetro 1 – Ponto B			Decibelímetro 2 – Ponto A		
		Chegada	Parado	Partida	Chegada	Parado	Partida
Trem002	Velho 105	83,6	79,4	77,6	81,6	80,3	79,7
	Velho 112	79,3	77,8	77,7	77,3	78,9	81,2
	Novo 229	81,2	79,2	78,9	79,7	82,1	80,7
	Velho 111	81,2	80,2	79,8	79,4	80,6	82,7
	Média	81,4	79,2	78,7	79,7	81,2	81,1
Ruído de fundo		78,6			79,0		
Média		78,8					

Fonte: Os autores (2018).

Tabela 3 - L_{Aeq} Trens e L_{Aeq} Ruído de Fundo para o projeto Trem003 [dB(A)]

Projeto	Trem	Decibelímetro 1 – Ponto B			Decibelímetro 2 – Ponto A		
		Chegada	Parado	Partida	Chegada	Parado	Partida
Trem003	Velho 103	80,1	75,5	78,4	81,4	79,0	79,5
	Velho 119	79,9	76,7	77,8	78,8	80,2	79,5
	Velho 108	80,1	76,7	79,0	80,3	80,8	80,6
	Velho 105	78,6	74,2	77,2	78,9	76,2	80,6
	Média	79,7	75,9	78,1	80,0	79,4	80,1
Ruído de fundo		79,9			80,0		
Média		80,0					

Fonte: Os autores (2018).

Em alguns casos, os níveis de pressão sonora de ruído de fundo encontram-se em patamar superior aos NPS de chegada e partida dos trens. Isso ocorre porque os intervalos de tempo que cobrem os fenômenos de chegada e partida são menores do que os usados para o cálculo do L_{Aeq} de ruído de fundo (da ordem de 20 contra 90 segundos). Além disso, muitos são os fatores que elevam os valores do L_{Aeq} de ruído de fundo ao longo da medição, como a passagem de veículos pesados pela rodovia, motos sem

silenciador e até mesmo caças F-5 da Força Aérea Brasileira. Em um período menor, ocorrem menos fatores desse tipo.

As figuras 15 e 16 mostram os gráficos dos valores de L_{Aeq} , por instante de tempo, referentes ao Trem Velho 105, durante o projeto Trem002. Diferente do observado na estação Santo Afonso, os valores superiores a 85 dB(A) são devido a veículos que transitavam ao redor da estação, durante os intervalos de ruído de fundo.

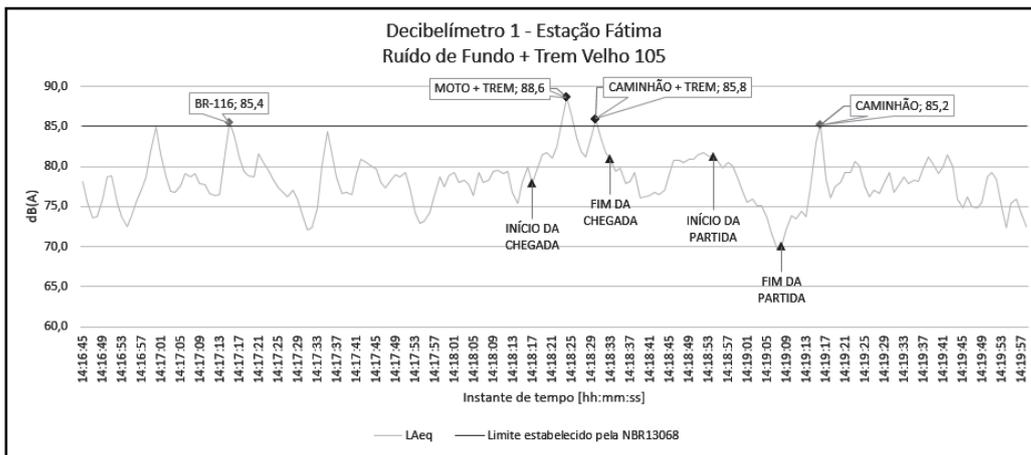


Figura 15 – Evolução dos níveis de pressão sonora gerados pelo Trem Velho 105 e medidos pelo decibelímetro 1, durante o projeto Trem002
Fonte: Os autores (2018).

