

### Acústica

A percepção sonora em uma sala depende da intensidade e da relação temporal entre o som direto e o som indireto refletido pelas paredes da sala. Quando o som é refletido de forma reiterativa, se tem a **reverberação**. Esta pode-se ser atenuada utilizando superfícies inclinadas ou materiais absorventes. O tamanho da sala afeta diretamente o valor do chamado **tempo de reverberação** (TR): quanto maior a sala, mais demora o som em viajar entre as paredes e, maior será o valor de TR. O valor típico de tempos de reverberação para salas de aula é entre 0.5 e 0.7 s. Em salas grandes há que cuidar também que o tempo entre o som direto e a primeira reflexão não seja maior que 50 msec pois de outra forma os dois sons não se misturam senão que se escutaram como sons separados. Para isto, muitas vezes se suspendem do teto grandes painéis refletores. No caso de música, as reflexões favorecem a mistura (*amalgama*) dos sons contribuindo para o colorido musical. Os tempos de reverberação podem ser calculados a partir da **absorção**  $A$  da superfície de área  $S$ , a qual se define como:  $A = \alpha S$ , onde  $\alpha$  coeficiente de absorção do material (Tabela)

#### Coefficientes de absorção

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Concreto pintado	0.05	0.06	0.07	0.09
Janela de vidro	0.25	0.18	0.12	0.07
Argamassa	0.09	0.07	0.05	0.05
Bloco de concreto	0.44	0.31	0.29	0.39
Piso de pedra	0.01	0.01	0.01	0.02
Piso de madeira	0.11	0.10	0.07	0.06
Piso de carpete	0.05	0.10	0.20	0.45
Telha acústica	0.93	0.83	0.99	0.99
Cadeira (não ocupada)	0.26	0.39	0.46	0.43
Cadeira ocupada	0.40	0.56	0.65	0.64

As pesquisas de W.A. Sabine (1896) levaram a uma relação empírica para o tempo de reverberação TR (em seg), proporcional ao volume  $V$  da sala ( $m^3$ ) e inversamente proporcional a absorção da superfície (em  $m^2$  ou *sabins*). A formula de Sabine funciona bem em salas com pouca absorção (coeficiente de absorção médio  $\alpha < 0.2$ ). Do contrário se utiliza a fórmula de Eyring (1930), a qual funciona bem se os coeficientes de absorção das superfícies não forem muito diferentes.

$$TR(\text{Sabine}) = 0.16 \frac{V}{A} \qquad TR(\text{Eyring}) = - \left( \frac{0.16V}{S \ln(1 - \alpha)} \right)$$

## Critérios de Acústica

Dependendo do uso para o qual um auditório foi projetado (palestras, sala de aula, sala de concertos, etc) é necessário otimizar parâmetros como o tempo de reverberação (TR) e o nível do som reverberante. A utilização de materiais absorventes diminui esses dois parâmetros. Otimizar o TR de uma sala exige um compromisso entre:

- definição ou claridade, o que requer  $\tau$  curtos
- intensidade do som, o que exige um nível reverberação alto
- vivacidade (*liveness*), que requer  $\tau$  longos

Um tempo bom de reverberação depende do tamanho do auditório (a razão volume/superfície) e do uso para o qual foi planejado. Um auditório destinado basicamente para palestras deve ter um tempo de reverberação mais curto do que um auditório destinado para música. Os estudos de acústica de auditórios levaram a estabelecer uma série de **critérios subjetivos** para acústicas:

**Intimidade** (*intimacy*): um auditório tem uma acústica aconchegante quando a música soa como se estivesse sendo executada num pequeno auditório. O intervalo de tempo entre o som direto e o primeiro som refletido deve ser menor que 20 ms.

**Vivacidade** (*liveness*): relacionado basicamente ao tempo de reverberação para médias e altas frequências. Uma sala com TR muito curto terá uma acústica *seca* enquanto que um valor de TR muito alto atrapalha a audição.

