

Um fator importante é que normalmente o topo da barreira fica condicionado às necessidades acústicas, pois este elemento é o responsável por parte das possíveis difrações sonoras que atingem o lado oposto, como já mencionado anteriormente. Existem vários métodos, que serão citados a seguir, para eliminar ou amenizar essas difrações.

O meio, ou o corpo, normalmente é a parte mais visível de uma barreira e onde os principais raios sonoros serão interceptados, portanto, de inquestionável importância no desempenho acústico e efeito visual da barreira.

Já as bases das barreiras muitas vezes ficam escondidas ou por vegetações ou por grades de segurança. Nas primeiras barreiras construídas, segundo Kotzen e English (1999), havia a preocupação de que não existissem frestas ou aberturas na base, para que o som não vazasse para o lado oposto. Porém, mais recentemente, algumas barreiras já são construídas com elementos vazados na base, sem a necessidade de sistemas de drenagens especiais, e ainda permitem que pequenos animais possam passar de um lado para o outro, o que em áreas rurais pode ser um benefício, mas em áreas urbanas, além de representar risco de vida aos animais, potencializa acidentes nas rodovias (atropelamentos). Estas frestas também exigem mais atenção na manutenção.

Na área da base ocorre também o sistema de captação de águas pluviais, assim como a coleta de resíduos dispensados na rodovia, portanto, mais do que o efeito visual, a base de uma barreira tem compromisso com seu bom funcionamento.

3.3 Formas e dimensões

Tanto os desempenhos acústicos das barreiras, como as suas formas melhoraram acentuadamente nas últimas décadas, impulsionados por pesquisadores europeus e por grupos internacionais, tais como a Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), que pesquisa soluções para o problema do ruído nos meios de transporte (KOTZEN; ENGLISH, 1999).

As barreiras, em geral, agregam à paisagem um peso horizontal pelo fato de o comprimento ser freqüentemente maior do que a altura. Entretanto, em alguns casos, a altura fica tão expressiva no valor visual da paisagem, quanto o comprimento. Como acontece na via rápida urbana (VRU) Périphérique, em Paris, onde uma barreira construída para proteger uma área residencial tem sua altura mais notável que seu comprimento, conforme mostra a figura 57.



Figura 57 Barreira com 20m de altura protegendo uma área residencial na Périphérique, em Paris.

Fonte: Kotzen e English (1999).

O comprimento de uma barreira fica condicionado, principalmente, à difração sonora, que não ocorre apenas no topo das barreiras, mas também nas suas extremidades horizontais. Sendo assim, sua eficácia na atenuação do ruído não depende apenas da altura, mas também de seu comprimento, que deve ser analisado cuidadosamente ainda em projeto, considerando-se sempre a largura da área que deve ser protegida por esta barreira. Segundo Kotzen e English (1999), pode-se partir por um ângulo de 160° , do receptor à fonte sonora, para calcular o comprimento necessário de uma barreira, para que se possa garantir que as difrações ocorridas nas extremidades horizontais não influenciem o desempenho acústico final da barreira na proteção das áreas sensíveis.

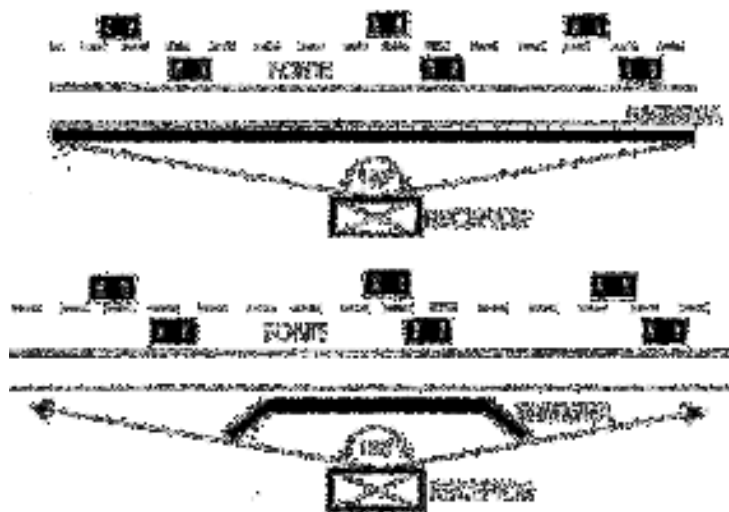


Figura 58 Comprimento reto ou angular de uma barreira.

Fonte: Kotzen e English (1999).

