



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UnICEUB

PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

ANA LUÍSA OLIVEIRA E VIEIRA

**SIMULAÇÕES DE BARREIRAS ACÚSTICAS PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO
GERADO PELO METRÔ-DF**

BRASÍLIA

2019



ANA LUÍSA OLIVEIRA E VIEIRA

**SIMULAÇÕES DE BARREIRAS ACÚSTICAS PARA ATENUAÇÃO DO RUÍDO
GERADO PELO METRÔ-DF**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica
apresentada à Assessoria de Pós-Graduação e
Pesquisa.

Orientação: Sérgio Luiz Garavelli

BRASÍLIA

2019

RESUMO

O ruído urbano é um dos principais problemas ambientais que atinge a população das grandes cidades. Além do incômodo, afeta a qualidade de vida, a saúde física e mental dos habitantes. A cidade de Águas Claras apresenta uma população aproximada de 180 mil habitantes com elevada densidade, apesar de nova, sofre com problemas ambientais. Nos últimos anos a contaminação acústica na cidade aumentou, sendo o ruído gerado pela operação do metrô, uma das fontes principais. Como característica especial, a maior parte da malha metroviária em Águas Claras é de superfície, ou seja, a céu aberto — em trincheiras, sobre aterros e em terrenos no mesmo nível da via. Edifícios mais altos e próximos à linha, recebem o ruído gerado pela operação do metrô, o que perturba uma boa parcela da população, principalmente nos períodos de tarde/noite. A solução de barreiras acústicas, muito difundida em países da Europa, se apresenta como uma alternativa para a mitigação da contaminação ambiental neste caso. Esta pesquisa teve como objetivo principal propor soluções mitigadoras para o ruído gerado pela operação do Metrô-DF, por meio da instalação de barreiras acústicas. Inicialmente foram realizadas medições acústicas próximo as margens da linha férrea, aos edifícios das vias Boulevard norte e sul, além de medidas no interior das residências. Estes resultados foram utilizados para a caracterização da fonte de ruído e também para a calibração dos mapas acústicos. A partir dos dados coletados in situ e de informações complementares sobre a operação do metrô, foram gerados os mapas acústicos e a partir dos mesmos a realização das simulações com a implantação das barreiras acústicas. Para tal foram selecionadas três regiões, o critério utilizado foi o nível da linha férrea em relação a via. Área cuja linha férrea estava em talude, no mesmo nível e acima. As simulações foram realizadas utilizando o software SoundPlan, com o módulo do ruído ferroviário RMR-2002. Para a elaboração do mapa foram inseridos os elementos topográficos, os edifícios e suas alturas, as vias e as ferrovias além de outros parâmetros de entrada do software. O mapa acústico foi gerado inicialmente, sem a implantação das barreiras. Um conjunto de simulações preliminares foram realizadas, o que proporcionou a escolha de barreiras com três diferentes tipologias: barreira reta, barreira com elemento inclinado de topo e barreira cantilevered, para as quais um estudo mais detalhado foi realizado. Como resultados tem-se que a barreira cantilevered foi a que apresentou a melhor performance para as três regiões estudadas, sendo o seu desempenho superior às demais. Os níveis de pressão sonora que atingem as fachadas dos edifícios foram reduzidos em percentuais de 15% a 20% com implantação da barreira. Os resultados indicaram que a atenuação com a colocação das barreiras acústicas em áreas nos quais a linha férrea se apresenta no mesmo nível da via rodoviária é menos eficiente quando comparadas com as em talude.

Palavras-chave: Barreira acústica. Metrô. Poluição Sonora.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de estudo: mapa da cidade de Águas Claras	7
Figura 1 - Proporção apropriada para as partes da barreira	10
Figura 2 - Posicionamento da barreira em função do local da fonte de ruído	11
Figura 3 - Barreiras com topo em “T” e “Y” com ou sem material absorvente	11
Figura 4 - Exemplo de barreira do tipo cantilevered, Suíça	12
Figura 5 - Exemplo de barreira feita de solo	13
Figura 6 - Barreira de concreto poroso	13
Figura 7 - Barreira com painéis metálicos	14
Figura 8 - Barreiras acrílicas em perfil metálico	14
Figura 9 - Efeito de uma barreira com vegetação	15
Figura 10 - Barreiras com painéis solares.....	16
Figura 11 - Medições sendo feitas em via (à esq.) e em apartamento (à dir.).....	17
Figura 12 – Regiões selecionadas para simulações das barreiras	20
Figura 14 - Redução média em dB para cada tipo de barreira simulada	24
Figura 15 - Redução média em %	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de pressão sonora $L_{máx}$ medido e simulado	18
Tabela 2 - Comparativo entre os diferentes tipos de barreiras- Edifício 1	21
Tabela 3 - Comparativo entre os diferentes tipos de barreiras- Edifício 2	22
Tabela 4 - Comparativo entre os diferentes tipos de barreiras- Edifício 3	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1	EFEITOS NOCIVOS DO RUÍDO	8
2.2	TEORIA APLICADA ÀS BARREIRAS ACÚSTICAS.....	8
2.3	TIPOLOGIA DE BARREIRAS ACÚSTICAS.....	10
2.4	MATERIAIS EM BARREIRAS ACÚSTICAS	12
3	METODOLOGIA	16
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as preocupações acerca do conforto ambiental têm se intensificado em meio aos projetistas. Além da melhora nos aspectos construtivos, a busca por uma forma de projetar que seja considerada cada vez mais agradável, traz benefícios diretos na qualidade de vida das pessoas. Um dos itens extremamente importantes deste debate é a poluição sonora. A preocupação com os efeitos do ruído na saúde humana, tanto a curto como a longo prazo, tem aumentado por parte das autoridades em todo o mundo (WHO, 2009).

Um dos grandes originadores do ruído nas grandes cidades é o transporte (rodoviário, ferroviário ou aéreo) (PAUNOVIĆ *et al.*, 2014). Mas mesmo que esse debate na sociedade atual tenha ganhado mais força em meados do século XX, esse problema não é tão recente. Civilizações antigas, como o Império Romano, já haviam vivenciado problemas em relação ao ruído noturno. Mumford (1998), em seu livro *A Cidade na História*, relata o episódio entre Júlio César e o fluxo intenso de carroças na Roma Antiga. Como o tráfego era pesado, o imperador decretou que as mercadorias estavam impedidas de serem transportadas durante o período diurno. Por mais pertinente que lhe parecesse, isso teve um efeito negativo na vida da população e se mostrou ineficaz, pois o transporte de mercadorias foi transferido para o período noturno. O atrito gerado entre a roda e as estradas feitas de pedra, provocava um ruído que perturbava a população durante o sono. Um problema persistente até os dias de hoje, pois a população das cidades cresce, por muitas vezes, ao longo de vias de fluxo intenso. No caso do DF, não foi diferente.

