

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

7600106 Física (Arquitetura)

Acústica de Salas

Prof. Dr. José Pedro Donoso

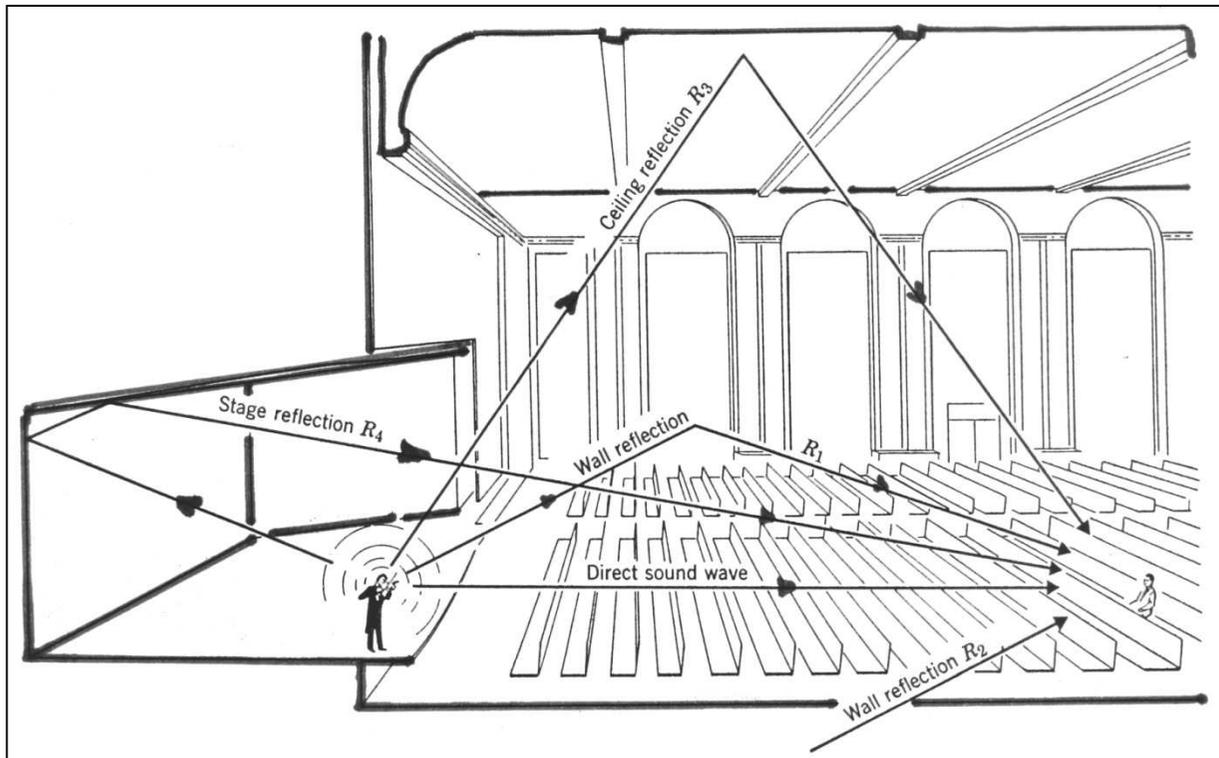
Acústica de salas e auditórios

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.

