

AUT0278 - Desempenho Acústico, Arquitetura e Urbanismo



Ruído e Acústica Urbana

e-mail: aut278.2018@gmail.com

Acústica Urbana

- Ambiente urbano:
 - composto de espaços construídos que são acusticamente ricos.



- Espaços urbanos:
 - são estruturas complexas:
 - diversidade de fontes de ruído,
 - diversidade de usos (atividade),
 - as intervenções são complexas,
 - a percepção de benefícios de intervenção não é imediata,
 - os custos (financeiros e funcionais) podem ser elevados.

Acústica Urbana

- A concepção dos espaços urbanos precisa ser gerenciada cuidadosamente a fim de possibilitar a criação de ambientes sonoros agradáveis, capazes de nos proteger dos ruídos indesejáveis, que geram incômodos e acarretam danos à saúde.



Crítérios para avaliação de ruído:

- Vários países têm suas próprias normas e recomendações sobre índices e níveis de ruído para vários tipos de ambientes.



Crítérios utilizados no Brasil:

Avaliação do Ruído

Legislação e Normas Técnicas



Avaliação de ruído: Norma Regulamentadora NR 15 -
Ministério do Trabalho - Atividades e Operações Insalubres

Anexo 1 da NR15:

- Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente:

Nível de ruído [dB(A)]	Máxima exposição diária permissível	Fator de dobra 5
85	8 horas	
90	4 horas	
95	2 horas	
100	1 hora	
105	30 minutos	
110	15 minutos	
115	7 minutos	
120	3 minutos	

Avaliação de ruído: Norma Regulamentadora NR 15 - Ministério do Trabalho - Atividades e Operações Insalubres

▪ Anexo 1 da NR15

LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE

NÍVEL DE RUÍDO dB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Avaliação de ruído: Norma Regulamentadora NR 15 - Ministério do Trabalho - Atividades e Operações Insalubres

▪ Anexo 1 da NR15

- Limites de tolerância para **ruídos de impacto** (NR15).

Limite de Tolerância: 130 dB

(em dB linear)

Pode provocar ruptura de tímpano

Legislação Federal de Ruído no Brasil:

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente) -
Resolução Conama 001 e 002 de 17 de agosto de 1990.

Resolução CONAMA nº 1/90: Estabelece critérios, padrões, diretrizes e normas reguladoras da poluição sonora.

Resolução CONAMA nº 2/90: Estabelece normas, métodos e ações para controlar o ruído excessivo que possa interferir na saúde e bem-estar da população.

Medições e índices de acordo com as
normas ABNT NBR 10151 e NBR 10152.



Avaliação do Ruído - Normas Brasileiras:

Normas técnicas ABNT NBR 10151 e 10152:

- processos de revisão pela ABNT
(Associação Brasileira de Normas Técnicas).

- NBR 10151 – *Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto das comunidades - Procedimento, 2000.*

- ~~NBR 10152 – *Níveis de ruído para conforto acústico, 1987.*~~

- NBR 10152 – *Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações, 2017.*



NBR 10151 - *Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento:*



ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 28º andar
CEP 20003-900 – Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro – RJ
Tel.: PABX (21) 210-3122
Fax: (21) 220-1762/220-6436
Endereço eletrônico:
www.abnt.org.br

Copyright © 2000,
ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas
Printed in Brazil
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

JUN 2000

NBR 10151

Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento

Origem: Projeto NBR 10151:1999
ABNT/CB-02 - Comitê Brasileiro de Construção Civil
CE-02:135.01 - Comissão de Estudo de Desempenho Acústico de Edificações
NBR 10151 - Acoustics - Evaluation of noise in inhabited areas aiming the comfort of the community - Procedure
Descriptors: Acoustics. Noise
Esta Norma substitui a NBR 10151:1987
Válida a partir de 31.07.2000
Incorpora a Errata nº 1 de JUN 2003

Palavras-chave: Acústica. Ruído

4 páginas

NBR 10151 - *Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento:*

- Fixa níveis de aceitabilidade de ruído em comunidades (níveis de critério de avaliação)
- Determina o procedimento de medição do ruído.



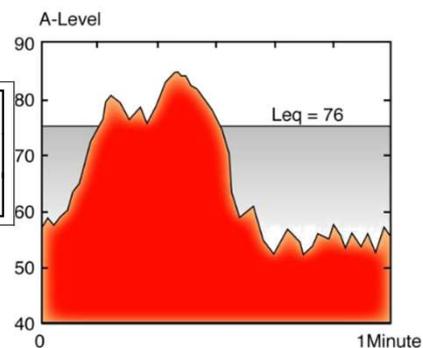
NBR 10151 - Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento:

- Define o parâmetro:

L_{Aeq} (nível de pressão sonora equivalente ponderado em A):

É o ruído contínuo equivalente durante um certo intervalo de tempo.

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_A(t)/10} dt \right]$$



NBR 10151 - Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento:

- A duração do ruído deve ser avaliada sobre um período de tempo relevante, como por exemplo, “o período diurno e período noturno”.
- Pode ser definido pelas autoridades locais de acordo com os hábitos da população.
- Recomenda-se usar a faixa das **7 h às 22 h para o período diurno** e a faixa das **22 h às 7 h para o período noturno**.



6.2.2 Os limites de horário para o período diurno e noturno da tabela 1 podem ser definidos pelas autoridades de acordo com os hábitos da população. Porém, o período noturno não deve começar depois das 22 h e não deve terminar antes das 7 h do dia seguinte. Se o dia seguinte for domingo ou feriado o término do período noturno não deve ser antes das 9 h.



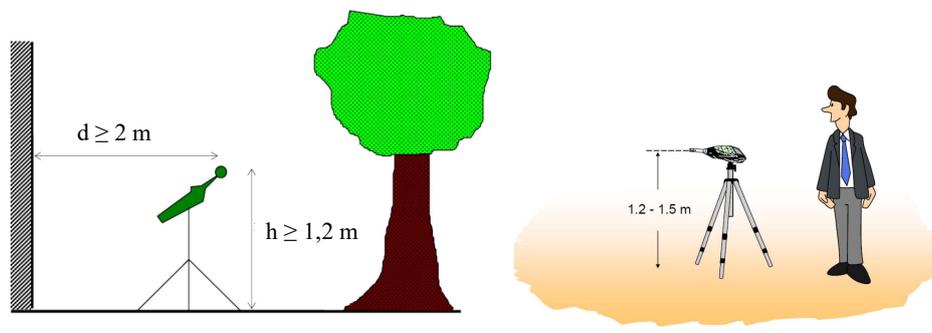
NBR 10151 - *Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento:*

Indicadores de ruído ambiente:

- L_d → L_{Aeq} no **período diurno** (07:00 h – 22:00h)
- L_n → L_{Aeq} no **período noturno** (22:00 h – 07:00h)

NBR 10151 - *Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento:*

- No exterior das edificações, as medições devem ser efetuadas em pontos afastados aproximadamente 1,2 m do piso e pelo menos 2 m do limite da propriedade e de quaisquer outras superfícies refletoras, como muros, paredes etc.



***NBR 10151 - Avaliação de ruído em áreas habitadas,
visando o conforto da comunidade - Procedimento:***

Tabela 1 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A)

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Problemas:

“Se o nível de ruído ambiente for superior ao da Tabela 1 para a área e o horário em questão, o NCA assume o valor do nível de ruído ambiente.”

Método de medição – precisou ser revisto.

Projeto em Consulta Nacional	 <p>ABNT/CB-002 2º PROJETO DE REVISÃO ABNT NBR 10151 DEZ 2017</p>	
	<p>Acústica — Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — Aplicação de uso geral</p> <p><i>Acoustics — Measurement and evaluation of sound pressure levels in inhabited environments — Application for general use</i></p> <p>Prefácio</p> <p>A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas pelas partes interessadas no tema objeto da normalização.</p> <p>Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da ABNT Diretiva 2.</p> <p>A ABNT chama a atenção para que, apesar de ter sido solicitada manifestação sobre eventuais direitos de patentes durante a Consulta Nacional, estes podem ocorrer e devem ser comunicados à ABNT a qualquer momento (Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996).</p> <p>Ressalta-se que Normas Brasileiras podem ser objeto de citação em Regulamentos Técnicos. Nestes casos, os órgãos responsáveis pelos Regulamentos Técnicos podem determinar outras datas para exigência dos requisitos desta Norma.</p> <p>A ABNT NBR 10151 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Construção Civil (ABNT/CB-002), pela Comissão de Estudo de Desempenho Acústico de Edificações (CE-002-135.001). O seu 1º Projeto de Revisão circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 10, de 11.10.2012 a 10.12.2012. O seu 2º Projeto de Revisão circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº XX, de DD.MM.AAAA a DD.MM.AAAA.</p> <p>Esta segunda edição cancela e substitui a edição anterior (ABNT NBR 10151:2000 Versão corrigida 2003), a qual foi tecnicamente revisada.</p> <p>O Escopo em inglês desta Norma Brasileira é o seguinte:</p> <p>Scope</p> <p><i>This Standard establishes:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> — procedure for measure and evaluate of outdoor sound pressure levels, as a function of land occupation and use; — procedure for measure and evaluate of sound pressure levels inside buildings arising from airborne and structural transmission from sound sources; — procedure for evaluating of total, specific and residual sound; 	

NBR 10151 - *Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — Aplicação de uso geral*

Esta Norma estabelece:

- procedimento para medição e avaliação de níveis de pressão sonora em ambientes externos às edificações, em função da finalidade de uso e ocupação do solo;
- procedimento para medição e avaliação de níveis de pressão sonora em ambientes internos às edificações provenientes de transmissão sonora aérea e de vibração da estrutura de uma edificação;
- procedimento para avaliação de som total, específico e residual;
- procedimento para avaliação de som tonal, impulsivo, intermitente e contínuo;
- limites de níveis de pressão sonora para ambientes externos às edificações, em áreas destinadas a à ocupação humana, em função da finalidade de uso e ocupação do solo.

NBR 10151 - *Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — Aplicação de uso geral*

Esta Norma não se aplica a:

- avaliação do nível de exposição ocupacional;
- equipamentos prediais e hidrossanitários de uma edificação. Nestes casos, devem ser aplicadas Normas Brasileiras específicas;
- medição e avaliação de impacto ambiental decorrente do uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas, as quais são executadas conforme a ABNT NBR 9653;
- medição e avaliação de níveis de pressão sonora decorrentes de sistemas de transporte (aeroviário, aquaviário, ferroviário, metroviário e rodoviário), as quais são executadas conforme a ABNT NBR 16425 (todas as partes).

NBR 10151 - Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — Aplicação de uso geral

$L_{Aeq,T}$ (nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderada em A), expresso em dB:

Tabela 3 – Limites de níveis de pressão sonora em função dos tipos de áreas habitadas e do período

Tipos de áreas habitadas	RL _{Aeq} Limites de níveis de pressão sonora	
	Período diurno	Período noturno
Área de residências rurais	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista predominantemente residencial	55	50
Área mista com predominância de atividades comerciais e/ou administrativa	60	55
Área mista com predominância de atividades culturais, lazer e turismo	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

9.1 Períodos/horários

Os limites de horário para o período diurno e noturno da Tabela 3 podem ser definidos pelas autoridades de acordo com os hábitos da população. Porém, o período noturno não deve começar depois das 22 h e não deve terminar antes das 7 h do dia seguinte. Se o dia seguinte for domingo ou feriado, o término do período noturno não deve ser antes das 9 h.