PLANTA

O comprimento da barreira pode ser poupado se os ângulos de incidência dos raios sonoros forem bem estudados. No primeiro exemplo, figura 58, a barreira cobre em traço reto a área a ser protegida; já no segundo exemplo a barreira atenua igualmente no primeiro, porém, com suas extremidades inclinadas, ou seja, a mesma atenuação em uma barreira menor, conseqüentemente com menor custo na obra e aumento na visibilidade de ambos os lados da barreira. Vale ressaltar, entretanto, que tal medida exige maior disponibilidade no terreno, pois se não houver área livre suficiente ou condições geográficas adequadas para essa composição, será necessário estender o comprimento da barreira, de acordo com o primeiro exemplo.

Característica notável nas barreiras é o fator de repetição. Normalmente, as barreiras mantêm em toda a sua extensão muitos elementos repetitivos, como, por exemplo, os painéis, os pilares ou as janelas, como mostra a figura 59. Alguns projetos mais ousados tratam a barreira, considerando toda a sua extensão, como um objeto de decoração na paisagem urbana, evitando assim os tais elementos repetitivos, como o exemplo da figura 60. A vantagem de um projeto com o fator de repetição é que, normalmente, ele representa uma considerável diminuição nos custos da obra. Outro possível benefício é oferecer a sensação de equilíbrio visual, contudo, em alguns casos, este fator torna-se dispensável pela intenção de criar uma barreira assimétrica, conforme a figura 61.



Figura 59 Barreira com elementos repetitivos.

Fonte: Foto da autora (2005).



Figura 60 Barreira como escultura.

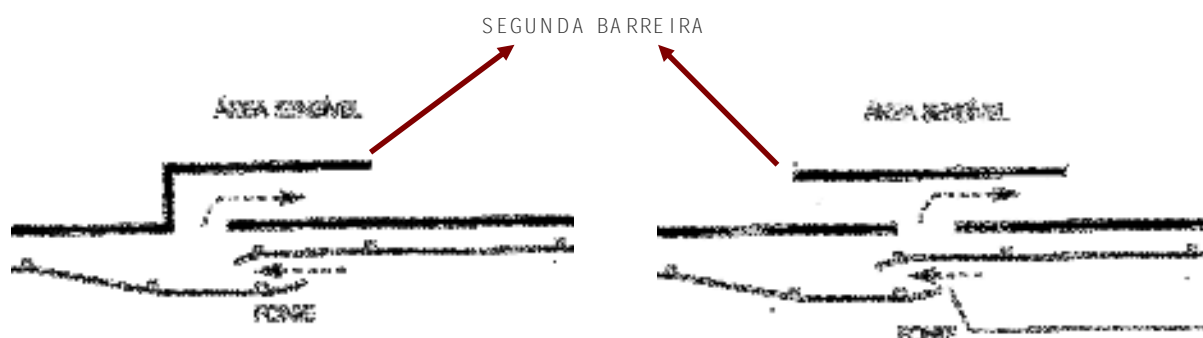
Fonte: Kotzen e English (1999).



Figura 61 Barreira assimétrica.

Fonte: Kotzen e English (1999).

É muito importante na concepção de uma barreira, para um bom desempenho acústico, que não existam vãos em sua extensão, a fim de evitar que o som escape por estas frestas e atinja a área a ser protegida. Quando houver necessidade de um vão, ou para manutenção, ou para passagem de pedestres, este deve ser igualmente protegido por uma segunda barreira paralela, obviamente em menor escala, vide figura 62. Neste caso, os cuidados com as difrações sonoras aumentam, portanto é indicado que na face interna desta segunda barreira seja aplicado um revestimento absorvente.



PLANTA

Figura 62 Vãos para manutenção ou passagem de pedestres nas barreiras.

Fonte: Adaptado de Kotzen e English (1999).

