

# ACÚSTICA DE SALAS DE AULAS

*Informações para a criação de ambientes de aprendizagem com condições acústicas favoráveis*

*Uma publicação do Comitê Técnico em Acústica Arquitetônica da Sociedade Americana de Acústica.*

*O objetivo desta publicação é o de fornecer uma fonte complementar para arquitetos, educadores e administradores escolares, para ser utilizada na construção e renovação de instalações escolares. Esta publicação não tem o objetivo de substituir o trabalho de consultores acústicos profissionais. É para ser utilizada como material de auxílio no entendimento dos elementos para obtenção de condições de escuta desejáveis em salas de aula.*

*Esta publicação foi preparada para o Comitê Técnico de Acústica Arquitetônica da Sociedade Americana de Acústica por: Benjamin Seep, Robin Glosemeyer, Emily Hulce, Matt Linn e Pamela Aytar; os quais, na época da preparação desta publicação, eram alunos do programa de Engenharia Arquitetônica da Universidade de Kansas. A supervisão deste trabalho esteve a cargo de Bob Coffeen, FASA, membro do corpo de professores de Engenharia Arquitetônica da Universidade de Kansas.*

*Esta versão foi traduzida por Stephanie L.B. Mondl e revisada por Sylvio Bistafa, Márcio H.A. Gomes e Samir N.Y. Gerges.*

---

## INTRODUÇÃO

---

Desenvolve-se atualmente nos Estados Unidos uma das maiores campanhas de construção e renovação escolar da história. Com a crescente ênfase na educação, nós temos que aproveitar a oportunidade para acabar com uma antiga prática americana: a construção de salas de aula com baixa qualidade acústica. Este problema invisível tem sérias implicações para o aprendizado, mas é facilmente resolvido.

Reverberação e ruído em excesso interferem com a inteligibilidade da fala, resultando na redução do entendimento e, portanto, na redução do aprendizado. Em muitas salas de aula nos Estados Unidos, a inteligibilidade da fala é de 75% ou menos. Isto significa que em testes de inteligibilidade da fala, ouvintes com audição normal podem ouvir apenas 75% das palavras lidas de uma lista. Imagine ler um livro faltando toda quarta palavra, sendo esperado que se entenda o material nele contido. Parece ridículo? Bem, essa é exatamente a situação na qual estudantes se deparam todo dia nas escolas dos Estados Unidos.

Muitos educadores defendem que é importante aperfeiçoar a acústica nas salas de aula usadas pelas crianças com problemas de audição, mas desnecessária para aquelas salas usadas por estudantes com audição normal. Contudo, muitos estudantes com “audição normal” também se beneficiariam da melhor acústica nas salas de aula. Inclusive estudantes com pouca aptidão para o aprendizado, aqueles com problemas de processamento auditivo e aqueles para os quais o inglês é o segundo idioma. Frequentemente, tais estudantes não são separados em salas de aula com acústica realçada, sendo in-

cluídos com os demais. Outro grupo para o qual o aprendizado é especialmente dependente de uma boa acústica, são as crianças pequenas, que são incapazes de “inferir do contexto”. Com seu vocabulário e experiência limitados, quando perdem algumas palavras da exposição da professora, elas são menos capazes que os alunos mais velhos para “preencher” os pensamentos perdidos. Em face destas considerações, fica claro que uma grande variedade de alunos se beneficia da melhoria da acústica das salas de aula.

Por que os problemas acústicos nas salas de aula são endêmicos, quando as soluções não são necessariamente caras? A principal razão não é a falta de recursos, mas falta de percepção do problema e suas soluções. Em 1998, incríveis 7,9 bilhões de dólares foram gastos em prédios escolares nos Estados Unidos. Por apenas uma fração a mais, todos esses espaços poderiam ter sido projetados ou renovados para oferecer boas condições auditivas. Entretanto, para que isso ocorra, os projetistas de escolas e arquitetos devem iniciar o processo de planejamento com a acústica das salas de aula em mente. O melhor modo de resolver problemas acústicos é evitá-los, e não corrigi-los. Durante o processo de planejamento, problemas acústicos podem geralmente ser evitados com um pouco de reflexão prévia e com uma diferente disposição dos mesmos materiais de construção. A renovação de salas de aula mal-projetadas fica muito mais cara. Mesmo assim, o custo de renovação é pequeno quando comparado com os custos sociais provenientes de salas de aula com baixa qualidade acústica, que prejudicam o aprendizado de milhões de crianças.

Conhece-se há décadas a necessidade de salas de aula com boa acústica e os métodos para atingi-la, porém estas informações não estão sendo facilmente disponibilizadas para arquitetos, projetistas de escolas, administradores, professores e pais. Este informe foi concebido para fornecer uma visão geral dos problemas e soluções relativas à acústica das salas de aula, tanto para novas construções como para renovações. O texto fornece explicações claras e objetivas e exemplos; o Apêndice apresenta definições e cálculos quantitativos, assim como fontes para informações mais detalhadas. O projeto de espaços com exigências acústicas especiais, assim como teatros ou salas de música, ou espaços com problemas de ruído mais complicados, são melhores desenvolvidos por um consultor acústico profissional.