A cidade de Águas Claras (Figura 1), foi pensada para se desenvolver exatamente ao longo da linha do metrô, contando com três estações: Arniqueiras, Águas Claras e Concessionárias. Como outras, teve um crescimento elevado e desordenado nos últimos anos, o que fez com que os problemas de má gestão e mau planejamento fossem sentidos no dia a dia de seus habitantes. Todos os dias, em média, cerca de 170 mil pessoas (Metrô - DF, 2018) utilizam os trens como meio de deslocamento em todo o DF, sendo uma boa parcela moradores de Águas Claras que trabalham no Plano Piloto. No entanto, os prédios cada vez mais altos e mais próximos à linha, recebem o ruído gerado pela operação do metrô, o que perturba uma boa parcela da população, principalmente nos períodos de tarde/noite (Garavelli *et al.*, 2016). Pela falta de atenção aos estudos que possibilitem a melhoria da qualidade das construções,

atentando às exigências da norma de desempenho muito recente, NBR 15575 (2013), a população acaba por ter que contratar empresas especializadas em acústica para adaptarem-se às condições locais. Além disso, a medida só é eficaz quando, após a instalação de janelas acústicas, por exemplo, a unidade fica totalmente fechada.

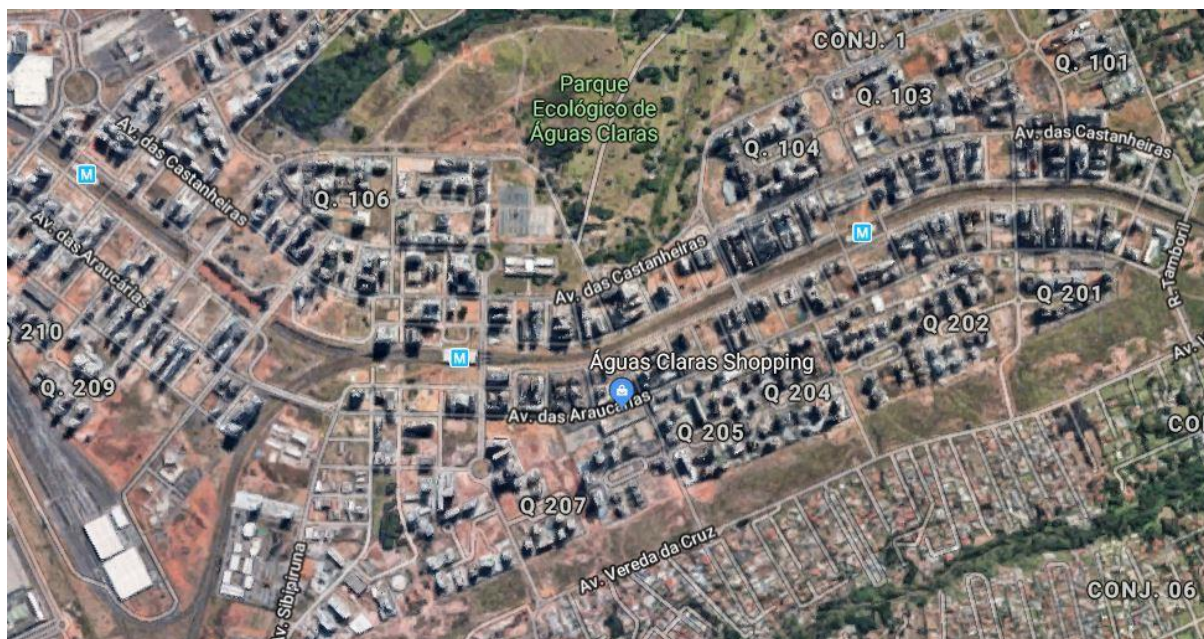


Figura 1 - Área de estudo: mapa da cidade de Águas Claras
(Fonte: Google Maps, 2019)

Como forma de mitigação do ruído, as barreiras acústicas têm se apresentado como uma alternativa, o que impacta de maneira positiva na melhoria na qualidade de vida da população nas cidades. Se bem dimensionadas, com escolha de materiais e de geometria apropriados, elas podem ser grandes aliadas no controle da poluição sonora, proporcionando conforto aos cidadãos. Kotzen *et al.* (1999) utilizam a terminologia “barreiras acústicas ambientais”, visto que estes elementos também podem ser vistos como elemento integrante da paisagem urbana, devendo ser projetadas de modo a respeitar a identidade do local em que serão instaladas. Este estudo busca propor barreiras acústicas para reduzir os problemas relacionados ao ruído ferroviário na cidade de Águas Claras.

O objetivo da presente pesquisa é demonstrar se, com a utilização de barreiras acústicas ao longo da linha do metrô de Águas Claras, o ruído provocado pelo transporte é reduzido de forma eficaz e significativa, amenizando o desconforto na população ali residente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EFEITOS NOCIVOS DO RUÍDO

O ruído ambiental, ou poluição sonora, vem se mostrando como o terceiro maior poluidor, afetando a saúde das pessoas principalmente no período da noite (WHO, 2009; Freia *et al.*, 2014). Ele é definido como um som que incomoda e se mostra prejudicial, podendo ser causado por várias atividades, inclusive as de meios de transporte rodoviário, ferroviário etc. (Diretiva 2002/49/CE). Os níveis de pressão sonora estabelecidos pela NBR 10151 (2000) como desejáveis, dificilmente são obedecidos. Para uma área mista, predominantemente residencial, por exemplo, são estabelecidos limites de 55 dB para o período diurno, e de 50 dB para o noturno. Com os métodos construtivos adotados no Brasil e com a ainda prematura legislação que exija desempenho acústico da construção, fica cada vez mais difícil atingir esse valor, que é aconselhado inclusive pela Organização Mundial da Saúde.

Relaciona-se o problema do ruído com a saúde humana, dependendo do tempo de exposição e da intensidade, por exemplo. Os efeitos podem ser sentidos a curto prazo, como a perda de audição temporária, dores de cabeça, ou a longo prazo, como o estresse, distúrbios do sono e ansiedade (Miedema *et al.*, 2003). Alguns problemas cardíacos e até mesmo a elevação de pressão, podem ser sentidas pelo incômodo do ruído noturno, o que aumenta o risco de morte e reduz gradativamente a qualidade de vida do indivíduo. Inúmeros são os prejuízos que a exposição ao ruído traz à saúde humana, o que afeta diretamente na produtividade e na expectativa de vida nas cidades.

Essa é uma questão que vem sendo discutida em vários países, que trazem suas próprias legislações para proteger a população. O ruído ferroviário, traz níveis de pressão sonora na faixa de 70 dB, mostrando-se bem acima do desejável, e trazendo incômodos a uma parcela da população (Brüel, 2000). Segundo a APA (2011), cerca de 40% das pessoas estão sujeitas a níveis acima dos recomendados. A exposição contínua a esse tipo de ruído, pode acarretar os mais diversos problemas supracitados, devendo receber uma atenção especial das autoridades.

