



Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos - IFSC

7600100 Acústica Física

Acústica de salas: reverberação

Prof. Dr. José Pedro Donoso

Agradescimentos

Os docentes da disciplina gostariam de expressar o seu agradecimento as editoras **LTC** (Livros Tecnicos e Científicos), **Cengage Learning** e **E. Blucher** pelo acesso às figuras dos livros textos: "*Física*" de Tipler & Mosca e "*Fundamentos de Física*" de Halliday, Resnick e Walker (LTC), "*Principios de Física*" de Serway & Jewett (Cengage Learning), "*Física*" de Cutnell & Johnson e "*Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*" (Blucher).

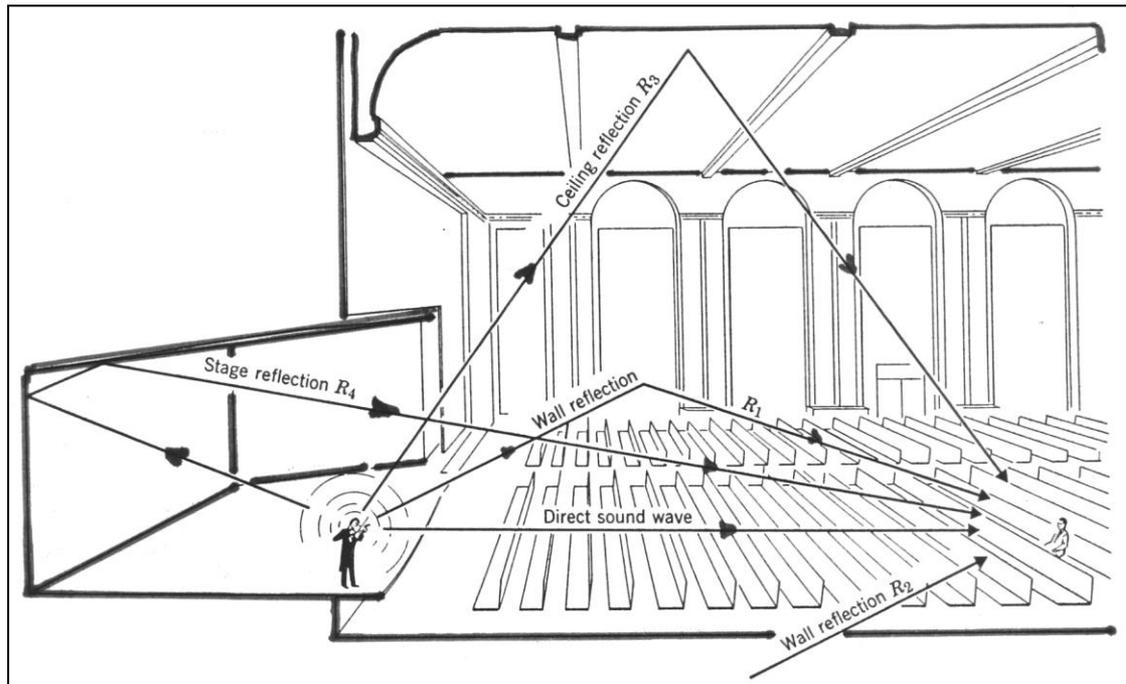
Acústica de salas e auditórios

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.

Considera-se que uma diferença de tempo entre o som direto e o indireto menor que 0.5 seg. é acusticamente favorável. Neste caso, as reflexões não incomodam para entender a voz falada pois elas aumentam a intensidade do som que chega ao ouvido.

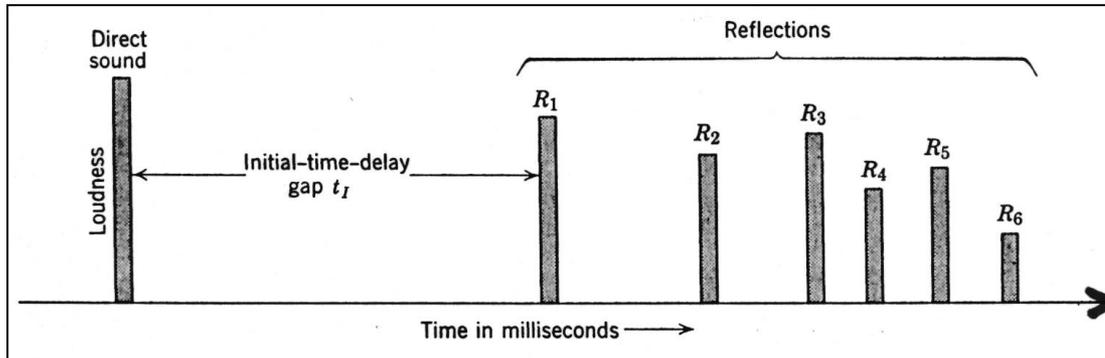
No caso de música, estas reflexões favorecem a mistura (*amalgama*) dos sons contribuindo para o colorido musical.