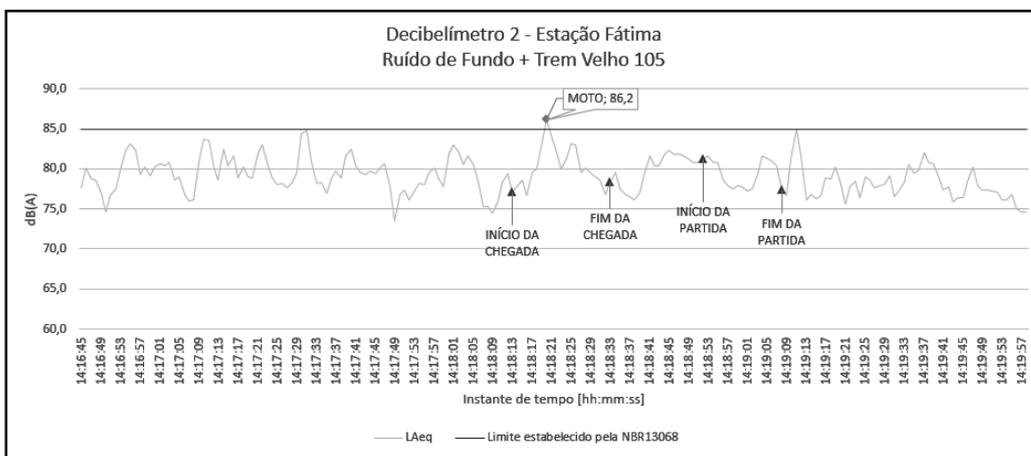


Figura 16 – Evolução dos níveis de pressão sonora gerados pelo Trem Velho 105 e medidos pelo decibelímetro 2, durante o projeto Trem002
Fonte: Os autores (2018).

Quando a grandeza L_{Aeq} extrapola o limite, durante a chegada do trem, a causa é a passagem de uma moto e um caminhão. Comparando-se atentamente os dois gráficos, percebe-se o mesmo comportamento da série L_{Aeq} , com uma pequena diferença de magnitude. Para os pontos destacados, pode-se dizer que o decibelímetro 1 mediu a moto,

o caminhão e o trem, enquanto o 2 mediu somente a moto por dois motivos: o primeiro é porque o decibelímetro 1 percebe o trem se aproximando antes do 2, por se situar no ponto A. A segunda explicação é que a diferença entre a leitura dos equipamentos é da ordem de 2 dB(A) nos instantes de passagem dos veículos, e de apenas 0,2 dB(A) num

instante posterior à partida do trem, quando passou outro caminhão. Isso evidencia a contribuição do trem na figura 15.

Os gráficos de L_{Aeq} , por instante de tempo do Trem Velho 108, estão disponíveis nas figuras 17

e 18. Mesmo sendo este o pior caso do projeto Trem003, verifica-se apenas um ponto acima de 85 dB(A), que ocorreu junto à passagem de um caminhão pela rodovia. Fica evidente que a situação é de conforto, segundo a norma.

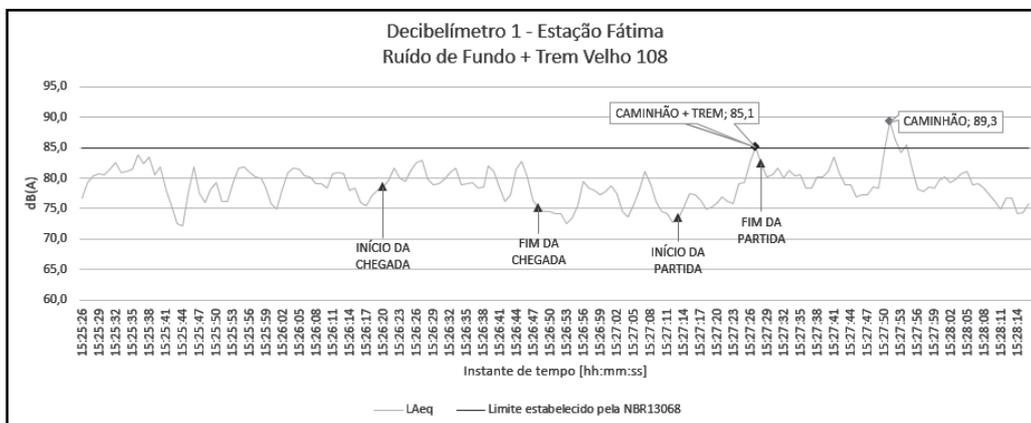


Figura 17 – Evolução dos níveis de pressão sonora gerados pelo Trem Velho 108 e medidos pelo decibelímetro 1, durante o projeto Trem003
Fonte: Os autores (2018).