2.2 TEORIA APLICADA ÀS BARREIRAS ACÚSTICAS

Quando se trabalha com acústica, é importante conhecer a fonte geradora da onda, a trajetória que a onda percorre e o receptor, que vai ser quem receber certa intensidade dessa onda. A trajetória vai determinar as possíveis atenuações à medida que a onda propaga, que podem ser: obstáculos, vegetação, ou o próprio ar, que faz com que a intensidade tenha um decaimento de acordo com a distância fonte/receptor (Bistafa, 2006). Bruel *et al.* (2000) condicionam a propagação pelas condições ambientais, como a umidade, gradiente de temperatura e velocidade dos ventos, pelas características de absorção do solo e o tipo de fonte (pontual ou contínua).

Existem 3 formas de tratar o ruído, seja pela fonte, pelo receptor ou pela trajetória. Na fonte, por exemplo, pode-se utilizar materiais que absorvam impacto. No receptor, o uso de construções mais bem preparadas, com isolamentos e camadas de materiais compostos de forma a suavizá-lo. O último caso é o da trajetória, onde se encaixam as barreiras acústicas, que se tornam dispositivos que impedem ou pelo menos reduzem a incidência do ruído. Para tal, é necessário entender como é o comportamento do som ao ar livre.

Dessa maneira, a onda sonora pode sofrer 3 efeitos principais: absorção, reflexão e difração. A absorção é quando a onda encontra uma superfície com propriedades que fazem com que ela reduza de intensidade. Na reflexão, a superfície faz com que a onda volte na direção oposta. No caso das barreiras acústicas, o mais importante é conhecer o fenômeno da difração. Esse fenômeno, que foi inicialmente estudado na ótica, ocorre quando a onda tem sua trajetória desviada, acontecendo quando ela vai de encontro à borda do elemento. Esse efeito é o mais difícil de ser tratado, e o mais importante para o desempenho de uma barreira, visto que pode fazer a onda tomar uma direção nova e que seja muito incômoda. A difração cria um efeito de sombra acústica quando o receptor está próximo ao obstáculo, porém espalha a onda para mais longe. A forma de tratar isso é estudando materiais que tenham propriedades que auxiliem no combate ao ruído, além da forma da barreira.

Maekawa (1968) estabelece que a atenuação do ruído por barreiras acústicas na difração, de acordo com a sua geometria, altura e onde está posicionada. Kurze e Anderson (1971) criaram também uma relação em termos do número de Fresnel (N)(1), que depende do comprimento da onda incidente (λ) e da distância entre fonte-barreira-receptor ou $A/B/D$, representados pela letra $\theta = AB+BD-AD$.

$$N = \frac{2\theta}{\lambda} \quad (1)$$

A partir do número de Fresnel, também criaram uma possibilidade para calcular a IL (2), que é a perda por inserção (*'insertion loss'*) por difração (Bistafa, 2006), fora da sombra acústica, ou seja, a partir do ponto em que a fonte já consegue ser enxergada, com a presença da barreira. Esse valor é possível de ser conhecido pelo cálculo da atenuação da barreira (3).

$$IL = A_{barreira} - A_{solo} \quad (2)$$

$$A_{barreira} = \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tan \sqrt{2\pi N}} + 5dB \quad (3)$$

2.3 TIPOLOGIA DE BARREIRAS ACÚSTICAS

São várias as formas que uma barreira acústica pode assumir, sendo que ela em si é composta por três elementos principais: a base, o corpo e o topo. Cada parte da barreira deve manter uma certa proporcionalidade para que sejam eficientes (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**1). Cada uma das partes, pode ser tratada com materiais diferentes, respeitando o desempenho e a função de cada uma.

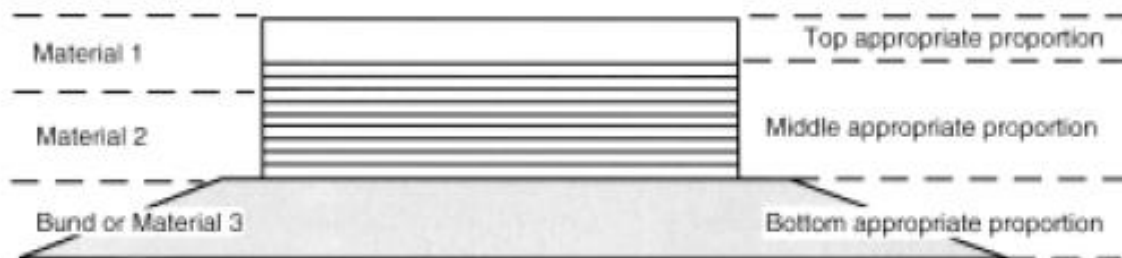


Figura 1 - Proporção apropriada para as partes da barreira
(Fonte: livro Environmental Noise Barriers, 1999)

Outro aspecto relevante ao se pensar no projeto de implantação das barreiras é o local onde elas devem ser posicionadas. Regiões nas quais a fonte do ruído está enterrada abaixo do nível do solo, por exemplo taludes, a barreira deve ser posicionada imediatamente na sua parte superior. No entanto, em regiões em que a fonte está no nível da superfície, a barreira deve estar, preferencialmente, o mais próximo possível da fonte (Figura 2).

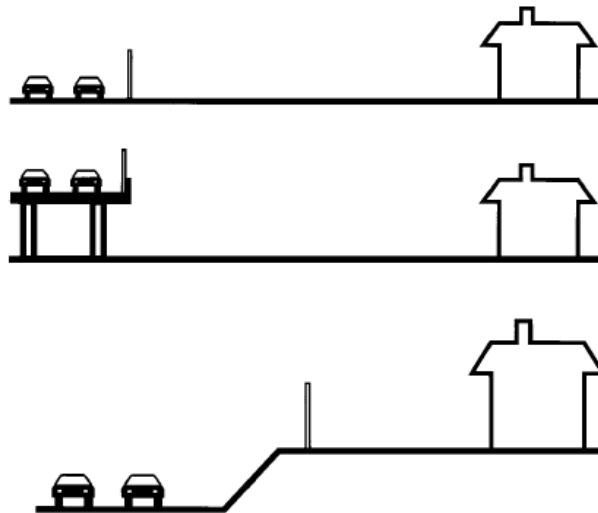


Figura 2 - Posicionamento da barreira em função do local da fonte de ruído
(Fonte: livro *Environmental Noise Barriers*, 1999)

O topo pode ter conformações diferenciadas, que podem ser grandes aliados contra o efeito da difração. Além disso, a altura da barreira influencia no seu desempenho. No entanto, nem sempre são possíveis alturas exorbitantes, além do efeito de encarceramento que isso pode gerar. Assim, a barreira pode receber formas de topo diferenciados (em “Y” ou “T”, por exemplo) (2.3), podendo receber inclusive material absorvente, ajudando mais ainda no desempenho. As bordas laterais das barreiras também podem ter terminações mais suaves, suavizando tanto o ruído, como a própria forma.



