



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA

(Material para o aluno)

Marcio Ferreira Lacerda
&
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Marcio Ferreira Lacerda, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018

QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA DE AULA

1. Propagação do som

Ondas sonoras são ondas mecânicas, ou seja, necessitam de um meio material (ar, água, etc) para se propagar. Essas ondas comprimem e distendem o meio, produzindo zonas alternadas de pressão alta e baixa.

O som se propaga com uma velocidade finita, aproximadamente 340 m/s no ar. Por exemplo, se um raio cai em longe de uma pessoa, o som do trovão só será ouvido por essa pessoa após um determinado intervalo de tempo. Ela verá primeiramente a luz emitida pelo raio e somente depois ouvirá o barulho do trovão. A distância a que caiu o raio pode ser estimada multiplicando a velocidade do som pelo tempo transcorrido entre a chegada da luz e a do som. Por exemplo, se você ouve o som com um segundo de ‘atraso’, o raio caiu a aproximadamente 340 m; se o atraso fosse de 5 segundos a distância seria de 1.700 m.

2. Frequência e intensidade do som

A frequência com que as zonas de compressão e distensão se alternam em uma onda sonora é uma grandeza característica dessas ondas. O que chamamos de som audível são ondas em uma determinada faixa de frequência, que vai tipicamente de 20 Hz até 20.000 Hz. Esses limites não são fixos, variando de pessoa para pessoa. A figura a seguir mostra o espectro sonoro da audição humana e de alguns animais.

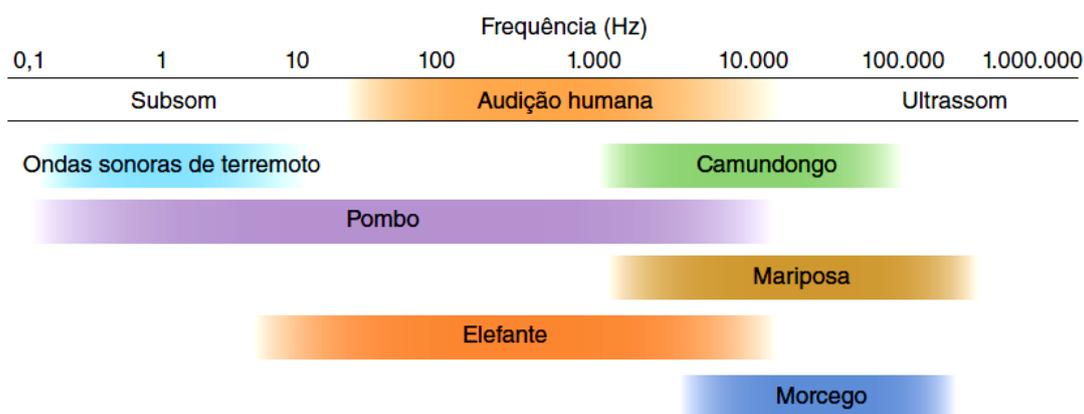


Figura 1: O espectro sonoro ouvido por alguns animais.

A intensidade de uma onda sonora é medida em unidades de *bel*, abreviada como B (o nome foi dado em homenagem a Alexander Graham Bell, um dos inventores do telefone). Geralmente um bel representa uma diferença muito grande de intensidade

sonora; por esta razão se usa mais o seu submúltiplo decibel (assim como usamos centímetro ou milímetro para medir comprimentos pequenos e deixamos o metro de lado muitas vezes). O decibel representa 1/10 do bel (deci = décima parte) e é abreviado como dB.

Já vimos que a audição humana é limitada, em termos de frequência, entre 20 Hz e 20.000 Hz. Em relação ao nível de intensidade sonora, nossa audição possui um limite inferior de 0 dB, aproximadamente. O limite superior é determinado, grosso modo, pela sensação de dor que pode ser provocada pelo som. O gráfico a seguir mostra em que valores de frequência (eixo horizontal) e nível de intensidade sonora (eixo vertical) o ouvido humano é capaz de ouvir o som.