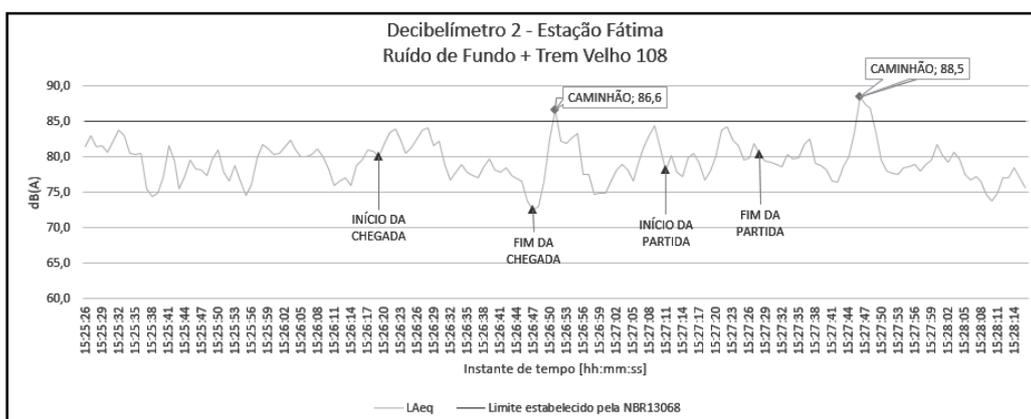


Figura 18 – Evolução dos níveis de pressão sonora gerados pelo Trem Velho 108 e medidos pelo decibelímetro 2, durante o projeto Trem003
Fonte: Os autores (2018).

6.3 Espectro sonoro de frequências

Os gráficos de “nível sonoro equivalente, *versus* banda de frequência”, foram elaborados com o intuito de sugerir uma melhoria acústica na estação Santo Afonso, pois foi a única a apresentar valores de L_{Aeq} maiores de 85 dB(A). Para o projeto Trem001, o pior caso foi o Trem Velho 104. Seus espectros são ilustrados na figura 19, sendo os dados de partida medidos pelo decibelímetro 1, e os de chegada, pelo decibelímetro 2.

Em relação aos gráficos de espectro, a série de valores menores, localizadas à esquerda em cada valor de frequência, é composta de apenas ruído de fundo,

enquanto a série de valores maiores, localizada à direita em cada valor de frequência, representa o som gerado pelo trem, associado ao som de ruído de fundo. A diferença entre elas estima a contribuição do trem ao espectro. Como sugestão de melhoria para um trabalho futuro, espera-se que a aplicação de *baffles* atuantes nas frequências, cujos níveis sonoros foram mais elevados, retorne uma melhoria significativa na situação acústica da estação. Em ambos os casos, sugere-se uma atenuação na faixa entre 250 e 2.000 Hz e considera-se importante a contribuição em alta frequência no dimensionamento dos *baffles*, pois se percebe, na figura 19, um grande aumento no L_{Aeq} em 8 KHz e 16 KHz, quando o trem se movimenta.