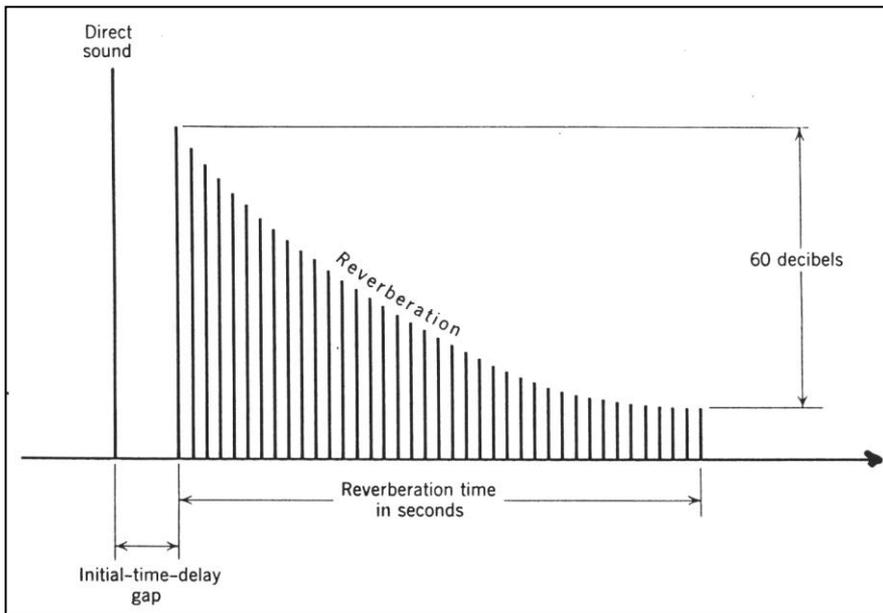
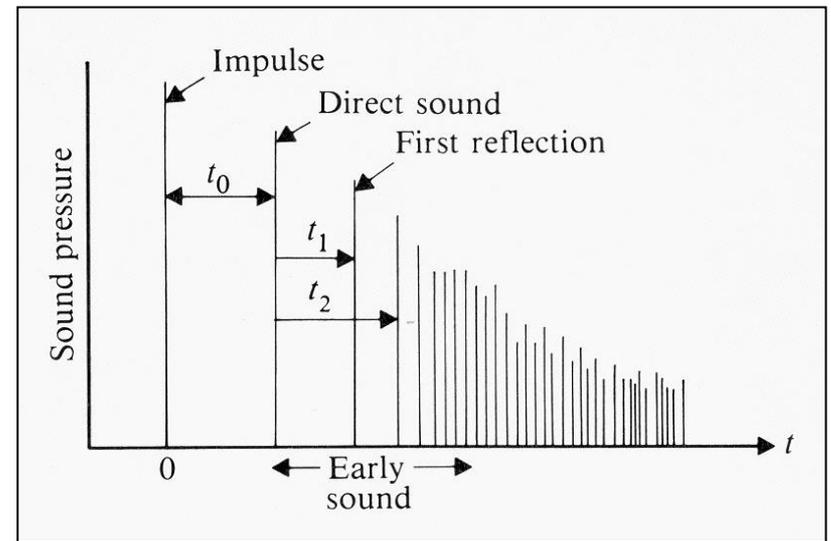
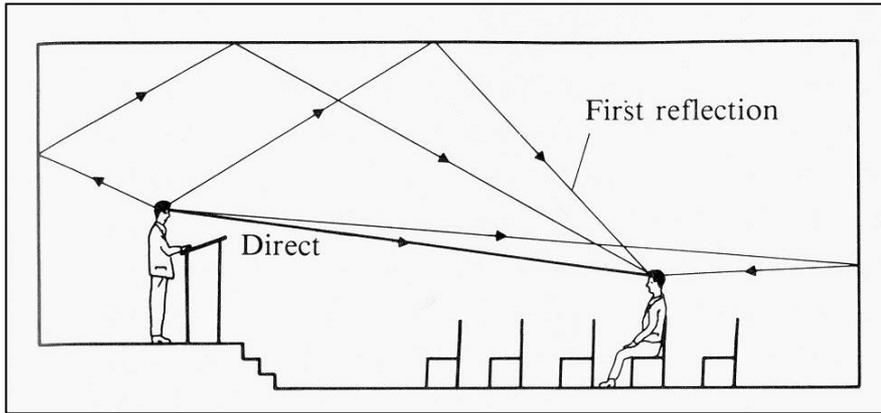
Quando o som é refletido de forma reiterativa, se tem a **reverberação**.



A figura mostra as trajetórias do **som direto** e do **som refletido** até o espectador, numa sala de concerto.

O som direto chega primeiro no espectador. A seguir chegam os sons refletidos das superfícies mais próximas e, finalmente, as reflexões das superfícies mais afastadas.





Em acústica, define-se a **reverberação** como a persistência do som no ambiente. Ela é parametrizada pelo **tempo de reverberação**. Por definição, este tempo corresponde ao decaimento em **60 dB** na intensidade do som reverberante.

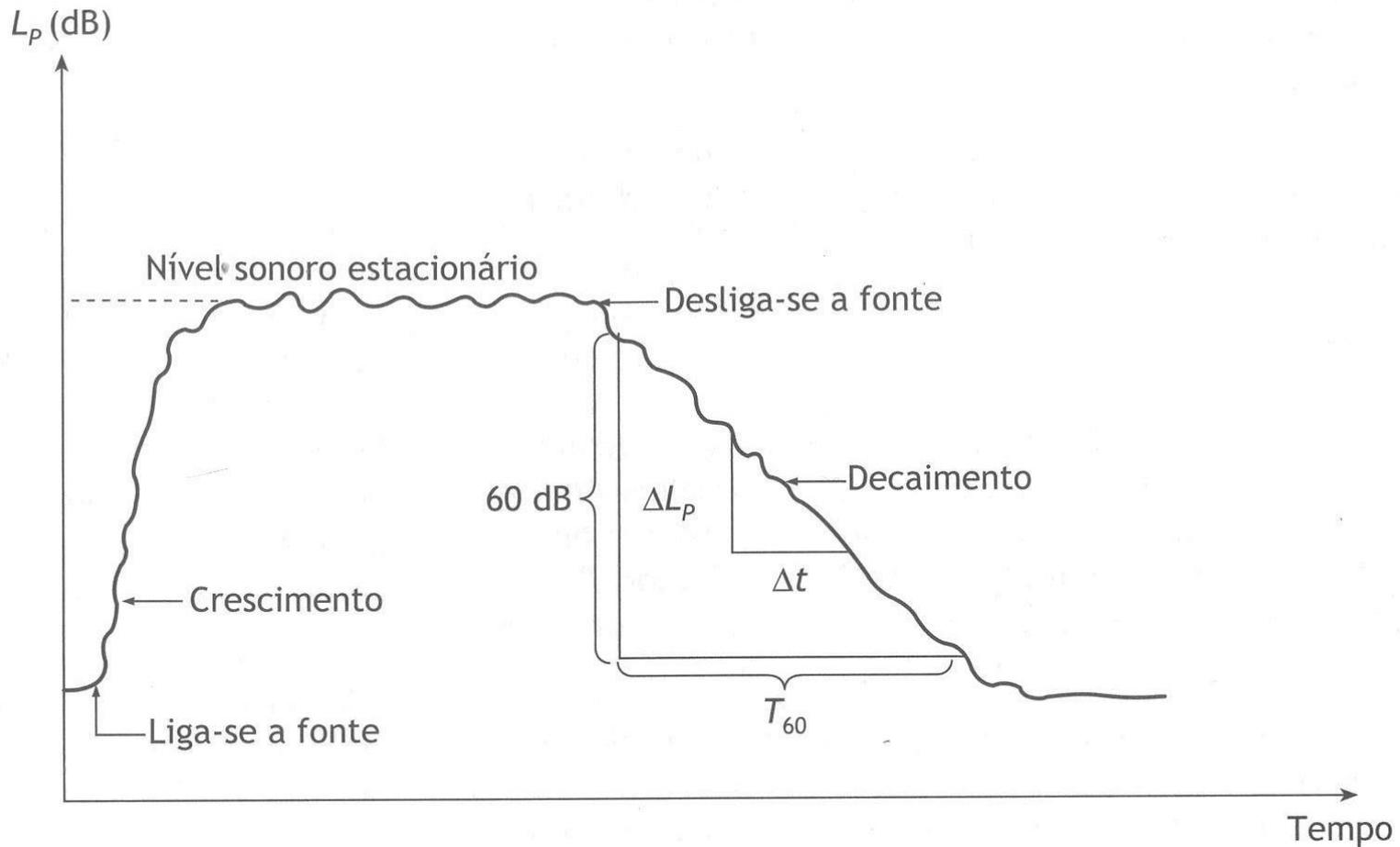
Rigden. *Physics and the sounds of music*
 Rossing. *The Science of sound*