Figura 3 - Barreiras com topo em “T” e “Y” com ou sem material absorvente
(Fonte: livro *Environmental Noise Barriers*, 1999)

Um tipo muito comum e utilizado em outros países é a barreira *cantilevered* (Figura 4). Nesse tipo de barreira, temos uma forma que além de deixá-la com aspecto mais suave, é muito eficiente do ponto de vista acústico, já que ela é mais baixa e consegue proteger corredores de transporte de forma mais eficaz.

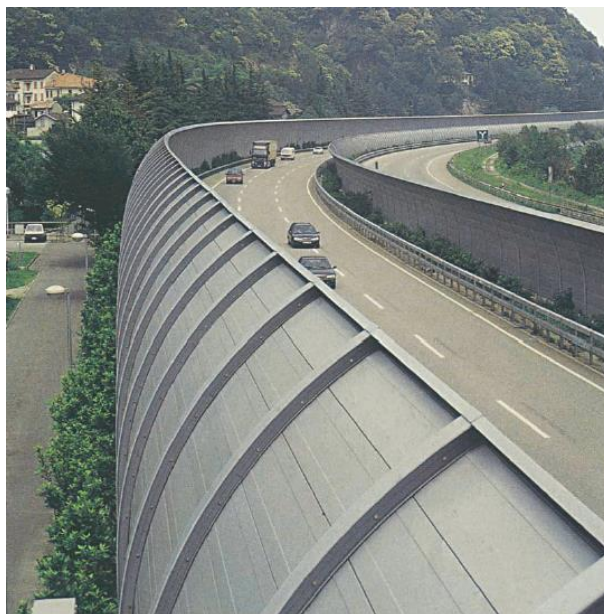


Figura 4 - Exemplo de barreira do tipo cantilevered, Suíça
(Fonte: livro *Environmental Noise Barriers*, 1999)

Os tipos e formatos de barreiras são os mais variados, indo desde os mais simples, até os mais complexos, dependendo, claro, do desempenho acústico desejado. Em um projeto de barreira acústica, o que deve ser muito levado em conta é o fator estético (que deve respeitar a identidade da cidade e o conforto do cidadão), o seu custo e manutenção, e a sua atenuação sonora.

2.4 MATERIAIS EM BARREIRAS ACÚSTICAS

Inúmeros materiais podem ser utilizados na confecção de barreiras acústicas, de acordo com a propriedade que se busca aproveitar, sendo as mais usuais de concreto ou de acrílico. No entanto, já existem propostas de utilização dos mais variados materiais, que vão desde reciclados, até fibras vegetais. Outro material largamente utilizado são os metais, principalmente os mais leves como o alumínio, que apresentam melhor desempenho acústico, ou até mesmo a associação de vários desses citados anteriormente. A escolha do material vai ser de extrema importância para determinar o desempenho satisfatório de uma barreira, mas, apesar do lado técnico, o viés estético também pesa na hora da definição do material. Kotzen e English (1999) relatam locais na Europa, como a Holanda por exemplo, em que o efeito estético da barreira fez com que o governo fosse obrigado a retirá-las de uma área residencial.

Um material bem comum e simples de ser utilizado é o próprio solo em forma de taludes, que possui uma absorção relativamente boa do ruído. Possuem fácil execução e manutenção, e são relativamente baratas, preservando aspectos naturais e podendo ter até plantações de gramíneas em sua superfície (Figura 5), quase sem que se perceba serem de fato barreiras acústicas. No entanto, para obter desempenho comparável a uma barreira vertical mais tradicional, necessita de uma área horizontal bem maior, já que a sua espessura em profundidade também é bem maior.



Figura 5 - Exemplo de barreira feita de solo
(Fonte: Google Imagens, 2019)



Figura 6 - Barreira de concreto poroso
(Fonte: Google Imagens, 2019)

Outro tipo bem comum e simples, são as barreiras feitas de concreto, um material largamente utilizado em construção civil. Ele é bem versátil, e proporciona infinidade de formas e métodos de execução (Figura 6), podendo até ser colorido para ser apresentado de forma mais “amigável”. É um material que pode ser tratado como refletivo ou absorvente, dependendo do modo como foi executado, podendo conter menor ou maior porosidade, por exemplo. No

entanto, pode causar um efeito de enclausuramento por ser um material opaco, e que visualmente é mais pesado.

Avançando nos materiais mais conhecidos, chegamos nas barreiras feitas de materiais metálicos, principalmente os mais leves. Existem chapas de alumínio perfuradas com propriedades absorventes largamente utilizadas na execução desse tipo de estrutura, pois além de leves, tem propriedades de não corroer. Os tipos de chapas mais reflexivas também podem ser usados, mas são menos populares. Os metais são vistos em barreiras comumente associados a materiais acrílicos (Figura 7).



Figura 7 - Barreira com painéis metálicos
(Fonte: Google Imagens, 2019)



Figura 8 - Barreiras acrílicas em perfil metálico
(Fonte: Google Imagens, 2019)

Por conta do efeito psicológico citado anteriormente, os materiais mais populares em barreiras acústicas são os translúcidos, em especial o acrílico. Eles ganharam destaque pois

eliminam a opacidade da barreira, reduzindo a sensação de enclausuramento, ao mesmo tempo que protegem fonte-receptor (Figura 8). Apesar de suas propriedades reflexivas, quando associados a outros materiais, como visto anteriormente, trazem um efeito agradável.

Outra associação interessante e benéfica nessas estruturas, são as chamadas “barreiras vegetais”, que associam barreiras acústicas comuns à vegetação. Apesar de a vegetação por si só não ser considerada uma barreira para o som, ao associá-la a outro material de substrato, auxiliam na dissipação do ruído. Além disso, o efeito visual para os usuários é bem agradável, visto que cria verdadeiros jardins verticais, o que proporciona conforto ao ambiente, além de não dar uma aparência de barreira (Figura 9). Podem trazer benefícios inclusive ligados à sustentabilidade, já que as trocas gasosas com o meio podem melhorar a oxigenação do local. Normalmente são utilizadas plantas do tipo trepadeira, pela facilidade de fixação, mas inúmeros arranjos podem ser feitos, inclusive com criação elementos que funcionam como jardineiras para plantio de outros tipos de vegetação.



Figura 9 - Efeito de uma barreira com vegetação
(Fonte: Site Bracústica, 2019)

Além dos materiais supracitados, há uma infinidade de possibilidades em adaptar outros materiais ao projeto de uma barreira acústica, como blocos, tijolos, plásticos e fibras, além de outros ainda em estudo. Eles podem ser associados, ou colocados em diferentes partes da barreira (base, corpo, topo). Existem, ainda, alternativas incorporadas às barreiras, que visam a sustentabilidade. Como exemplo, temos aquelas feitas com painéis solares (Figura 10), no intuito de geração de energia. Essa energia poderia ser usada, por exemplo, como alternativa

na iluminação pública: a barreira capta a luz solar do dia e pelo período noturno ilumina as vias próximas.