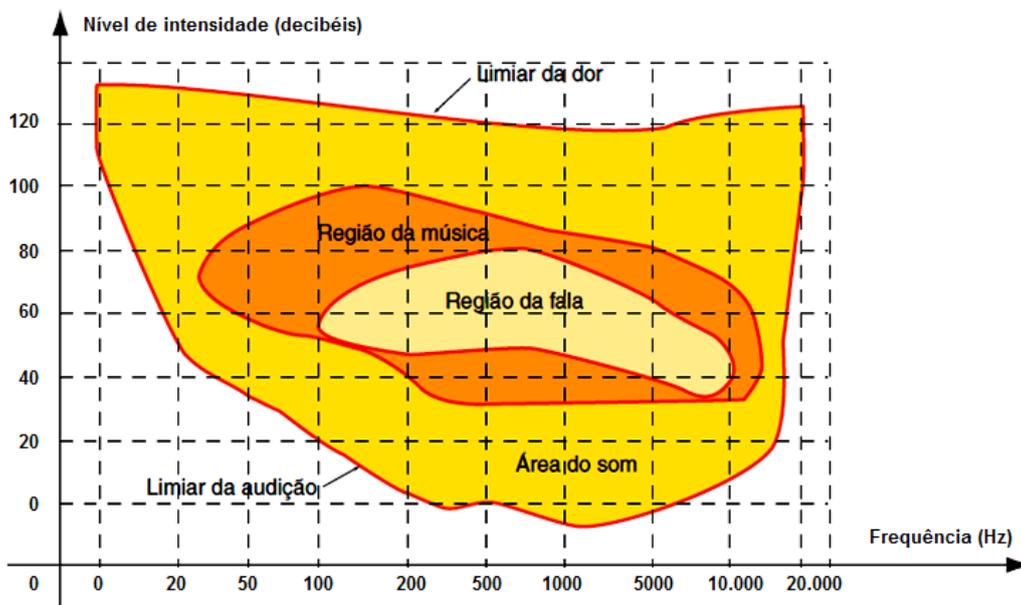


Figura 2: Região de intensidade sonora e frequência que o ouvido humano é capaz de ouvir.

3. Níveis de ruídos aceitáveis

Qualquer pessoa que seja exposta excessivamente a sons de alta intensidade pode sofrer danos auditivos irreversíveis. Os níveis aceitáveis de ruído são estabelecidos por normas técnicas e alguns exemplos para ambientes internos estão apresentados na Tabela 1. Níveis aceitáveis em diferentes tipos de áreas externas estão mostrados na Tabela 2.

Ambiente	dB
Hospitais (apartamentos, enfermarias)	40-50
Escolas (salas de aula)	40-50
Residências (dormitórios)	35-45
Residências (sala de estar)	40-50
Sala de concertos e teatros	30-40
Sala de conferência, cinemas de múltiplo uso	35-45
Restaurante, bares e confeitaria	40-50
Escritórios (salas de reuniões)	30-40
Igrejas e templos (cultos meditativos)	40-50
Pavilhão para atividades esportivas	45-60

Tabela 1: Níveis aceitáveis de ruído, em decibéis, para alguns tipos de ambientes internos (adaptado da norma NBR 10152).

Tipo de área	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Áreas estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Áreas mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Tabela 2: Níveis aceitáveis de ruído, em decibéis, para áreas externas (adaptado da norma NBR 101521).

Para proteger trabalhadores que estão submetidos a ruídos excessivos, a Legislação de Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho estabelece limites de tolerância para ruídos contínuos e intermitentes conforme pode ser observado na tabela abaixo:

Nível de ruídos (dB)	Máxima exposição diária permitida
80	16 horas
85	8 horas
90	4 horas
95	2 horas
100	1 hora
105	30 minutos
110	15 minutos
115	7 minutos

Tabela 3: Máxima exposição diária permitida para ruídos (adaptado da norma NR-15 do Ministério do Trabalho).