Quando se liga uma fonte sonora em um recinto, a energia sonora se eleva até atingir uma condição de equilíbrio (nível sonoro estacionário). Nessas condições, a energia sonora fornecida pela fonte é equilibrada pela energia sonora absorvida no recinto.

Ao se desligar a fonte sonora, o nível sonoro no recinto cai. A queda será tanto mais rápida quanto maior for a absorção sonora do recinto.

Define-se o **tempo de reverberação** como o tempo necessário para que o nível sonoro do recinto caia 60 dB após o desligamento da fonte sonora. O **tempo de reverberação** será longo em recintos com pouca absorção sonora, e curto em recintos com muita absorção sonora.

Ref.: Bistafa. *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído* (Blucher, 2011) Seção 10.2



Crescimento e decaimento do nível sonoro em recintos, com indicação do tempo de reverberação (rotulado T_{60})

Ref.: Bistafa. *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído* (Blucher, 2011) Seção 10.2.

Para cada tipo de sala existe um **tempo de reverberação** apropriado. Para as salas destinadas a palavra falada, o tempo ótimo de reverberação é menor que para as salas destinadas a música. Nestas salas a reverberação é até certo ponto necessária, a fim de imprimir qualidade acústica a música orquestral.

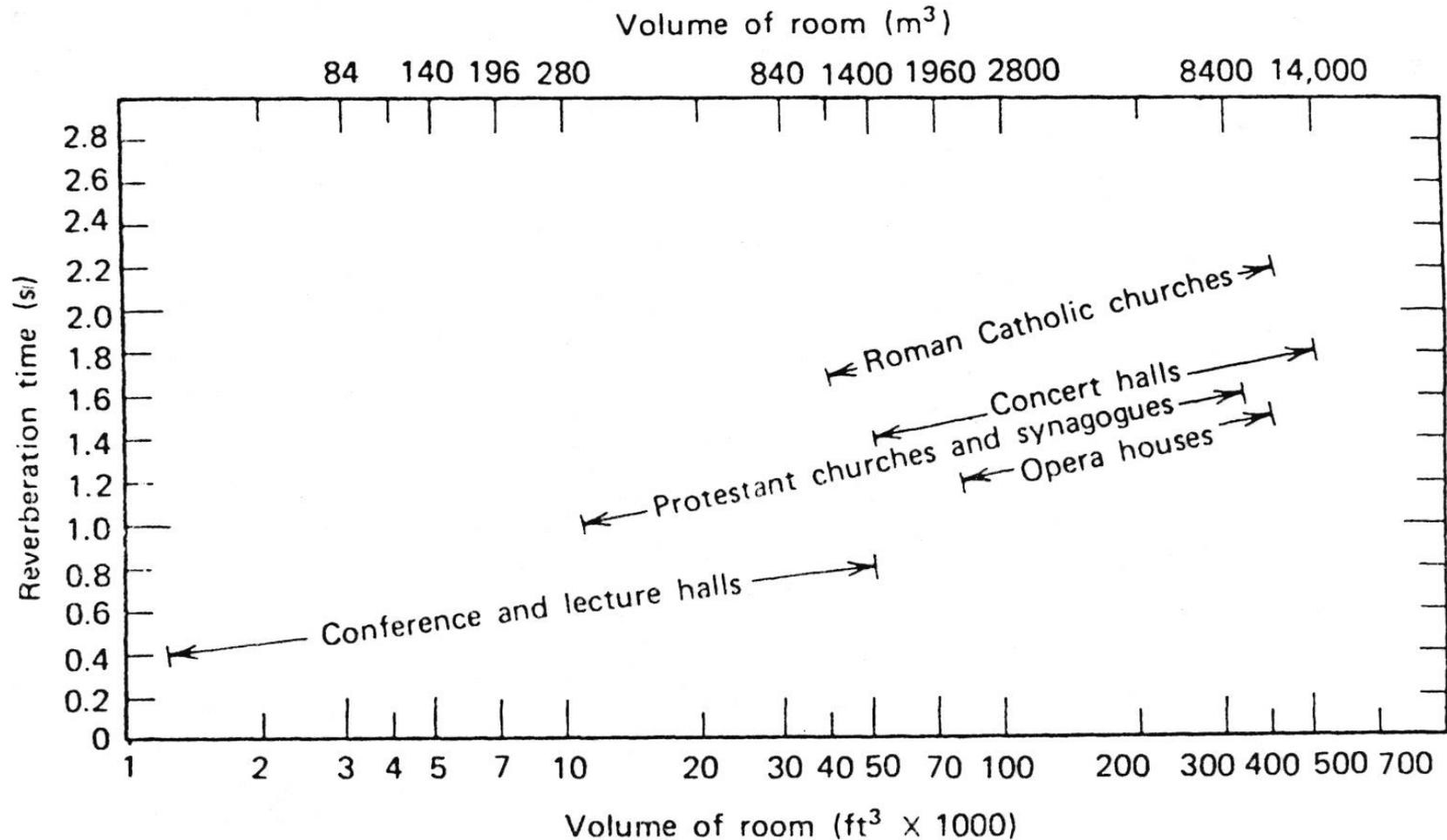
Tempos de reverberação para recintos escolares:

Tipo de compartimento	Tr para $125 \text{ Hz} < f < 250 \text{ Hz}$	Tr para $250 \text{ Hz} < f < 4.000 \text{ Hz}$
Salas de aula teórica	Tr < 1,2 s	0,8 s < Tr < 1,0 s
Sala de educação musical	Tr < 1,5 s	1,0 s < Tr < 1,3 s
Refeitórios	Tr < 1,5 s	1,0 s < Tr < 1,3 s
Ginásios	Tr < 3,0 s	1,5 s < Tr < 2,5 s

Léa Cristina Lucas de Souza, Manuela Guedes de Almeida, Luís Bragança.
Bê-á-bá da Acústica Arquitetônica (EDUFSCar, 2006) Tabela 17.

Tempos de reverberação

Depende do volume da sala e da absorção das paredes





Wallace Clement Sabine (1868-1919)

Paul Earls Sabine (1879-1958), primo

Hale Johnson Sabine (1909-1981), filho

Wallace Clement Sabine, professor de Matemáticas e Filosofia Natural da Universidade de Harvard, foi o primeiro a pesquisar as propriedades de absorção em salas. Os trabalhos de Sabine em acústica começaram quando foi consultado sobre a acústica problemática de uma sala de conferências no *Fogg Art Museum* construído em 1895 na Universidade de Harvard. O tempo de reverberação dessa sala era muito longo (4 a 5 segundos) o que deixava a fala confusa e ininteligível.

Rachel, *The Science & Applications of Acoustics* (Springer, 2006)
Perez Miñana. *Compendio práctico de acústica* (Ed. Labor, 1969)

Sabine resolveu o problema introduzindo na sala materiais absorventes (**almofadas**). Ele concluiu que o tempo de reverberação era inversamente proporcional a área total das superfícies absorventes. Sabine estendeu seus experimentos para salas de diferentes tamanhos e deduziu que o tempo de reverberação era diretamente proporcional ao volume das salas.

As pesquisas de Sabine levaram a uma relação empírica para o tempo de reverberação (TR , em segundos). A fórmula de Sabine foi posteriormente demonstrada teoricamente (ver Anexo)

Luis Jesús Arizmendi. *Tratado Fundamental de Acústica en la Edificación*. (Ed. Universidad de Navarra, 1980)
Beyer. *Sounds of Our Times* (Springer & AIP, 1999)

Tempo de reverberação

W.A. Sabine propus em 1896 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** (A , em *sabins*):

$$TR = 55.2 \frac{V}{A \cdot v_s} = 0.16 \frac{V}{A}$$

Como o ar também contribui para a absorção do som em altas f , o tempo de reverberação para um auditório será:

$$TR = 0.16 \frac{V}{A + mV}$$

onde m representa a absorção do ar ($m = 0.12$ para o ar a 2000 Hz, 20 °C e 30% de umidade relativa). Esta formula de Sabine é válida se absorção for pequena.

Tempo de reverberação

A formula de Eyring (1930) para o tempo de reverberação TR resulta de uma aproximação estatística que supõe que a energia reverberante está uniformemente distribuída na sala:

$$TR = -\left(\frac{0.16V}{S \ln(1-\alpha)} \right)$$

Onde a absorção da superfície é $A = \alpha S$, onde α é o coeficiente de absorção e S é a área da superfície. Esta formula funciona bem se os coeficientes de absorção das paredes, o teto e o piso não forem muito diferentes.

Os **tempos de reverberação** podem ser calculados com as relações de Sabine ou de Eyring a partir da **absorção A** da superfície de área **S** : **$A = \alpha S$**

Coeficientes de absorção (α)

	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

Comparação das formulas de Sabine e de Eyring

Consideremos uma sala de 25 m × 15 m × 10 m. O volume da sala é $V = 3750 \text{ m}^3$ e a área das superfícies é $S = 1550 \text{ m}^2$. Calculamos o tempo de reverberação com as fórmulas de Sabine e de Eyring com coeficientes de absorção $\alpha = 0.1$ a 0.8

Coeficiente de Absorção α	TR (Sabine)	TR (Eyring)	Diferença
0.1	3.87 s	3.67 s	5 %
0.2	1.93 s	1.73 s	10 %
0.4	0.97 s	0.76 s	21 %
0.8	0.48 s	0.24 s	50 %

Verificamos que a fórmula de Sabine *superestima* o tempo de reverberação quando o coeficiente de absorção da sala é mais alto.

Se o coeficiente de absorção médio da sala for inferior a 0.2, a fórmula de Sabine é adequada

Para salas com absorção muito forte, a fórmula de Eyring fornece resultados aceitáveis.

Ref.: Antonio Fischetti. *Initiation a l'Acoustique* (Belin, Paris, 2003) Chapitre 3

Nas salas destinadas a **música**, o **tempo de reverberação** (TR) deve ser calculado para baixas, para médias e para altas frequências (separando bandas em oitava) considerando a absorção média da sala sem o público (A_s), a absorção do piso (A_p) e a absorção das pessoas (A_{occ}).

