



ROTEIRO PARA PROJETO / AVALIAÇÃO ACÚSTICA

- 1) Identificar o local, seu entorno e as possíveis fontes sonoras existentes (móveis e fixas): ruído de tráfego (rodoviário, aéreo, ferroviário), atividades industriais, atividades comerciais, atividades recreativas, etc.
- 2) Identificar o nível de ruído externo, através de medições do nível de pressão sonora. Caso não seja possível realizar medições, estimar o nível através de modelos ou *softwares* de predição / estimativa do nível de pressão sonora gerado, considerando o máximo de informação possível.
- 3) Caso desejado, comparar os valores obtidos com os valores estabelecidos em normas técnicas e/ou legislação (ABNT NBR 10151, por exemplo).
- 4) Identificar o nível de pressão sonora interno aceitável no ambiente em questão (ABNT NBR 10152).
- 5) Para saber qual o isolamento sonoro necessário da fachada, medir o nível de pressão sonora em frente à fachada. Caso não seja possível medir, utilizar os resultados das estimativas de predição. Se necessário, promover barreiras acústicas.
- 6) Além das vedações verticais externas, considerar também o isolamento de ruído aéreo e de impacto das vedações verticais internas, ou seja, garantir isolamento adequado entre ambientes. Verificar os limites das normas (ABNT NBR 15575, para edificações habitacionais, por exemplo) e procurar um sistema que atinja esse resultado (pela lei das massas para material homogêneo, ou pelos catálogos dos fabricantes para os componentes industrializados).
- 7) A partir dos dados medidos ou estimados, inicia-se a fase de projeto, que engloba: implantação, orientação e forma do edifício, distribuição dos espaços internos, localização e forma dos recintos, etc.
- 8) Calcular o tempo de reverberação do ambiente e tentar ajustá-lo para o $TR_{ótimo}$, na escolha da geometria e dos materiais internos.
- 9) Detalhamento.
- 10) Por fim, deve-se ter atenção e cuidado durante a execução da obra, para que o projeto seja corretamente implantado, garantindo as condições acústicas esperadas.

- 1) Identificar o local, seu entorno e as possíveis fontes sonoras existentes (móveis e fixas): ruído de tráfego (rodoviário, aéreo, ferroviário), atividades industriais, atividades comerciais, atividades recreativas, etc.
- 2) Identificar o nível de ruído externo, através de medições do nível de pressão sonora. Caso não seja possível realizar medições, estimar o nível através de modelos ou *softwares* de predição / estimativa do nível de pressão sonora gerado, considerando o máximo de informação possível.

Para as medições, utilizar um sonômetro ou medidor de nível de pressão sonora. Já a simulação computacional pode ser realizada através de *softwares* como o CadnaA ou o SoundPlan. Para uma simples estimativa do ruído de tráfego rodoviário, utilizar o modelo da FHWA (*Federal Highway Administration - Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos*) ou a equação básica da propagação sonora ao ar livre, ambos apresentados em aula. Considerar o máximo de variáveis de entrada possíveis, como: distância fonte-receptor, número de veículos, velocidade dos veículos, atenuação sonora do solo, atenuação de barreiras acústicas, etc.

Estimativa do ruído de tráfego rodoviário (FHWA):

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

$L_{eq}(h)_i$ → 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 perpendicular da via de tráfego até o receptor, ou seja, o ponto onde se deseja estimar o nível equivalente, em metros.

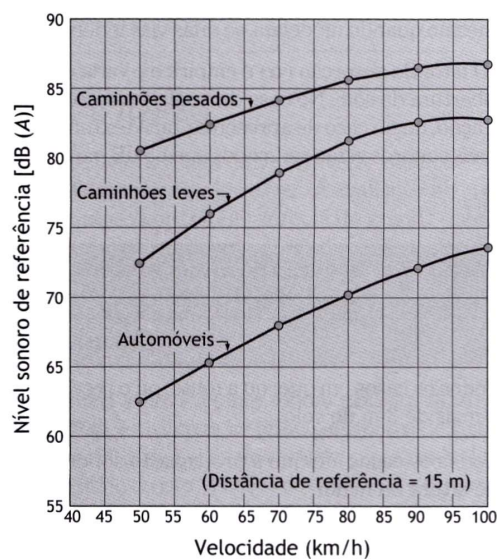
α → fator de absorção sonora da cobertura do solo entre a rodovia e o receptor.

A equação anterior é aplicada três vezes:

- automóveis → $L_{eq a}$
- caminhões leves (2 ou 3 eixos, entre 5 e 14 ton.) → $L_{eq cl}$
- caminhões pesados (3 ou + eixos, acima de 14 ton.) → $L_{eq cp}$

E então calcula-se o nível sonoro equivalente total:

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



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

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).