É possível medir o nível de ruído de um ambiente através de um aparelho chamado *decibelímetro*. Existem aplicativos que permitem que você use seu celular como um decibelímetro (não tão preciso quanto um aparelho profissional). Há diversos

aplicativos desse tipo para Android e iOS e muitos são gratuitos. A Figura 3 mostra um desses aplicativos durante a medida do nível de intensidade sonora em um ambiente.

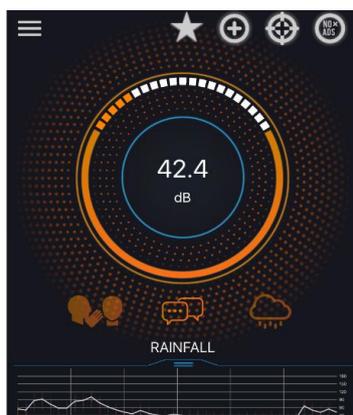


Figura 3: Aplicativo em um celular medindo o nível de intensidade sonora em decibéis.

4. Reflexão e Eco

A reflexão do som ocorre quando uma onda sonora encontra um obstáculo e retorna para o meio no qual estava se propagando. O eco é um fenômeno associado à reflexão do som. Por exemplo, quando uma pessoa grita em um ambiente amplo, como uma caverna, ou em uma região de montanhas, após alguns instantes pode ouvir novamente a própria voz. É o som emitido que, refletido, volta à sua origem.

A ecolocalização, ou biossonar, é um sentido encontrado em alguns animais (morcegos e golfinhos, por exemplo) que lhes permite determinar a posição de objetos por meio de emissão de ondas sonoras, no ar ou na água. Pelo tempo gasto para que essas ondas sejam refletidas no alvo e voltem como eco, o animal descobre a localização de corpos e obstáculos à sua volta.

Além dos animais, alguns seres humanos excepcionais também utilizam a ecolocalização. Por exemplo, o norte-americano Ben Underwood, que foi diagnosticado com câncer na retina e por isso teve seus olhos removidos aos três anos, era capaz de detectar objetos com batidas de palmas, cliques e estalos com a boca. Com esses sons ele era capaz de localizar o que estava ao seu redor, o que lhe permitia dispensar o auxílio de bengalas, cães guia, etc.

O princípio do eco também é utilizado na construção de instrumentos para avaliar distâncias, dimensões e formas, como o sonar e os aparelhos de ultrassonografia. O sonar é empregado, por exemplo, para estudar perfil do fundo do mar e na pesca, para localizar cardumes.

5. Reverberação: múltiplos ecos

O som produzido em um ambiente fechado (uma sala de aula, por exemplo) se propaga em várias direções e pode passar por múltiplas reflexões antes de chegar a um ouvinte. Essas múltiplas reflexões chegam ao ouvinte em instantes diferentes, muito próximos um do outro, gerando uma persistência do som mesmo após cessar sua emissão pela fonte sonora. Esse efeito é conhecido como *reverberação*.

A Figura 4 ilustra como múltiplas reflexões de um mesmo som podem chegar a um ouvinte, sobrepondo-se e gerando a reverberação.

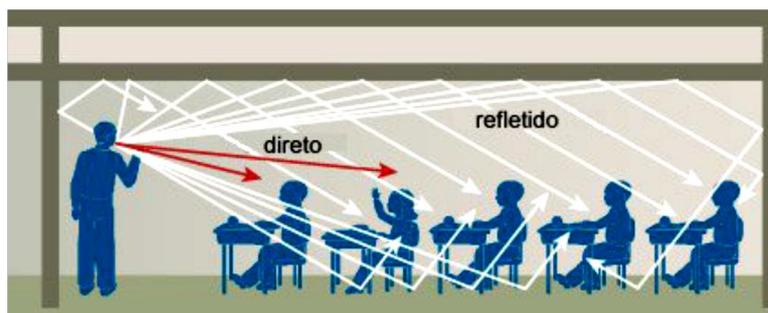


Figura 4: Ilustração do fenômeno da reverberação.