Figura 10 - Barreiras com painéis solares
(Fonte: livro *Environmental Noise Barriers*, 1999)

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada com base em estudos anteriores que avaliaram os impactos acústicos dos diversos modais de transporte em Águas Claras, de forma especial o metrô. Com dados de níveis de pressão sonora em mãos, bem como dados da população incomodada por esse ruído, foi possível elaborar formas de mitigar este problema, visto que uma grande parcela da população da cidade vive próximo aos trilhos. O estudo foi feito então com foco na população que sofre de forma imediata com o ruído ferroviário em Águas Claras, de forma a responder se o uso das barreiras acústicas é eficiente.

Inicialmente foram feitas medidas em campo, tanto nas vias secundárias (ou Boulevard), como dentro dos apartamentos. As medidas nas vias foram realizadas duas em duas, de forma a medir na calçada imediatamente à frente dos trilhos e na calçada mais recuada, à frente dos edifícios. O aparelho utilizado foi o medidor do nível de pressão sonora (também conhecido como decibelímetro ou sonômetro) de alta precisão Solo SLM da 01dB, que possui range dinâmico 20-137 dB, módulo de filtros multiespectro 1/1 e 1/3 de oitavas. Ele foi posicionado em um tripé, a uma altura de aproximadamente 1,20m do chão (Figura 1). Cada medida durou 15 minutos, feitas anotações nos momentos de passagem dos trens e de qualquer movimentação atípica que pudesse interferir em algum resultado. Ao todo foram obtidas 27 medidas, em períodos entre dezembro/2018 e março/2019.



Figura 11 - Medições sendo feitas em via (à esq.) e em apartamento (à dir.)
(Fonte: autora)

Já as medidas dentro das unidades habitacionais foram realizadas com o auxílio do mesmo aparelho, posicionado em um tripé maior, com até 4m de extensão, e um cabo, de modo que o microfone estivesse a pelo menos 1,50m de distância da fachada (Figura 1). A duração de cada medida foi de 15 minutos, e de forma análoga ao que foi feito nas vias, foram tomadas anotações do momento da passagem dos trens e de qualquer anormalidade que pudesse gerar interferência nos resultados. Ao todo foram coletados dados de 5 unidades em andares entre o 1º e 13º, em locais onde o trem passa em talude ou em superfície.

As simulações foram realizadas com base no software SoundPlan, que possui dados do sistema de referência SIRGAS 2000, emissão ruído ferroviário RMR 2002. Com todo o mapa da cidade inserido, com os elementos topográficos, os edifícios e suas alturas, as vias e as ferrovias posicionadas, sendo que todos os elementos foram assentados no terreno, deram-se início às simulações. O método utilizado foi o de posicionar no mapa os receptores, por toda a cidade e inclusive nos edifícios a serem estudados. O objetivo inicial era de comparar os dados em campo, com os obtidos em software, de modo a fazer a validação inicial do mapa. Os dados em campo, extraídos do aparelho de medição, representam o valor $L_{máx}$, ou seja, do pico do momento da passagem do metrô. Portanto, as simulações foram feitas nessa etapa com o modelo da ferrovia que continha os dados de pico.

Após a verificação destes dados, a segunda etapa foi de instalação das barreiras em três pontos escolhidos, neste caso 1 em um ponto em que o trem passa abaixo da superfície, 1 em um ponto de transição e outro em que ele passa acima da superfície. Neste momento, a

avaliação foi feita com foco nos edifícios e nos níveis que chegam aos andares de cada prédio. Como referência, foram escolhidos os locais dos prédios onde as medições *in loco* aconteceram, sendo um para cada situação de passagem do metrô. Ao todo foram feitas cerca de 100 simulações, de forma a escolher os designs que melhor se comportam e dialogam com a paisagem da cidade, verificados no modelo 3D gerado pelo programa. Nessa etapa, o modelo de ferrovia utilizado foi aquele que continha os dados do Lden, que representa o todo do dia-entardecer-noite. Ele foi escolhido pois representa o som distribuído por todo o dia e configurado aos horários de funcionamento do metrô, 6h-23h

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados avaliados *in situ*, foram tratados por meio de uma equação (4), que foi capaz de dar o valor para o L_{máx} medido, ao se isolar os momentos de pico da passagem do trem.

$$Leq = 10 \log \left[\frac{1}{T} \cdot \left(\sum_i^n t_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \right] \quad (4)$$

O cálculo se deu com a curva de ponderação A, em que o T é o somatório dos tempos de passagem de trens, n é o número de passagens, t é a duração de cada passagem e L_i o valor da pressão sonora nesse tempo. Com o auxílio do SoundPlan, estes dados foram comparados ao L_{max} simulado, para verificar o mapa. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

A média da diferença entre os níveis de pressão sonora preditos e medidos foi de 1,5 dB, sendo o desvio padrão da média de 1,1 dB. Para mapas acústicos de pequenas áreas é desejável que a diferença entres os valores preditos e os medidos não ultrapasse 2 dB, para grandes áreas a diferença deve ser menor que 3 dB. Dos 27 pontos monitorados, somente dois ultrapassaram o limite, sendo que o desvio médio menor que 2 dB.

Tabela 1 - Níveis de pressão sonora L_{máx} medido e simulado

Medida nº	L _{máx} medido (dB)	L _{máx} simulado (dB)	Diferença (dB)
1	73,1	76,5	3,4
2	66,0	64,9	1,1
3	65,4	66,7	1,3
4	77,9	77,2	0,7
5	70,6	73,1	2,5
6	74,4	74,0	0,4
9	67,5	65,3	2,2

10	67,5	64,4	3,1
11	75,7	73,1	2,6
12	65,3	66,7	1,4
13	61,1	61,3	0,2
14	72,1	73,6	1,5
15	70,2	70,0	0,2
17	67,0	66,3	0,7
18	75,8	75,3	0,5
19	74,0	74,5	0,5
20	77,3	75,3	2,0
21	72,8	70,5	2,3
22	70,9	74,5	3,6
24	78,1	78,0	0,1
25	69,4	67,2	2,2
26	79,4	78,2	1,2
27	72,6	72,0	0,6

Como descrito anteriormente, o próximo passo foi o de escolher os locais de implantação das barreiras, para realizar então as simulações e avaliar em como a inserção destes aparelhos pode influenciar nos níveis de pressão sonora nas devidas alturas dos edifícios. O primeiro local escolhido, se encontra na área mais baixa de Águas Claras e é onde o trem passa em talude. O segundo, em uma zona mais intermediária, ponto de transição entre talude e superfície. O último foi escolhido em uma área em que o trem passa em superfície. A (Figura 1) mostra os pontos escolhidos.

Foram feitas simulações com inúmeras configurações de barreira, até encontrar as mais eficientes. Três tipos principais foram escolhidos: barreira reta, barreira com elemento inclinado de topo e barreira cantilevered (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Ao longo das simulações, foram verificados vários parâmetros e como influenciam no comportamento acústico de cada um. Como a fase da pesquisa busca responder à pergunta de se a barreira funciona ou não, o material não foi configurado de forma específica, sendo utilizado o default do programa, que representa um material com coeficiente de absorção 0,206 e de reflexão 0,794.