NBR 10152 - Níveis de ruído para conforto acústico:



ABNT-Associação
Brasileira de
Normas Técnicas

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13 - 29º andar
CEP 20003-900 - Caixa Postal 1680
Rio de Janeiro - RJ
Tel.: PABX (021) 210-3122
Fax: (021) 220-1762/220-6436
Endereço Telegráfico:
NORMATECNICA

Copyright © 1987
ABNT - Associação Brasileira de
Normas Técnicas
Rio de Janeiro
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

DEZ 1987

NBR 10152

Níveis de ruído para conforto acústico

Foi revisada e substituída!

Processamento

Origem: Projeto NB-95/1986
CE-00:001.06 - Comissão de Estudo de Acústica
GT-1 - Especificações Acústicas
NBR 10152 - Acoustics - Loud levels for acoustical comfort - Procedure
Descriptors: Loud. Highest level. Accoustical comfort
Incorpora Errata, de JUN 1992
Reimpressão da NB-95, de MAR 1987

Palavras-chave: Ruído. Níveis máximos. Conforto acústico

4 páginas

NBR 10152 – Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações

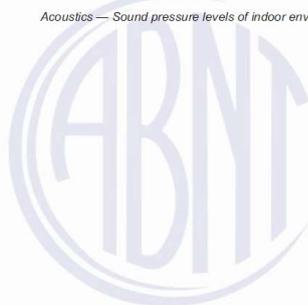
NORMA
BRASILEIRA

ABNT NBR
10152

Segunda edição
24.11.2017

Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações

Acoustics — Sound pressure levels of indoor environments



NBR 10152

- apresenta valores de referência para ambientes internos de uma edificação de acordo com suas finalidades de uso

Finalidade de uso	Valores de referência		
	RL_{Aeq} (dB)	RL_{ASmax} (dB)	RL_{NC}
Residências			
Dormitórios	35	40	30
Salas de estar	40	45	35
Salas de cinema em casa (<i>home theaters</i>)	40	45	35
Outros			
Auditórios grandes (> 600 m ³)	30	35	25
Auditórios pequenos (≤ 600 m ³)	35	40	30
Cozinhas e lavanderias	50	55	45
Tribunais	40	45	35

NOTA O valor de RL_{Aeq} para dormitório é compatível a faixa estabelecida na ABNT NBR 10152:1987 e também para a condição de L_{Aeq} de até 65 dB em áreas externas urbanas para o período diurno e 55 dB para o período noturno, estabelecida na ABNT NBR 10151:2000, considerado o desempenho mínimo previsto pela ABNT NBR 15575-4:2013 de 25 dB para isolamento de fachada em regiões Classe II (ver [2], [3] e [4]).

Tabela 3 – Valores de referência para ambientes internos de uma edificação de acordo com suas finalidades de uso (continua)

Finalidade de uso	Valores de referência		
	RL_{Aeq} (dB)	RL_{ASmax} (dB)	RL_{NC}
Aeroportos, estações rodoviárias e ferroviárias			
Áreas de <i>check-in</i> , bilheterias	45	50	40
Salas de embarque e circulações	50	55	45
Centros comerciais (<i>shopping centers</i>)			
Circulações	50	55	45
Lojas	45	50	40
Praças de alimentação	50	55	45
Garagens	55	60	50
Clínicas e hospitais			
Berçários	35	40	30
Centros cirúrgicos	35	40	30
Consultórios	35	40	30
Enfermarias	40	45	35
Laboratórios	45	50	40
Quartos coletivos	40	45	35
Quartos individuais	35	40	30
Salas de espera	45	50	40

Gestão e Controle de Ruído

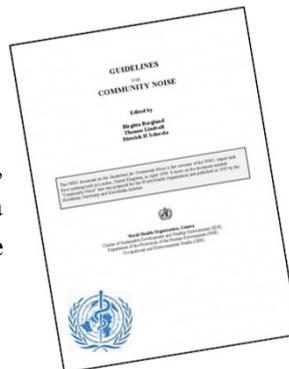
Um grande problema no Brasil...

- Não há uma política para **controle de poluição sonora** e nem para **gestão e controle de ruído**.



Gestão e Controle de Ruído

- O documento “*Guidelines for Community Noise*”, formulado em 1990, da Organização Mundial da Saúde, destaca a **importância do gerenciamento e controle de ruído em países em desenvolvimento**.



- O gerenciamento de ruído já é feito em **países desenvolvidos** há algumas décadas.
 - Green Paper (*Commission of the European Communities*, 1996)
 - Diretiva Europeia 2002/49/CE (Parlamento Europeu, 2002)
 - Regulamento Geral de Ruído (RGR)

Marcos que tornaram o gerenciamento de ruído excessivo e sua mitigação obrigatórios na Europa.

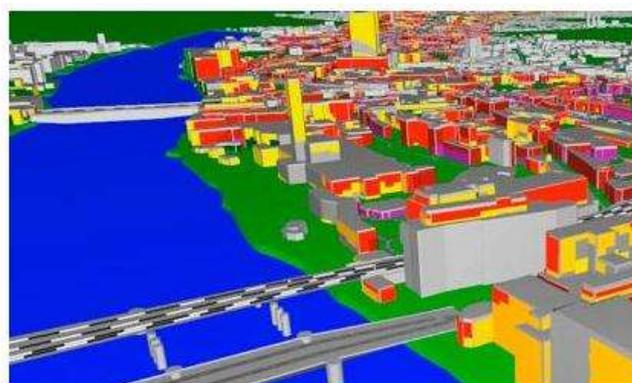
Gestão e Controle de Ruído

- A Diretiva Europeia 2002/49/EC possui três partes principais:
 - mapeamento de ruído (obrigatório para cidades acima de 250 mil habitantes),
 - um programa de ações e metas para combate à poluição sonora, e
 - um sistema de informação ao público.
- América do Sul: programas em Santiago (Chile), Bogotá (Colômbia) e Buenos Aires (Argentina).
- Brasil: apenas um programa de mapeamento oficial, o da cidade de Fortaleza, algumas iniciativas de pesquisas em cidades como Florianópolis, Belém, Rio de Janeiro, Curitiba e Aracaju. E uma novidade: desde 2016 em São Paulo!

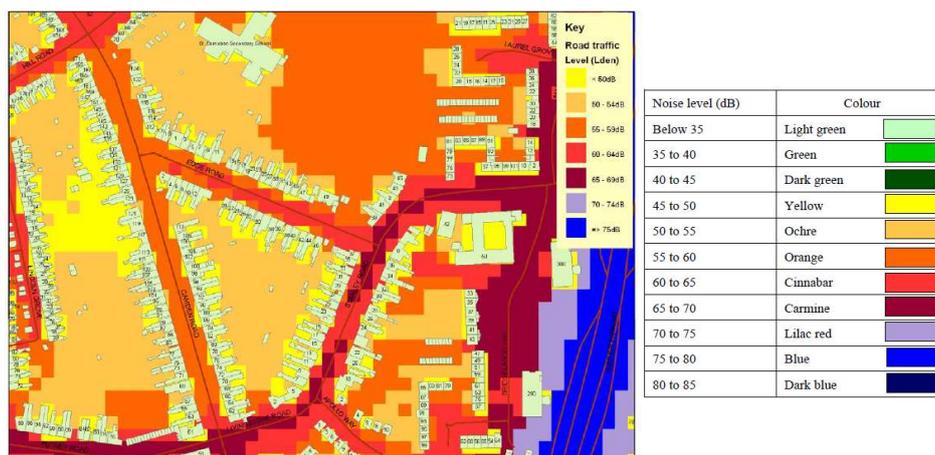
Avaliação do Ruído

- A principal ferramenta para o diagnóstico da distribuição e quantificação do ruído em áreas determinadas são os

Mapas Acústicos ou Mapas de Ruído



Mapa Acústico ou Mapa de Ruído



- fornece informação visual do comportamento acústico de uma área geográfica, num determinado momento.

O quê num mapa de ruído?

- diferentes fontes de ruído

- tráfego rodoviário
- tráfego ferroviário
- tráfego aéreo
- indústria
- entretenimento e lazer

- usos do solo

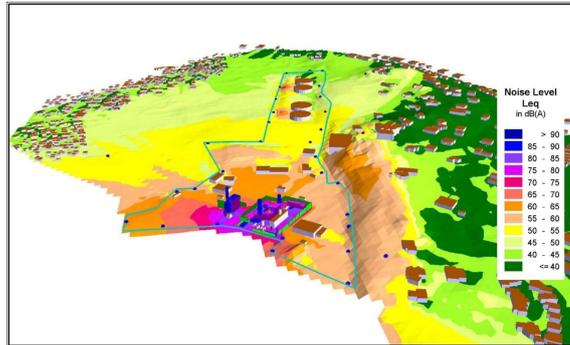
- ocupação humana

- terrenos

- objetos

- edificações

- outras construções (muros, pontes, viadutos)



Avaliação de Ruído - Mapas de Ruído

- Servem para:

- determinar o número de pessoas e de habitações em uma zona específica expostas a determinados níveis de ruído.

- identificar onde e em qual intensidade estão as pessoas expostas a níveis excessivos de ruído,

- auxiliar no projeto de soluções mitigadoras do problema.

- ferramenta de apoio às decisões de planejamento e ordenamento urbano com relação à gestão de ruído na cidade.

- Elaborados a partir de:

- medições,

- modelos matemáticos preditivos,

- ou uma combinação de ambos.