Como a cada reflexão o som perde uma fração da sua energia inicial, a reverberação tende a desaparecer com o tempo. Esse efeito está representado esquematicamente no gráfico da Figura 5.

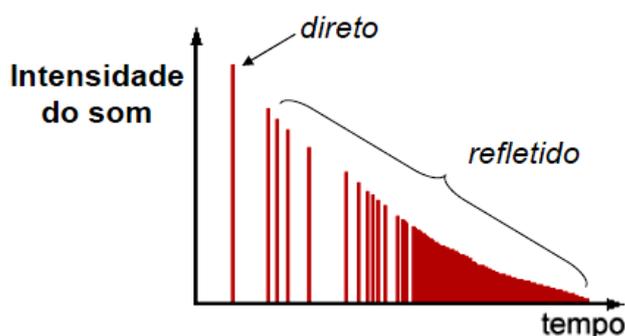


Figura 5: Reverberação de um pulso sonoro quase instantâneo.

Eco e reverberação não são sinônimos embora ambos sejam causados pela reflexão do som. O eco é o som que chega ao ouvinte após, essencialmente, uma única reflexão por um obstáculo distante, que é percebida após um intervalo de tempo suficiente para ser distinguida do som original. Na reverberação, como já foi dito, o som chega ao ouvinte após várias reflexões no próprio local, criando um prolongamento

auditivo. Se alguém está em um lugar muito reverberante, está pessoa ouve o som de sua voz sobreposto ao que acabou de dizer nos instantes anteriores.

6. Tempo de reverberação

Um ambiente muito reverberante pode trazer problemas no que diz respeito à inteligibilidade das palavras emitidas. Ao pronunciar-se um vocábulo com várias sílabas, os sons sobrepõem-se, ou seja, ao emitir uma sílaba o som da sílaba anterior ainda pode ser ouvido, prejudicando a compreensão do que foi dito. Por outro lado alguma reverberação pode ser útil acusticamente, pois as reflexões produzem um reforço ao som percebido diretamente, permitindo que pessoas distantes da fonte sonora possam ouvi-la mais facilmente.

O tempo de reverberação de um recinto é um dos principais parâmetros para caracterizar sua qualidade acústica. Em um ambiente que possui tempo de reverberação muito longo, vemos que o som enviado por uma fonte permanece perceptível por mais tempo. Numa sala de aula, por exemplo, isso pode prejudicar a comunicação verbal entre professor e alunos. Por outro lado, se o tempo de reverberação for muito curto torna-se mais difícil a um aluno distante do professor escutar o que este diz.

É importante que se tenha cuidado antes de julgar se a reverberação é prejudicial, visto que isso depende da finalidade para a qual o ambiente foi projetado. Também é necessário ter um padrão quantitativo do grau de reverberação. Uma medida muito usada para isso é o tempo de reverberação TR_{60} (ou simplesmente TR), definido como o tempo necessário para que a intensidade do som decaia 60 decibéis a partir do momento no qual a fonte cessa de emití-lo.

Para medir o tempo de reverberação de um ambiente, uma possibilidade é produzir um som abrupto (como uma bexiga de festa sendo estourada) e gravá-lo com um celular, por exemplo. Muitos aplicativos de gravação mostram a forma da onda registrada (a pressão sonora em função do tempo), o que permite estimar visualmente a reverberação do ambiente. A Figura 6 mostra a gravação do estouro de uma bexiga, feita com um desses aplicativos. Vemos que o som do estouro leva alguns décimos de segundo para tornar-se imperceptível.