Exemplo: sala de concerto de 3750 m^3 , com TR médio de 1.7 s:

f (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
A_i (m ²)	17	20	23	26	36	41
A_p (m ²)	157	236	303	356	337	307
A_{occ} (m ²)	212	300	377	439	450	437
$TR = \frac{0,16V}{A_{occ}}$ (s)	2,83	2	1,59	1,37	1,33	1,37

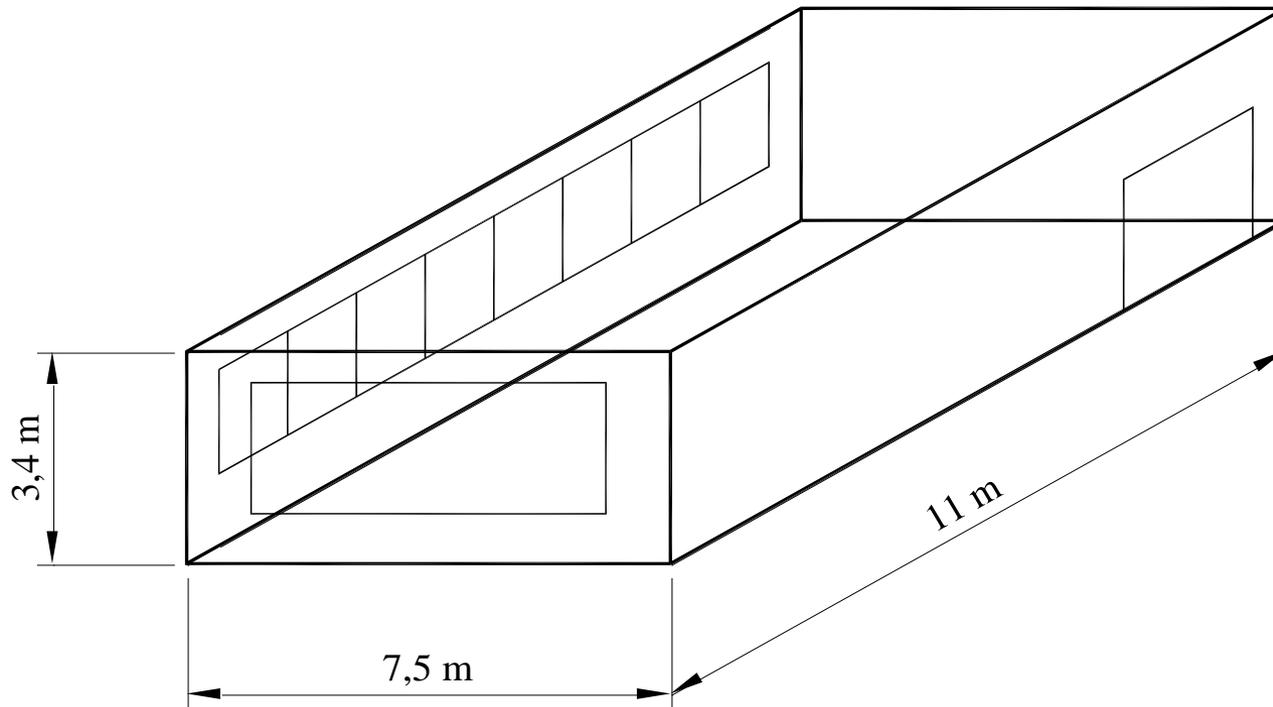
De todas as propriedades que permitem caracterizar a qualidade acústica de uma sala, a mais importante é sua reverberação, porque o tempo de reverberação fornece uma boa indicação do **brilho** e da **expressividade** da sala (***liveness***, em inglês).

Quando não há reverberação, a sala parece não ter vida; o som desaparece rapidamente e a acústica será bem “seca”.

Já uma reverberação muito longa, pelo contrário, dificulta a audição porque cada som se superpõe com o som anterior deixando a audição confusa. Uma reverberação excessiva afeta especialmente a audição das palavras faladas em salas de aula e auditórios, prejudicando a inteligibilidade da fala.

Exemplo 1: Acústica de uma sala de aulas

A sala de aula tem 11 m de comprimento, 7.5 m de largura e 3.4 m de altura. A sala têm 14 m² de janelas de vidro, um quadro negro de 5.6 m² e uma porta de 3 m²



Coeficientes de absorção

- As paredes da sala são rebocadas ($\alpha_1 = 0.03$ a 500 Hz),
- o forro é de gesso ($\alpha_2 = 0.03$),
- as janelas são de vidro ($\alpha_3 = 0.18$),
- o piso é de granito ($\alpha_4 = 0.01$),
- as portas são de madeira ($\alpha_5 = 0.14$),
- o quadro negro é de madeira compensada ($\alpha_6 = 0.07$).
- uma pessoa sentada numa cadeira é $\alpha_7 = 0.32$.

a) Determine a absorção das paredes, do forro, do piso, das janelas, das portas, do quadro negro e do fato da sala estar ocupada por 45 estudantes. Calcule o valor da absorção total.

Resposta

A absorção da superfície (em *sabins*) é o produto entre a área da superfície (em m^2) e o coeficiente de absorção (α). A área das paredes da sala é $2 \times (3.4 \times 7.5) + 2 \times (3.4 \times 11) = 125.8 \text{ m}^2$. Descontando as áreas das portas, das janelas e do quadro negro, obtemos:

Área das paredes: $S_1 = 103.2 \text{ m}^2$

Área do forro: $S_2 = 82.5 \text{ m}^2$

Área das janelas: $S_3 = 14 \text{ m}^2$

Área do piso: $S_4 = 82.5 \text{ m}^2$

Área das portas: $S_5 = 3 \text{ m}^2$

Área do quadro negro: $S_6 = 5.6 \text{ m}^2$

Área total destas superfícies: $S_t = 290.8 \text{ m}^2$

A absorção destas superfícies são:

Absorção das paredes: $A_1 = S_1 \times \alpha_1 = (103.2 \text{ m}^2) \times (0.03) = 3.1 \text{ sabins}$

Absorção do forro: $A_2 = S_2 \times \alpha_2 = (82.5 \text{ m}^2) \times (0.03) = 2.5 \text{ sabins}$

Absorção das janelas: $A_3 = S_3 \times \alpha_3 = (14 \text{ m}^2) \times (0.18) = 2.5 \text{ sabins}$

Absorção do piso: $A_4 = S_4 \times \alpha_4 = (82.5 \text{ m}^2) \times (0.01) = 0.8 \text{ sabins}$

Absorção das portas: $A_5 = S_5 \times \alpha_5 = (3 \text{ m}^2) \times (0.14) = 0.4 \text{ sabins}$

Absorção do quadro negro: $A_6 = S_6 \times \alpha_6 = (5.6 \text{ m}^2) \times (0.07) = 0.4 \text{ sabins}$

A absorção resultante da sala estar ocupada por $n = 45$ estudantes é:

$$A_7 = n \times \alpha_7 = 45 \times 0.32 = 14.4 \text{ sabins}$$

A absorção total é: $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 = 24.1 \text{ sabins}$

b) Calcule o coeficiente de absorção médio da sala $\alpha' = A/S$, onde S é a área interna da sala. Verifique que $\alpha' < 0.2$, portanto pode ser utilizada a expressão de Sabine para determinar o tempo de reverberação da sala.