Figura 12 – Regiões selecionadas para simulações das barreiras

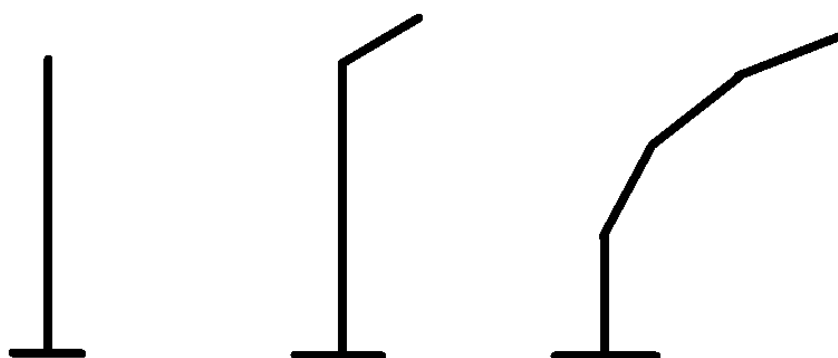


Figura 13 - Barreira reta, com elemento inclinado de topo e cantilevered

Vale ressaltar que em todos os casos que serão apresentados a seguir, apenas as barreiras com os melhores desempenhos foram escolhidas, sendo sua configuração final definida após inúmeros testes e simulações preliminares. Além disso, o número de receptores instalados para simulação foi condicionado à altura de cada prédio, colocados de 3 em 3m de altura.

O edifício 1, na região do talude, foi o primeiro a ser simulado, os resultados estão apresentados na Tabela 2. Foi observado que para barreiras retas, a altura a partir de 2m poderia causar um certo nível de desconforto na população, de forma a limitar a certa altura. Além disso, acréscimos de altura não produziam atenuações significativas. Com a barreira de topo inclinado, foi colocada uma inclinação de 30° e 0,5m de comprimento. Outras variações na angulação ou no tamanho, não foram tão significativas ou harmônicas no design. A barreira

cantilevered foi modelada com a colocação de elementos de 1m de comprimento, angulados entre si em 30°, de modo a criar o arco. A Tabela 2 indica o número e altura do receptor, os níveis de pressão sem a instalação das barreiras (NPS_{SB}), com barreira reta (NPS_{BR}), com barreira *cantilevered* (NPS_{BC}), e a maior diferença, que ocorreu com a última barreira.

Tabela 2 - Comparativo entre os diferentes tipos de barreiras- Edifício 1

Receptor	A(m)	NPS_{SB} (dB)	NPS_{BR} (dB)	NPS_{BT} (dB)	NPS_{BC} (dB)	Dif _m (dB)
1	3	42,1	38,1	37,5	36,5	5,6
2	6	47,8	42,9	41,9	41,0	6,8
3	9	53,0	48,2	45,3	44,0	9,0
4	12	55,2	53,2	50,3	46,0	9,2
5	15	56,4	55,2	53,2	47,2	9,2
6	18	56,8	56,3	54,6	48,0	8,8
7	21	56,7	56,6	54,9	48,5	8,2
8	24	56,5	56,6	54,9	48,9	7,6
9	27	56,4	56,4	54,9	49,3	7,1
10	30	56,2	56,2	54,8	49,6	6,6
11	33	56,0	56,0	54,8	50,0	6,0
12	36	55,4	55,4	54,5	50,5	4,9
13	39	55	55,1	54,2	51,1	3,9
14	42	54,9	54,9	54,1	51,6	3,3
15	45	54,7	54,7	53,9	52,0	2,7
16	48	54,4	54,3	53,4	51,8	2,6

A – altura; NPS_{SB} (dB) nível de pressão sonora sem barreira; NPS_{BR} (dB)- barreira reta; NPS_{ST} (dB) - barreira com elemento no topo; NPS_{BC} (dB) - barreira *cantilevered*; Dif_m diferença máxima.

No edifício 2, em região de transição, as barreiras modeladas seguiram a mesma linha da análise no edifício 1. Na Tabela 3 estão apresentados os resultados. Barreira reta com altura de 2,0m, a segunda com altura de corpo em 1,80m e elemento de topo com 30° de inclinação e 0,50m de comprimento. A última, *cantilevered*, foi modelada com um comprimento total de 4m, sendo que cada elemento possui uma inclinação entre si de 30°.

Uma observação feita durante as simulações foi de que a barreira *cantilevered*, mesmo que estendida de modo a formar quase um túnel, não apresentou atenuação maior quando comparada a outras configurações dela. Mesmo em andares inferiores, o próprio fato de que ainda havia um espaço por onde o som era capaz de passar, fez com que as diversas

simulações de barreiras desse formato não apresentassem uma diferença significativa entre si. Essas atenuações estavam na casa de 0,1dB a 0,2dB.

Tabela 3 - Comparativo entre os diferentes tipos de barreiras- Edifício 2

Receptor	A(m)	NPS _{SB} (dB)	NPS _{BR} (dB)	NPS _{BT} (dB)	NPS _{BC} (dB)	Dif _m (dB)
1	3	50,9	50,5	45,9	41,1	9,8
2	6	58,0	57,9	53,1	44,7	13,3
3	9	58,8	58,7	56,2	49,5	9,3
4	12	58,8	58,8	57,0	52,7	6,1
5	15	58,8	58,8	57,2	54,5	4,3
6	18	58,7	58,2	57,2	55,2	3,5
7	21	58,2	57,4	57,0	55,5	2,7
8	24	57,7	57,3	56,8	55,6	2,1
9	27	57,3	57,1	56,6	55,6	1,7
10	30	57,0	56,8	56,4	55,5	1,5
11	33	56,6	56,6	56,3	55,4	1,2
12	36	56,4	56,4	56,1	55,3	1,1
13	39	56,2	56,1	55,9	55,1	1,1
14	42	56,0	55,9	55,7	55,0	1,0
15	45	55,7	55,7	55,5	54,8	0,9
16	48	55,5	55,5	55,3	54,7	0,8
17	51	55,3	55,3	55,1	54,5	0,8
18	54	55,1	55,1	54,9	54,3	0,8
19	57	54,9	54,8	54,8	54,2	0,7
20	60	54,7	54,6	54,6	54,0	0,7
21	63	54,5	54,4	54,5	52,8	1,7
22	66	54,3	54,2	54,3	53,6	0,7

A – altura; NPS_{SB}(dB) nível de pressão sonora sem barreira; NPS_{BR}(dB)- barreira reta; NPS_{BT}(dB) - barreira com elemento no topo; NPS_{BC}(dB) - barreira *cantilevered*; Dif_m diferença máxima.

Os resultados das simulações no edifício 3, situado em região de trilho em superfície, seguiu-se o modelo das anteriores estão apresentados na Tabela 4. Inicialmente, uma barreira com configuração reta, simulada com 1,80m e 2,0m, sendo que a última teve um desempenho minimamente melhor. Com a barreira de topo inclinado, foi mantida a configuração de 1,80m de altura e elemento de tomo angulado em 30° e 0,50m de extensão.

