

TÓPICOS EM POLUIÇÃO SONORA (resumo)

Ricardo E. Musafir – Maio de 2014

1. ESTIMATIVA DA POTÊNCIA SONORA DE UMA FONTE A PARTIR DE MEDIDAS DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

Sabemos que a potencia sonora gerada no interior de um volume V é dada pela integral, ao longo da superfície S , que delimita V , da componente da intensidade sonora normal à essa superfície. Isso vale se a fonte pode ser considerada “estatisticamente estacionária”, isto é, se suas propriedades estatísticas não variam com o tempo. Assim, se \bar{I}_n denota a componente da intensidade normal a S , tem-se

$$P = \int_S \vec{I} \cdot d\vec{S} = \int_S \bar{I}_n dS$$

Se \bar{I}_n é medido em diversos pontos e cada um dos valores, \bar{I}_{n_i} ($i = 1, 2, \dots, N$), é considerado como representando \bar{I}_n em uma área S_i , temos então a aproximação discreta:

$$P = \sum_{i=1}^N \bar{I}_{n_i} S_i$$

Em termos dos níveis de intensidade sonora, L_{i_i} , temos:

$$P = I_{ref} \sum_{i=1}^N 10^{L_{i_i}/10} S_i$$

e, para o nível de potência sonora, L_w ,

$$L_w = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^N 10^{L_{i_i}/10} S_i}{1 \text{ m}^2} \right]$$

Em geral, não dispomos do nível de intensidade sonora mas, se pudermos supor que

$$\bar{I}_{n_i} = \frac{P^2}{\rho c},$$

o que implica que os níveis de pressão sonora, L_i , em cada ponto, têm o mesmo valor que os níveis de intensidade sonora L_{i_i} correspondentes, tem-se então

$$L_w = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} S_i^*$$

onde $S_i^* = S_i/1\text{m}^2$.

O fato de que o nível de intensidade sonora é menor ou igual ao nível de pressão sonora (são idênticos em campo livre e longe da fonte) justifica essa aproximação, que está a favor da segurança. A expressão acima é freqüentemente usada para estimar a potência sonora de fontes.

Para o caso particular em que o NPS pode ser considerado uniforme ao longo da superfície de medição S , tem-se

$$L_w = L + 10 \log \sum_{i=1}^N S_i^* = L + 10 \log S^*$$

onde S^* expressa o valor da área S em m^2 .

2. ASPECTOS QUE INFLUENCIAM NA PROPAGAÇÃO DO SOM:

Efeito geométrico: dispersão esférica ou cilíndrica

Absorção: depende da frequência e da distância percorrida; maior para altas frequências

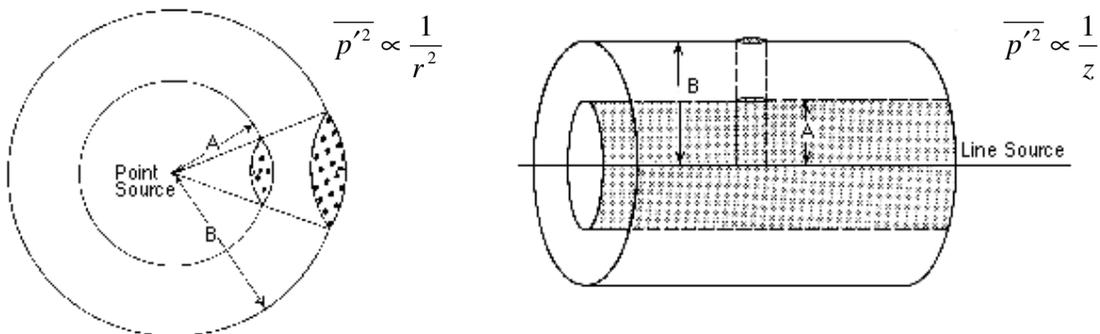
Absorção pelo ar, pela vegetação e pelo solo;