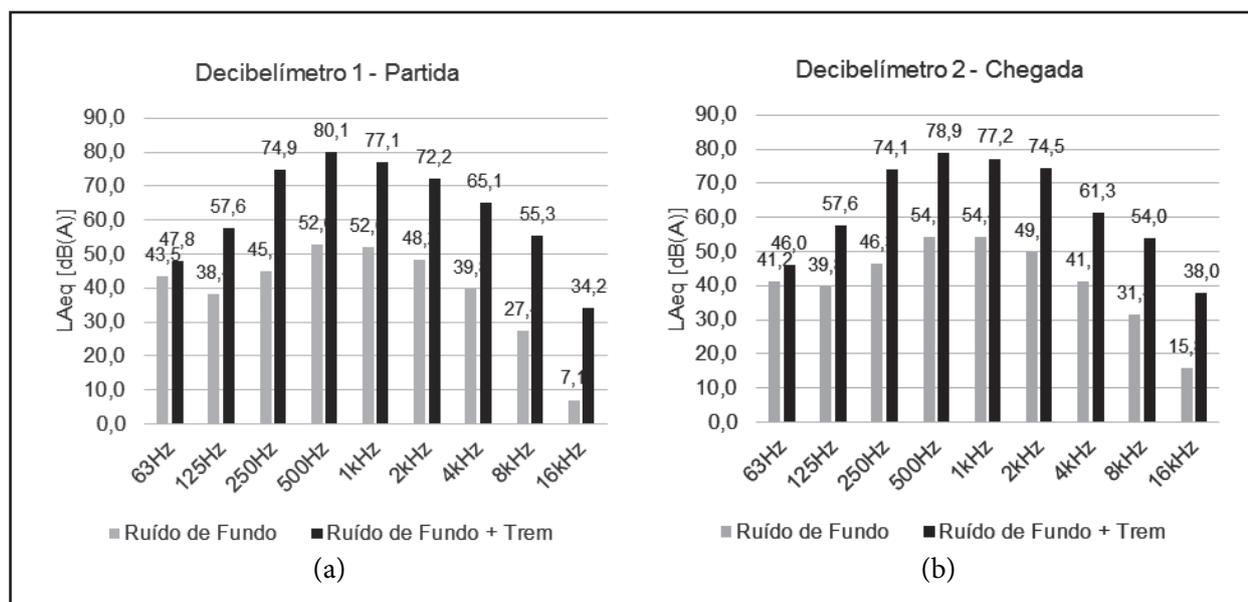


Figura 19 – Espectro de frequências para a partida (a) e para a chegada do Trem Velho 104 na estação Santo Afonso (b)

Fonte: Os autores (2018).

7 Conclusões

Na estação Santo Afonso, os passageiros permanecem confortáveis a 61,9 dB(A) de ruído de fundo, enquanto aguardam o trem. Quando o veículo chega, a arquitetura enclausurada faz com que o som seja refletido no interior do recinto, elevando os níveis de pressão sonora para a média de 85,5 dB(A). Esse valor elevado, sem dúvida, causa desconforto, que é, no entanto, momentâneo, pois o tempo médio de chegada dos veículos é de 20 segundos. Uma pessoa que chega à plataforma de embarque, logo após o veículo fechar suas portas, estará sujeita ao ruído de aceleração. Enquanto o trem parte, esse passageiro experimenta em média 84,9 dB(A), novamente por um curto período de tempo, da mesma ordem. Por ser apenas 0,1 dB(A) abaixo do limite estabelecido, a operação de partida pode ser considerada desconfortável na estação Santo Afonso. O tempo de exposição ao ruído de fundo do passageiro dependerá dos intervalos entre viagens escalados pela empresa, podendo chegar a 20 minutos.

Na estação Fátima, o ruído mais incômodo é o de fundo, com valor médio de 80 dB(A). Quando o trem chega, sua estrutura aberta permite a dissipação do som, elevando os níveis de pressão sonora à média de 81,4 dB(A). Percebe-se a diferença de apenas 1,4 dB(A), provenientes do carro metropolitano, contra 23,6 dB(A) na Santo Afonso. Tomando novamente como exemplo a situação hipotética do passageiro atrasado, na estação Fátima, essa pessoa se sujeitaria a

um valor médio de 81,1 dB(A), durante a aceleração do trem. Os intervalos de tempo de chegada e partida são da ordem de 20 segundos.

Apesar da estação Fátima ser considerada confortável pela NBR 13068/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997b), uma vez que nenhum valor de L_{Aeq} extrapolou 85 dB(A), a sensação ao esperar o trem nessa estação é de desconforto. Quanto mais tempo o passageiro esperar pelo veículo, mais incômodo o ruído será, pois os níveis equivalentes de ruído de fundo são elevados. Na Santo Afonso, ocorre o contrário. Mesmo sendo considerada desconfortável pela norma, um passageiro somente se sentirá incomodado pelo ruído, durante os poucos segundos de movimentação do trem.