A eficácia do isolamento de um som por uma barreira acústica urbana é condicionada por vários fatores, tais como: a massa da superfície, a rigidez, o ângulo de incidência dos raios sonoros, entre outros; todavia o mais relevante, segundo Kotzen e English (1999), é o cálculo de massa da superfície (M_s), pois por meio dele é possível identificar a densidade da barreira e, logo, o quanto irá isolar as ondas sonoras.

$$M_s = 3 \times 10^{\left(\frac{AT-10}{14}\right)} \text{ Kg / m}^2$$

Por vezes, em rodovias ou ferrovias são necessárias barreiras acústicas instaladas em ambos os lados. Nestes casos, quando as barreiras paralelas forem refletoras, os raios incidentes nas barreiras e refletidos de volta para a rodovia tendem a incrementar consideravelmente o ruído, causando eco batente. Isso pode ser aceitável quando a rodovia em questão é para tráfego expresso e não possui calçadas para pedestres, ciclovias ou acostamentos, conforme o exemplo da figura 63. Caso contrário, medidas alternativas devem ser adotadas para que as barreiras não intensifiquem ainda mais o nível do ruído, perceptível aos possíveis receptores localizados do mesmo lado da fonte, e, conseqüentemente, aumente a necessidade de atenuação sonora nas barreiras. Uma solução cabível e simples é revestir as duas barreiras, nas faces voltadas para a rodovia, com materiais acústicos absorventes, fazendo com que a porcentagem dos raios refletidos passe a ser insignificante.



Figura 63 Barreira nos dois lados da rodovia, paralelas entre si.

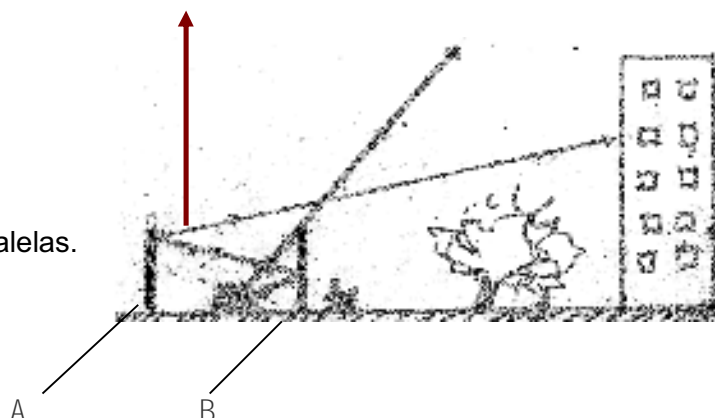
Fonte: Kotzen e English (1999).

Outro problema que pode tornar a implantação de duas barreiras, paralelas e refletoras, pouco eficaz é quando a relação da altura com a distância das barreiras não for bem calculada. Isso porque os raios originados entre duas barreiras paralelas podem atingir o receptor que se encontra no lado oposto da barreira, após a primeira reflexão, conforme é explicado na figura 64.

RAIO SONORO REFLETIDO PELA BARREIRA À DIRETO PARA O EDIFÍCIO

Figura 64 A altura de barreiras paralelas.

Fonte: Desenho da autora (2006).



Esta perda na atenuação pode ser bem significativa. Para Watts²⁹ (*apud* KOTZEN; ENGLISH, 1999), barreiras paralelas refletoras com 2m de altura e distantes entre si 34m podem perder até 4dB(A) na atenuação sonora. Esse resultado pode ser melhorado se a altura das barreiras for aumentada ou se a distância entre elas for diminuída.

Esta solução, porém, pode aumentar consideravelmente o custo da construção da barreira e diminuir ainda mais sua visibilidade, além do que, em muitos casos, pode ser impraticável devido à largura já determinada pela rodovia existente. Uma solução mais eficaz pode ser inclinar as barreiras para o lado externo da rodovia, oposto à zona de reflexão dos raios sonoros, de modo que os raios incidentes na barreira sejam facilmente direcionados para cima, não atingindo o receptor. Já o ângulo de inclinação depende da distância entre as duas barreiras, quanto maior for a distância menor a necessidade de inclinação. Para Slutskt e Bertoni³⁰ (*apud* KOTZEN; ENGLISH, 1999), para barreiras distantes 45m, uma inclinação de 3° é necessária, considerando que elas estejam posicionadas em linhas paralelas e sejam refletoras; já para barreiras distantes 18m, é necessária uma inclinação de 10 a 15° para que os raios não sejam direcionados ao receptor.

²⁹ WATTS, G. R. *Acoustical Performance of Parallel Traffic Noise Barriers*, *Applied Acoustics*, 1995 p. 47, 95-119.

³⁰ SLUTSKY, S. e BERTONI, H. L. *Analysis and Programmes for Assessment of Absorptive and a Tilted Parallel Barriers*. In: *Transport Research Record 1176*, Washington, DC, National Research Council, 1988.



Figura 65 Barreira inclinada.

Fonte: Kotzen e English (1999).