Resposta

Coeficiente de absorção médio da sala:

$$\alpha' = \frac{A}{S_t} = \frac{24.1}{290.8} = 0.08$$

Como $\alpha' < 0.2$, podemos usar a expressão de Sabine para determinar o tempo de reverberação da sala.

c) Calcule o tempo de reverberação da sala a 500 Hz. O tempo de reverberação recomendado para uma sala de 280 m³ é entre 0.6 e 0.8 s. Compare o TR calculado com o valor recomendado.

Resposta

Volume da sala: $V = 11 \text{ m} \times 7.5 \text{ m} \times 3.4 \text{ m} = 280.5 \text{ m}^3$

$$TR = 0.16 \frac{V}{A} = 0.16 \frac{280.5}{24.1} = 1.9s$$

Este tempo de reverberação está acima do valor recomendado para uma sala de aula de 300 m³, que é menos de 1 s

Uma forma de corrigir este problema é aumentar as superfícies absorventes. Se o forro de gesso for substituído por um forro de material fono-absorvente com um coeficiente de absorção de, por exemplo, 0.30, a absorção do forro será $A_2 = S_2 \times \alpha_2 = (82.5 \text{ m}^2) \times (0.30) = 24.8$ sabins, a absorção total será $A = 46.4$ sabins e o tempo de reverberação será:

$$TR = 0.16 \frac{V}{A} = 0.16 \frac{280.5}{46.4} = 1s$$

Colocando cortinas na sala, conseguiremos que o tempo de reverberação se reduza a um valor compatível com o recomendado. Existe uma grande diversidade de materiais fono-absorventes, como lãs minerais, espumas de poliuretano e tecidos absorventes que podem ser utilizados para melhorar a acústica dos locais

Exemplo 2: efeito de uma tapeçaria

Uma sala possui um volume de **750 m³** e a soma da área das paredes internas é **S₁ = 550 m²**. As paredes são de madeira (coeficiente de absorção $\alpha_1 = 0.15$). Uma tapeçaria de algodão de **S₂ = 24 m²** ornamenta uma das paredes (coeficiente de absorção $\alpha_2 = 0.7$). O proprietário deseja retirar a tapeçaria e deseja saber se vai ter consequências na acústica da sala.

Observação: uma variação do tempo de reverberação maior de 4% é perceptível. Esse é o limite relativo de discriminação de TR.

Resposta:

Calculo do tempo de reverberação da sala com a tapeçaria. As paredes de madeira cobrem $(550 - 24) = 526 \text{ m}^2$.

$$\text{Absorção: } A = (S_1 - S_2) \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 = (526 \times 0.15) + (24 \times 0.7) = 95.7$$

sabins

$$\text{O coeficiente de absorção médio é } \alpha = \frac{A}{V} = \frac{95.7}{550} = 0.17$$

Como $\alpha < 0.2$, podemos usar a equação de Sabine para calcular TR

$$TR = 0.16 \frac{V}{A} = 0.16 \frac{750}{95.7} = 1.25 \text{ s}$$

Se retira a tapeçaria. A absorção agora é: $A = S_1 \cdot \alpha_1 = (550 \times 0.15) = 82.5 \text{ sabins}$

$$TR = 0.16 \frac{V}{A} = 0.16 \frac{750}{82.5} = 1.45 \text{ s}$$

A variação de TR ao retirar a tapeçaria foi de

$$\frac{1.45 - 1.25}{1.25} = 16\%$$

Essa variação do tempo de reverberação será claramente perceptível na acústica do ambiente.

Ref.: Fischetti, Initiaton a l`acoustique (Belin, Paris,2003)