**Calor** (*warmth*): relacionado com a riqueza dos som graves. O tempo de reverberação abaixo de 250 Hz deve ser um pouco mais longo do que nas médias e nas altas frequências.

**Brilho** (*brilliance*): boa percepção dos sons de altas frequências (agudos).

**Intensidade do som direto** (*loudness*): o auditório deve ser projetado de forma que nenhuma pessoa fique sentada muito longe da fonte de som.

**Nível de som reverberante** (*reverberant sound level*). Este nível deve ser o mesmo em todo o auditório. Ele depende da potência da fonte e do valor de TR.

**Clareza** (*definition*): mede a percepção dos detalhes musicais e definição dos sons

**Envolvimento e difusão** (*diffusion or uniformity*): uma boa distribuição do som é conseguida por difusão ou por superfícies reflectoras irregulares, evitando-se focalização do som, a produção de ecos e a existência de regiões de "sombras sonoras".

**Equilíbrio** (*balance and blend*): igualdade na recepção de todos os tipos de sons

**Baixo nível de ruído** (*background noise*): deve ser menos de 24 dB a 1000 Hz.

## Referências bibliográficas

S.B. Bistafa, *Acustica Aplicada ao Controle de Ruído* (2<sup>a</sup> ed. 2011)

L.C.L. Souza, M.G. Almeida, L. Bragança, *Bê-abá da acústica arquitetônica* (Edufscar, 2006)

T.D. Rossing, *The science of Sound* (2<sup>nd</sup> ed, 1990)

Fló Menezes, *Acústica Musical* (Atelie, 2003)

Pérides Silva, *Acústica arquitetônica e condicionamento de ar* (2005)

J.S. Rigden, *Physics and the sound of music* (2<sup>nd</sup> ed., 1985)

Everest, *Master Handbook of Acoustics* (4<sup>th</sup> ed., 2001)

A. Fischetti, *Initiation a l'Acoutique* (Belin, Paris, 2003)

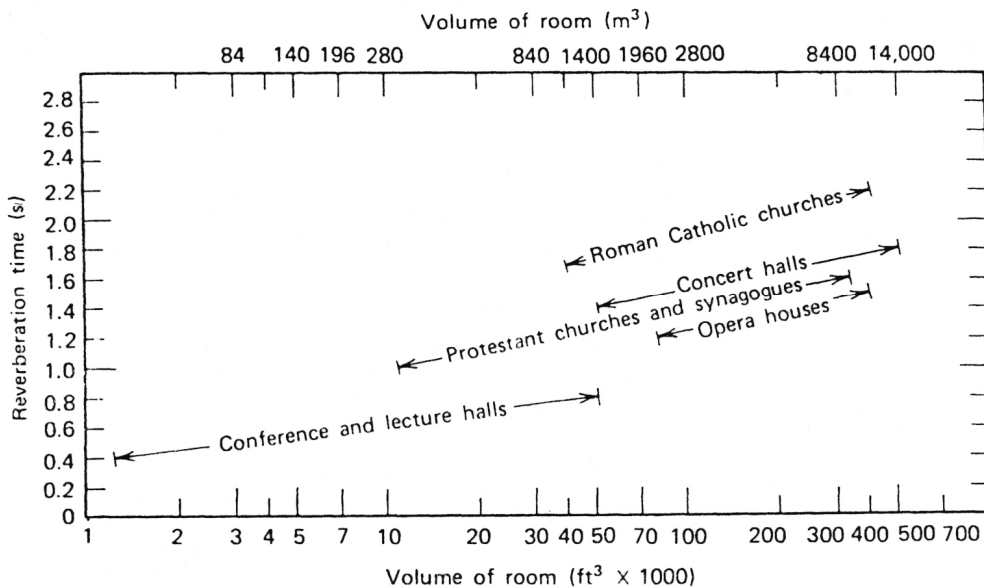
D.R. Raichel, *The Science and applications of acoustics* (Springer, 2006)