Presença de obstáculos: reflexão e difração

Difração: maior para baixas frequências

Vento e gradientes de temperatura (refração)

a) Efeito geométrico: dispersão esférica ou cilíndrica

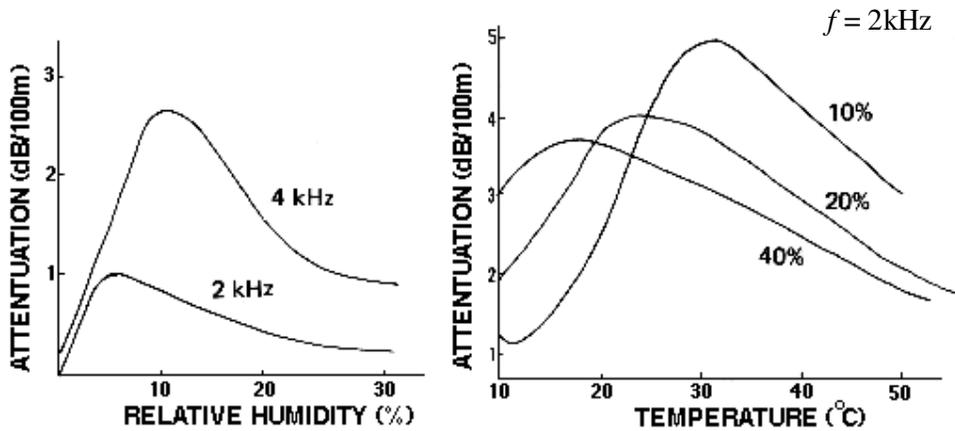


b) Absorção pelo ar

Depende de:

- pressão
- umidade
- temperatura
- frequência (aumenta com f)

f (Hz)	absorção (dB/100m), T: 25 °C		
	u: 50%	u:80%	u:100%
100	0,0258	0,0167	0,0135
250	0,134	0,096	0,080
500	0,322	0,293	0,265
1000	0,568	0,635	0,647
2000	1,020	1,071	1,141
4000	2,585	2,126	2,078
8000	8,654	6,061	5,351



No centro da faixa de freq. da fala (2 kHz), a absorção é tipicamente em torno de 1 dB/100 para umidade de 50 % ou maior (ver tabela). Para 8 kHz, pode chegar a 8,5 dB/100 m quando a temperatura é de 25°C e a umidade de 50%.

S

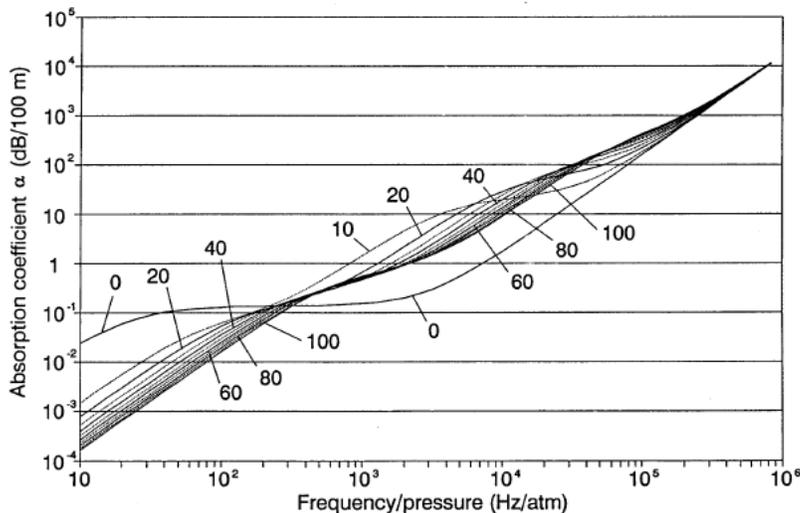


FIG. 2. Sound absorption coefficient in air (dB/100 m) versus frequency/pressure ratio for various percent relative humidities at 20°C.

Figure 2. Sound absorption coefficient in air (dB/100) versus frequency for various relative humidities at 20°C.

A tabela no início da pg. Anterior foi preenchida a partir do programa para cálculo de absorção do National Physics Laboratory (NPL), do Reino Unido, encontrado em:

<http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/absorption/>

NPL Acoustics: Calculation of absorption of sound by the atmosphere

Introduction

ISO 9613 Part 1 describes the calculation method for absorption of sound by the atmosphere. For pure-tones the standard specifies the attenuation coefficient as a function of frequency, temperature, humidity and pressure.

The calculator presented here computes the attenuation coefficient according to ISO 9613-1, given those four variables. This model assumes uniform meteorological conditions. The reference ambient atmospheric pressure, is that of the International Standard Atmosphere at mean sea level (101.325 kPa). The reference air temperature is 20 °C.