Mapas de Ruído - Metodologia recomendada

- Modelo **previsional** implementado em computador

Alguns *softwares*:

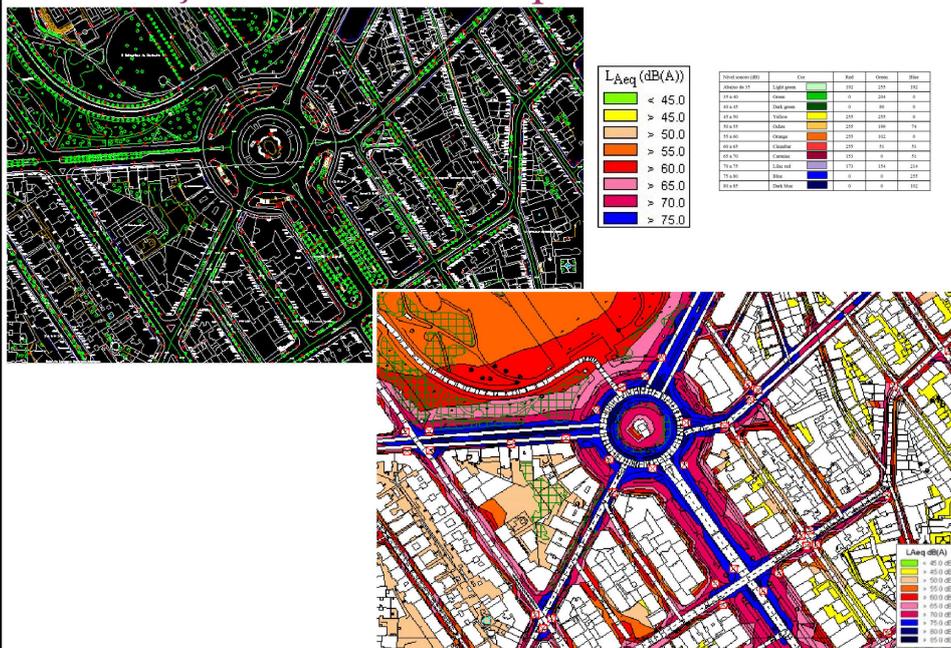
Cadna A (Datakustik)

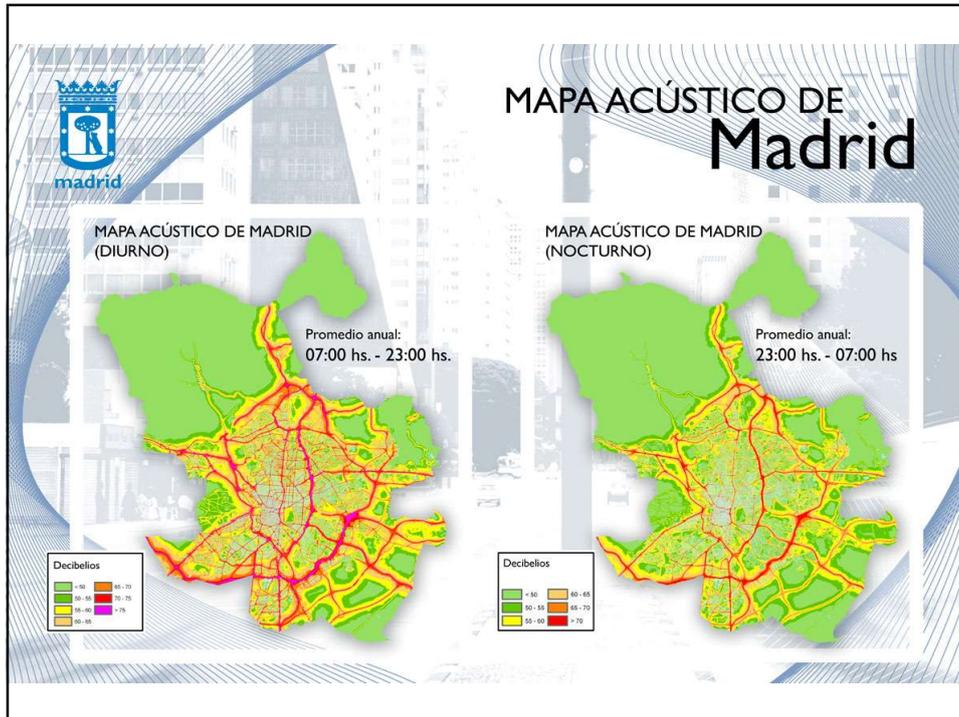
Predictor-LimA (Bruel & Kjaer)

SoundPlan (Braunstein + Berndt)

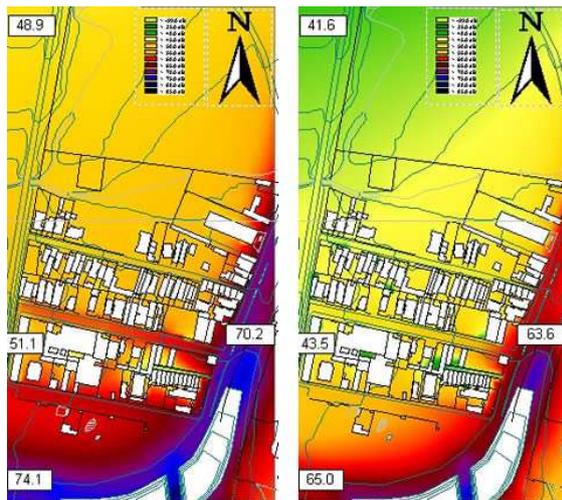
- Para a construção do modelo acústico, são necessários os **dados de entrada**.
- Validação do modelo através de **medições acústicas**.

Avaliação de Ruído - Mapas de Ruído





Avaliação de Ruído - Mapas de Ruído



No Brasil, Fortaleza tomou a iniciativa, por meio da Secretaria do Meio Ambiente, e foi a primeira cidade brasileira a ter sua Carta Acústica, apresentada em setembro de 2012.

Mapa sonoro do aeroporto de Fortaleza: períodos diurno e noturno.

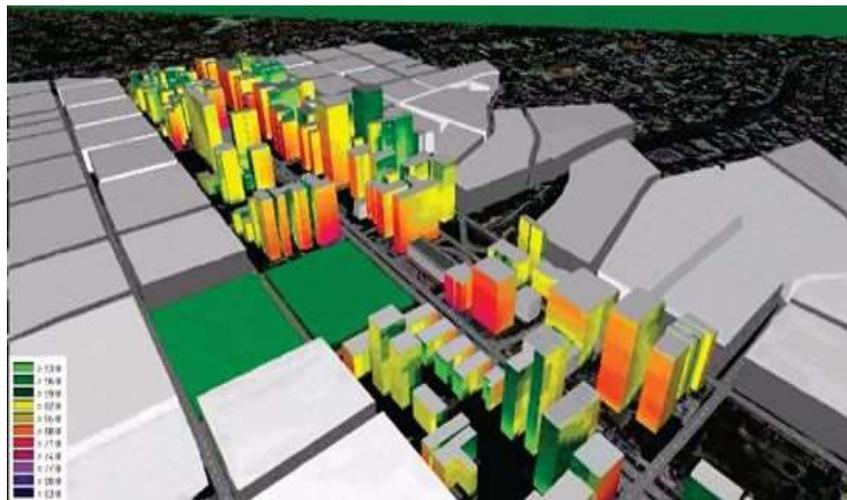
Mapa de Ruído Urbano da Cidade de SP

- Lei 16.499/2016, que estabelece o Mapa de Ruído em São Paulo:

- Em um prazo de sete anos a Prefeitura de São Paulo (o Poder Executivo Municipal) terá que desenvolver e implantar o Mapa de Ruído Urbano da cidade.



Avaliação de Ruído - Mapas de Ruído



Mapa sonoro da Avenida Paulista feito a partir de medições.

www.mapaderuidosp.org.br

Mapa de ruído urbano - Projeto Piloto SP – localizado entre as
Av. Paulista, Av. Brasil, Av. 9 de Julho e Av. 23 de Maio.

Dia



Noite



Gestão e Controle de Ruído Urbano

- O **mapeamento acústico** das cidades é apenas o primeiro passo para o início de um processo de gestão de ruídos urbanos.
- É uma tarefa difícil, pois é preciso existir “vontade política”.

Na Europa, esta iniciativa não partiu dos municípios, mas sim da imposição do Parlamento Europeu com a Diretiva Europeia.

- Precisamos pensar nas cidades.



- Temos planejadores urbanos.
- Onde estão os **planejadores sonoros urbanos**?

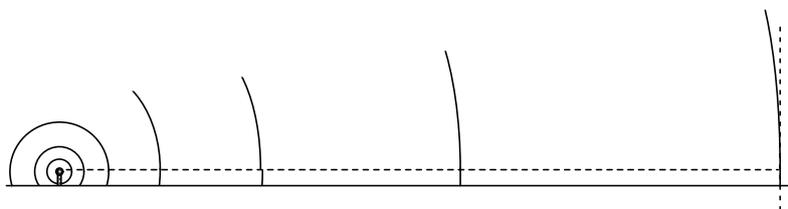
FUTURO!

Propagação do som ao ar livre

Propagação do som ao ar livre

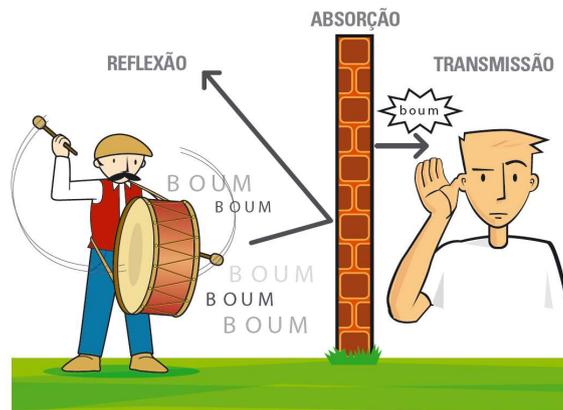
Como o som se propaga?

- A energia sonora gerada pela fonte sonora diminui com a distância da fonte até o receptor, propagando-se até atingir um obstáculo.



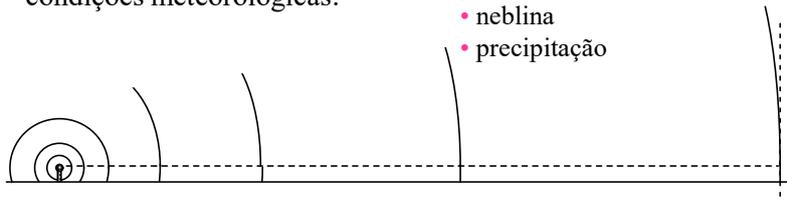
Como o som se propaga?

- Quando o som atinge um obstáculo, uma parte é refletida, outra é absorvida, dissipando-se sob a forma de calor, e outra é transmitida através do obstáculo.

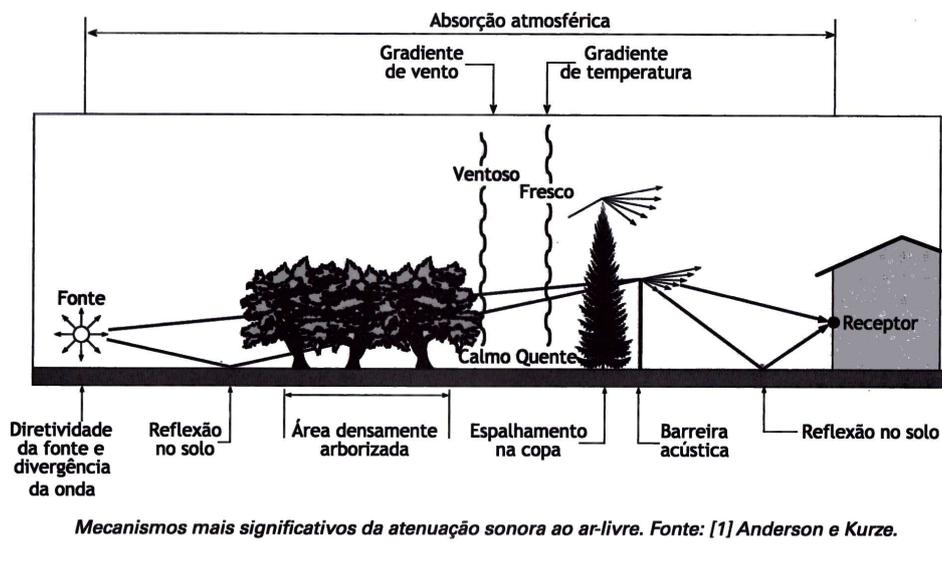


Principais mecanismos de atenuação sonora ao ar livre

- A propagação do som ao ar livre é afetada pela atenuação sonora ao longo do caminho de transmissão:
 - Atenuação ao se propagar ao ar livre
 - distância percorrida (distância fonte – receptor)
 - direcionalidade da fonte
 - existência de barreiras acústicas ou obstáculos (naturais ou artificiais, por exemplo: muros, edifícios)
 - tipo e topografia do solo, terreno
 - vegetação
 - absorção sonora do ar atmosférico
 - condições meteorológicas:
 - variação de temperatura
 - variação de umidade relativa do ar
 - direção e velocidade do vento
 - neblina
 - precipitação



Principais mecanismos de atenuação sonora ao ar livre



Como estimar a propagação sonora ao ar livre?