Como foi apresentado até o momento, são inúmeros os fatores relevantes na concepção da forma e no dimensionamento de uma barreira. Além da principal questão, o bom desempenho acústico, o projetista também tem responsabilidade com a paisagem visual do local em que será implantada a barreira. Portanto, além de projetos de Arquitetura e de Engenharia minuciosamente detalhados, existe também o projeto paisagístico.

Na busca pelo melhor desempenho acústico, a altura das barreiras poderia ser facilmente aumentada, se este artifício não pudesse comprometer ainda mais a paisagem visual local, além de aumentar os custos de construção, segundo Kotzen e English (1999). Assim, várias soluções engenhosas são pesquisadas com o intuito de suprir as necessidades de aumento na altura das barreiras, garantindo o bom desempenho acústico, principalmente em relação às reflexões sonoras e às difrações originadas nos topos das barreiras, conforme segue:

*Inclinar os topos das barreiras*³¹ pode ser um dos métodos mais simples de evitar o aumento na altura das mesmas. Consta na inclinação apenas da última secção de uma barreira, projetada para cima da fonte do ruído. Dessa forma, a difração sonora é desviada, diminuindo consideravelmente a porcentagem que atinge o receptor. No entanto as ondas sonoras tendem a ser refletidas para o local de origem, como ilustrado na figura 66. O uso de materiais acústicos absorventes revestindo a face da barreira voltada para a fonte do ruído e o topo da face oposta, no mínimo, é indispensável para que o desempenho acústico da barreira seja melhorado (KOTZEN; ENGLISH, 1999).

³¹ Termo original: cantilevered barriers.



Figura 66 Barreira com topo inclinado.

Fonte: Kotzen e English (1999).

Os *túneis* são os mais eficazes controladores de ruídos provenientes do tráfego. Seu custo, entretanto, normalmente inibe o aumento de sua demanda e, ainda assim, é cada vez mais comum esta solução em áreas extremamente sensíveis. Deve-se tomar cuidado apenas para que o ruído provocado dentro do túnel não atinja o entorno nas suas saídas, pois, por se tratar de um ambiente fechado, o tempo de reverberação dentro do túnel pode ser elevado e os raios sonoros refletidos, vide figura 69, podem chegar às saídas e então serem transmitidos à vizinhança por meio da difração. Sendo assim, é recomendado que este tipo de solução conte sempre com paredes internas revestidas com materiais acústicos absorventes, para que estas já atenuem as possíveis reflexões e diminuam o tempo de reverberação excessivo (KOTZEN; ENGLISH, 1999).



Figura 67 Túnel.

Fonte: Kotzen e English (1999).

Outra alternativa para evitar o aumento na altura das barreiras é a criação de *galerias*³², ou seja, um túnel semi-aberto. Uma solução “híbrida” parecida com a descrita nos túneis, porém, como não se trata de um elemento totalmente fechado, apresenta grandes vantagens com relação a iluminação e ventilação natural e redução da reverberação (KOTZEN; ENGLISH,1999).



Figura 68 Galerias.

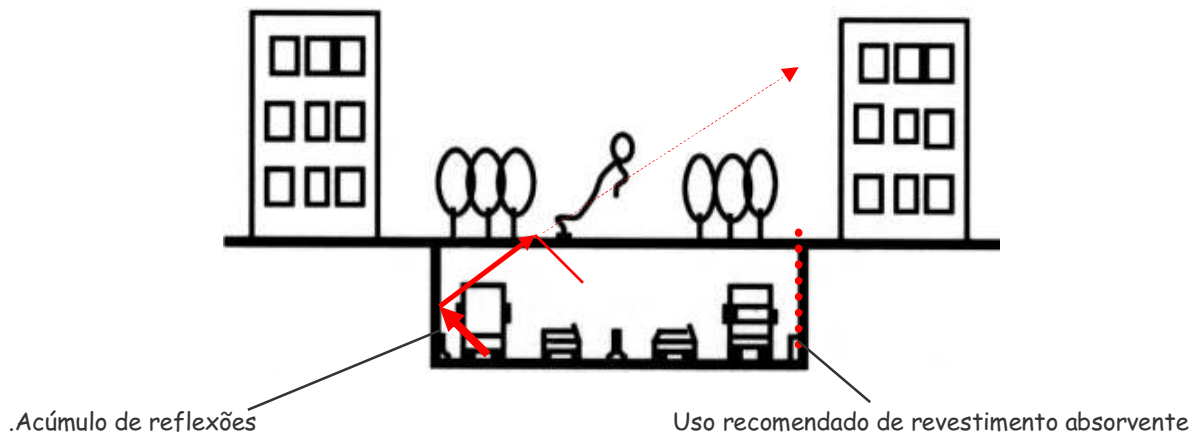
Fonte: Kotzen e English (1999).