Calculator

Frequency (Hz)

Temperature (Celsius)

Pressure (kPa)

Relative humidity (%)

Molar concentration of water vapour

Atmospheric absorption : (dB/m)

You can verify the calculator using some [validation data](#) taken from Table 1 of ISO 9613-1, and [calculate attenuation due to atmospheric absorption at a distance](#).

c) Solo:

Causa reflexões que podem interferir construtiva ou destrutivamente, e que dependem do tipo de solo.

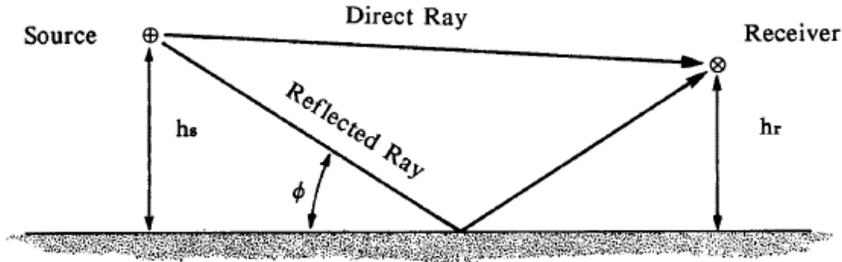


Figure 5 Geometry for reflection of sound from level ground with finite impedance

A situação é mais simples no caso de solo totalmente absorvente ou totalmente refletor. Consideraremos apenas esses casos.

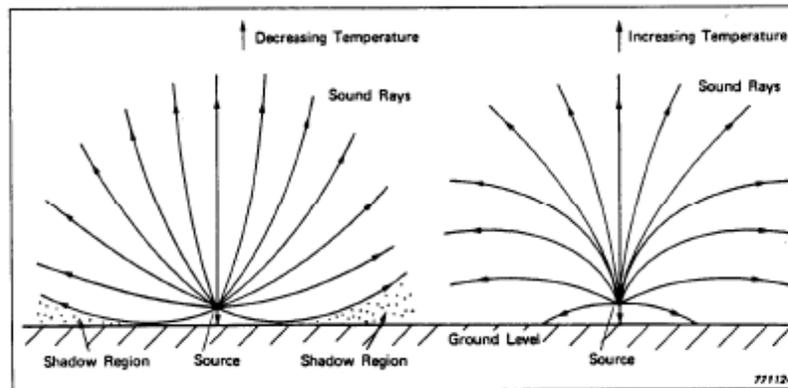
d) Temperatura:

Velocidade do som, variação com a temperatura:

$$c(T) = c(T_0) + 0,56 (T - T_0)$$

para $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $c = 343,6 \text{ m/s}$.

OU: $c(T) = 331,4 + 0,6 T \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ m/s}$



Refração do som devido a gradientes de temperatura. a) normal (temperatura caindo com altitude) b) inversão (temperatura aumentado com altitude)

e) Vento:

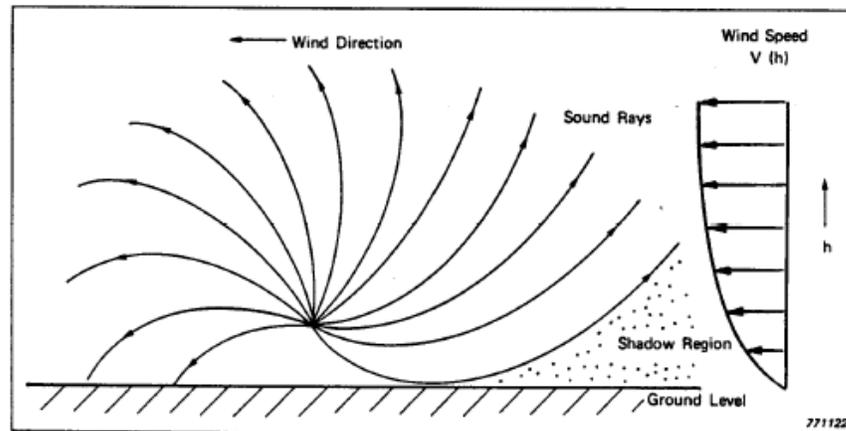


Figure 3. Refractive effects caused by wind

f) Atenuação pela vegetação

Vegetação densa: ~ 7 dB por 30 m, na faixa 200 Hz a 2 kHz. Largura mínima do cinturão: 15 m.