No entanto, a última barreira, *cantilevered*, após feitas inúmeras simulações, sofreu uma modificação que afetou significativamente seu desempenho. Ao contrário das configurações anteriores, em que foram utilizados módulos iguais e de mesmo comprimento e angulação, esta foi modelada com um primeiro elemento maior de 1,50m inclinado a 40° e depois outros

elementos menores e angulados em 10° conformando um arco. Esse arranjo implicou em um resultado melhor, principalmente em andares superiores.

Tabela 4 - Comparativo entre os diferentes tipos de barreiras- Edifício 3

Receptor	A(m)	NPS _{SB} (dB)	NPS _{BR} (dB)	NPS _{BT} (dB)	NPS _{BC} (dB)	Dif _m (dB)
1	3	56,0	48,0	47,6	44,2	11,8
2	6	56,3	52,8	50,9	45,5	10,8
3	9	56,3	55,0	53,6	47,2	9,1
4	12	56,3	55,7	54,9	47,7	8,6
5	15	56,1	55,7	55,5	48,2	7,9
6	18	56,0	55,7	55,4	49,8	6,2
7	21	55,8	55,5	55,2	51,7	4,1
8	24	55,6	55,4	55,1	52,3	3,3
9	27	55,3	55,3	55,0	52,4	2,9
10	30	55,2	55,2	54,8	52,4	2,8
11	33	55,0	55,0	54,7	52,5	2,5
12	36	54,8	54,8	54,5	52,6	2,2
13	39	54,5	54,7	54,4	52,9	1,6
14	42	54,3	54,5	54,2	53,2	1,1
15	45	54,1	54,3	54,0	53,5	0,6
16	48	54,0	54,1	53,9	53,7	0,3
17	51	53,8	53,9	53,7	53,6	0,2
18	54	53,6	53,7	53,5	51,5	2,1
19	57	53,5	53,5	53,4	51,4	2,1

A – altura; NPS_{SB}(dB) nível de pressão sonora sem barreira; NPS_{BR}(dB)- barreira reta; NPS_{BT}(dB) - barreira com elemento no topo; NPS_{BC}(dB) - barreira *cantilevered*; Dif_m diferença máxima.

Observa-se que para os três casos a barreira *cantilevered* foi a que apresentou o melhor desempenho acústico. Para os andares inferiores a atenuação do ruído foi maior, mas em andares intermediários também é possível notar que ela existe. As tabelas geradas das simulações também mostram como ocorre o comportamento da onda, visto que mesmo em andares mais superiores, alguns apresentam redução maior se comparados aos seus antecessores. Isso pode ocorrer pois com as reflexões e efeitos de difração, a onda pode seguir um caminho diferente e menos uniforme durante o percurso.

Outro ponto relevante é de como ocorreu o comportamento em cada configuração do metrô. A região em talude obteve uma atenuação bem maior se comparada às demais, pelo fato de que o próprio solo possui um coeficiente capaz de absorver parte da incidência da onda, além de conferir uma certa proteção bem maior da fonte.

Um resumo do comportamento médio avaliado de cada tipo de barreira nos três casos, está apresentado a seguir, **Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada..** Nelas estão apresentados os dados de atenuação média em valores absolutos de dB e em percentual de redução.

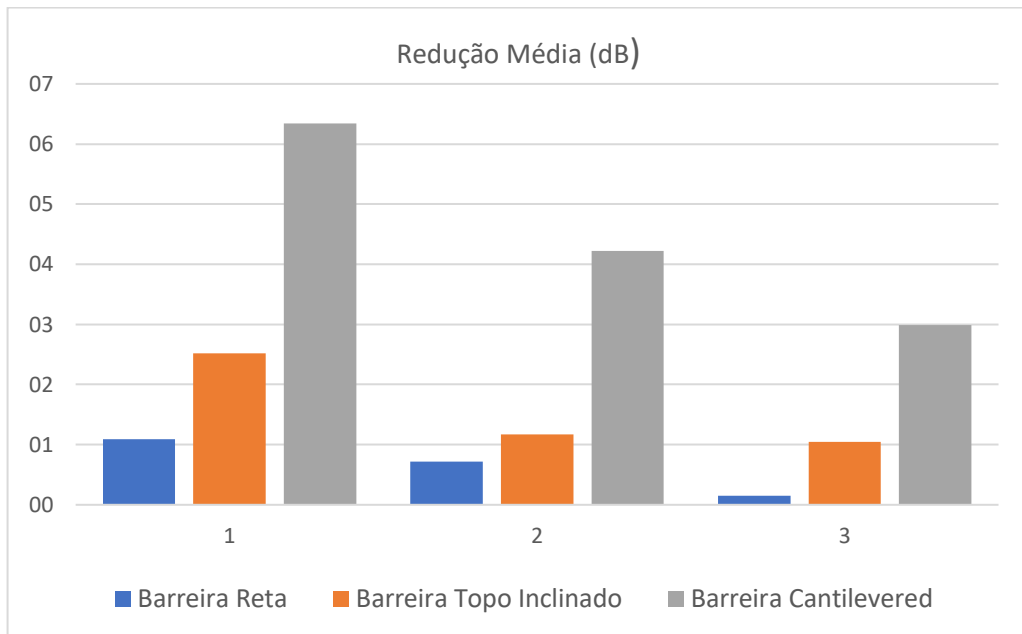


Figura 2 - Redução média em dB para cada tipo de barreira simulada

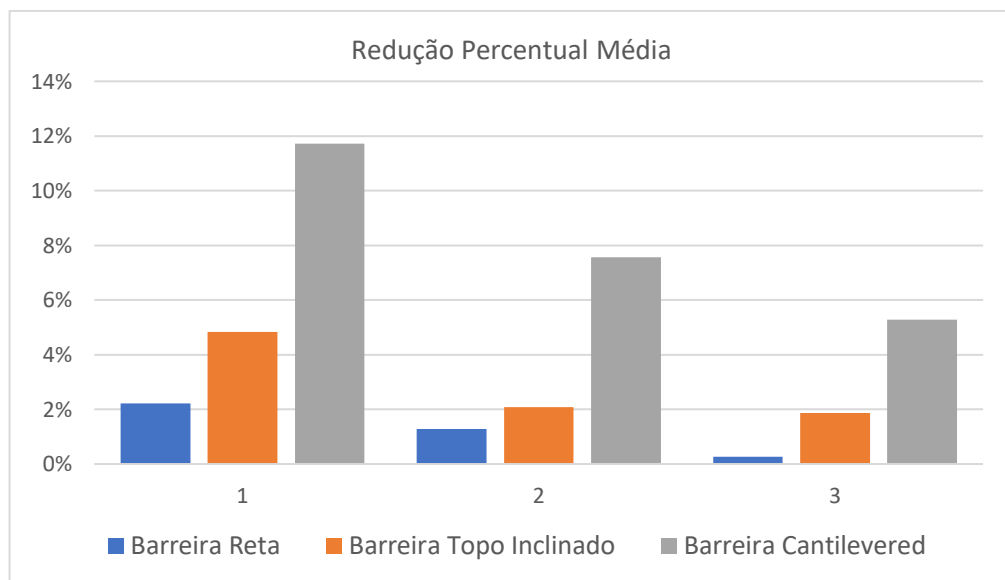


Figura 3 - Redução média em %

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema do ruído na cidade de Águas Claras é constantemente abordado, visto que o o planejamento inicial da cidade foi alterado diversas vezes. Quando se pensa em formas de