- Através de relações entre a potência (W) das fontes sonoras, níveis de pressão sonora no receptor e a influência dos caminhos de propagação sonora.
- Análise de campo acústico em uma comunidade.

Equação básica da propagação sonora ao ar livre

$$NPS(r, \theta) = NWS - 20 \log r + DI_{\theta} - 10 \log \frac{\Omega}{4\pi} - A_{combinada} - 11 \text{ dB}$$

$NPS(r, \theta)$ → nível de pressão sonora à distância r e direção θ da fonte.

NWS → nível de potência sonora (característica da fonte).

DI_{θ} → índice de direcionalidade da fonte na direção θ , em dB.

Ω → ângulo sólido disponibilizado para a fonte para livre propagação.

$A_{combinada}$ → inclui:

- atenuação sonora do ar atmosférico (absorção do ar); 
- atenuação sonora do solo; 
- atenuação de barreiras acústicas; 
- atenuação de edificações; 
- atenuação de vegetação densa; 
- amplificação sonora causada pela reverberação urbana; 
- efeitos de variações de temperatura e de velocidade do vento. 

Atenuação do ruído com a distância

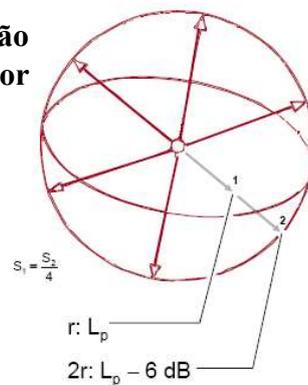
• Fonte Pontual

- Uma fonte sonora pontual irradia energia sonora de forma mais ou menos idêntica em todas as direções (propagação radial, por ondas sonoras esféricas).

- Para uma fonte sonora pontual, a **atenuação sonora é da ordem de 6 dB(A) por duplicação da distância à fonte.**

- Intensidade: inversamente proporcional ao quadrado da distância.

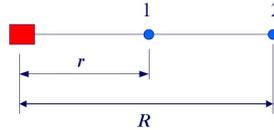
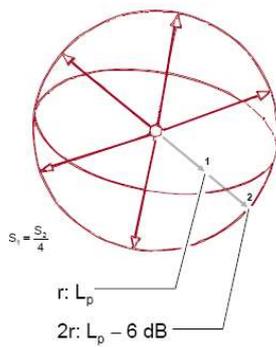
$$\frac{I_r}{I_R} = \frac{R^2}{r^2}$$



Atenuação do ruído com a distância

- **Fonte Pontual**

- Diferença do nível de pressão sonora entre dois pontos:



$$NPS_r - NPS_R = 10 \log \left(\frac{R^2}{r^2} \right)$$

$$NPS_r - NPS_R = 20 \log \left(\frac{R}{r} \right)$$

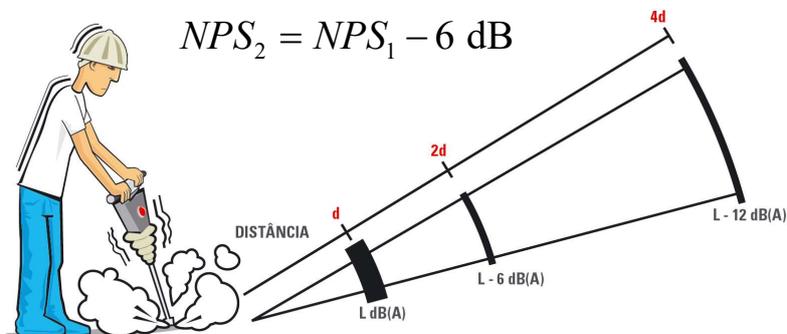
Atenuação do ruído com a distância

- **Fonte Pontual**

- Caso especial: Se $R = 2r$:

$$NPS_1 - NPS_2 = 20 \log \left(\frac{R}{r} \right) = 20 \log \left(\frac{2r}{r} \right) = 20 \log(2)$$

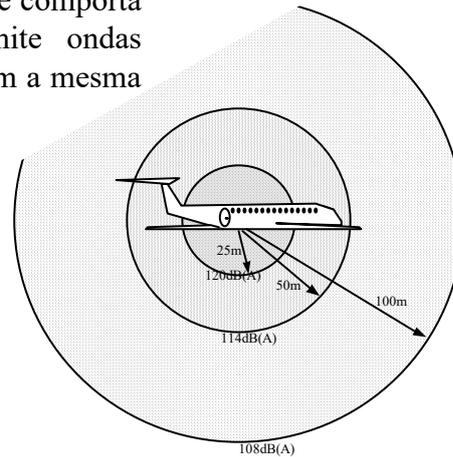
$$NPS_2 = NPS_1 - 6 \text{ dB}$$



Atenuação do ruído com a distância

• Fonte Pontual

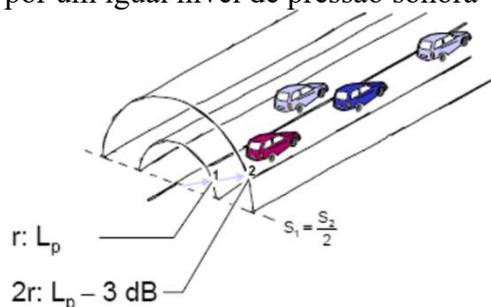
- Em termos de ruído de tráfego rodoviário, admitimos que um veículo que se comporta como uma fonte pontual, emite ondas sonoras em todas as direções com a mesma amplitude.



Atenuação do ruído com a distância

• Fonte Linear

- Uma fonte sonora linear irradia energia sonora de forma cilíndrica (propagação num plano perpendicular à fonte segundo circunferências que aumentam de raio com o tempo, afastando-se do eixo desta).
- O som se propaga em superfícies semi-cilíndricas que envolvem a fonte e que se caracterizam por um igual nível de pressão sonora (ondas sonoras cilíndricas).
- Uma estrada pode ser considerada uma fonte sonora linear se nela circular um grande número de veículos em fila contínua.



Atenuação do ruído com a distância

- **Fonte Linear**

- Para uma fonte sonora linear, a **atenuação sonora é da ordem de 3 dB(A) por duplicação da distância à fonte.**

- Intensidade: inversamente proporcional à distância: $\frac{I_r}{I_R} = \frac{R}{r}$

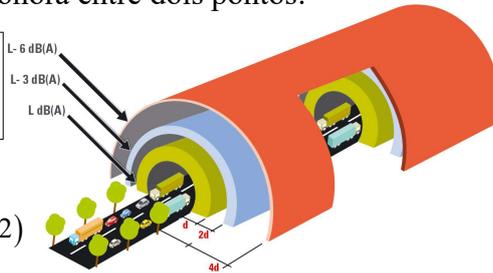
- Diferença do nível de pressão sonora entre dois pontos:

$$NPS_r - NPS_R = 10 \log \left(\frac{R}{r} \right)$$

- Caso especial: Se $R = 2r$:

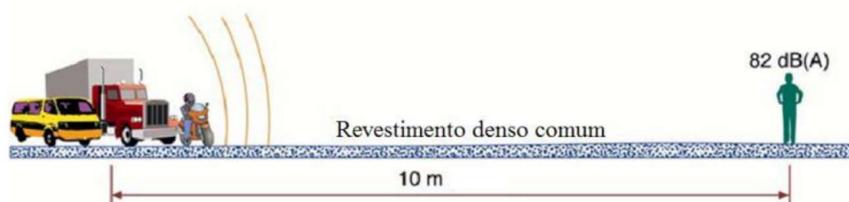
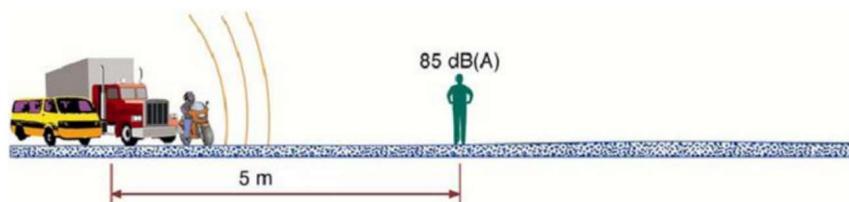
$$NPS_r - NPS_R = 20 \log \left(\frac{2r}{r} \right) = 20 \log(2)$$

$$NPS_R = NPS_r - 3 \text{ dB}$$



Atenuação do ruído com a distância

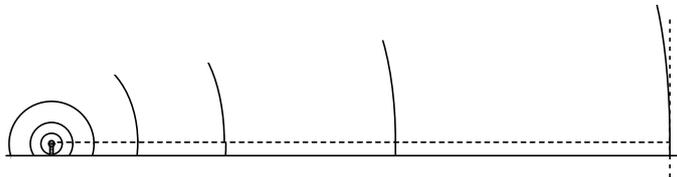
- **Fonte Linear**



Atenuação do ruído com a distância

• Fonte Plana

- É a fonte menos usual, dentre as três, sendo aquela em que não há dissipação de energia sonora com o aumento da distância à fonte.
- A onda não muda de geometria ao avançar: as superfícies de onda constituem planos paralelos sempre com a mesma área, e o nível de pressão é independente da distância.
- Ondas esféricas e cilíndricas comportam-se como ondas planas, quando o receptor se situa a grandes distâncias da fonte.