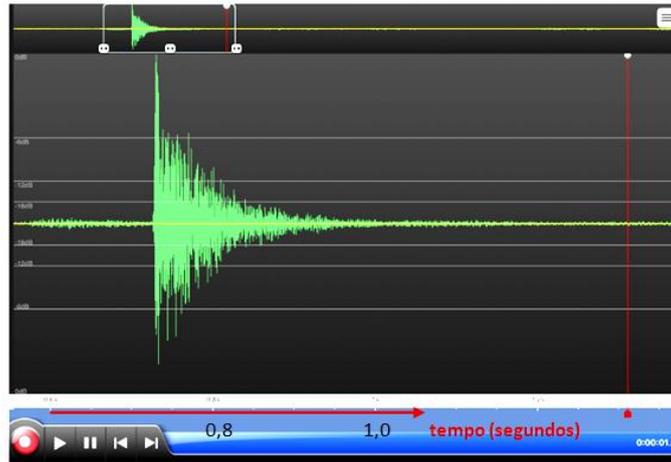


Figura 6: Reverberação do som produzido pelo estouro de uma bexiga de festa.

A Figura 6 mostra a forma da onda sonora produzida pelo estouro da bexiga. Para obter o tempo de reverberação TR_{60} precisamos de um gráfico que mostre o nível de intensidade sonora, medido em decibéis, em função do tempo. Um gráfico desse tipo está mostrado na Figura 7, também para o estouro de uma bexiga. Vemos que, medida em decibéis, a intensidade sonora decai proporcionalmente ao tempo transcorrido.

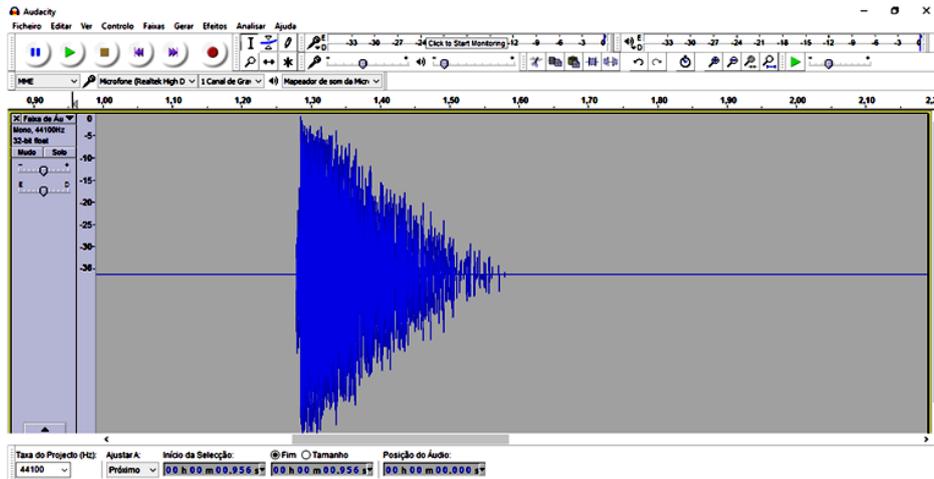


Figura 7. O nível sonoro, medido em decibéis, após o estouro de uma bexiga.

A Figura 8 mostra esquematicamente como a reverberação de um som abrupto, medida em decibéis, diminui linearmente com o tempo. Ou seja, seu gráfico é uma reta inclinada para baixo. O tempo de reverberação TR_{60} pode ser obtido diretamente desse gráfico, como também está mostrado na Figura 8.

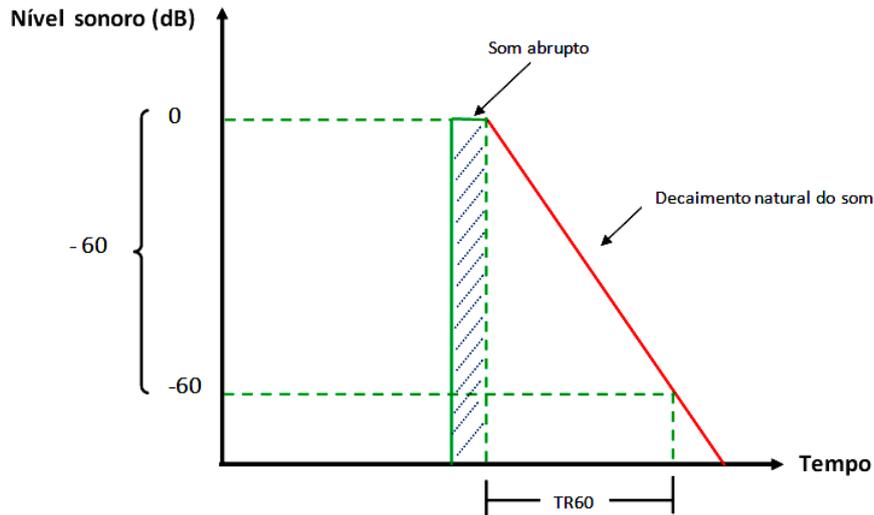


Figura 8: Tempo de reverberação (TR_{60}) de um som abrupto.

