



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A198

Estudo Acústico para o Controle da Propagação do Ruído Aéreo de um Segmento de Metrô na Cidade de São Paulo – Brasil

Maria Luiza R. Belderrain ^(a)
Fernando Henrique Aidar ^(b)

(a) C L B Engenharia Consultiva – São Paulo – SP – Brasil email: clbengenharia@gmail.com
(b) F. H. Aidar Engenharia – São Paulo – SP – Brasil email: fhaidar@terra.com.br

Abstract

This paper deals about transportation noise, due to the expansion of the metropolitan lines in the city of São Paulo – SP – Brasil. A new station – named Tamanduateí – will be constructed 16,0 m above the ground. Design parameters establish velocities until 100 km / h for the trains. This paper presents an acoustic modelling to find the possible noise impact to the neighbourhood .

Resumo

A expansão da linha de trem metropolitano na cidade de São Paulo prevê a construção de um trecho na zona sul, continuação da Linha 2 – Verde, constituído por três novas estações. Dessas, a intermediária ou *Tamanduateí* – localizada sobre o rio de mesmo nome – será elevada. Assim, o trem percorrerá mais de 1 km em via elevada, ao emergir do túnel. Considerando que a cidade de São Paulo está entre as mais populosas do mundo, tal condição implica que o trem trafegará em zona urbanizada, formada por moradias multifamiliares (poucos pavimentos) e também por galpões e lojas comerciais. Este trabalho mostra a modelagem acústica adotada para o problema, afim de minimizar o impacto sonoro da passagem do trem - que poderá alcançar velocidades de até 100 km / h – à região circunvizinha. É importante notar que a Estação *Tamanduateí* estará numa cota 16,0 m acima do greide da rua e os receptores distam cerca de 30,0 a 40,0 m da linha de transporte.

1 Considerações sobre ruído de trens

Em se tratando de movimento de trens, pode-se afirmar que a maior fonte de ruído no sistema é o contato roda - trilho. A energia irradiada pelas múltiplas fontes de ruído de um sistema de trens, é registrada por medições do nível de pressão sonora feitas à distâncias padronizadas do trilho e a alturas padronizadas do microfone. Em geral, o nível de pressão sonora em dBA de um trem de passageiros consiste de uma flutuação em torno do nível máximo, obtido na passagem do trem num intervalo de tempo

1.1 Parâmetros que influenciam o nível de ruído dos trens

Conforme referências III e IV, o nível de ruído emitido por trens é dependente dos seguintes fatores:

- .número de vagões (carros) e velocidade da composição;
- .amortecimento elástico do leito;
- .tipo de estrutura do elevado sobre a qual transita (metálica, ou de concreto);
- .tipo de freio - a disco ou sapata;
- .tipo de emendas dos trilhos (emenda seca para compensar dilatação ou emenda soldada);
- .sistema de suspensão mecânica, truque x vagão;
- .estrutura da carenagem dos vagões e do amortecimento de vibração da mesma;

Em relação ao observador ou receptor, os fatores são:

- .distância à fonte (eixo dos trilhos);
- .tipo de barreira adotada;
- .diferença de cotas entre a linha e o solo lindeiro;
- .tipo de solo (refletor ou absorvente de som).

1.2 Modelo de cálculo do nível de ruído

A fim de permitir a comparação entre dados de medição e estabelecer um padrão para os mesmos (ref. III), o modelo de cálculo utiliza medições normatizadas considerando-se um "trem longo" e uma distância pré fixada de 30 m ao eixo da via. Considera-se "trem longo" aquele cujo comprimento excede em 3 ou mais vezes a distância de medição.

Deve-se observar que o trem constitui uma fonte acústica linear, de comprimento finito. A sua passagem, para o observador, provoca um acréscimo de nível sonoro, sua manutenção num "plateau" e posterior decréscimo de nível.