• Exemplo 01:

- Um policial mede o nível de pressão sonora a uma distância de 7,5 m de uma linha de tráfego numa estrada e encontra 80 dB. Qual deveria ser o nível a uma distância de 75 m da linha de tráfego supondo a leitura:
 - a) como uma fonte isolada
 - b) como uma fonte linear

• **Exemplo 01:**

$$r = 7,5 \text{ m}$$

$$NPS_r = 80 \text{ dB}$$

$$R = 75 \text{ m}$$

$$NPS_R = ?$$

a) $NPS_r - NPS_R = 20 \log(R/r)$

$$80 - NPS_R = 20 \log(75/7,5)$$

$$80 - NPS_R = 20 \log(10)$$

$$NPS_R = 80 - 20 \cdot (1)$$

$$NPS_R = 60 \text{ dB}$$

b) $NPS_r - NPS_R = 10 \log(R/r)$

$$80 - NPS_R = 10 \log(75/7,5)$$

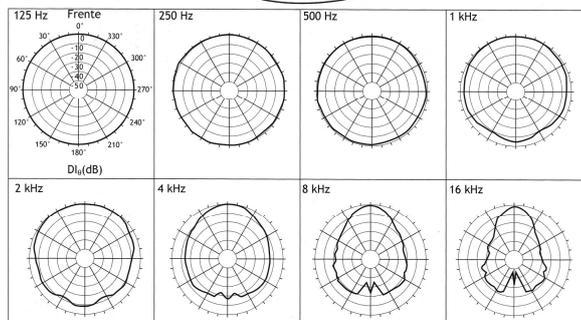
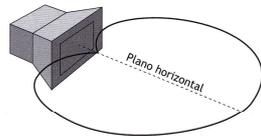
$$80 - NPS_R = 10 \log(10)$$

$$NPS_R = 80 - 10 \cdot (1)$$

$$NPS_R = 70 \text{ dB}$$

Direcionalidade da fonte sonora

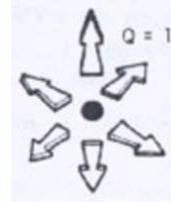
- Índices de direcionalidade são normalmente apresentados em diagramas polares.
- Diagramas polares de índices de direcionalidade de um alto falante no plano horizontal em função de θ , nas bandas de 125 Hz a 16 kHz:



- Observa-se que o alto falante é mais direcional nas altas frequências (característica comum a muitas fontes sonoras).

Direcionalidade da fonte sonora

- Para fonte omnidirecional (pontual): $DI_{\theta} = 0$
- Para fonte omnidirecional (pontual), longe de superfícies refletoras: $DI_{\theta} = 0 \quad \Omega = 4\pi$



- **Equação básica para uma fonte omnidirecional em campo livre:**

$$NPS = NWS - 20 \log r - 11 \text{ dB}$$

onde:

NPS é o nível de pressão sonora (dB).

r é a distância da fonte ao receptor (m).

NWS é o nível de potência sonora (dB).

• *Exemplo 02:*

- O nível de potência sonora de um jato voando a uma altitude de 1 km é de 160 dB. Encontre o nível de pressão sonora máximo no chão diretamente abaixo da rota do vôo assumindo que a aeronave irradia igualmente em todas as direções.

$$r = 1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$$

$$NWS = 160 \text{ dB}$$

$$NPS = ?$$

$$NPS = NWS - 20 \log(r) - 11$$

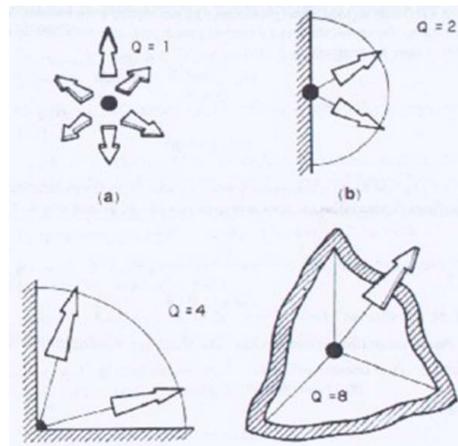
$$NPS = 160 - 20 \log(1000) - 11$$

$$NPS = 160 - 20 \cdot (3) - 11$$

$$NPS = 89 \text{ dB}$$

Ângulo sólido

Efeito da presença de superfície no ângulo para livre propagação:



Ângulo sólido

- Para uma fonte sonora longe do solo:

$$-10 \log \frac{\Omega}{4\pi} = -10 \log \frac{4\pi}{4\pi} = 0 \text{ dB}$$

- **Equação básica para uma fonte sonora direcional em campo livre, longe de superfícies refletoras:**

$$NPS = NWS - 20 \log r + DI_{\theta} - 11 \text{ dB}$$

Ângulo sólido

- Para uma fonte localizada no solo ou próxima dele, a energia sonora estará concentrada no ângulo sólido 2π (semi espaço), que é metade do ângulo sólido 4π (espaço em torno de um ponto). Nesse caso:

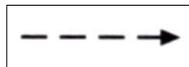
$$-10 \log \frac{\Omega}{4\pi} = -10 \log \frac{2\pi}{4\pi} = +3 \text{ dB}$$

- Para uma fonte localizada próxima ao solo e a uma fachada vertical de edificação:

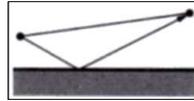
$$-10 \log \frac{\Omega}{4\pi} = -10 \log \frac{\pi}{4\pi} = +6 \text{ dB}$$

Atenuação sonora do ar atmosférico (absorção do ar)

- Atenuação depende da quantidade relativa de vapor de água presente e é aproximadamente proporcional ao quadrado da frequência.
- Há normas específicas para seu cálculo.



Atenuação sonora do solo



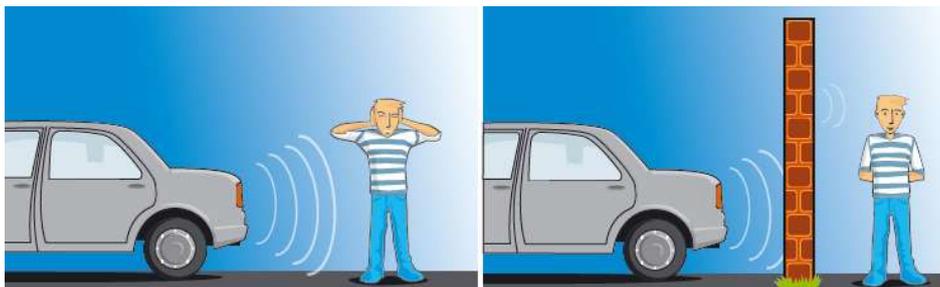
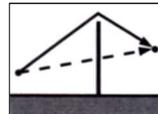
- **Influência da cobertura do solo**

- Para solos acusticamente “duros” (asfalto, terra batida, água, solo inundado, etc):

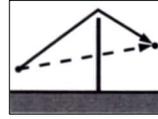
$$\text{ângulo sólido } \Omega = 2\pi \quad -10 \log \frac{2\pi}{4\pi} = +3 \text{ dB}$$

- Para solos acusticamente “macios” (com vegetação, terra arada ou aerada, neve ou outros solos fissurados): há atenuação sonora.

Atenuação de barreiras acústicas



Barreiras Acústicas

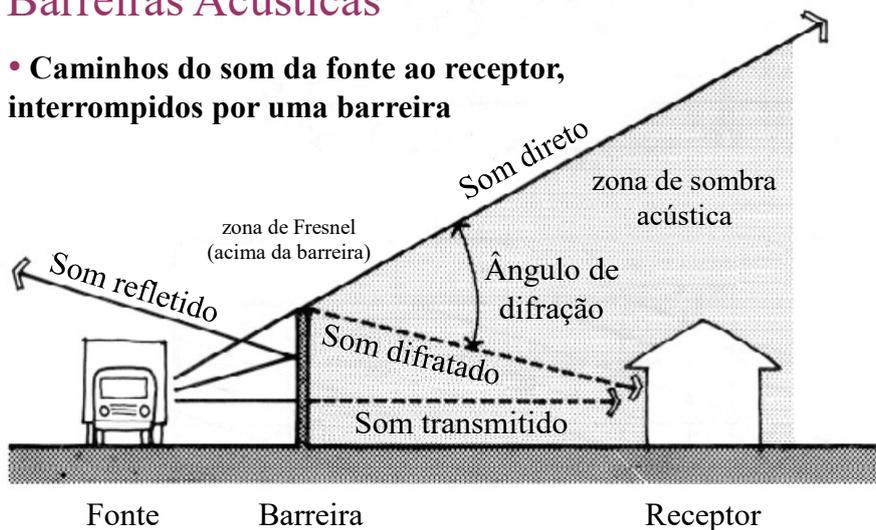


- Barreiras naturais ou artificiais:
 - Qualquer estrutura ou obstáculo entre a fonte e o receptor (já existente e/ou especialmente construído para isso).
 - Aterros, desníveis, taludes já existentes, construções que funcionem como obstáculos à propagação do ruído, etc.



Barreiras Acústicas

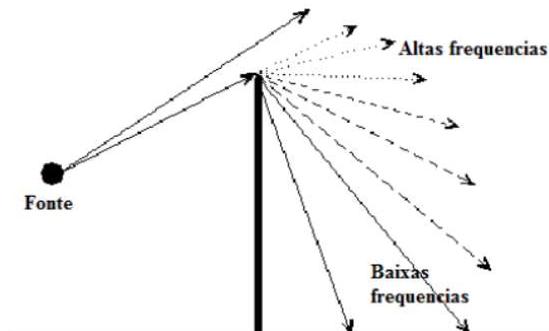
- Caminhos do som da fonte ao receptor, interrompidos por uma barreira



- O som que penetra na zona de sombra acústica tem seu nível reduzido por difração. Essa redução chama-se atenuação da barreira ($A_{barreira}$).

Barreiras Acústicas

- A difração é definida como sendo a modificação de um campo sonoro devido à introdução de um obstáculo dentro deste campo sonoro.
- Quanto maior o ângulo de difração, mais eficiente é a atenuação da barreira.



Barreiras Acústicas

- **Barreiras longas** → barreiras onde a difração sonora no topo (e não nas bordas laterais) é que determina a atenuação por elas conferida.



Barreiras Acústicas

- Redução sonora no caminho de propagação
- Um das principais ferramentas utilizadas em controle de ruído, pois podem bloquear a propagação do som na direção dos receptores expostos a elevados níveis de ruído.



Barreira em madeira de pinho

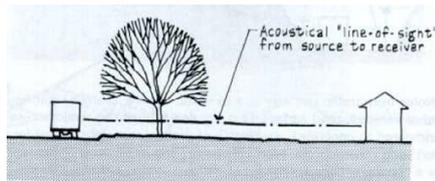


Barreira com painéis metálicos sanduíche: chapas de alumínio com recheio de lã de rocha

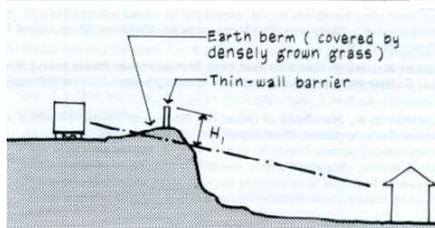
Exemplos de Barreiras Acústicas

Qual é a melhor configuração para proteger a residência do ruído de tráfego?