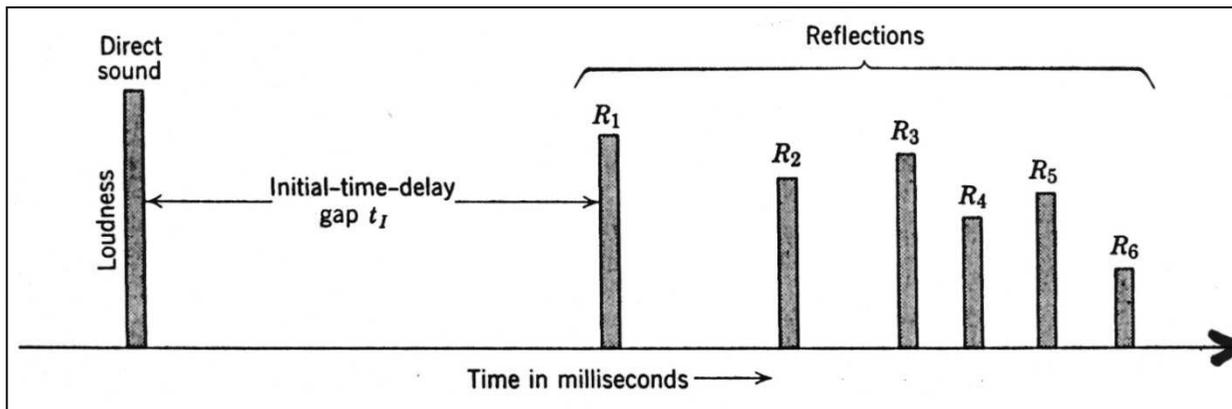
No caso de música, estas reflexões favorecem a mistura (*amalgama*) dos sons contribuindo para o colorido musical.

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

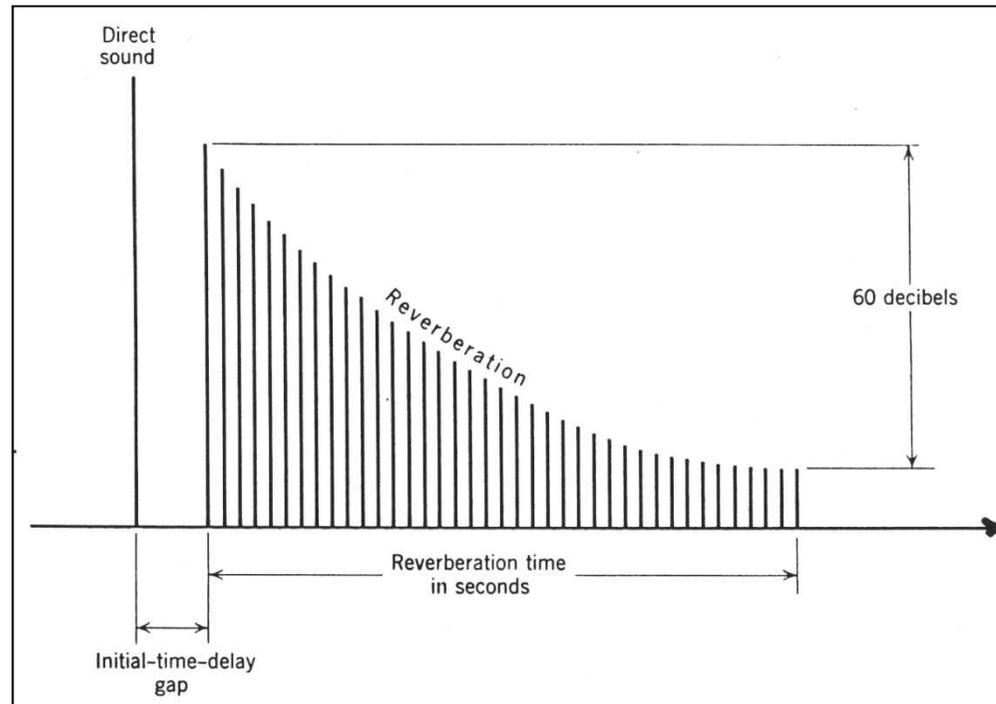


A figura mostra um músico tocando um violino e as trajetórias do som direto e do som refletido até o espectador, numa sala de concerto.

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.



Leo L. Beranek, *Music, acoustic and architecture* (Wiley, 1962)



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.



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.

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

Tempo de reverberação

As pesquisas de W.A. Sabine levaram a uma relação empírica para o **tempo de reverberação** τ (em seg), proporcional ao **volume** V da sala (m^3) e inversamente proporcional a **absorção da superfície** (A , em m^2 ou *sabins*) :

$$\tau = 0.16 \frac{V}{A}$$

Em altas freqüências, o ar também contribui para a absorção do som. O tempo de reverberação para um auditório será:

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

onde m representa a absorção do ar ($m = 0.12$ para o ar a 2000 Hz, 20 °C de temperatura e 30% de umidade relativa).