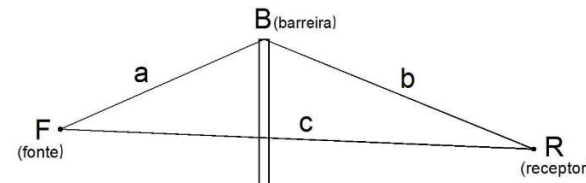
DI_{θ} → índice de direcionalidade da fonte na direção θ , em dB.

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

$A_{combinada}$ → atenuação 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 por barreiras acústicas:



δ → diferença dos trajetos por cima da barreira e através da barreira: $\delta = a + b - c$

a → distância da fonte ao topo da barreira (FB);

b → distância entre o receptor e o topo da barreira (BR);

c → distância entre a fonte e o receptor (FR).

N → número de Fresnel.

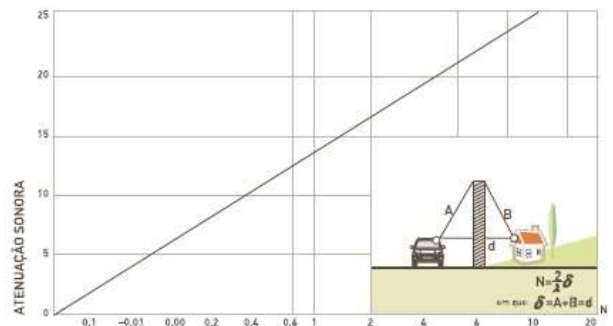
λ → comprimento de onda

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

$A_{barreira}$ → atenuação por perda de inserção da barreira.

(Maekawa) Equação ou através do gráfico:

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



Obs.: O nível de pressão sonora expresso em dB(A) é um número único que pode ser comparado com a norma ABNT NBR 10151. Caso queira saber melhor o comportamento sonoro, utilizar o nível de pressão sonora em função da frequência (em bandas de oitavas ou terços de oitavas).

Tabela de conversão de dB para dB(A):

Frequência (Hz)	Ponderação A
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1000	0
2000	+ 1,2
4000	+ 1,0
8000	-1,1

Soma de níveis em dB: $NPS_1 + NPS_2 + \dots + NPS_n = ?$

$$NPS_T = 10 \log \left(10^{NPS_1/10} + 10^{NPS_2/10} + \dots + 10^{NPS_n/10} \right)$$

Ou, de maneira simplificada: $NPS_2 + NPS_1 = ?$ $NPS_2 > NPS_1$

- Determinar a diferença numérica entre os níveis a serem somados: $\Delta NPS = NPS_2 - NPS_1$
- Encontrar na tabela o valor numérico correspondente a ser adicionado ao maior nível, $L+$:

ΔNPS , Diferença numérica entre os níveis [dB]	0 a 1	2 a 3	4 a 8	9 a 10	≥ 11
$L+$, Valor a ser adicionado ao maior nível [dB]	3	2	1	0,5	0

- Adicionar o valor encontrado $L+$ ao maior valor (NPS_2) para obter o nível resultante.
- 3) **Caso desejado, comparar os valores obtidos com os valores estabelecidos em normas técnicas e/ou legislação (ABNT NBR 10151, por exemplo).**
 - 4) **Identificar o nível de pressão sonora interno aceitável no ambiente em questão (ABNT NBR 10152).**
 - 5) **Para saber qual o isolamento sonoro necessário da fachada, medir o nível de pressão sonora em frente à fachada. Caso não seja possível medir, utilizar os resultados das estimativas de predição. Se necessário, promover barreiras acústicas.**

Diferença padronizada de nível de fachada ($D_{2m,nT}$), em dB:

$$D_{2m,nT} = NPS_{1,2m} - NPS_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

$NPS_{1,2m}$ → nível de pressão sonora do lado de fora; 2 m a frente da fachada, em dB;
 NPS_2 → nível de pressão sonora médio na sala receptora, em dB;
 T → tempo de reverberação da sala receptora, em s;
 T_0 → tempo de reverberação de referência ($T_0 = 0,5$ s).

- 6) **Além das vedações verticais externas, considerar também o isolamento de ruído aéreo e de impacto das vedações verticais internas, ou seja, garantir isolamento adequado entre ambientes. Verificar os limites das normas (ABNT NBR 15575, para edificações habitacionais, por exemplo) e procurar um sistema que atinja esse resultado (pela lei das massas para material homogêneo, ou pelos catálogos dos fabricantes para os componentes industrializados).**

Lei da Massa: A perda na transmissão sonora aumenta 6 dB cada vez que se dobra a massa ou cada vez que se dobra a frequência da onda sonora incidente.