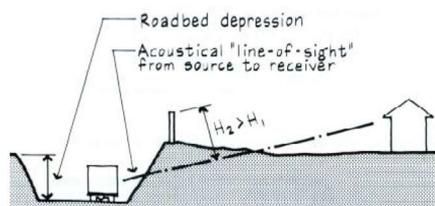
1)



2)

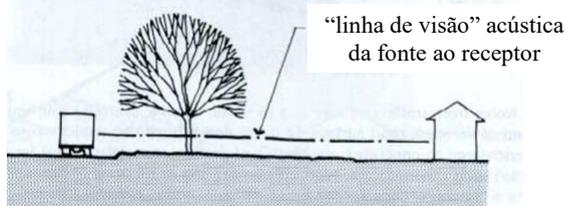


3)

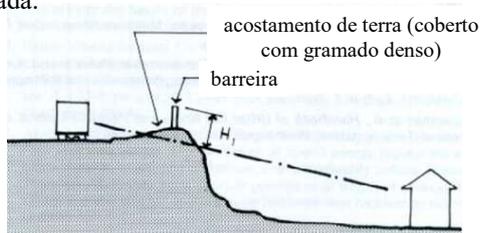


Exemplos de Barreiras Acústicas

- **Pobre:** Largura estreita de árvores pode fornecer proteção visual, mas não acústica.



- **Boa:** Rodovia elevada + acostamento de terra + barreira acústica podem fornecer boa atenuação. Entretanto, rodovias elevadas a mais que 150 m podem produzir quase os mesmos níveis sonoros que rodovias no mesmo nível, porque a linha de visão não será bloqueada.



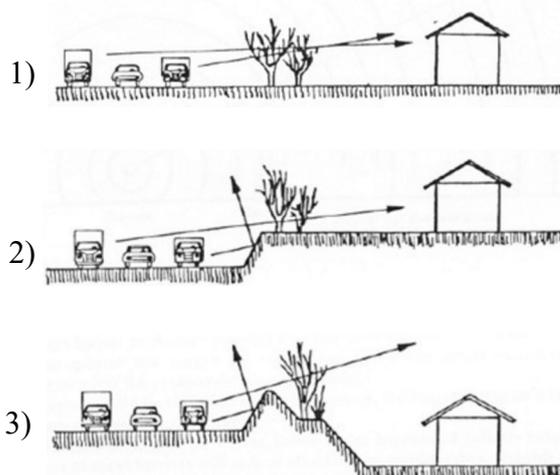
Exemplos de Barreiras Acústicas

- **Melhor:** Vias em depressão, abaixo do nível, podem interromper ainda mais a trajetória do som direto da fonte ao receptor, fornecendo maior atenuação por difração.



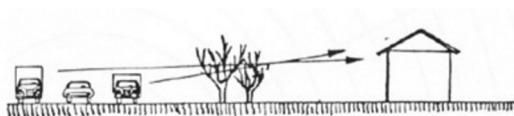
Exemplos de Barreiras Acústicas

Qual é a melhor configuração para proteger a residência do ruído de tráfego?

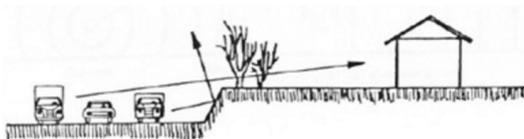


Barreiras Acústicas

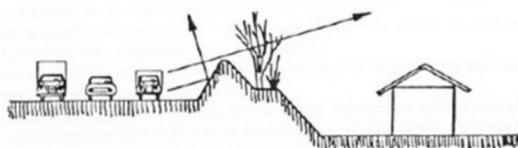
Redução do ruído de tráfego



Pior configuração: paisagem não proporciona proteção sonora.



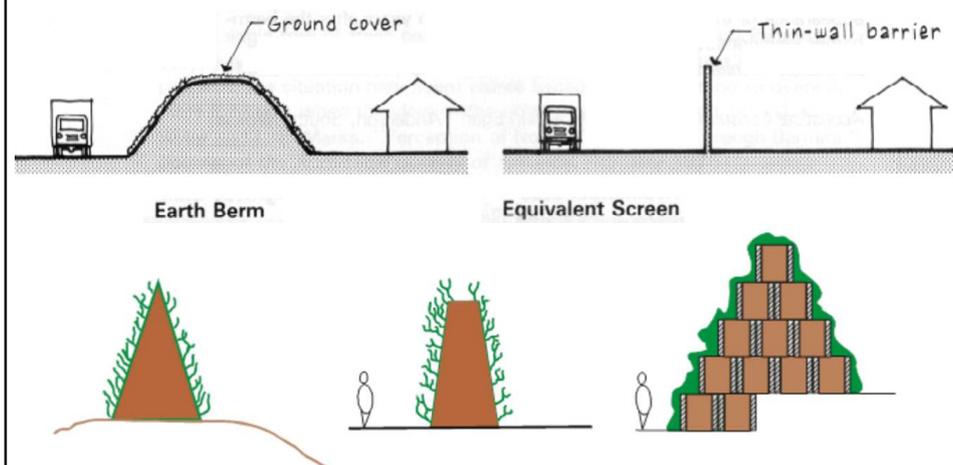
Melhoria no desempenho: via em nível inferior em relação à massa edificada.



Melhor configuração: via em posição elevada em relação à massa edificada + barreira topográfica.

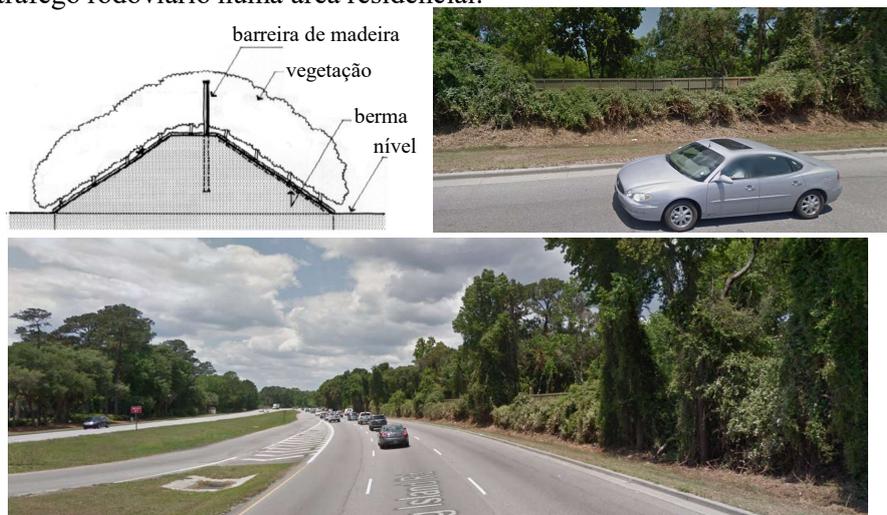
Exemplos de Barreiras Acústicas

- Acostamentos de terra cobertos com gramado denso ou outro material absorvente podem ser tão eficazes quanto barreiras finas refletoras, reduzindo o ruído de 5 a 10 dB(A).



Exemplos de Barreiras Acústicas

- **Condomínio Moss Creek (Hilton Head Island, Carolina do Sul)**
- Combinação acostamento de terra + barreira longa para reduzir ruído de tráfego rodoviário numa área residencial.



Barreiras Acústicas

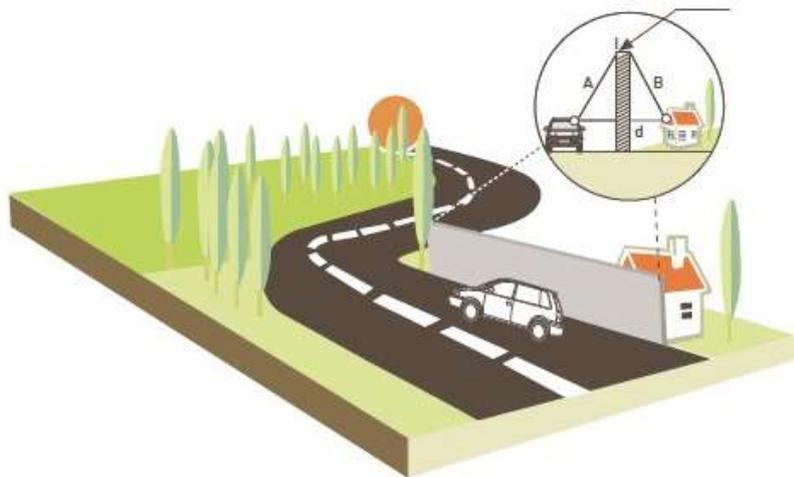


- $A_{barreira}$ aumenta à medida que:
 - a barreira aproxima-se da fonte ou do receptor.
 - a altura efetiva da barreira aumenta.
- Quanto mais próxima da fonte ou do receptor, melhor é o desempenho acústico da barreira.
- Quanto mais alta a região existente entre a projeção do raio sonoro direto incidente sobre o receptor e o topo do elemento da barreira, maior sua eficiência.
- Quanto à frequência sonora:
 - Para sons de alta frequência, as barreiras são mais eficazes, pois tendem a refletir.
 - Para sons de baixa frequência, são menos eficientes, pois ocorre difração no topo da barreira.

Barreiras Acústicas

- Fatores complicadores:
 - Geralmente são negligenciadas: transmissão sonora através da barreira e efeitos do vento.
 - Para a transmissão sonora através da barreira ser desprezível quando comparada com a transmissão sonora por difração, a barreira não deve apresentar aberturas, e recomenda-se que a barreira tenha uma densidade superficial de 20 kg/m^2 , valor facilmente conseguido com espessuras e materiais necessários para proporcionar a estabilidade mecânica requerida pela barreira.

Como estimar a atenuação da barreira, A_{barreira} ?



- Perda por inserção – diferença de nível no receptor sem e com a presença da barreira.

- Maekawa:

$$A_{\text{barreira}} = 10 \log(20N)$$

onde:

- A_{barreira} é a atenuação por perda de inserção da barreira.

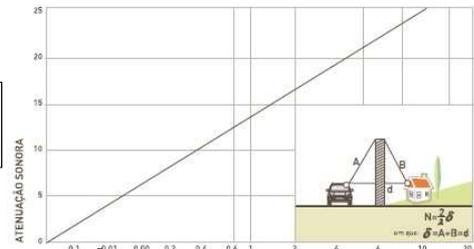
- N é o número de Fresnel.

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

- δ é a diferença dos trajetos por cima da barreira e através da barreira.

$$\delta = a + b - c$$

- λ é o comprimento de onda.

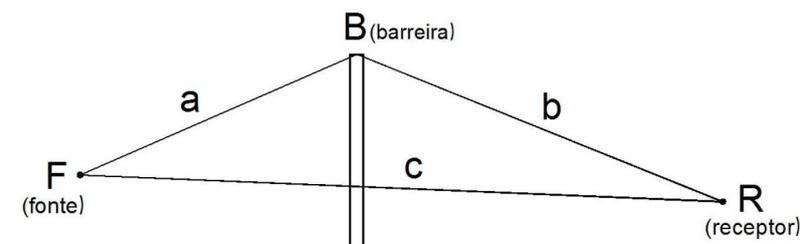


- Diferença dos trajetos por cima da barreira e através da barreira (δ)

$$\delta = a + b - c$$

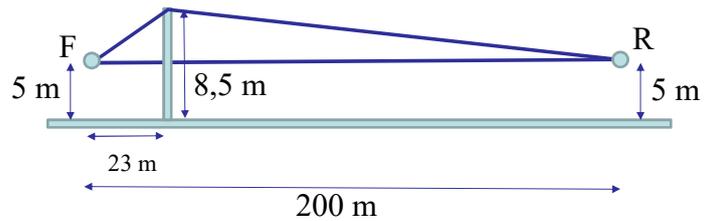
- onde:

- a é a distância da fonte ao topo da barreira (FB);
- b é a distância entre o receptor e o topo da barreira (BR);
- c é a distância entre a fonte e o receptor (FR).