The Science of sound. Th. D. Rossing (Addison Wesley, 1990)

A **reverberação** pode-se ser atenuada utilizando superfícies inclinadas ou materiais absorventes.

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 α *coeficiente de absorção do material* (Tabela)

	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

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.

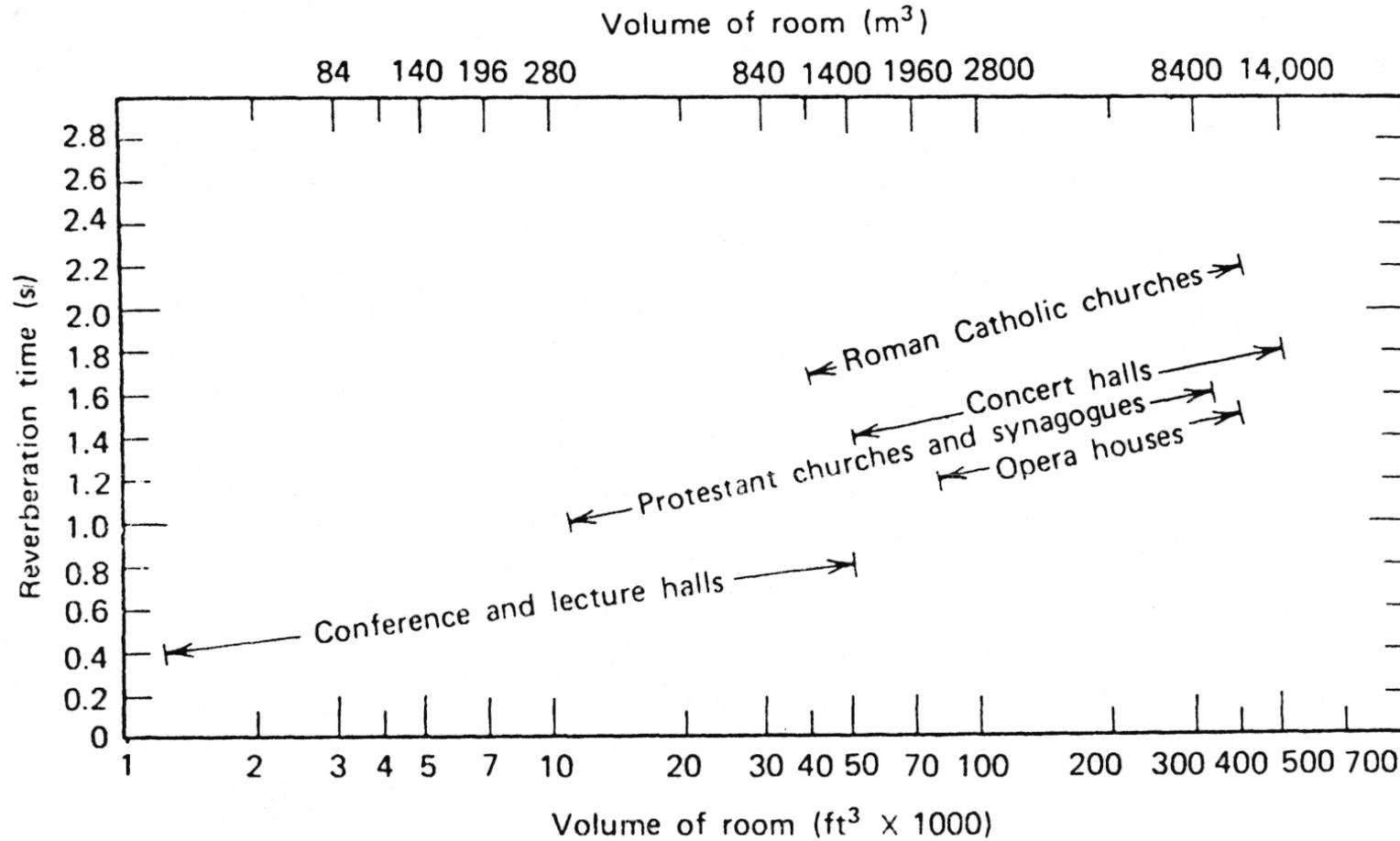
Tempos de reverberação para recintos escolares:

Tipo de compartimento	Tr para 125 Hz < f < 250 Hz	Tr para 250 Hz < f < 4.000 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

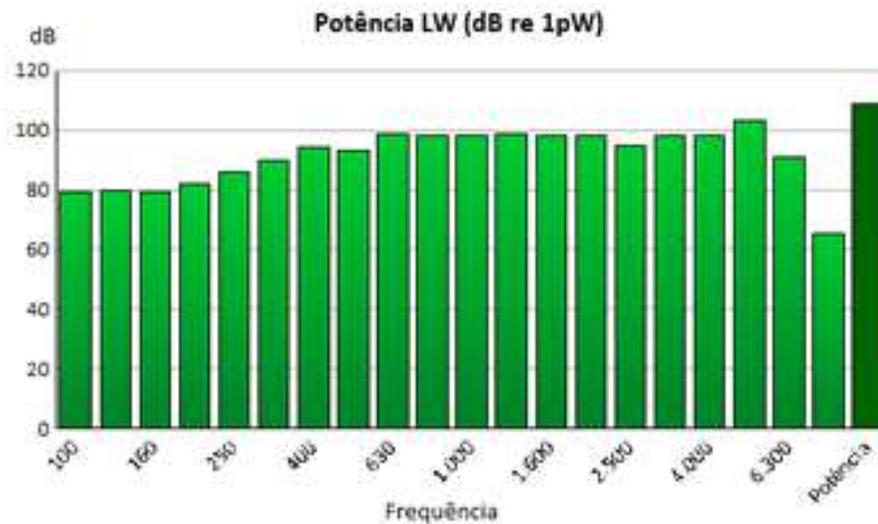


J.S. Rigden
*Physics and the
sounds of music*



Medidas de tempos de reverberação

O Dodecaedro é uma fonte sonora omnidirecional de banda larga, construído a partir de 12 alto-falantes dispostos na forma de dodecaedro regular.