Exemplo 3

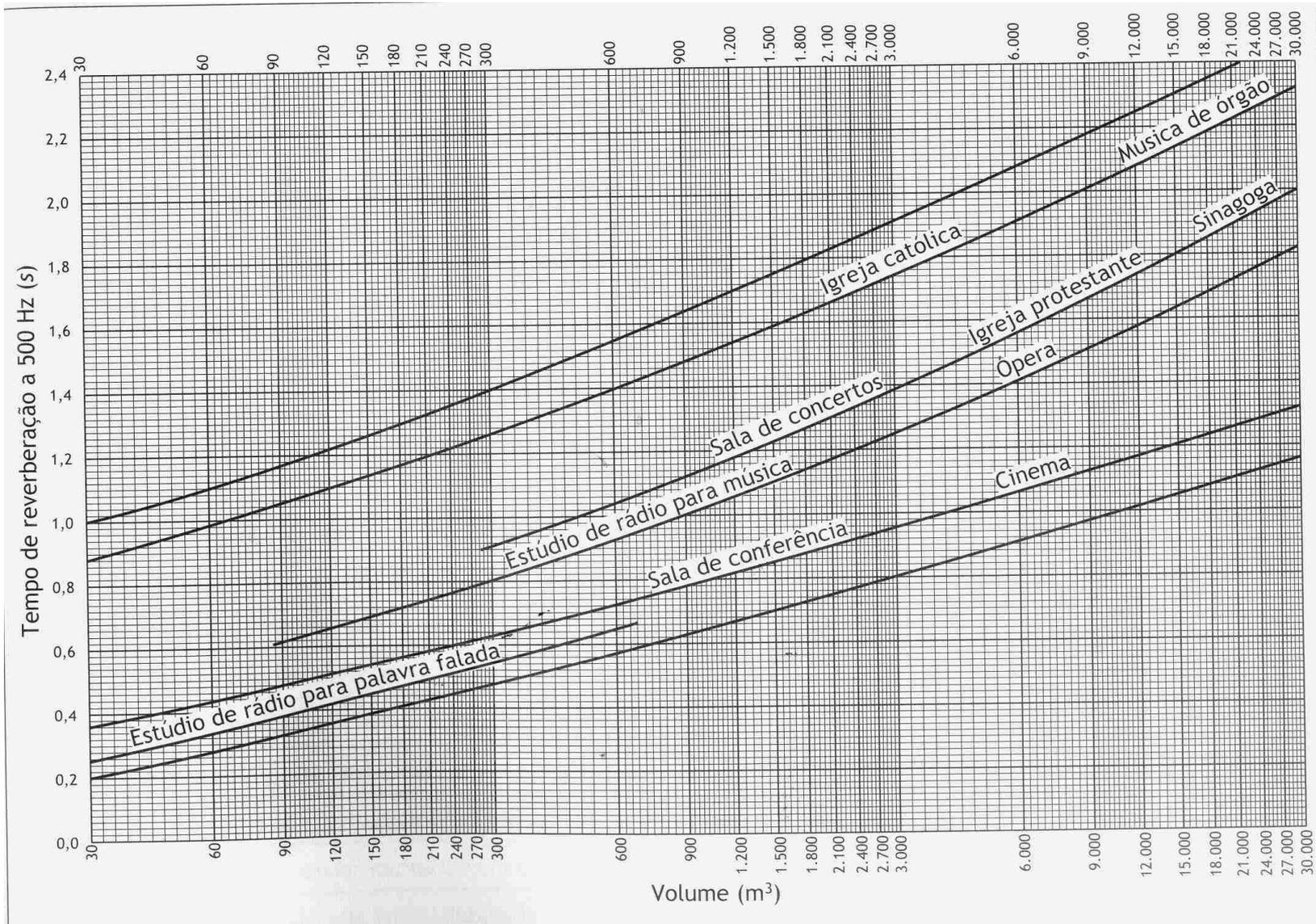
(Adaptado de : Bistafa. *Acústica Aplicada*. Exemplo 10.2)

Considere uma sala de seminários de 7 m × 7 m × 2.8 m ocupada por oito pessoas sentadas. O piso está revestido com carpete, o teto com *Sonex* (espuma de poliuretano) e as paredes são de alvenaria revestida com gesso. A porta da sala é de madeira e tem 2.1 m × 0.9 m.

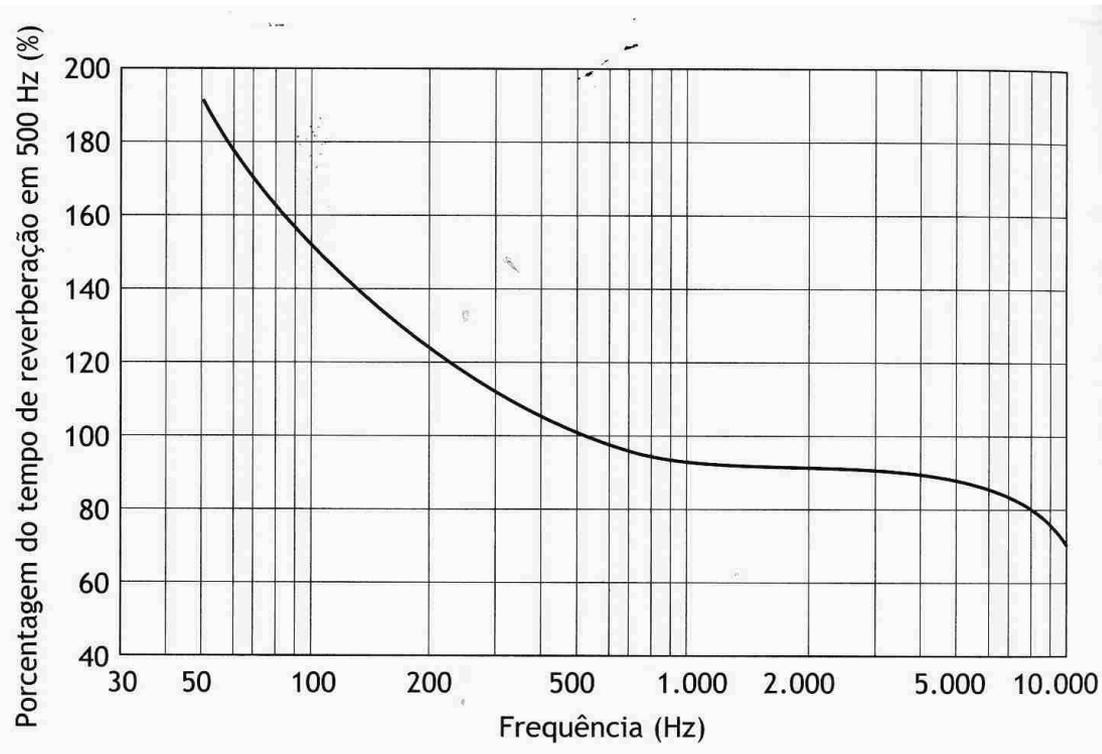
Tempos de reverberação calculados com a Eq. de Sabine:

Absorção	125 Hz	500 Hz	2000 Hz
A (piso)	2.45	4.90	14.7
A (teto)	0.98	10.80	27.44
A (paredes)	1.53	2.29	3.06
A (pessoas)	1.60	1.56	3.28
A (porta)	0.45	0.26	0.25
A - Sala	7.01	19.8	48.73
TR	3.13 s	1.10 s	0.45 s

Tempos de reverberação recomendados em 500 Hz



Cálculo do tempo de reverberação em outras frequências



Bistafa. *Acústica Aplicada*

Gráfico para obtenção dos tempos de reverberação recomendados (TR) para outras frequências, como porcentagem do TR recomendado em 500 Hz.