A fim de melhorar acusticamente a estação Santo Afonso, sugere-se a instalação de *baffles* com atenuação para frequências de 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz pelos altos valores de L_{Aeq} registrados e, nas frequências de 8.000 e 16.000 Hz, pela grande contribuição do trem ao espectro. Para tornar a estação Fátima mais confortável aos usuários, sugere-se seu isolamento do ambiente externo, seguindo-se o modelo das estações modernas. Caso essa melhoria seja aplicada, será necessário um estudo dos espectros de frequência na plataforma, a fim de se verificar a necessidade da aplicação de *baffles*, como na Santo Afonso.

Por fim, uma melhor especificação dos limites e condições de análise por parte da norma possibilitaria que conclusões mais condizentes com a realidade surgissem. De fato, baseando-se na percepção

subjetiva por parte do aluno e orientador, durante as medições de 1 hora, a estação que apresenta maior desconforto acústico é a que está dentro do limite imposto pela NBR 13068/1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997b). A estação considerada desconfortável em valores de L_{Aeq} incomoda pouco os passageiros. Sugere-se uma reformulação dos critérios de classificação utilizados pela norma.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: acústica: avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade: procedimento. Rio de Janeiro, 2000. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13067**: carro metropolitano e veículo leve sobre trilhos: determinação dos níveis de ruídos. Rio de Janeiro, 1997a. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13068**: ruídos interno e externo em carro metropolitano e veículo leve sobre trilhos (VLT). Rio de Janeiro, 1997b. 2 p.

BISTAFA, S. R. B. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. 380 p.

BRÜEL & KJAER. **Modelo 2250**: manual do utilizador. Naerum, 2005. 118 p.

CENTRO-OESTE BRASIL. **Seção transversal da via férrea**. 2018. Disponível em: <http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/corte-perfil-Via-ferrea.shtml>. Acesso em: 28 mar. 2019.

EMPRESA DE TRENS URBANOS DE PORTO ALEGRE. **A operação**. 2012. Disponível em: <http://www.trensurb.gov.br/relatoriosocioambiental/2012/operacao.html>. Acesso em: 20 maio 2018.

EMPRESA DE TRENS URBANOS DE PORTO ALEGRE. **Os trens**. 2015. Disponível em: http://www.trensurb.gov.br/paginas/galeria_projetos_detalhes.php?codigo_sitemap=39. Acesso em: 20 maio 2018.

LAKUŠIĆ, S. *et al.* **Determination of noise levels**

in railway station zones. Zagreb: University of Zagreb, 2010. 8 p.

MIGUEL, L. F. F.; TAMAGNA, A. **Tópicos de acústica aplicada**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. 143 p.

MOBILIZE BRASIL. **Trem da região metropolitana de Porto Alegre, RS**. 2012. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/mapas/19/mapa-da-rede-de-metro-de-porto-alegre-rs.html>. Acesso em: 20 out. 2018.

PAOZALYTE, I.; GRUBLIAUSKAS, R.; VAITIEKUNAS, P. **Research of railway noise pollution at the living area of railway station in Klaipeda City and designing of noise barrier**. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University, 2011. 8 p.

SALIBA, T. M. **Manual prático de avaliação e controle do ruído**. 9. ed. São Paulo: LTr, 2016. 143p.

SHARIFF, M. S. B. **Evaluation of noise level in coach and train station at LRT Kelana Jaya Line**. 2016. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Batu Pahat, Malásia, 2016.

SONNEVILLE. **Low vibration track (LVT)**. 2011. Disponível em: <http://www.sonneville.com/low-vibration-track-lvt/>. Acesso em: 20 maio 2018.

STRAUCH, R. G. **Análise de ruído interno para avaliação de conforto dos passageiros do Trensurb e avaliação da dose de ruído a que o operador do trem está exposto**. 2016. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

TESTA, L. C. **Análise do ruído interno para avaliação do conforto dos passageiros dos novos trens da Trensurb e avaliação da dose de ruído a que o operador do trem está exposto**. 2017. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

WAVE DESIGN SOLUTION. **Baffle acústico**. 2014. Disponível em: <http://www.archiexpo.com/pt/prod/wave-design-solution/product-143094-1531722.html>. Acesso em: 20 maio 2018.