Grom Acustica e Vibração
Rio de Janeiro



Medidas de tempos de reverberação



Grom Acustica e Vibração
www.grom.com.br

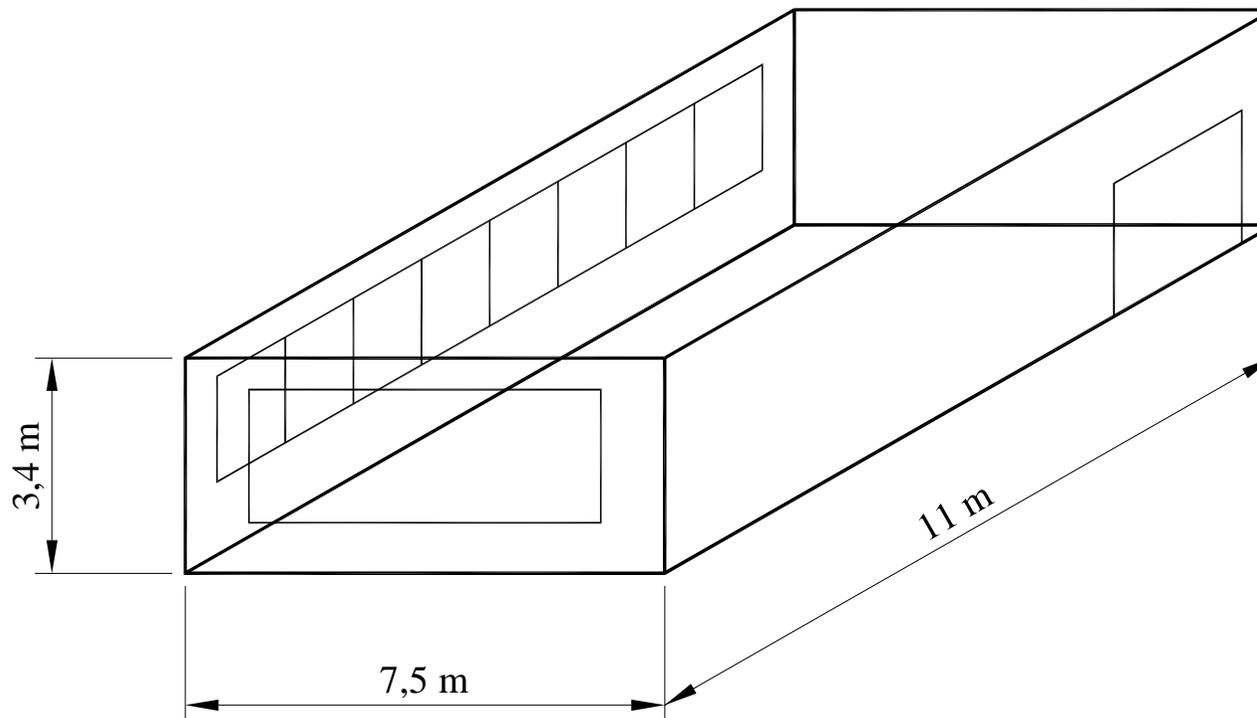
De todas as propriedades que permitem caracterizar a qualidade acústica de uma sala, a mais importante é sua reverberação, porque o tempo de reverberação fornece uma boa indicação do **brilho** e da **expressividade** da sala (***liveness***, em inglês).

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: Acústica de uma sala de aulas

A sala de aula tem 16 m de comprimento, 9 m de largura e 3.3 m de altura. A sala têm 22 m² de janelas de vidro. Calcule o tempo de reverberação.



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.

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 (τ) e o nível do som reverberante.

Otimizar o tempo de reverberação de uma sala exige um compromisso entre:

- **definição**, o que requer τ curtos
- **intensidade do som**, o que exige um nível reverberação alto
- **vivacidade** (*liveness*), que requer τ longos

Um tempo de reverberação depende do tamanho do auditório e do uso para o qual foi planejado. O valor típico do **tempo de reverberação** (τ) para **salas de aula** é de 0.5 s. Em salas grandes há que cuidar também que o tempo entre o som direto e a primeira reflexão não seja maior que 1/20 s (0.05 seg) pois de outra forma os dois sons não se misturam senão que se escutaram como sons separados.

Critérios subjetivos e parâmetros acústicos

Criterios subjetivos	Parâmetros acústicos
Sensação de reverberação	Tempo de reverberação (TR) Early decay time (EDT)
Precisão do som	Critério de clareza C₈₀ Indice RASTI
Critério de espaço	Razão DIR/rev Lateral Efficiency (LE) (impressão espacial) Inter aural cross correlation coefficient (IACC) (reflete o grau de difusão sonora na sala) Parâmetro associado: BQI = 1 - IACC

Fischetti, *Initiation a l'acoustique* (Belin, Paris, 2003)