Barreiras com *coberturas vazadas*³³ são apresentadas pelos autores como outra possível forma de evitar o aumento na altura da barreira. Neste caso, painéis revestidos com materiais sonoros absorventes são pendurados sobre as pistas, verticalmente, de forma que desviem os raios sonoros originados na rodovia para cima, evitando atingir a área sensível. Esta solução garante boa qualidade do ar e também iluminação natural, mas não elimina o problema com a difração dos raios sonoros originada nos topos dos painéis, a menos que seja combinado com outro método (KOTZEN; ENGLISH,1999). A figura 69 apresenta alguns cortes das variações possíveis em uma barreira acústica: túnel, galeria e cobertura vazada.

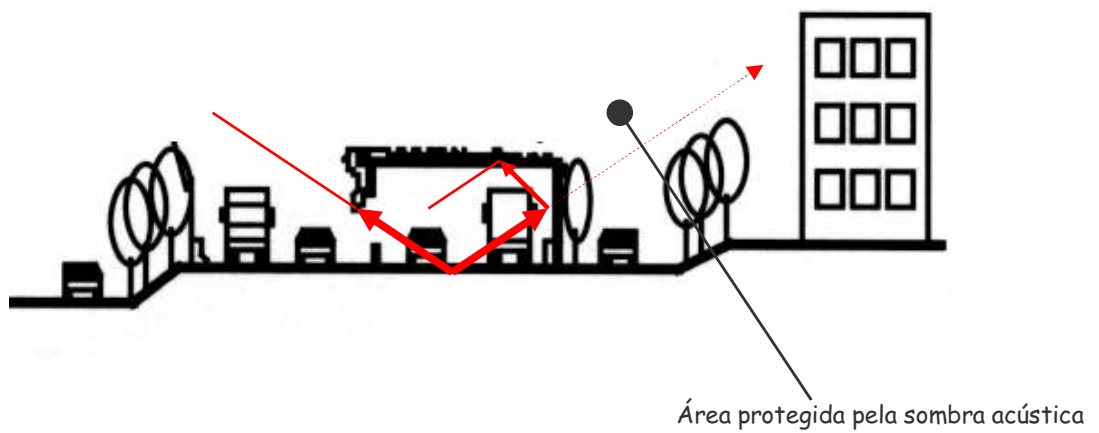
³² Termo original: galleried barriers.

³³ Termo original: louvred covers.

TÚNEL COMO ATENUADOR DE RUÍDO ORIGINADO NO TRÁFEGO



GALERIA AO INVÉS DE MURO SIMPLES DE CONTENÇÃO SONORA



COBERTURA VAZADA COM PAINÉIS ABSORVENTES PENDURADOS

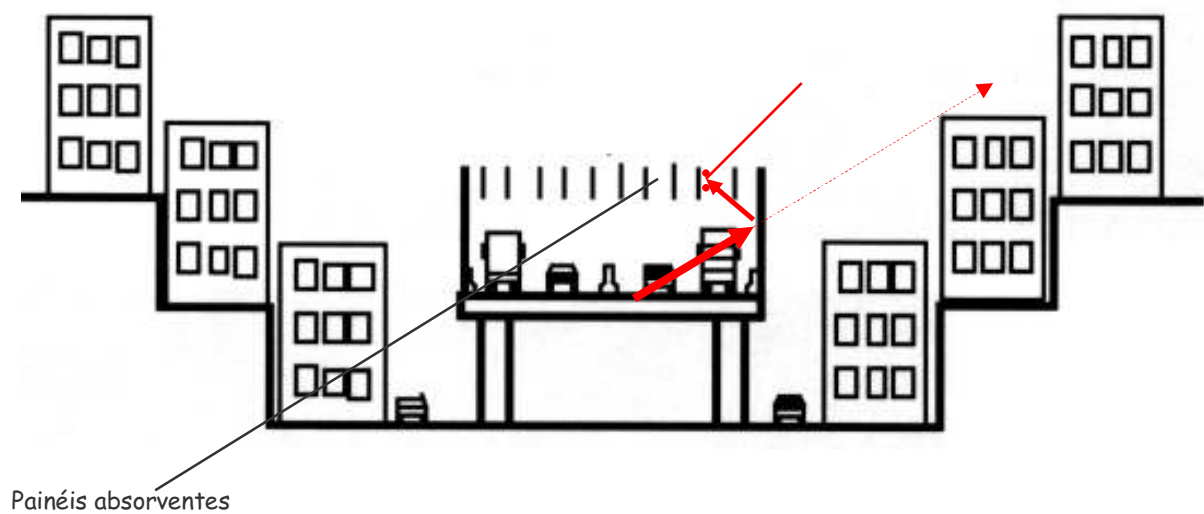


Figura 69 Variações possíveis em barreiras acústicas urbanas.