Altura do cinturão: árvores que se elevem 5m acima da linha de visão (Bistafa, 2006)

Gramma alta/arbustos (Beranek, 1971):

$$A(\text{dB}) = (0,18 \log f - 0,31)r$$

$$\Rightarrow f = 100 \text{ Hz}, r = 100 \text{ m}: A = 5 \text{ dB};$$

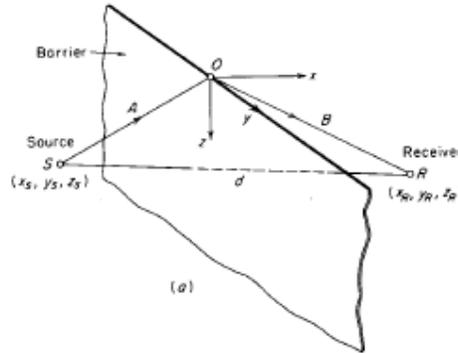
$$f = 1000 \text{ Hz}, r = 100 \text{ m}: A = 23 \text{ dB}$$

Floresta: $A = 0,01 f^{1/3} r$

$$\Rightarrow f = 100 \text{ Hz}, r = 100 \text{ m}: A = 4,6 \text{ dB};$$

$$f = 1000 \text{ Hz}, r = 100 \text{ m}: A = 10 \text{ dB}$$

f) Atenuação por barreiras:



Atenuação depende da razão entre a DIFERENÇA de percurso do som entre a fonte e o receptor, gerada pela presença da barreira, Δ , e o comprimento de onda λ ($\lambda = c_0/f$).

Com referencia à figura acima, $\Delta = A + B - d$

A atenuação é expressa em função do Numero de Fresnel, $NF = \frac{2\Delta}{\lambda}$.

Perda por inserção, PI (ou IL, de *insertion loss*): Diferença entre o NPS num dado ponto sem a barreira e com a barreira.

Pode ser aproximada pela expressão (obtida experimentalmente)

$$PI = 10 \log (3 + 20NF)$$

Para $NF = 0$ (o topo da barreira tangencia a linha “fonte-observador”), $PI = 10 \log (3) \cong 5$ dB.

Se a barreira não cobre a visão da fonte, NF passa a ser negativo. Nesse caso, a fórmula ainda é valida para $NF \geq -0,1$. No limite $NF = -0,1$, a PI é nula.

Para $NF > 1,5$ vale a aproximação:

$$PI \cong 10 \log (20NF) = 10 \log NF + 13 \text{ dB}$$

OBS: Quando as expressões fornecerem valores de PI superiores a 25 dB, deve-se adotar o valor de 25 dB, que pode ser visto, em termos práticos, como um valor máximo para a PI.

3. TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE PAREDES:

Hipóteses: Pannel infinito, plano, ondas com incidência normal.

Pannel com massa superficial σ , onda com frequência f :

Num cálculo aproximado, supondo a impedância do ar $\rho_0 c_0 \ll \sigma f$, obtém-se, para a perda na transmissão PT, definida por

$$PT = 10 \log \left(\frac{\text{energia incidente}}{\text{energia transmitida}} \right) = 10 \log \left(\frac{\overline{p_i^2}}{\overline{p_T^2}} \right),$$

a expressão

$$PT = 20 \log \left(\frac{\pi f \sigma}{\rho_0 c_0} \right)$$

que, para σ em kg/m^2 , f em Hz e com os valores de $\rho_0 c_0$ do ar, pode ser escrita como

$$PT = 20 \log \sigma f - 42 \text{ dB}$$

Para incidência aleatória, o valor de PT é reduzido de 6 dB, i.e.,

$$PT = 10 \log \sigma f - 48 \text{ dB}$$

Usando-se uma ou outra expressão, tem-se um aumento de 6dB por oitava para a perda na transmissão.

Um valor de PT de X dB significa que a energia sonora transmitida corresponde a $10^{-X/10}$ da energia incidente. Se a parede é composta de diversos materiais, pode-se considerar que a fração da energia que atinge cada material sofre a redução de energia correspondente e estimar a perda na transmissão total a partir desse raciocínio.