mitigação do ruído, as barreiras acústicas vêm ganhando espaço no cenário urbano da contemporaneidade, por serem versáteis e proporcionarem conforto. Normas e legislações estão sendo desenvolvidas em todo o mundo para que a qualidade de vida das pessoas seja tomada em conta, sendo os estudos na área de interesse tanto para os que fornecem como para os que desfrutam dos mais diversos serviços, seja de transporte, moradia, comércio, lazer etc.

Com o objetivo de analisar se as barreiras são uma solução possível para a área do metrô em Águas Claras, foram primeiramente realizadas medições em unidades habitacionais que se encontram voltadas para a linha do trem. Desta forma, além de obter o dado medido do quanto o ruído chega ao apartamento, foi possível conversar com moradores de modo a entender melhor o problema e como cada um convive com ele. Além disso, observou-se as configurações do metrô e possíveis locais de realização das simulações, de forma a abranger a cidade toda.

Após fase de medição e observação, começaram a ser efetuadas simulações no software SoundPlan para modelagem dos vários tipos de barreira com o intuito de observar seus comportamentos. Foram escolhidos os três tipos de barreira (reta, topo inclinado e cantilevered), para que houvesse maior otimização da solução a ser encontrada. No processo de modelar cada barreira foram observadas suas peculiaridades e fatores que influenciam no seu desempenho.

Decorridas todas as simulações, foi demonstrado que a barreira cantilevered foi a que apresentou o melhor resultado para os três casos estudados, sendo o seu desempenho muito superior às demais. Em muitos andares a atenuação chegou de 15% a 20% do que incide sem a colocação da barreira. Outro ponto é que a atenuação foi muito mais difícil em regiões de trem em superfície do que em talude, onde níveis de pressão sonora foram baixados a menos de 40dB.

Sendo assim, é possível que o uso de barreiras acústicas possa trazer benefícios a população de aproximadamente 180 mil pessoas que vivem em Águas Claras, especialmente a parcela que está às margens dos trens.

O uso dos materiais e devidos tratamentos, são de notável importância para avaliar o desempenho de uma barreira. Dessa forma, seria importante que possíveis pesquisas

posteriores abordem a questão de utilização de outros materiais, podendo inclusive apresentar soluções sustentáveis, e aprofundando em como as barreiras propostas podem ser aprimoradas.

Agradecimento: A FAP-DF (Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal), ao UniCEUB e a UnB pelo apoio financeiro e parceria na realização do projeto 0193.001557/2017 (FAP/DF).

REFERÊNCIAS

ABNT (2000) NBR 10151 - Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT (2013) NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ALI, M. Y.; BARBALHO, B. S.; GARAVELLI, S. L.; MAROJA, A. M. Incômodo Provocado pelo Metrô em Águas Claras - DF. In: XXVII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 2017, Brasília. ANAIS DO XXVII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 2017. v. 1. p. 254-263.

APA (2011) Agência Portuguesa do Ambiente. Diretrizes para elaboração de mapas de ruído versão 3. Disponível em: https://www.apambiente.pt/zdata/DAR/Ruido/NotasTecnicas_EstudiosReferencia/DiretrizesMapasDez2011_todo_2.pdf. Data de acesso: 28 de março de 2019

BASE DE INFORMAÇÕES DO CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Resultados da Sinopse por setor censitário DF, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/base_de_informacoess_por_setor_censitario_universo_censo_2010.pdf. Acesso em: 01/03/2019.

BISTAFA, S. R. Acústica Aplicada ao Controle do Ruído. Editora Edgard Blücher, 1ª edição - 2006, p.187-230.

BRÜEL E KJAER. Ruido Ambiental. K. Larsen & Søn A/S, 2000.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (CODEPLAN) Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios 2016. Disponível em: http://www.codeplan.df.gov.br/images/CODEPLAN/PDF/pesquisa_socioeconomica/pdad/2016/Apresentacao_PDAD_Aguas_Claras.pdf. Acesso em: 23/02/2019.

DIRETIVA 2002/49/CE Relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente, The Official Journal of the European Communities 189, p. 12-17, 2002.

FERREIRA NETO, M. de F.; BERTOLI, S. R. Desempenho De Barreiras Acústicas ao Ar Livre: Comparação Entre Aspectos Objetivos e Subjetivos. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, p.135-142, 2002.

FREIA, P.; MOHLERA E.; RÖÖSLIA, M. Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 217(2-3), p. 188–195, 2014.

GARAVELLI, S. L; SILVA, W. C.; SILVA, E. F. F, COSTA, C. A.; CARVALHO JR, E. B. e MAROJA, A. M. A contaminação acústica provocada pelo Metrô do DF. In: 7º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional Integrado e Sustentável, Maceió-Brasil, 2016.

IBGE CIDADES. Distrito Federal, Brasília. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/panorama>. Acesso em: 01/03/2019.

KOTZEN, B.; ENGLISH, C. *Environmental Noise Barriers*. Ed. E & FN Spon, 1ª ed, 1999.

MAEKAWA, Z., Noise reduction by screens *Applied Acoustics*, v.1, p.157-173, 1968.

METRÔ DF. Disponível em: < <http://www.metro.df.gov.br/estrutura-2/>>. Acesso em: 14/12/2018.

METRÔ DF. Horário de funcionamento. 2017. Disponível em: <<http://www.metro.df.gov.br/horario-de-funcionamento-2/>>. Acesso em: 14/12/2018.

MIEDEMA, H. M. E.; PASSCHIER-VERMEER W.; VOS, H. Elements for a position paper on night-time: transportation noise and sleep disturbance. TNO Inro, Delft, 2002-59, 2003.

MUMFORD, L. A cidade na história. Editora WMF Martins Fontes, 4ª ed, p. 228-233, 1998.

PAUNOVIĆ, K.; BELOJEVIĆ, G.; JAKOVLJEVIĆ, B. Noise annoyance is related to the presence of urban public transport. *Science of the Total Environment* 481, p. 479-487, 2014.

SICAD/DF-ORTOFOTOCARTAS 2009 (SICAD-SIRGAS) escala 1:10.000. Disponível em http://www.segeth.df.gov.br/mapas_sicad/index_sirgas.htm. Acesso em 13/12/2018.

SOUNDPLAN MANUAL. Braunstein + Berndt GmbH, Backnang, Alemanha, 2012.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Burden Night Noise Guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2009.