Vamos utilizar essas observações para obter o tempo de reverberação do som do estouro da bexiga mostrado na Figura 7. O nível sonoro registrado na figura cai de 0 dB a aproximadamente -30 dB, de modo que não podemos obter diretamente o tempo de reverberação TR_{60} como indicado na Figura 8. Só podemos medir diretamente o tempo necessário para cair 30 dB, que chamaremos de TR_{30} . Entretanto, como a queda do nível sonoro é proporcional ao tempo, o tempo TR_{60} é o dobro de TR_{30} , ou seja, medindo TR_{30} e multiplicando o resultado por 2 obtemos o tempo de reverberação TR_{60} .

Essa medida está ilustrada na Figura 9. Podemos utilizar um programa que permita fazer desenhos (Word, Powerpoint ou um editor de figuras) para inserir uma reta diagonal que acompanha o decaimento do nível sonoro, uma reta horizontal no nível de -30 dB e duas retas verticais. a primeira correspondente ao instante em que a diagonal passa por 0 dB e a segunda ao instante em que a diagonal passa por -30 dB. O tempo TR_{30} corresponde ao intervalo entre as retas verticais. Da escala de tempo mostrada na parte superior da Figura 9, vemos que esse intervalo vai de 1,0 s a 1,2 s, ou seja, $TR_{30} = 0,2$ s. Com isso, obtemos que o tempo de reverberação é $TR_{60} = 2 \times TR_{30} = 2 \times 0,2 \text{ s} = 0,4 \text{ s}$.

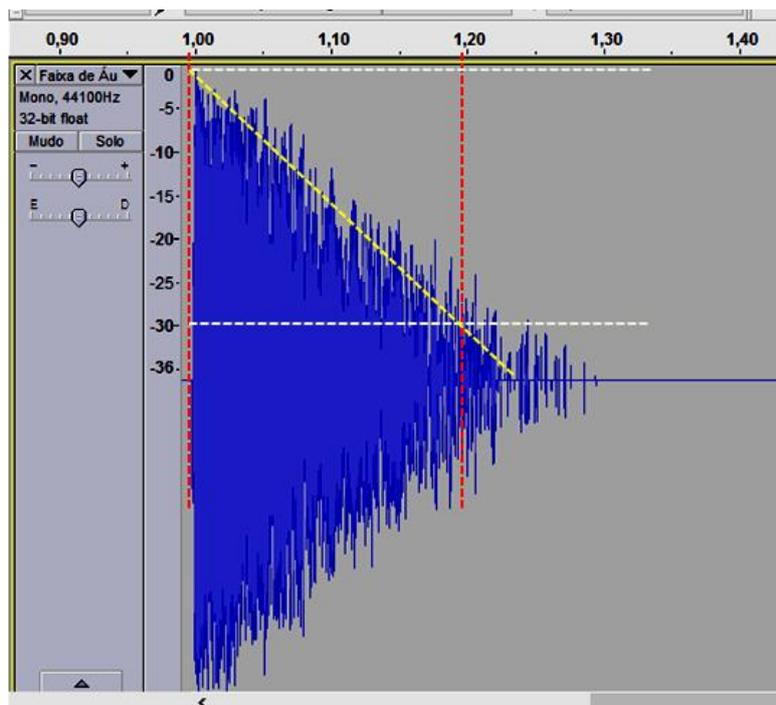


Figura 9: Medida do tempo de reverberação.