A expressão a seguir refere-se à condição de trilhos "soldados contínuos" (a qual produz menor nível de ruído). As medições dos níveis de pressão sonora L_A em dBA em função da velocidade, para uma variedade de trens de passageiros, quando normatizadas (em relação à distância de medição e trem longo) mostra que 90% dos dados estão compreendidos numa faixa de +/- 6 dB, para a formulação:

$$L_A = 74 + 30 \log \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad \text{dBA} \quad (1)$$

Onde:

$$v = \text{velocidade do trem em km / h;} \\ v_0 = \text{velocidade de referência} = 60 \text{ km / h.}$$

A expressão acima resulta no acréscimo de 9 dBA no nível L_A com o dobro da velocidade. Eventuais desvios obtidos no nível L_A para diferentes tipos de trem, devem-se principalmente às diferenças observadas nos tipos de trilhos e demais parâmetros retro mencionados.

1.3 Aplicação do modelo de cálculo x medições reais

Para comprovar se o modelo de cálculo está adequado, realizaram-se comparações do nível obtido a 30 m e regredido para a distância do ponto de medição, com medições realizadas "in situ", na Linha 1 - azul do METRO, próximo ao elevador da Av. Cruzeiro do Sul.

Na continuação da Linha 2 - Verde, segundo informações do METRO, está previsto que o trem poderá alcançar velocidades de até 100 km / h na saída do túnel ao adentrar o elevador, visto que o trecho de 1 km é reto e/ou possui curvas pouco acentuadas. Assim, temos para uma distância de 30 m à fonte:

$$L_A = 74 + 30 \log (100 / 60) = 80.6 \text{ dBA}$$

1.3.1 Medições de ruído no elevador da Cruzeiro do Sul - Linha 1 - Azul

As medições sonoras ocorreram em 22/10/2007, com tempo de amostragem correspondente a 5 minutos, num ponto, a saber:

- junto ao Santuário das Almas, Av. Cruzeiro do Sul, a 25 m do trem sobre o elevador.

O instrumento utilizado foi um analisador sonoro de precisão, tipo I, digital, com 4 canais, capacidade de integração, armazenamento de dados, modelo SVAN 948, fabricante SVANTEK (Polônia). Para cada ponto de medição tem-se um "plot" do evento completo onde é possível identificar os acréscimos devido à passagem do(s) trem(ns), obtendo-se a energia equivalente desse evento específico.