Para partições homogêneas:

$$PT = 20 \log(f \cdot M) - 47 \text{ dB}$$

f → frequência da onda sonora incidente, em Hz;
 M → densidade superficial da partição, em kg/m^2 .

Perda na Transmissão Sonora Composta ou Global (PTc):

$S_i \rightarrow$ área do elemento i (m^2);

$\tau_i \rightarrow$ coeficiente de transmissão sonora do elemento i ;

$PT_i \rightarrow$ perda na transmissão sonora do elemento i ;

$$PTc = 10 \log \frac{\sum S_i}{\sum \tau_i S_i}$$

$$\tau_i = 10^{-PT_i/10}$$

Índice de Redução Sonora Aérea (R), em dB:

$$R = NPS_1 - NPS_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A_2} \right)$$

$NPS_1 \rightarrow$ nível de pressão sonora médio na sala emissora, em dB;

$NPS_2 \rightarrow$ nível de pressão sonora médio na sala receptora, em dB;

$S \rightarrow$ área da parede divisória entre os dois ambientes, em m^2 ;

$A_2 \rightarrow$ área de absorção sonora equivalente da sala receptora, em m^2 .

Conhecendo a redução da divisória R , é possível calcular a **diferença de nível entre ambientes**, em dB:

$$NPS_1 - NPS_2 = R - 10 \log \left(\frac{S}{A_2} \right)$$

Diferença padronizada de nível entre ambientes (D_{nT}), em dB:

$$D_{nT} = NPS_1 - NPS_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

$NPS_1 \rightarrow$ nível de pressão sonora médio na sala emissora, em dB;

$NPS_2 \rightarrow$ nível de pressão sonora médio na sala receptora, em dB;

$T \rightarrow$ tempo de reverberação da sala receptora, em s;

$T_0 \rightarrow$ tempo de reverberação de referência ($T_0 = 0,5$ s).

Nível de pressão sonora de impacto padronizado (L_{nT}), em dB:

$$L_{nT} = L_2 - 10 \log \frac{T}{T_0}$$

$NPS_2 \rightarrow$ nível de pressão sonora médio na sala receptora quando o piso sob teste é excitado pela fonte sonora de impacto padronizada, em dB;

$T \rightarrow$ tempo de reverberação da sala receptora, em s;

$T_0 \rightarrow$ tempo de reverberação de referência ($T_0 = 0,5$ s).

Os valores de $D_{2m,nT}$, R , D_{nT} e L_{nT} , variam com a frequência sonora e são apresentados em tabelas ou gráficos. Os valores únicos (ponderados), $D_{2mT,w}$, R_w , $D_{nT,w}$ e $L_{nT,w}$, são obtidos de acordo com as partes 1 e 2 da norma internacional ISO 717, fazendo um ajuste gráfico (usando a curva de referência dada em cada parte da norma):

Diferença padronizada de nível de fachada ponderada $D_{2m,nT,w}$

Índice de redução sonora ponderado R_w

Diferença padronizada de nível ponderada $D_{nT,w}$

Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado $L_{nT,w}$

7) A partir dos dados medidos ou estimados, inicia-se a fase de projeto, que engloba: implantação, orientação e forma do edifício, distribuição dos espaços internos, localização e forma dos recintos, etc.

- a) Estudo de implantação, orientação e forma do edifício, e sua relação com as edificações adjacentes;
- b) Efeitos de vento, temperatura e solo;
- c) Integração e verificação do impacto no entorno urbano;
- d) Distribuição dos espaços internos do edifício, em função da geração e da tolerância ao ruído;
- e) Compatibilização com a ventilação;
- f) Escolha da localização e da forma dos recintos a serem estudados;
- g) Escolha das soluções construtivas;
- h) Escolha dos materiais e revestimentos internos e do mobiliário para calcular o tempo de reverberação, passo seguinte.

8) Calcular o tempo de reverberação do ambiente e tentar ajustá-lo para o $TR_{\text{ótimo}}$, na escolha da geometria e dos materiais internos.

- a) Identificar o tempo ótimo de reverberação, $TR_{\text{ótimo}}$, (pelo gráfico, por exemplo);
- b) Calcular o tempo de reverberação (TR) do ambiente em estudo, em segundos;
- c) Comparar o TR do ambiente em estudo com o $TR_{\text{ótimo}}$.
- d) Acrescentar ou diminuir a área de materiais absorventes em função da comparação, para que se alcancem valores próximos a $TR_{\text{ótimo}}$.