Fonte: Adaptado de Kotzen e English (1999).

Conforme já estudado anteriormente, o topo da barreira fica sujeito ao fenômeno da difração, que, se não for considerada, pode diminuir consideravelmente o resultado da atenuação acústica da barreira. Os autores Kotzen e English (1999) citam variações nos topos das barreiras³⁴ para anular ou amenizar possíveis difrações sonoras, que serão analisadas a partir deste momento. Lembrando que as todas as soluções são patenteadas³⁵.

Barreira com topo em formato de T³⁶

É a instalação de um plano horizontal no topo da barreira, deixando-a com o formato de T. Para este tipo de barreira, pesquisadores estimam que topo com 1m de largura e constituído por materiais refletores é possível melhorar a atenuação sonora em 1.4dB(A) em relação a uma barreira simples. Já se o topo for revestido com material acústico absorvente, é possível melhorar a atenuação sonora em até 2.0dB(A) em relação a uma barreira simples. E em uma situação ainda melhor, onde a mesma barreira apresenta 2m de largura no topo e ainda revestido com um material acústico absorvente, é possível melhorar a atenuação sonora em até 3.1dB(A), de acordo com a figura 70 (WATTS³⁷ *apud* KOTZEN; ENGLISH, 1999).



Figura 70 Barreira com topo em formato de T.

Fonte: Adaptado de Kotzen e English (1999).

³⁴ Termo original: diffracting-edge modifications.

³⁵ Patentes: Título de autoria e uso exclusivo de um invento (HOUAISS, 2003).

³⁶ Termo original: t-shaped barriers.

³⁷ WATTS, G. R.. *Acoustic Performance of a Multiple Edge Noise Barrier Profile at Motorway Site*. *Applied Acoustics* 42, 1996.

Barreira com topos múltiplos

Pesquisas mostram que com topo triplo em uma barreira, sendo sua altura de 0.5m e largura de 1m, é possível obter uma melhora na atenuação de 2.4dB(A) em relação a uma barreira simples. Se forem acrescentados revestimentos acústicos absorventes no topo do meio, é possível melhorar a atenuação em 2.5dB(A), em relação a uma barreira simples. Caso a altura do topo seja aumentada para 1m e ainda com material acústico absorvente na borda do elemento central, a atenuação passa para 2.6dB(A). E em uma situação ainda melhor, com a largura entre os topos de 2m, a atenuação alcançada chega a 2.7dB(A), como mostra a figura 71 (WATTS³⁸ apud KOTZEN; ENGLISH, 1999).



Figura 71 Barreira com topos múltiplos.

Fonte: Adaptado de Kotzen e English (1999).

Barreira com topo em formato de Y³⁹

No Japão, novas barreiras em formato de Y estão sendo desenvolvidas, cujos topos recebem mais uma peça Y, mas numa escala reduzida. Assim os raios sonoros originados na rodovia passam por quatro difrações no topo antes de chegarem ao outro lado da barreira e atingir a área a ser protegida. Convém que a face da barreira voltada para a rodovia e as superfícies do Y menor recebam materiais acústicos absorventes para contribuir na atenuação sonora. Testes demonstraram uma notável melhora deste tipo de barreira em relação às barreiras Y planas ou barreiras simples de alturas equivalentes, com melhora na atenuação

³⁸ *Ibidem.*

³⁹ Termo original: y-shaped barriers.

equivalente a 10dB sobre a frequência de 500Hz (SHIMA *et al.*⁴⁰ *apud* KOTZEN; ENGLISH, 1999).

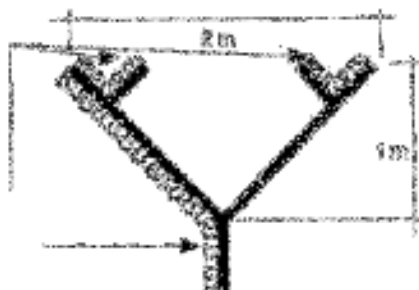


Figura 72 Barreira com borda em formato de Y.