Foto 1: Santuário das Almas na Cruzeiro do Sul

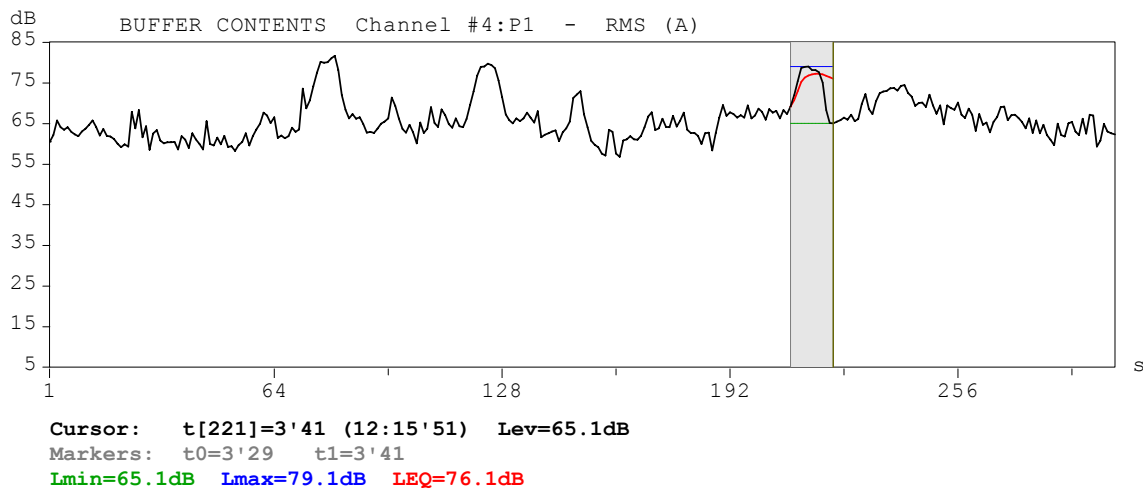
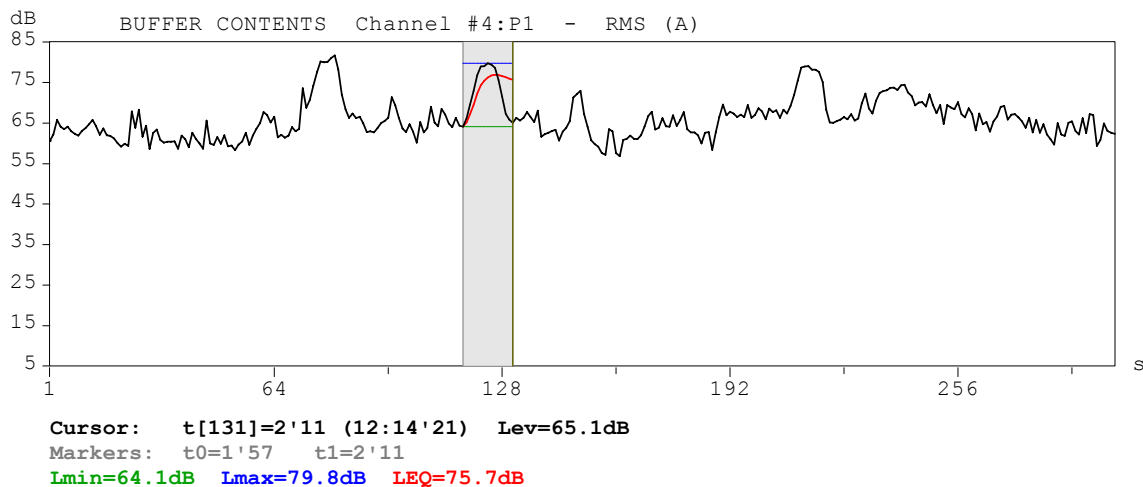
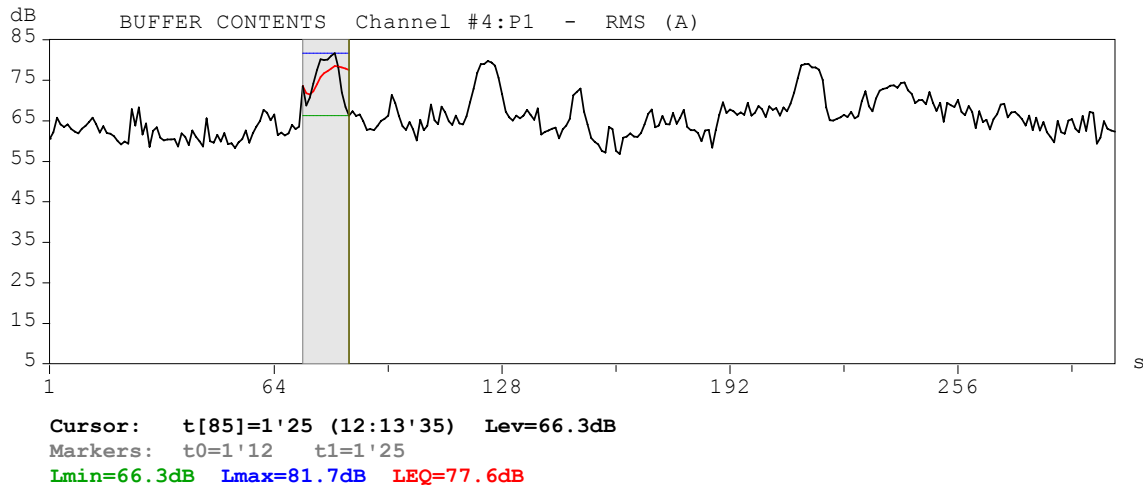