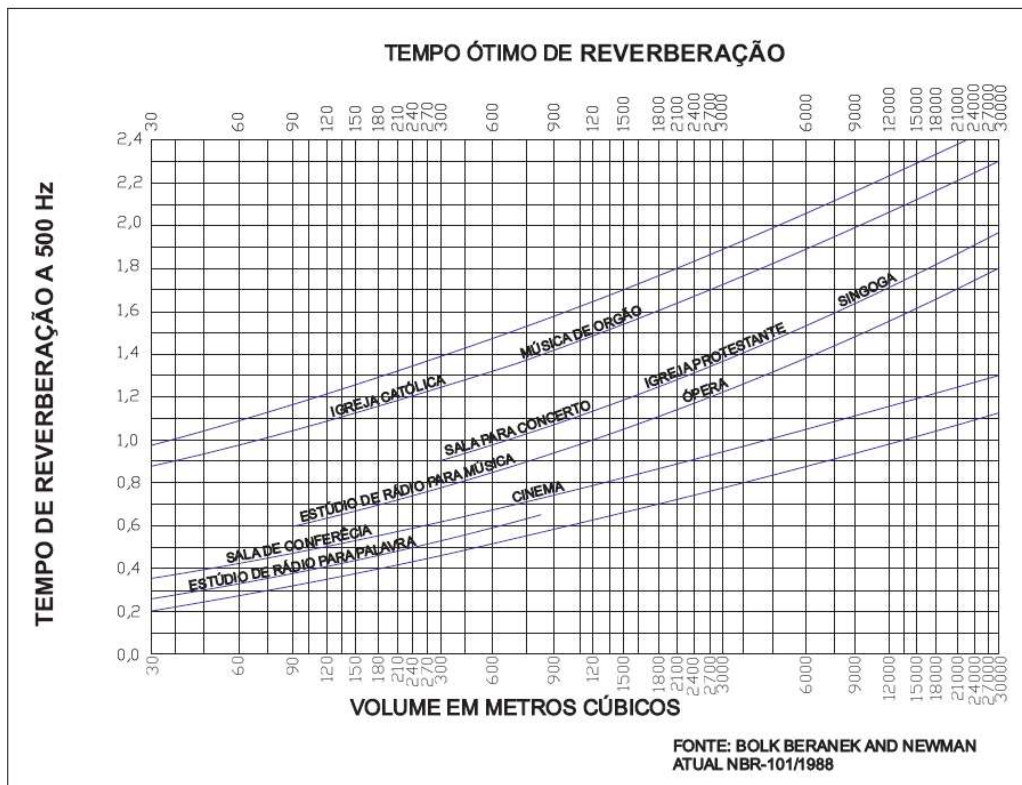
$$TR = 0,161 \frac{V}{A}$$

$V \rightarrow$ volume da sala, em m^3 .
 $A \rightarrow$ área de absorção sonora equivalente da sala, em m^2 *Sabin* (é o somatório dos produtos entre os coeficientes de absorção sonora α_i das n superfícies da sala pelas áreas S_i das n superfícies).

$$A = \sum \alpha_i S_i = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

- Na presença de objetos que absorvem o som, como pessoas, cadeiras, mesas, etc., a absorção sonora total desses elementos (A_{obj}) deve ser considerada no somatório:

$$A = \sum \alpha_i S_i + A_{obj}$$



Obs.1: A absorção a ser adicionada é a diferença entre a ótima e a real.

Obs.2: É possível verificar a redução em dB, do nível interno da sala quando se modificam as superfícies e/ou materiais de absorção sonora:

$$\text{redução} = 10 \log \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

$A_1 \rightarrow$ área de absorção sonora equivalente da sala.
 $A_2 \rightarrow$ área de absorção sonora equivalente da sala após as modificações.

Obs.3: Atenção: Balancear as absorções no ambiente em estudo, evitando a concentração excessiva de materiais absorventes ou reflexivos em áreas impróprias.

9) Detalhamento.

10) Por fim, deve-se ter atenção e cuidado durante a execução da obra, para que o projeto seja corretamente implantado, garantindo as condições acústicas esperadas.

Obs.: O arquiteto deve saber distinguir materiais absorventes acústicos de materiais isolantes acústicos. As funções “absorver” e “isolar” podem ser complementares, mas requerem diferentes características dos materiais. Um material absorvente regula a quantidade de absorção sonora dentro de um ambiente. Um material isolante, aplicado sobre uma parede, promove a redução da transmissão sonora para outro ambiente.

Se for necessário utilizar equipamentos de reforço sonoro (amplificadores, alto-falantes), devem ser previstos os locais de sua instalação.