7. Tempo de reverberação e qualidade acústica

O tempo de reverberação adequado a cada ambiente é determinado por especialistas em acústica e arquitetura. A Figura 10 mostra as faixas aceitáveis de TR_{60} para alguns ambientes encontrados em escolas.

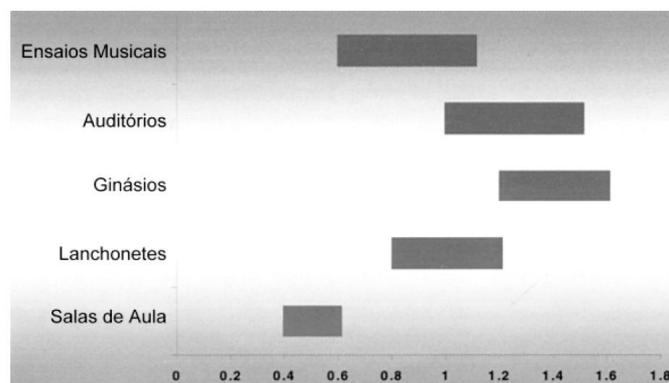


Figura 10: Tempos de reverberação (TR_{60} em segundos) apropriados a ambientes encontrados em instalações escolares.

Podemos ver na Figura 10 que o tempo de reverberação em uma sala de aula deve estar entre 0,4 e 0,6 s, aproximadamente. Se o tempo de reverberação ficar muito distante dessa faixa, a compreensão do que é dito pelo professor pode ficar comprometida.

8. Ruído e qualidade acústica da sala de aula

O tempo de reverberação não é o único elemento relevante para a qualidade acústica de uma sala de aula. Outro fator, tão ou mais importante, é o nível de ruído na sala. De acordo com as normas brasileiras, o nível de ruído aceitável em uma sala de aula está, no máximo, entre 40 e 50 dB (veja a Tabela 1). Para que o professor seja compreendido pelos alunos, sua voz deve estar acima do ruído na sala de aula. Em turmas de crianças pequenas a voz do professor deve estar no mínimo 15 dB acima do nível de ruído. Para alunos mais velhos essa diferença diminui, chegando a cerca de 5 dB no caso de turmas de adultos. Os alunos ouvem a voz do professor a cerca de 60 dB, em média, o que significa que ruídos ambientais muito acima do limite 40-50 dB tornam difícil entender o que está sendo dito na sala de aula.

A diferença em decibéis entre a voz do professor e o ruído da sala é chamada de *relação sinal-ruído* (S/R). Quanto maior for o valor da relação S/R, maior será a capacidade de compreensão da fala. A Figura 11 mostra como a taxa de compreensão de palavras depende da relação sinal-ruído e do tempo de reverberação da sala de aula. Vemos que quanto menor for a relação sinal-ruído e maior for o tempo de reverberação, pior será a qualidade acústica da sala de aula.

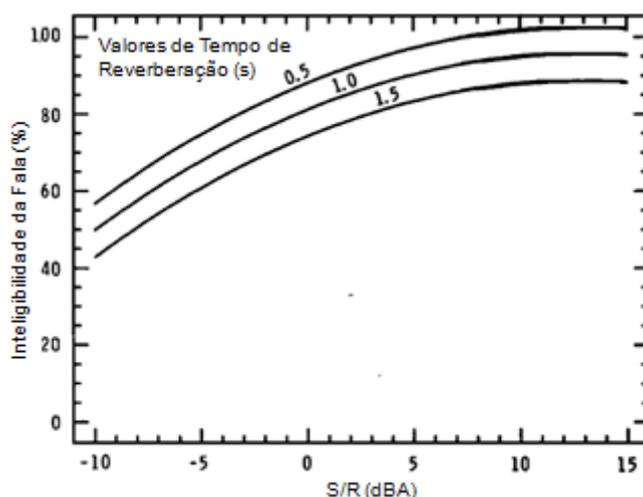


Figura 3.11: Percentagem de reconhecimento de palavras em função da relação sinal-ruído S/R e do tempo de reverberação.