Fonte: Adaptado de Kotzen e English (1999).

Barreira com topo em formato tubular⁴¹

O uso de elementos tubulares, forrando os topos das barreiras, tem sido muito pesquisado, principalmente em formas cilíndricas ou em formatos de cogumelos. Ressalta-se ainda que experimentos realizados com topos cilíndricos obtiveram resultados com atenuações variáveis, condicionadas aos tamanhos aplicados destes elementos nos topos, entretanto, observa-se um consenso entre os pesquisadores de que estes dispositivos atenuam em média de 2 a 3dB(A) em relação às barreiras simples com alturas equivalentes (KOTZEN; ENGLISH, 1999).

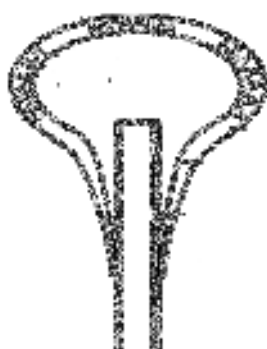


Figura 73 Barreira com borda em formato tubular.

Fonte: Adaptado de Kotzen e English (1999).

⁴⁰ SHIMA, H., WATANABE, T., MIZUNO, K., IIDA, K., MATSUMOTO, K. & NAKASAKI, K. *Noise Reduction of a Multiple Edge Noise Barrier*. In: *Proceedings of Internoise 96*. Liverpool, 1996.

⁴¹ Termo original: tubular cappings.

Barreiras com elementos de interferência nos topos⁴²

Neste tipo de barreira, os topos recebem elementos que atuam redirecionando para cima os raios sonoros provenientes da difração no topo da barreira, como a caixa em perfil L anexada no topo, na face oposta à da fonte ruidosa, como mostra a figura 74, com 0.5m de largura e 0.7m de altura. Os raios sonoros que sofrem difração no topo da barreira entram nesta caixa e, pelo fato de as medidas serem desiguais, estes raios sofrem várias interferências até serem lançados novamente para o exterior. Este método, segundo pesquisadores, oferece um melhoramento na atenuação de 6dB(A) (IIDA *et al.*⁴³ *apud* KOTZEN; ENGLISH, 1999). Em oposição, Watts⁴⁴ (*apud* KOTZEN; ENGLISH, 1999) conclui que esta atenuação é bem menor, em média de 1.9dB(A), sendo que apenas 0.7dB(A) desta atenuação ele atribui ao efeito da caixa anexada. Indica-se ainda que as superfícies internas do elemento anexado sejam revestidas com materiais acústicos absorventes, pois assim haverá uma contribuição ainda maior para uma boa atenuação sonora.

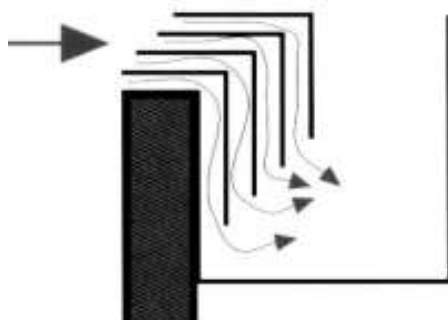


Figura 74 Barreiras com elementos de interferência nos topos.

Fonte: Adaptado de Kotzen e English (1999).

Quanto ao dimensionamento da barreira, diversos métodos para calcular a altura da barreira e a distância ideal na relação fonte/barreira/receptor entre os autores pesquisados. Nesta dissertação será citado o método usado por Egan (1988).

⁴² Termo original: phase interference devices.

⁴³ IIDA, K., KONDOH, Y. & OKADO, Y. *Research on a Device for Reducing Noise*. In: *Transport Research Record 983*, Washington, DC. National Research Council. 1984. p. 51-4

⁴⁴ WATTS, G. *Acoustic Performance of an Interference-Type Noise Barrier Profile*. In: *Applied Acoustics*, 49(1), 1996. p. 1-16.

Para Egan (1988), a relação entre a altura da barreira e a distância fonte/ barreira/ receptor é fornecida pela fração:

$$\frac{H^2}{R}$$

A altura (H) considerada começa na linha de visão acústica e termina no topo da barreira e a distância (R) é a metragem entre a fonte e a barreira, sendo que a distância entre o receptor e a barreira tem que ser muito maior do que R, como mostra a figura 75. O número obtido deve ser localizado no gráfico, segundo a frequência desejada e, assim, será possível obter o valor correspondente da atenuação pela barreira em questão.