Tabela 1: Níveis Lmin, Lmax e Leq dos Eventos

Evento	Lmin dBA	Lmax dBA	Leq dBA
Trem sentido Jabaquara	66.3	81.7	77.6
Trem sentido Tucuruvi	64.1	79.8	75.7
Trem sentido Jabaquara	65.1	79.1	76.1

O nível de ruído de fundo da amostragem correspondeu a $L_{90} = 60.4$ dBA, indicando um acréscimo médio de 16 dBA para os eventos do trem. Os resultados do ponto b) superam os do ponto a) em função da proximidade em relação à fonte. Pode-se fazer o ajuste para a distância padronizada de medição a 30 m e depois comparar com a expressão 1, aplicando-se a correção em função da velocidade padronizada do trem = 60 km / h. Temos:

➤ $LA = 76.5$ dBA para 25 m distância; $LA = 75.7$ dBA para 30 m distância

Corrigindo a velocidade (na expressão 1) de 70 km / h para 60 km / h:

➤ $LA = 75.7 + 30 \log (70 / 60) = 77.7$ dBA

Valores que estão na faixa de +/- 6 dBA em torno de $LA = 74$ dBA, comprovando a adequação do modelo.

2 Critérios Acústicos x Níveis de Ruído Ambiente

A ocupação lindeira do prolongamento da linha 2 - verde do METRO, particularmente no trecho em elevado: km 28.7 + 71 m a km 29.7 + 90 m (Estação Tamandateí), constitui-se numa "área mista predominantemente residencial", e "área mista com vocação comercial e administrativa", segundo classificação da norma brasileira NBR 10.151: "Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o Conforto da Comunidade". Outro critério pertinente é a Lei Municipal de São Paulo 13.885 / 2004 referente aos parâmetros de incomodidade referidos a zona de uso das edificações.

Assim, os níveis máximos permitidos na vizinhança do Elevado da Linha 2 - Verde do METRO, entre estações Sacomã e Tamandateí, considerando os dois critérios são:

Área mista, predominantemente residencial:

- .Leq diurno = 55 dBA (NBR 10.151) / 65 dBA (Lei 13.885)
- .Leq noturno = 50 dBA (NBR 10.151) / 45 dBA (Lei 13.885)

Área mista, com vocação comercial / administrativa:

- .Leq diurno = 60 dBA (NBR 10.151) / 65 dBA (Lei 13.885)
- .Leq noturno = 55 dBA (NBR 10.151) / 50 dBA (Lei 13.885)

3 Análise do Impacto Acústico do Trem em Elevado

O trecho em elevado, inclusive emboque / desemboque, projetado entre o km 28,5 + 45 m e o km 29,7 + 90 m, com 1,2 km de extensão e abrangendo também a Estação Tamandateí, percorrerá uma região residencial constituída por habitações unifamiliares de 1 ou 2 pavimentos, uma região comercial com galpões e, próximo ao fim do elevado, novamente uma região residencial. Os parâmetros essenciais à análise e dos quais depende o estudo de propagação sonora são:

- .velocidade do trem em cada trecho, estimada;
- .para cada velocidade, o respectivo nível de ruído do trem;
- .a distância ao receptor mais próximo;
- .o critério adotado para esse receptor.

Dependendo da atenuação necessária ao trecho, a solução adotada poderá ser barreira acústica ou fechamento acústico (prolongamento virtual do túnel), lembrando que não é

possível a instalação de barreira acústica central (entre trens), com ambas faces absorventes, em função de dificuldade para manutenção e passagem de cabos.