Exemplo: considerando uma parede com 2 materiais, um ocupando a área S_1 e o outro, uma área S_2 , se os valores de PT correspondentes a cada material são, respectivamente, PT1 e PT2, então a PT total é calculada a partir de:

$$\overline{p_T^2} = \overline{p_i^2} \left(\beta 10^{-PT_1/10} + (1 - \beta) 10^{-PT_2/10} \right)$$

$$\text{onde } \beta = \frac{S_1}{S_1 + S_2}.$$

Este resultado explica porque a existência de uma fresta ou de uma porta com PT mais baixa que a parede circundante pode comprometer significativamente o isolamento efetivo de uma parede.

4. RELAÇÃO ENTRE NPS E POTENCIA SONORA EM AMBIENTES INTERNOS:

Hipótese: campo difuso (o NPS é aproximadamente uniforme)

$$P = \frac{\overline{p'^2} A}{4\rho_0 c_0} \quad \text{ou} \quad \overline{p'^2} = \frac{4P\rho_0 c_0}{A}$$

onde A é a área de absorção efetiva, calculada a partir do produto das áreas individuais das paredes (ou demais objetos) da sala pelos respectivos coeficientes de absorção sonora,

$$A = \sum S_i \alpha_i$$

onde S_i representa a área i e α_i o coeficiente de absorção sonora daquela superfície.

Pode-se definir um coeficiente de absorção médio $\bar{\alpha}$ para a sala, dado por

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum S_i \alpha_i}{\sum S_i} = \frac{A}{\sum S_i}$$

A expressão para $\overline{p'^2}$ dada no início deste item descreve o chamado “campo reverberante”.

Considerando-se também a presença do “campo direto”, além do campo reverberante, tem-se para $\overline{p'^2}$:

$$\overline{p'^2} = P\rho_0 c_0 \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right)$$

Essa aproximação pode ser melhorada considerando-se que o campo reverberante só existe após a primeira reflexão, e que a fração $\bar{\alpha}$ da energia sonora, que é absorvida na primeira reflexão, não faz parte do campo reverberante. Assim, tem-se:

$$\overline{p'^2} = P\rho_0 c_0 \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{A} \right)$$

No caso limite $\bar{\alpha}=1$, a expressão correspondente ao caso de propagação campo livre é obtida.

Deve-se notar que a área de absorção efetiva (A) depende da frequência (porque os coeficientes de absorção das diversas superfícies também dependem). Assim, em geral, o $\overline{p'^2}$ resultante é dado pela soma dos $\overline{p'^2}$ correspondentes às diversas faixas de frequência.

A relação mais simples entre $\overline{p'^2}$ e P (considerando $\overline{p'^2}$ como uniforme em todo o campo) fornece:

$$L = L_w + 10 \log \left(\frac{4}{A^*} \right) = L_w + 6 \text{ dB} - 10 \log A^*$$

onde $A^* = A/1\text{m}^2$. A relação mais complexa fornece:

$$L(r) = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^{*2}} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{A^*} \right)$$

onde r^* é o valor de r em metros.

Uma tabela de coeficientes de absorção de diversos materiais, em função da frequência (faixas de oitavas) é mostrada abaixo.

Sound Absorption Coefficients

Materiais	Coefficients					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Alvenaria, tijolo aparente (Brick – Unglazed)	.03	.03	.03	.04	.05	.07
Alvenaria, tijolo aparente pintado (Brick – Unglazed, Painted)	.01	.01	.02	.02	.02	.03
Carpet – Heavy, on Concrete	.02	.06	.14	.37	.60	.65
Carpet – Heavy, on 40oz Hairfelt or Foam Rubber on Concrete	.08	.24	.57	.69	.71	.73
Carpet – Heavy, with Impermeable Latex Backing on 40oz Hairfelt or Foam Rubber on Concrete	.08	.27	.39	.34	.48	.63
Concrete Block – Light, Porous	.36	.44	.31	.29	.39	.25
Concrete Block – Dense, Painted	.10	.05	.06	.07	.09	.08
Gypsum Board – 1/2", Nailed to 2x4, 16" O.C.	.29	.10	.05	.04	.07	.09
Marble or Glazed Tile	.01	.01	.01	.01	.02	.02
Plaster – Gypsum, or Lime, Smooth Finish on Tile or Brick	.013	.015	.02	.03	.04	.05
Plaster – Gypsum, or Lime, Rough Finish on Lath	.14	.10	.06	.05	.04	.03
Plaster – Gypsum, or Lime, Smooth Finish on Lath	.14	.10	.06	.04	.04	.03
Plywood Paneling – 3/8" Thick	.28	.22	.17	.09	.10	.11
Fabrics	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz

Light Velour – 10oz/sq yd, Hung Straight, in Contact with Wall	.03	.04	.11	.17	.24	.35
Medium Velour – 14oz/sq yd, draped to half area	.07	.31	.49	.75	.70	.60
Heavy Velour – 18-oz/sq yd, Draped to Half Area	.14	.35	.55	.72	.70	.65
Floors	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Concrete or Terrazzo	.01	.01	.015	.02	.02	.02
Linoleum – Asphalt, Rubber, or Cork Tile on Concrete	.02	.03	.03	.03	.03	.02
Wood	.15	.11	.10	.07	.06	.07
Wood Parquet in Asphalt on Concrete	.04	.04	.07	.06	.06	.07
Glass	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Large Panes of Heavy Plate Glass	.18	.06	.04	.03	.02	.02
Ordinary Window Glass	.35	.25	.18	.12	.07	.04
Other	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Water Surface, e.g. Swimming Pool	.008	.008	.013	0.15	.020	0.25
Air, Sabins per 1000 Cubic Feet	.09	.20	.49	1.20	2.90	7.40
Open Doors and Windows	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Values Below are Given in Sabins/sq ft of Seating Area or Per Unit						
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Absorption of Seats and Audience	Values Below are in Sabins/sq ft of Seating Area or Per Unit					
Chairs – Metal or Wood Seats, Each, Unoccupied	.15	.19	.22	.39	.38	.30
People in a Room – Per Person (Do not use for Auditorium Calculations)	2	3	4	5	5	4
Audience – Seated in Upholstered Seats, Per Square Foot of Floor Area (Use for Auditorium Calculations)	.60	.74	.88	.96	.93	.85

Fonte:

http://www.acousticalsurfaces.com/acoustic_IOI/101_13.htm

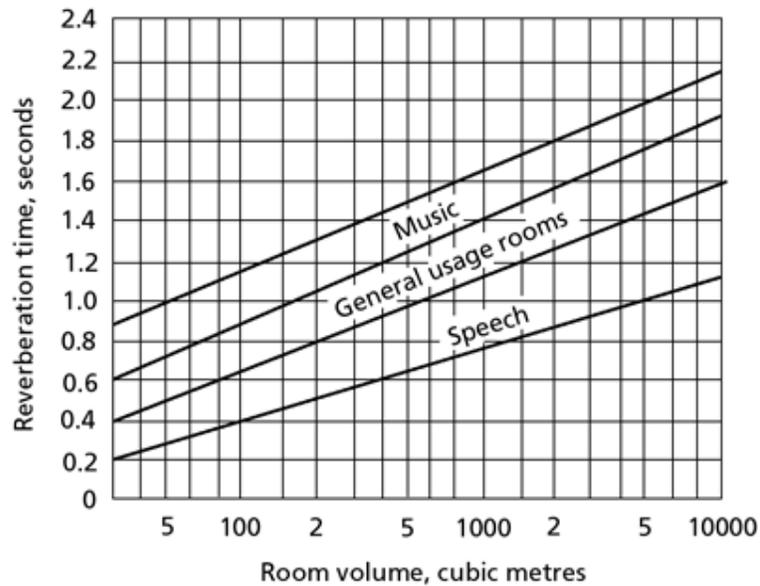
5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO:

É o tempo que o NPS leva, em um ambiente, para cair 60 dB após a fonte sonora ser desligada. Equivale ao tempo que o som leva, naquele ambiente, para “desaparecer”.

O tempo de reverberação, T_R , pode ser calculado pela expressão:

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

onde A é a área de absorção efetiva, em m^2 , e V é o volume da sala em m^3 . A figura abaixo mostra os valores de T_R recomendados em função da utilização de uma sala e de seu volume.



000183

Um calculador para o tempo e reverberação (que contém a tabela de coeficientes de absorção de diversos materiais) pode ser encontrado em:

http://www.sae.edu/reference_material/pages/Reverberation%20Time%20Calculator.htm