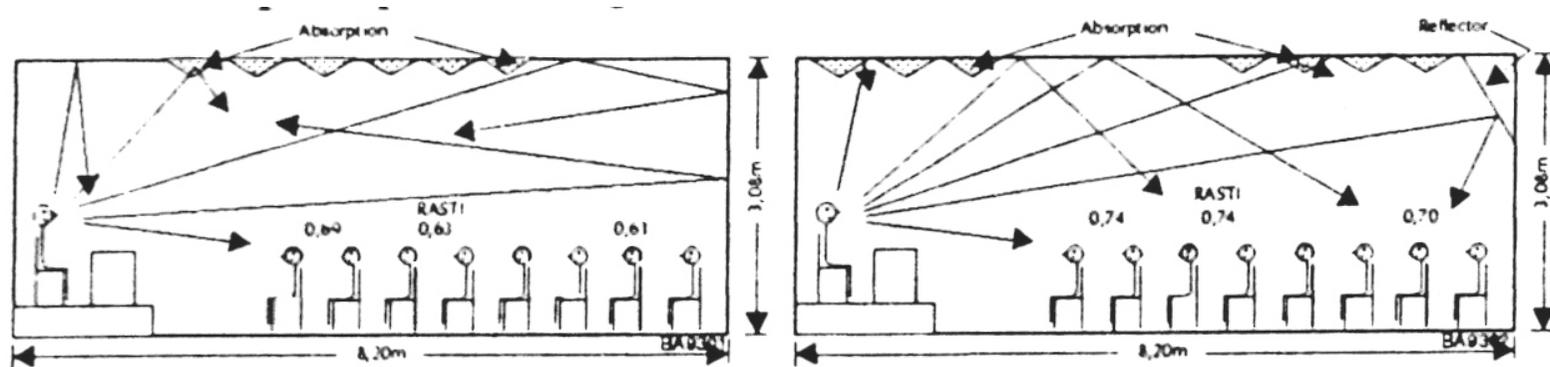
As principais características acústicas ou atributos subjetivos de uma sala são:

- **Intimidade** (*intimacy*) sensação acústica de se estar perto da fonte sonora
- **Vivacidade** (*liveness*) tempo de reverberação para médias e altas frequências
- **Calor** (*warmth*) relacionado a riqueza dos sons graves (75 a 350 Hz)
- **Brilho** (*brilliance*). Boa percepção de altas frequências
- **Intensidade do som direto** (*loudness*)
- **Nível de som reverberante** Deve ser o mesmo em todo o auditório
- **Clareza** (*definition, clarity*). Mede o grau de percepção de todos os detalhes musicais ou o grau de definição com que os sons são percebidos como distintos
- **Envolvimento e difusão** (*diffusion, uniformity*). Boa distribuição do som
- **Equilíbrio tímbrico** (*balance*). Igualdade na recepção de todos os tipos de sons
- **Ruído de fundo** (*background noise*) deve ser menos de 24 dB a 1000 Hz

T.D. Rossing, *The Science of sound* (Addison Wesley, 1990)
Luis Henrique, *Acústica Musical* (Fundação Gulbenkian, Lisboa, 2002)

Clareza (*definition, clarity*)

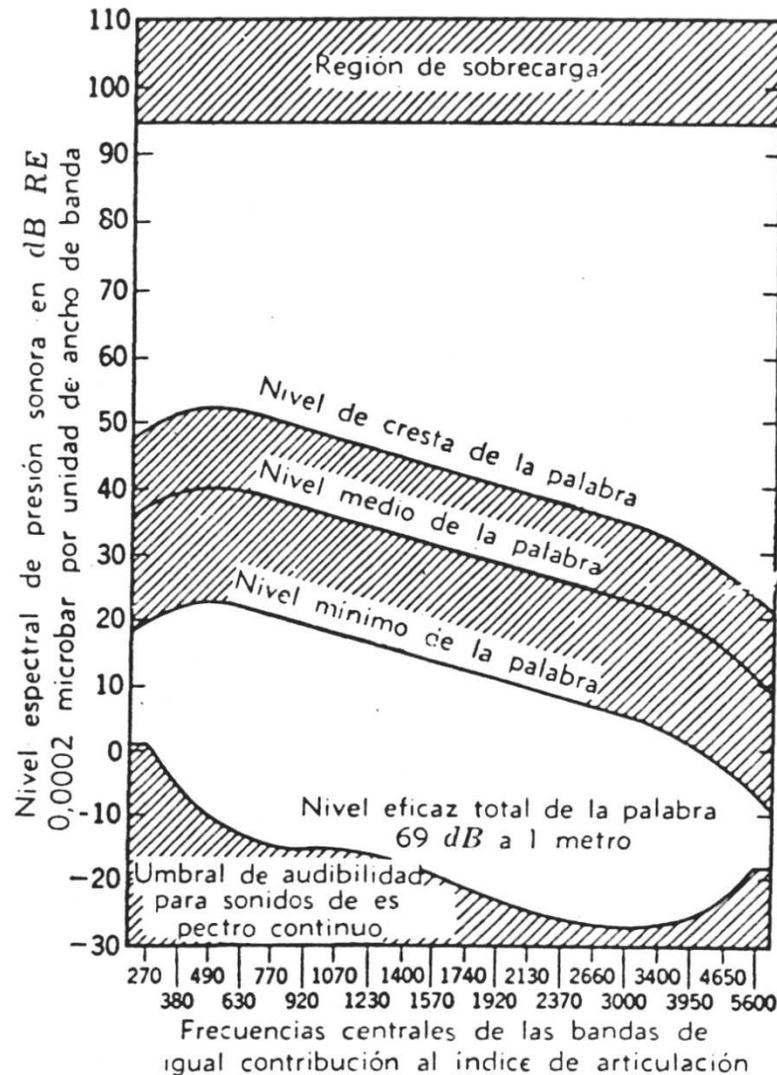
Mede o grau de definição com que os sons são percebidos como distintos