## Aplicações

### 1 – Acústica da sala D1

A sala de aula D1 tem 10.4 m de comprimento, 7 m de largura e 3.3 m de altura. A sala têm 14.5 m<sup>2</sup> de janelas. As paredes são rebocadas (coeficiente de absorção  $\alpha_1 = 0.05$  a 500 Hz), o teto é chapiscado ( $\alpha_2 = 0.20$ ), o piso é de pedra ( $\alpha_3 = 0.02$ ), as janelas são de vidro ( $\alpha_4 = 0.12$ ). A sala tem  $n = 50$  cadeiras.

- Verifique que a absorção das paredes é  $A_1 = \alpha_1 S_1 = 5$  sabins, onde  $S_1$  é a área das quatro paredes (descontados os 14.5 m<sup>2</sup> da área das janelas).
- Determine a absorção do teto ( $A_2 = \alpha_2 S_2$ ), a do piso ( $A_3 = \alpha_3 S_3$ ), a das janelas de vidro ( $A_4 = \alpha_4 S_4$ ). Verifique que a absorção total  $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 22.8$  sabins
- Calcule o coeficiente de absorção médio da sala  $\alpha' = A/S$ , onde  $S$  é a area interna da sala. Verifique que  $\alpha' < 0.2$ , portanto pode ser utilizada a expressão de Sabine para determinar o tempo de reverberação  $TR$  da sala. Calcule  $TR$ .
- Consulte o gráfico da figura 1 para saber qual o tempo de reverberação recomendado para a sala de aula D1. Compare o  $TR$  calculado com o valor recomendado.
- A absorção resultante da sala estar ocupada por  $n$  estudantes é  $A_5 = n\alpha_5$  onde  $\alpha_5 = 0.56$ . Calcule o tempo de reverberação da sala ocupada.



**Figura 1:** tempos de reverberação recomendados para vários ambientes, definidos por sua função e por seu volume (Ref: Rigden, *Physics and the sound of music*)

## 2 – Atenuação de ruído por uma barreira

A sala de eventos do campus 1 da USP-S. Carlos é utilizada para festas e formaturas. Para atenuar o nível do ruído nas residências próximas a sala foi construído um muro de 6.5 m de altura e 42 m de comprimento para atuar como barreira sonora. O espesso muro de cimento impede a transmissão do som pela barreira, mais quando a onda sonora atinge o topo da barreira ela é curvada para baixo devido ao fenômeno de difração. Por este fenômeno, as ondas sonoras podem contornar obstáculos criando novas séries de ondas. Calcule a atenuação sonora em dB, com e sem a barreira, para um ruído de intensidade  $L_W = 100$  dB na sala de eventos. A sala está 15 m da barreira e as residências estão a 13 m ao outro lado do muro. Considere  $f = 500$  Hz.

a) O nível de intensidade para uma onda sonora propagando-se no ar livre é:  $L_P \approx L_W - 20 \log(r) - 11$  dB, onde  $r$  é a distância da fonte sonora até o receptor. Calcule  $L_P$  considerando  $r = 13 + 15 = 28$  m

b) A atenuação sonora da barreira  $a$ , resultante do fenômeno de difração no topo da barreira pode ser expressada em função do número de Fresnel  $N$

$$a = 5 + 20 \log \sqrt{2\pi N}$$

onde: 
$$N = \frac{2(A + B - C)}{\lambda} = \frac{2(A + B - C)f}{v_s}$$

$v_s = 343$  m/s é a velocidade do som no ar e as distâncias  $A$ ,  $B$  e  $C$  estão indicadas na figura. A distância  $C$  representa a trajetória do som direto fonte – receptor. A distância  $(A + B)$  representa a trajetória do som refratado. Mostre que a atenuação sonora desta barreira é  $a = 22$  dB. Calcule o nível de intensidade sonora no receptor,  $L = L_P - a$