Outro meio para calcular a atenuação de uma barreira, ainda segundo Egan (1988), é usando a equação:

$$AT = 10 \log \frac{H^2}{R} + 10 \log f - 17$$

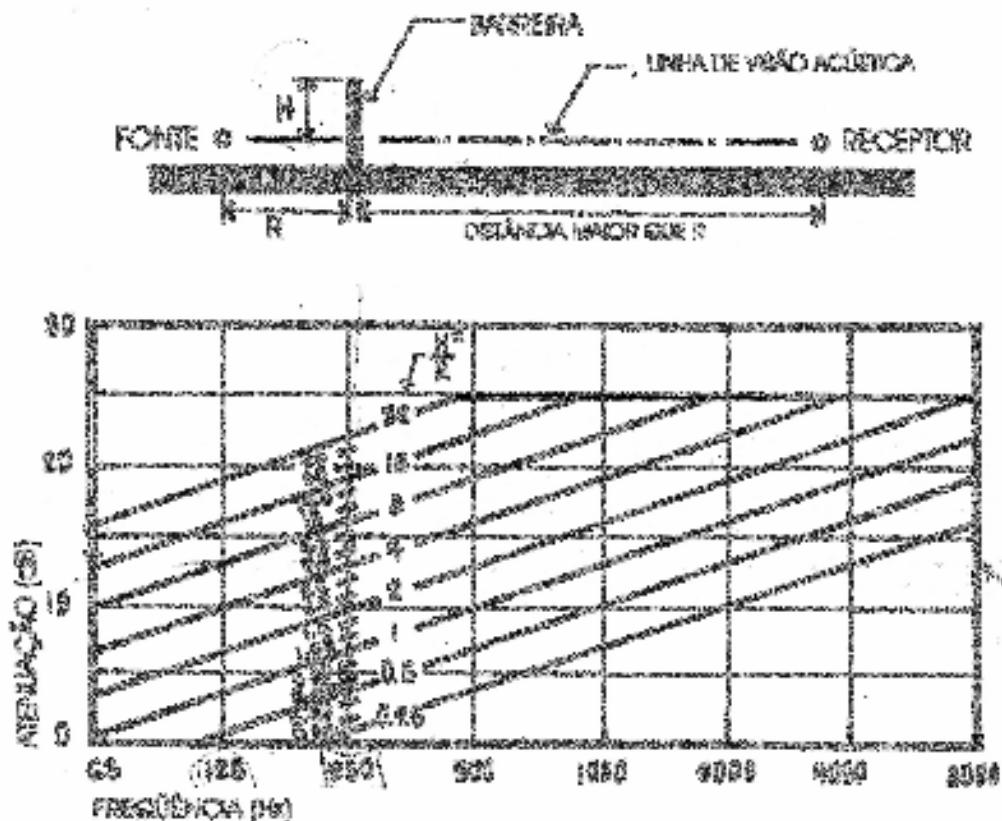


Figura 75 Cálculo de barreira, segundo método usado por Egan.

Fonte: Adaptado de Egan (1988).

3.4 Desempenhos acústicos dos principais materiais

Conforme descrito anteriormente, a barreira acústica urbana funciona como interceptadora dos raios sonoros que, em sua ausência, atingiriam diretamente o receptor. Assim, a atuação de uma barreira, como atenuador sonoro, se dá ou por reflexão ou por absorção dos raios sonoros incidentes sobre ela. O que faz com que uma barreira seja um bom absorvente acústico ou um bom isolante acústico é a escolha dos materiais que serão aplicados tanto nas estruturas como nos revestimentos destas barreiras.

No caso da reflexão sonora, a energia incidente sobre a barreira retorna imediatamente para o mesmo lado da fonte, poupando o lado do receptor, o que garante um bom isolamento acústico na barreira. Porém este método pode aumentar a intensidade do ruído no lado da fonte sonora, de forma que se não houver do outro lado da via algum elemento absorvente, esta pista pode se tornar um produtor de ruído ainda mais intenso (VER FIGURA 63).

Na barreira instalada na rodovia dos Bandeirantes, em São Paulo, a existência de um talude coberto com grama no lado oposto ao da barreira, vide figura 76, contribui muito na atenuação dos raios sonoros refletidos pela barreira, diminuindo, assim, o ruído resultante na rodovia.



Figura 76 Talude paralelo a barreira instalada na rodovia dos Bandeirantes, em São Paulo.

Fonte: Foto da autora (2006).