A **qualidade acústica** do ambiente interfere na captação daquilo que se é transmitido e, conseqüentemente, na interpretação do conhecimento.

Nas **crianças** no primário, que estão formando vocabulário e formando as conexões cerebrais, o problema de acústica das salas de aula se torna grave (podem levar a perda de 30 a 40% das sílabas faladas, gerando assim uma deficiência no aprendizado). O tempo de reverberação nessas salas chega a 3 segundos, quando o recomendado pela O.M.S. é de 0.6 s.

Ref: Laboratório de Acústica Ambiental, LAA, Unversidade Federal do Paraná



L. Beranek, *Acustica*
 Editora Hispano Americana, 1969

O espectro sonoro da **voz humana** tem seu máximo em 500 a 1000 Hz.

A duração de cada sílaba de uma palavra é da ordem de 1/8 seg. e o intervalo entre sílabas é – em média – 0.1 seg.

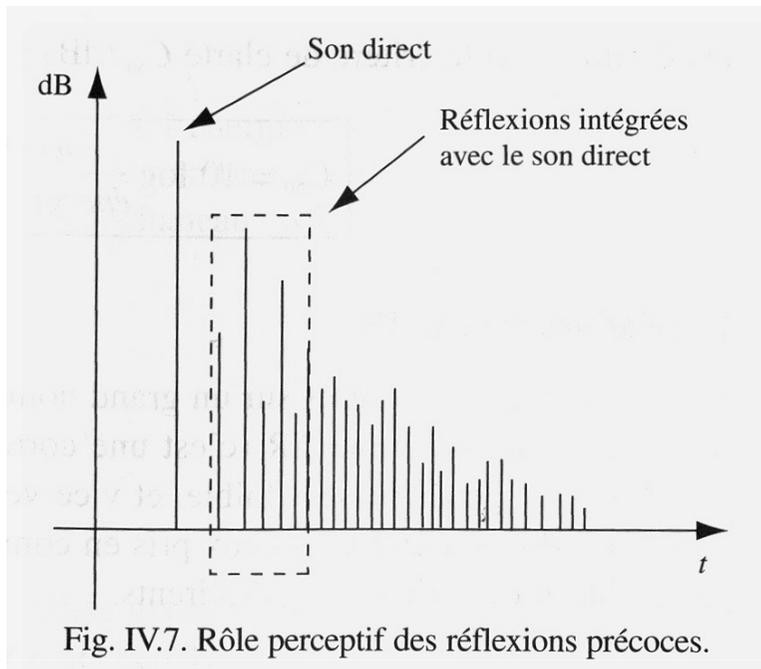
Beranek e colaboradores, analisaram a **inteligibilidade** das palavras levando em consideração o mecanismos de audição.