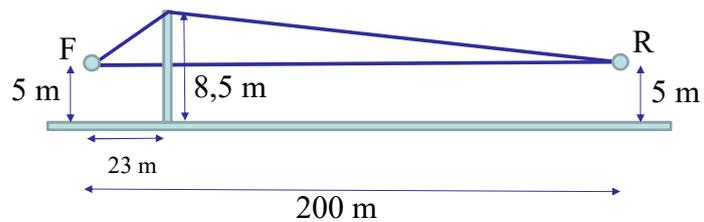


• **Exemplo 03:**

- Para uma fonte sonora pontual, calcule a atenuação da barreira ($A_{barreira}$) com 8,5 m de altura, na posição indicada na figura, para a frequência de 1000 Hz:



• **Exemplo 03:**



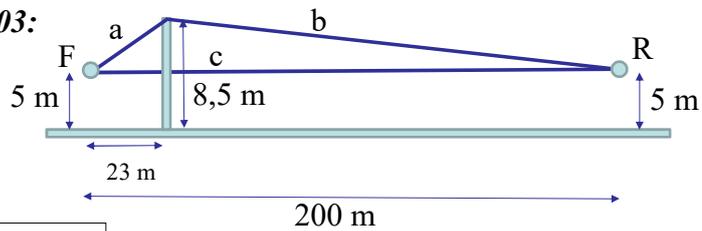
- Mackawa:

$$A_{barreira} = 10 \log(20N)$$

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

$$\delta = a + b - c$$

• **Exemplo 03:**



$$\delta = a + b - c$$

$$a^2 = 23^2 + 3,5^2 = 529 + 12,25 = 541,25$$

$$a = \sqrt{541,25} = 23,26 \text{ m}$$

$$b^2 = 3,5^2 + 177^2 = 12,25 + 31329 = 31341,25$$

$$b = \sqrt{31341,25} = 177,03 \text{ m}$$

$$c = 200 \text{ m}$$

$$\delta = a + b - c$$

$$\delta = 23,26 + 177,03 - 200 = 0,29 \text{ m}$$

• **Exemplo 03:**

Para 1000 Hz: $\lambda = 0,34 \text{ m}$

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

$$N = \frac{2 \cdot 0,29}{0,34} = 1,706$$

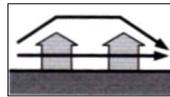
• **Maekawa:**

$$A_{\text{barreira}} = 10 \log(20N)$$

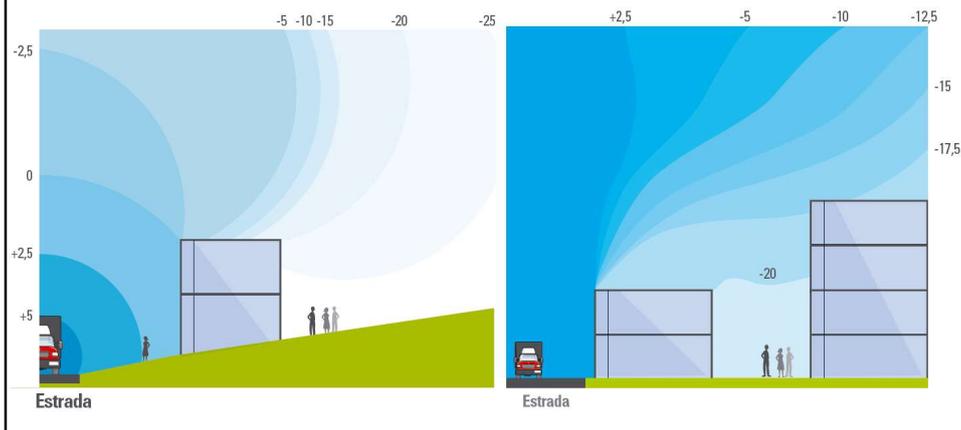
$$A_{\text{barreira}} = 10 \log(20 \cdot 1,706) = 10 \log(34,12)$$

$$A_{\text{barreira}} = 10 \cdot 1,533 = 15,33 \text{ dB}$$

Atenuação de edificações



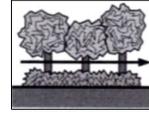
- Edificações atenuam os níveis sonoros quando se interpõem entre a fonte sonora e o receptor. O som é difratado no topo das edificações.



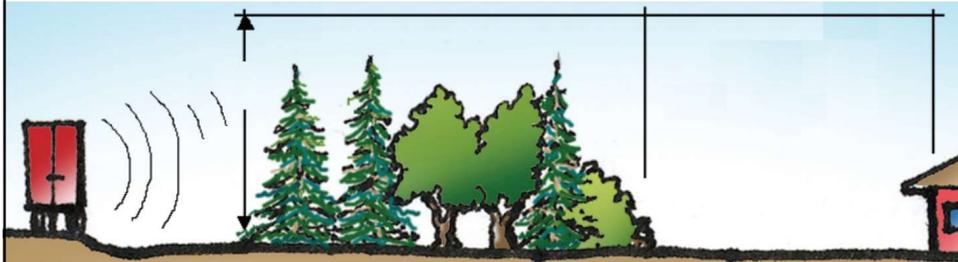
Atenuação de edificações

- Devido a aberturas entre as edificações, uma fileira de edificações atenua menos do que uma barreira contínua de mesma altura.
 - 1 fileira: atenuação máxima de 10 dB (resultados de campo).
 - Fileiras subsequentes conferem atenuação menor: 1,5 dB de atenuação para cada fileira adicional, até o limite de 10 – 15 dB de atenuação total.

Atenuação de vegetação densa



- Cinturão verde: funciona como barreira acústica vazada.
- Atenuação máxima de 10 dB (resultados de campo).

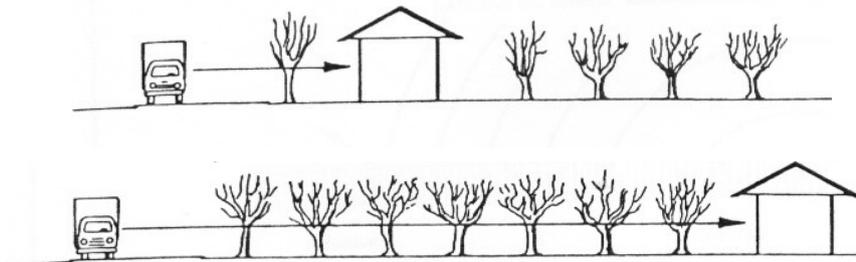


Fatores que influenciam:

- Largura do cinturão;
- Altura do cinturão;
- Localização do cinturão;
- Configuração do plantio.

Largura do cinturão

- A vegetação deve ter largura superior a 15 m, pois cortinas de vegetação menores que isso geralmente são ineficazes, por não gerar o espalhamento necessário para produzir atenuação sonora.
- Na faixa de frequências de 200 a 2000 Hz, a atenuação será da ordem de 7 dB para cada 30 m de largura do cinturão verde. Essa atenuação somente ocorrerá após os primeiros 15 m de largura da vegetação.

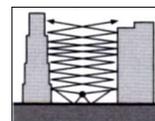


Altura do cinturão

- A área com vegetação deve ser densamente ocupada com árvores que se elevem pelo menos 5 m acima da linha de visão.



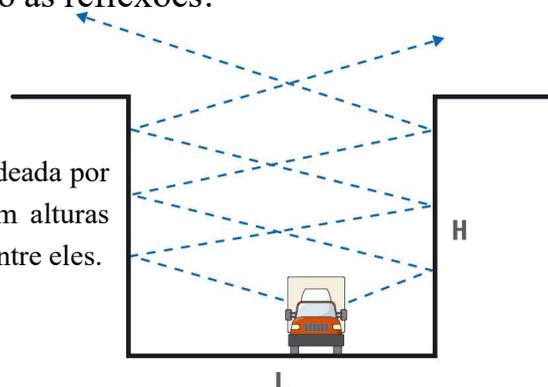
Amplificação sonora causada pela reverberação urbana



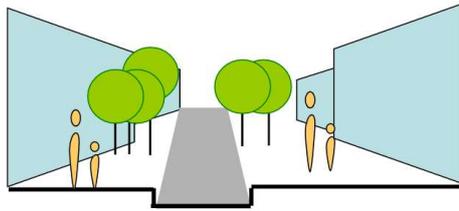
- As múltiplas reflexões nas fachadas das edificações que margeiam as vias de tráfego podem amplificar o ruído de tráfego:
→ causam reverberação urbana.

- Rua em “U”: atenção às reflexões!

- Rua em U: é uma estrada ladeada por edifícios quase contíguos com alturas mais ou menos homogêneas entre eles.

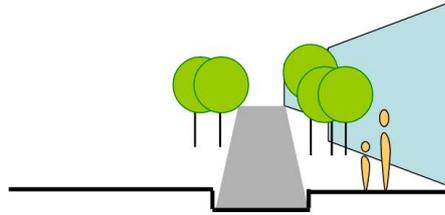


- Rua em “U”: atenção às reflexões!



Rua em “U”:

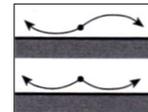
- Barreiras contínuas.
- Campo acústico reverberante: reflexões x fachadas.



Rua em “L”:

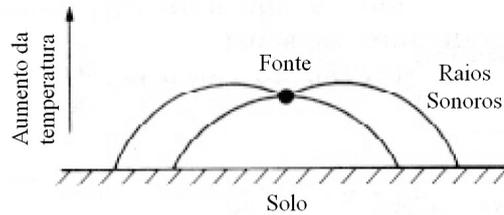
- Barreira em um dos lados.
- Propagação sonora: aproxima-se do campo livre.

Efeitos de gradientes de temperatura e de velocidade do vento

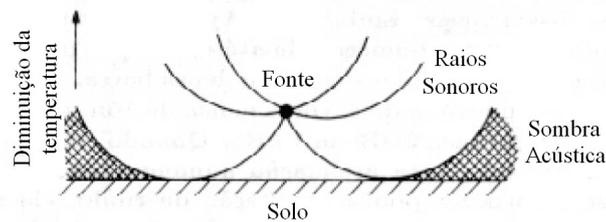


- Variações de temperatura e de velocidade do vento com a altitude provocam gradientes de velocidade do som.
- **Influência da temperatura**
 - A velocidade de propagação do som no ar depende na temperatura (é proporcional à temperatura).
temperatura maior → velocidade do som maior
 - Gradiente de temperatura causa deformação da frente de onda com criação de sombra acústica simétrica.