Exemplo: se o TR recomendado for 0.5 s a 500 Hz, em 125 Hz o TR recomendado será 150% daquele em 500 Hz, ou seja $TR = 0.75$ s

Sala de seminários

Tempo de reverberação	125 Hz	500 Hz	2000 Hz
Calculado	3.15 s	1.06 s	0.45 s
Recomendado	0.75 s	0.5 s	0.48 s

Bistafa. *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. Exemplo 10.2

Verifica-se que o tempo de reverberação em altas frequências (2000 Hz) está adequado ao uso da sala de seminários. Porém, há necessidade de se introduzir mais absorção na sala para reduzir o tempo de reverberação nas baixas e nas médias frequências.

A opção de aumentar a quantidade do material absorvente colocando *Sonex* nas paredes, irá reduzir o TR em 2000 Hz, o que é inconveniente. A recomendação é introduzir dispositivos especializados de absorção sonora, como painéis ressonantes sintonizados na faixa 125 Hz a 500 Hz, ou painéis perfurados com material absorvente poroso no seu interior.

Tempo de reverberação recomendado para salas de aula (TR)

Ref.: P.H.T. Zannin, D.P.Z. Zwirtes. *Applied Acoustics* **70** (2009) 626–635.

Brasil

$0.4 < TR \leq 0.6$ s – salas de aula com $120 < V \leq 300$ m³

Ref.: NBR12179. *Brazilian standard for acoustical treatment of closed rooms*. Rio de Janeiro, Brazil (in Portuguese); 1992.

França

$0.4 < TR < 0.8$ s – salas de aula com $V \leq 250$ m³

$0.6 < TR < 1.2$ s – salas de aula com $V > 250$ m³

Alemanha

TR entre 0.8 e 1.0 s – salas de aula com $V \sim 250$ m³

TR entre 0.9 e 1.1 s – salas de aula com $V \sim 500$ m³

TR entre 1.1 e 1.2 s – salas de aula com $V \sim 750$ m³

Japon

TR = 0.6 s – salas de aula com $V \sim 200 \text{ m}^3$

TR = 0.7 s – salas de aula com $V \sim 300 \text{ m}^3$

Grão Bretanha

TR < 0.6 s (ensino básico e salas pequenas)

TR < 0.8 s (ensino médio e salas de seminários)

Estados Unidos

TR = 0.6 s – salas de aula com $V < 283 \text{ m}^3$

TR = 0.7 s – salas de aula com $283 \text{ m}^3 < V \leq 566 \text{ m}^3$

Ref.: P.H.T. Zannin, D.P.Z. Zwirtes. Applied Acoustics **70** (2009) 626–635.

Anexo

Formula de Sabine para o Tempo de Reverberação

Em uma sala, as perdas de energia sonora correspondem a energia absorvida pelas paredes. Para que o nível sonoro na sala seja constante, a energia emitida pela fonte deve ser igual a aquela absorvida pelas paredes

E_e = energia emitida pela fonte sonora

Por definição, a potência sonora (em watts) é igual a energia emitida (em joules) por intervalo de tempo. Para um $\Delta t = 1$ s, a energia emitida é:

$$E_e = P \times 1 s$$

E_a = energia absorvida pelas paredes da sala

Por definição, a energia absorvida por uma parede é igual a energia incidente vezes o coeficiente de absorção: $E_a = \alpha \times E_i$

$$E_e = \alpha \times E_i$$

E_i = energia incidente sobre as paredes

Por definição, a intensidade sonora (em W/m²) é igual a energia (em joules) que atravessa a superfície por intervalo de tempo (em segundos) e a área S da superfície (em m²)

$$I_r = \frac{E_i}{S \cdot \Delta t}$$

Para um intervalo $\Delta t = 1$ s, a energia incidente é:

$$E_i = I_r \times S$$

Então, a energia absorvida é: $E_a = \alpha \times E_i = \alpha \times I_r \times S = A \cdot I_r$

A conservação de energia exige: $E_e = E_a \Rightarrow P = A \cdot I_r$

A intensidade sonora que reverbera na sala:

$$I_r = \frac{P}{A}$$

O tempo de reverberação (TR) é o tempo que demora o som para decair 60 dB na sala após desligar a fonte sonora. Seja L_0 o nível de intensidade reverberante na sala antes de desligar a fonte e, $L(TR)$ o nível depois de um tempo TR

$$L_0 - L(TR) = 60 \text{ dB}$$

O nível de intensidade reverberante na sala

$$L_0 = 10 \cdot \log \left(\frac{I_r}{I_0} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{P}{A \times 10^{-12}} \right)$$

Depois de desligada a fonte sonora, a intensidade reverberante decai exponencialmente

$$I_r(t) = \frac{P}{A} e^{-t/\tau}$$

Onde τ é a constante de tempo da sala (de **volume** V (em m^3), **absorção** A (em m^2 ou sabins))

$$\tau = \frac{4V}{A \cdot v_s}$$

Quando $t = TR$

$$I_r(t) = \frac{P}{A} e^{-TR/\tau}$$

O nível de intensidade reverberante fica

$$L(TR) = 10 \cdot \log \left(\frac{P e^{-TR/\tau}}{A \times 10^{-12}} \right) = L_0 + 10 \cdot \log \left(e^{-TR/\tau} \right)$$

Lembrando a transformação de logaritmo decimal para logaritmo neperiano:

$$\log(x) = \frac{\ln(x)}{\ln(10)}$$

Então

$$L(TR) = L_0 + 10 \cdot \frac{\ln \left(e^{-TR/\tau} \right)}{\ln(10)} = L_0 - \frac{10 \cdot TR}{\tau \cdot \ln(10)}$$

De acordo a definição do tempo de reverberação

$$L_0 - L(TR) = 60 \text{ dB}$$

Então podemos escrever

$$\frac{10 \cdot TR}{\tau \cdot \ln(10)} = 60$$

Ou seja

$$TR = 6 \times \tau \cdot \ln(10) = 6 \times \frac{4V}{Av_s} \times \ln(10)$$

Substituindo o valor da velocidade do som $v_s = 340 \text{ m/s}$ e $\ln(10) = 2.3$, obtemos a formula de Sabine para o tempo de reverberação

$$TR \approx 0.16 \frac{V}{A}$$

Ref.: Antonio Fischetti. *Initiation a l'Acoustique* (Belin, Paris, 2003) Annexe 3