Acima do ruído ambiente mais por debaixo da linha de saturação (figura), todas as sílabas das palavras faladas serão audíveis para o ouvinte. Mais se o ruído cobre uma parte da região sombreada central, o índice de articulação será menor que 100%.

Precisão do som

Uma sala possui boa *definição, clareza, precisão* ou *inteligibilidade* se os detalhes sonoros são bem percebidos.

A clareza é devida sobretudo ao som direto, que leva a informação de utilidade a identificação das fontes.



Critério de clareza C_{80}

Se admite que as reflexões dentro do intervalo 0 a 80 ms que seguem o som direto se integram com ele. Estas reflexões são parte do som “de utilidade”. Para medir a distribuição temporal da energia sonora, se define o critério C_{80} a partir da resposta a um pulso sonoro.

Fischetti, *Initiation a l'acoustique* (Belin, Paris, 2003)

Índice de clareza, definido como 10 vezes o logaritmo da razão entre a energia sonora que chega dentro de 80 ms com a energia sonora que chega depois.

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\text{energia sonora de 0 a 80 ms}}{\text{energia depois de 80 ms}}$$

Um valor $C_{80} = 3$ dB, por exemplo, significa que o nível da energia reverberante precoce é superior em 3 dB que o nível da energia reverberante atrasado. Para que a clareza (subjetiva) seja satisfatória, o valor de C_{80} deve estar entre -6 dB e $+6$ dB. Abaixo de -6 dB significa que a sala é muito “confusa”. Acima de 6 dB, a acústica da sala é considerada muito “seca”.

$$\mathbf{-6 \text{ dB} \leq C_{80} \leq +6 \text{ dB}}$$

Grandes salas de concertos



Grosser Musikvereinsaal
(Viena)

1680 asientos

Reverberation time: 2 s

Mid-frequency binaural
quality index (**BQI**): 0.64

Clarity factor **C**₈₀ = -2.8

Leo Beranek: Concert Hall Acoustics. *Architectural Science Review* 54, 5 (2011)

Avaliação da comunicação da fala em salas de aula de ensino básico

Medidas: Reverberation time (*RT*), Early decay time (*EDT*), C_{50} , level of teacher voices and classroom noises.

Índice de clareza C_{50} , definido como 10 vezes o logaritmo da razão entre a energia sonora que chega dentro de 50 ms com a energia sonora que chega depois.

Apenas 6% das salas de aula ativas, satisfazem o **critério** para jovens de 12 – 13 anos, de $S/N = 15$ dB, para atingir níveis elevados de reconhecimento das palavras. Os resultados indicam que o nível da voz do professor tende a aumentar com o aumento do nível do ruído

Resultados (a 1000 Hz)

Salas ocupadas	
TR	0.37 s
EDT	0.35 s
C_{50}	10.65 dB
Salas Desocupadas	
TR	0.42 s
EDT	0.41 s
C_{50}	9.06 dB

Referências bibliográficas

- *Acústica Técnica*, Ennio Cruz da Costa (editora Edgard Blucher, 2003)
- *The Science of sound*. Th. D. Rossing, 2nd ed. (Addison Wesley, 1990)
- *Physics and the sound of music*, J.S. Rigden, 2nd edition (Wiley 1985)
- *Initiation à l'acoustique*, A. Fischetti (Editions Belin, Paris, 2003)
- *Acoustique et Batiment*. B. Grehant (Ed. Tec Doc, Paris, 1994)
- *Acústica*. L. Beranek (Ed Hispano Americana, 1969)
- *Acusttica Musical*. Luis L. Henrique (Fund. Calouste Gulbenkian, 2002)
- *Introducción a la acústica arquitectónica*. G.Roselló Vilarroig, J.M. Marzo Diez. Revista **Tectonica**, vol. 14: Acústica (ATC Ediciones, Madrid, 1995)
- *Física Básica*, Vol. 2, H.M. Nussenzveig (Blucher, 1983)
- *Master Handbook of Acoustics*. F.A. Everest (4th ed., McGraw Hill, 2001)