- Efeito de aumento da temperatura com a altura:

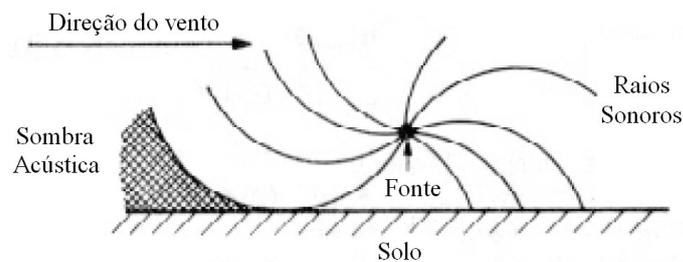


- Efeito de diminuição da temperatura com a altura:



Efeitos de gradientes de temperatura e de velocidade do vento

- **Influência do vento**
 - Distorção da frente de onda devido à velocidade e à direção do vento. Criação de sombra acústica.
 - A velocidade do vento aumenta verticalmente para cima, pois as camadas de ar próximas ao solo tendem a frear por atrito.
 - Variação do caminho das ondas sonoras com o efeito do vento:



QUADRO 9.2 Principais mecanismos de atenuação sonora ao ar-livre					
Mecanismo	Seção	Descrição sucinta	Atenuação aproximada de 5 dB		
			Condições	À distância de	
	9.3	Absorção sonora do ar atmosférico.	A 10 °C e 70% de umidade relativa.	800 m	A
				1.500 m em 500 Hz 250 m em 4 kHz	Oitava
	9.4	Interferência (quase sempre destrutiva) entre o som direto e o refletido sobre solo acusticamente "macio".	Para alturas da fonte e do receptor da ordem de 1,2 m.	85 m	A
				10 m em 250 e 500 Hz 50 m em 125 e 1.000 Hz Não há em 63 e 2.000 Hz	Oitava
	9.5	Atenuação provocada por uma barreira acústica entre a fonte e o receptor, combinada com uma atenuação adicional do solo acusticamente "macio".	Quando o receptor encontra-se na sombra acústica gerada pela barreira, em temperaturas normais e sem vento.	Todas	—
	9.6	Atenuação provocada por edificações entre a fonte e o receptor.	Com uma fileira de edificações com aproximadamente 25% de abertura.	Todas	—
	9.7	Atenuação provocada por vegetação densa entre a fonte e o receptor.	Áreas com muitas árvores e vegetação densa no solo.	30 m	A
				100 m em 500 Hz 50 m em 4.000 Hz	Oitava
	9.8	Amplificação sonora devida a múltiplas reflexões em desfiladeiros urbanos.	Com edificações de no mínimo 10 m de altura em ambos os lados da rua.	—	—
	9.9	Alteração da atenuação do solo e/ou da barreira, ou criação de sombras acústicas causadas por gradientes verticais de temperatura e de ventos.	Em dias ensolarados, para alturas da fonte e do receptor da ordem de 1,2 m.	150 m	A
				150 m em 500 Hz 50 m em 4.000 Hz	Oitava

Observações:
Omitem-se atenuações causadas por neblina, precipitação e turbulência atmosférica, por não serem geralmente significativas.
A refere-se a níveis sonoros A-ponderados para espectro de fonte típica.
Omitem-se os efeitos da divergência da onda, da diretividade da fonte e de grandes superfícies refletoras próximas à fonte, por já terem sido abordados anteriormente.
Fonte: [1] Anderson e Kurze.

(Bistafa)

Ruído de tráfego

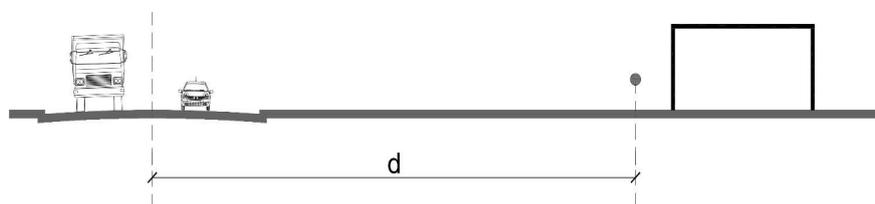
- Uma das principais fontes de poluição sonora ambiental:
 - tráfego (rodoviário, ferroviário e aéreo).
- Como estimar o ruído de tráfego?
 - Através de modelos simplificados, mas com limitações.
 - Através de programas computacionais específicos.
 - Processo complexo.

Estimativa do ruído de tráfego rodoviário

- A seguir, modelo geral e simplificado de predição do nível de pressão sonora equivalente:
 - tráfego rodoviário.
 - rodovias infinitamente longas.
 - modelo desenvolvido pela FHWA (*Federal Highway Administration* - Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos).
 - cálculo do L_{eq} durante o período de 1 hora.

Estimativa do ruído de tráfego rodoviário

- Aplicar a equação seguinte para cada tipo de veículo:
 - automóveis
 - caminhões leves (2 ou 3 eixos, peso entre 5 e 14 ton)
 - caminhões pesados (3 ou mais eixos, acima de 14 ton)
- E depois calcular a média logarítmica.



Estimativa do ruído de tráfego rodoviário

$$L_{eq}(h)_i = \overline{L_{0i}} + 10 \log \left(\frac{N_i}{V_i T} \right) + 10 \log \left(\frac{15}{d} \right)^{1+\alpha} + A_{combinada} - 13 \text{ dB}(A)$$

$L_{eq}(h)_i$ → nível equivalente horário do i-ésimo tipo de veículo.

$\overline{L_{0i}}$ → nível sonoro de referência para o i-ésimo tipo de veículo.

É o nível sonoro emitido por um determinado tipo de veículo (pode ser obtido através de medições, gráficos ou tabelas).

N_i → número do i-ésimo tipo de veículo que trafega no intervalo de tempo T em horas ($T = 1$ hora).

V_i → velocidade média do i-ésimo tipo de veículo (em km/h).

T → tempo de duração para o qual deseja-se o L_{eq} , devendo corresponder ao N_i ($T = 1$ hora).

d → distância perpendicularmente à via de tráfego até o receptor, ou seja, o ponto onde se deseja estimar o nível equivalente, em metros.

α → fator de absorção sonora da cobertura do solo entre a rodovia e o receptor.

Estimativa do ruído de tráfego rodoviário

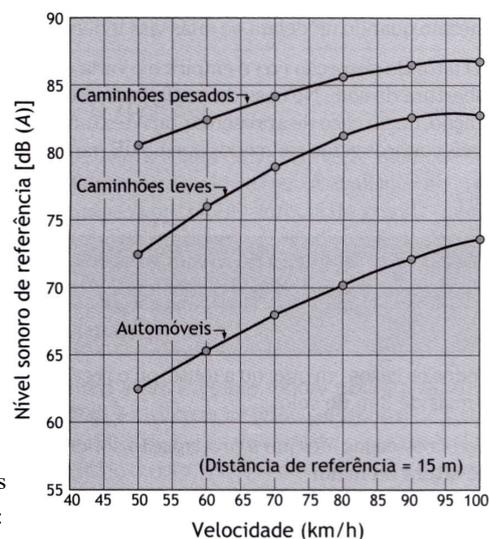
- A equação anterior é aplicada três vezes:
 - automóveis $\rightarrow L_{eq\ a}$
 - caminhões leves (2 ou 3 eixos, peso entre 5 e 14 ton.) $\rightarrow L_{eq\ cl}$
 - caminhões pesados (3 ou mais eixos, acima de 14 ton.) $\rightarrow L_{eq\ cp}$

$$L_{eq\ total} = 10 \log \left(10^{L_{eq\ a}/10} + 10^{L_{eq\ cl}/10} + 10^{L_{eq\ cp}/10} \right)$$

Estimativa do ruído de tráfego rodoviário

$\overline{L}_{0\ i}$ \rightarrow nível sonoro de referência para o i -ésimo tipo de veículo.

- Obtido em função da velocidade média para a, cl e cp.



- Nível sonoro de referência para três classes de veículos em função da velocidade média:

Estimativa do ruído de tráfego rodoviário

$A_{combinada}$ → atenuação combinada (apresentada anteriormente).

α → fator de absorção sonora da cobertura do solo entre a rodovia e o receptor.

- varia com o tipo de cobertura do solo,
- valor empírico.

Atenuação sonora por elementos normalmente encontrados ao longo de rodovias

Situação	Atenuação	α
(a) Solo pavimentado ou “duro”	3 dB/DD	$\alpha = 0$
(b) Vegetação rasteira ou solo “macio”	4,5 dB/DD	$\alpha = 0,5$ Um ou outro (não ambos)
(c) Vegetação densa (com pelo menos 5 m de altura)	5 dB, primeiros 30 m 5 dB, próximos 30 m (máximo de 10 dB)	
(d) Edificações	3 dB, 40-60% da área 5 dB, 70-90% da área 1,5 dB para cada fileira adicional (máximo de 10 dB)	$\alpha = 0$
(e) Muro e berma (barreiras de terra)	Muro: até 20 dB Berma: até 23 dB	

Figura 9.20 Atenuação sonora provocada por elementos normalmente encontrados ao longo de rodovias, segundo modelo da FHWA (DD, duplicação da distância). Fonte: [7] Mestre e Wooten.

• **Exemplo 04:**

- Para um receptor a uma distância $d = 30$ m de uma rodovia onde circulam apenas automóveis a uma velocidade média de 80 km/h, estime o nível sonoro equivalente no período de 1 hora, quando circulam 4000 automóveis.

• **Exemplo 04:**

- 1) Pelo gráfico, obter $\overline{L_{0a}}$, $\overline{L_{0cl}}$ e $\overline{L_{0cp}}$.
- 2) Determinar N_i dos veículos que trafegam no intervalo de tempo T , para cada tipo de veículo: N_a , N_{cl} e N_{cp} .
- 3) Determinar as velocidades médias: V_a , V_{cl} e V_{cp} .
- 4) Determinar a distância d entre o receptor e o eixo geométrico da via.
- 5) Determinar o fator de absorção sonora α da cobertura do solo entre a rodovia e o receptor.
- 6) Determinar $A_{combinada}$.
- 7) Determinar os três níveis equivalentes, L_{eqa} , L_{eqcl} e L_{eqcp} .

$$L_{eqi} = \overline{L_{0i}} + 10 \log \left(\frac{N_i}{V_i T} \right) + 10 \log \left(\frac{15}{d} \right)^{1+\alpha} + A_{combinada} - 13 \text{ dB}(A)$$

- 8) Determinar o $L_{eq \text{ total}}$: $L_{eq \text{ total}} = 10 \log \left(10^{L_{eqa}/10} + 10^{L_{eqcl}/10} + 10^{L_{eqcp}/10} \right)$

• **Exemplo 04:**

1) Pelo gráfico, para $V_a = 80$ km/h, $\overline{L_{0a}} = 70$ dB(A).

2) $N_a = 4000$ veículos.

3) $V_a = 80$ km/h.

4) $d = 30$ m.

5) $\alpha = 0$.

6) $A_{combinada} = 0$.

7) $L_{eq a}$:

$$L_{eq a} = \overline{L_{0a}} + 10 \log \left(\frac{N_a}{V_a T} \right) + 10 \log \left(\frac{15}{d} \right)^{1+\alpha} + A_{combinada} - 13 \text{ dB}(A)$$

8) $L_{eq total} = L_{eq a}$.