3.1 Barreira Acústica

Conforme ref. III, ao se utilizar barreiras com a face interna absorvente, como é o indicado em linhas do trem metropolitano, visando a redução do ruído, estudos realizados para diferentes trens resultou uma proposta de cálculo cuja fórmula é dada por

$$\Delta_{barreira} = 9,4 \log(2 + 50\delta) \quad \text{dBA} \quad (2)$$

Onde: $\Delta_{barreira}$ = atenuação da barreira, dBA

δ = diferença entre os caminhos do som difratado e direto, m

Note-se que a atenuação da barreira já é fornecida em dBA, pois a formulação considera que o espectro sonoro do contato roda / trilho é predominantemente composto por médias / altas frequências. O nível de pressão sonora que alcança o receptor é obtido a partir do nível LA do trem (expressão 1) de acordo com a velocidade adotada, menos a atenuação da barreira e menos a atenuação pela distância*. Temos:

$$NPS_{rec} = L_A - \Delta_{barreira} - \Delta_{distância} \quad \text{dBA} \quad (3)$$

*a atenuação pela distância é considerada $10 \log(d_2 / d_1)$ ou $20 \log(d_2 / d_1)$, em dBA, dependendo se d_2 é menor ou maior do que $L / \pi = 38$ metros, em função do comprimento do trem ($L=120\text{m}$)

Nos casos em que a atenuação promovida pela barreira não seja suficiente ou sua altura não seja viável, fica descartada tal alternativa e procede-se à solução alternativa, que é o fechamento em torno do trem como um túnel virtual.

3.2 Fechamento Acústico – Metodologia de Cálculo

Em se tratando de fechamento acústico formado por paredes laterais e teto ao redor do trem, primeiramente é estimado o nível de potência sonora da fonte, considerando-se propagação esférica.

$$NWS_{trem} = L_A + 10 \log(2\pi l^2) \quad \text{dBA} \quad (4)$$

Depois, calculam-se os parâmetros absorção média ($\bar{\alpha}$) e constante da sala (R) para o túnel, em função das superfícies (S_i) e materiais de acabamento envolvidos (α_i). A seguir, calcula-se o nível de pressão sonora reverberante (dentro do túnel) como:

$$NPS_{rev} = NWS_{trem} + 10 \log\left(\frac{4}{R}\right) \quad \text{dBA} \quad (5)$$

Definindo-se os materiais do fechamento com um valor de PT (perda por transmissão) em dB, mínimo, calcula-se o índice de transmissibilidade médio ($\bar{\alpha}$) das paredes, piso e teto, e obtém-se o valor médio PTm.

$$PT_m = 10 \log \frac{1}{\tau_m} \quad \text{dBA} \quad (6)$$

A partir daí, estima-se o nível de pressão sonora externo (transição túnel - ar livre) como:

$$NPS_{ext} = NPS_{rev} - PT_m - 6 \quad \text{dBA} \quad (7)$$

O nível de potência sonora externo, do enclausuramento, é obtido somando-se as superfícies radiantes (paredes laterais e teto do "túnel"). O nível de pressão sonora num determinado receptor, pode ser calculado a partir desse valor, menos a correção com a distância ao receptor (d). Temos:

$$NWS_{ext} = NPS_{ext} + 10 \log A^* \quad \text{dBA} \quad (8)$$

A^* = somatório das superfícies de paredes e teto, ou paredes, teto e piso m^2

$$NPS_i = NWS_{ext} - 10 \log(2\pi d^2) \quad \text{dBA} \quad (9)$$

3.3 Quadro Resumo dos Tratamentos Acústicos do Trecho Emboque - Elevado - Desemboque

Trecho	Extensão	Tratamento Acústico
Km 28,5 + 45 m - Km 28,7 + 71 m	226 m	Túnel a céu aberto - fechamento pesado
Km 28,7 + 71 m - km 29,1	329 m	Túnel a céu aberto - fechamento leve
Km 29,1 - km 29,2 + 60 m	160 m	Barreiras com 3,50 m altura - laterais às vias
Km 29,3 + 95 m - km 29,6 + 10 m	215 m	Barreiras com 3,50 m altura - laterais às vias
Km 29,6 + 10 m - km 29,7 + 90 m	180 m	Túnel a céu aberto - fechamento leve

onde:

Fechamento pesado = com paredes de concreto e cobertura em painéis acústicos

Fechamento leve = com paredes e cobertura em painéis acústicos (isolante e absorvente de som)

Nota importante

À falta de dados reais de níveis de pressão sonora dentro de Tuneis com a passagem de trens, a diferentes velocidades, os autores deste trabalho tiveram de partir de um artifício considerando os truques dos vagões como fontes sonoras isoladas dentro de um espaço idêntico ao do túnel, e assim por esse artifício resolver um problema a semelhança de fontes sonoras estacionárias confinadas, desprezando totalmente o espaço ocupado pela carenagem dos vagões. Os resultados dos níveis sonoros no espaço aberto certamente serão levemente inferiores aos apontados. As diferenças constatadas por um monitoramento oportuno poderão ser úteis para futuros estudos assemelhados.

4 Conclusões

Os estudos teóricos realizados para avaliar o impacto sonoro da passagem de trens metropolitanos em trecho elevado sobre a comunidade urbana ao redor, indicam o seguinte:

- .devido a alta velocidade do trem, estimada em até 100 km/h, os níveis sonoros produzidos na saída / entrada do túnel ou no próprio elevado estão estimados em $Leq = 91$ dBA a 82 dBA, respectivamente;
- .em função desses níveis sonoros e aplicando-se a metodologia de cálculo indicada no item 3.0 deste documento, estima-se que os níveis de ruído que alcançarão a comunidade vizinha serão maiores do que os critérios acústicos, indicados no item 2.0 deste trabalho;
- .assim, será necessário instalar proteções acústicas ao longo do trajeto de passagem dos trens, para não implicar em incômodo acústico aos receptores da vizinhança, os quais estão próximos – entre 20 m e 40 m do eixo da via;
- .tais proteções foram divididas em dois tipos: fechamentos completos (como um túnel virtual, a céu aberto) e barreiras acústicas com 3,50 m de altura;
- .os fechamentos completos, por sua vez, foram classificados em “pesados” = paredes de concreto e cobertura em painéis acústicos ou “leves” = paredes e cobertura em painéis acústicos;
- .tais painéis – que também constituirão as barreiras acústicas – serão formados por um elemento isolante em chapa de aço mais um elemento absorvente (manta porosa), este devidamente protegido para exposição ao tempo;
- .todos os materiais serão certificados não somente em relação ao desempenho acústico, mas também em relação ao comportamento ao fogo, durabilidade, facilidade de manutenção, etc;
- .este trabalho destaca a importância de se realizar um estudo preventivo do impacto ambiental acústico sobre comunidades urbanas, em função da demanda de transporte coletivo, neste caso, prolongamento de uma linha de metro em trecho elevado.

Agradecimento

Ressaltamos a iniciativa da Companhia do Metropolitano de São Paulo em elaborar este estudo e agradecemos todo seu apoio no sentido de viabilizar esta avaliação acústica sobre trecho a ser implantado na expansão da Linha 2 – Verde – do METRO de São Paulo.

Referências

- I Norma Brasileira 10.151 – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade – revisão julho / 2000.
- II Lei 13.885/2004 PMSP – “Parâmetros de Incomodidade em função do Uso e Ocupação do Solo”.
- III Nelson, Paul (1987) Transportation Noise Reference Book – Butterworths - Part 4: Train Noise, chapters 14, 15, 16 e 17. England.
- IV Harris, Cyril M. (1979) Handbook of Noise Control – McGraw Hill – Chapter 33 – Rail Transportation Noise. United States of America.
- V Beranek, Leo (1971) Noise and Vibration Control – McGraw Hill – Chapter 7 – Sound Propagation Outdoors. United States of America.