---

### OS FUNDAMENTOS

---

Nós freqüentemente falamos sobre o desejo de construir salas com boa acústica, mas isto se tornou um termo vago e quase sem sentido. Não há nenhum critério único que garanta boa acústica para todos os ambientes e seus usos. Pequenas salas de aulas, grandes locais de conferências, auditórios, locais de shows, lanchonetes e ginásios têm exigências acústicas específicas. Para entender como estes diferentes espaços devem ser projetados, há necessidade de familiarizarmos com algumas propriedades básicas do som.

No primeiro século a.C., o arquiteto romano Vitruvius explicou no *De architectura*, o seu famoso Tratado em Arquitetura de 10 volumes, que o som “se move em infinitas voltas circulares, como as várias ondas circulares que aparecem quando uma pedra é lançada em uma superfície lisa da água..., porém enquanto na água os círculos movem-se horizontalmente em uma superfície plana, a voz além de avançar horizontalmente, sobe também verticalmente em estágios regulares”. Enquanto Vitruvius não entendia tudo sobre o som, ele es-

tava correto neste ponto particular. Em geral, o som se irradia em ondas para todas as direções a partir de uma fonte, até encontrar obstáculos como paredes ou tetos. Duas características dessas ondas sonoras são de interesse particular para nós na acústica arquitetônica: **intensidade** e **freqüência**. Intensidade é uma medida física de uma onda sonora, relacionada com quão alto o som é percebido. Nós também podemos medir a freqüência de uma onda sonora, a qual nós percebemos como tom. Por exemplo, em um piano, as teclas à direita têm tons mais elevados do que as da esquerda. Se o som tem apenas uma freqüência, é chamado de tom puro, mas muitos sons do dia a dia, como a fala, música e ruído, são sons complexos compostos por uma mistura de freqüências diferentes. A importância da freqüência surge quando a onda sonora encontra uma superfície: o som reagirá diferentemente em freqüências distintas. A sensibilidade do ouvido humano também varia com a freqüência, e nós estamos mais sujeitos a sermos incomodados por ruídos de média a alta freqüência, especialmente por tons puros.

Imagine o som como um raio luminoso propagando-se pelo o espaço e encontrando objetos. Quando o som incide sobre uma superfície, muitas coisas podem acontecer, inclusive:

**Transmissão** - O som transmite-se através da superfície, de um lado para outro, assim como a luz passa através da janela.

**Absorção** - A superfície absorve o som, assim como uma esponja absorve a água.

**Reflexão** - O som incidente na superfície muda de direção, assim como uma bola bate e volta em uma parede.

**Difusão** - O som incidente na superfície reflete-se em várias direções, assim como os pinos ao serem atingidos por uma bola de boliche. Tenha em mente que várias dessas ações podem ocorrer simultaneamente. Por exemplo, a onda sonora pode, ao mesmo tempo, ser refletida e absorvida por uma parede.

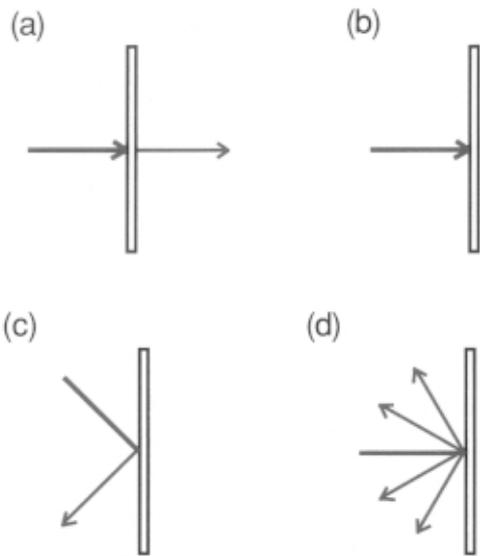


Figura 1 – Interação Som/Superfície: (a) transmissão, (b) absorção, (c) reflexão, (d) difusão.

Como resultado, a onda refletida pode não ser tão intensa como a onda inicial. A frequência do som também faz diferença. Muitas superfícies absorvem sons de altas frequências e refletem sons de baixas frequências. O **Coefficiente de Absorção** ( $\alpha$ ) e o **NRC** (Coeficiente de Redução de Ruído) são usados para especificar a capacidade de um material absorver som.

Um problema especial que resulta do som refletido são **ecos discretos**. Muitas pessoas estão familiarizadas com o fenômeno de gritar em uma falésia e ouvir uma voz respondendo. Ecos podem acontecer também em salas, porém mais rapidamente. Se a voz de uma professora ecoa continuamente na parede de trás de uma sala de aula, cada eco irá interferir com a próxima palavra, fazendo com que a exposição fique difícil de entender. Ecos são também um problema bastante comum em ginásios.

Outro tipo de eco que interfere com a audição é o **eco palpante**. Quando duas superfícies duras e planas são paralelas, o som pode saltar rapidamente de um lado para outro entre elas criando um efeito “campainha”. Isso pode ocorrer entre duas paredes, ou entre o piso e o teto.

Níveis de intensidade sonora e níveis de pressão sonora podem ser medidos em **decibéis** (dB). Em geral, sons altos têm valor maior em dB do que os sons brandos. Devido ao fato de que a escala decibel é logarítmica e não linear, a operação de adição não pode ser aplicada na forma usual.

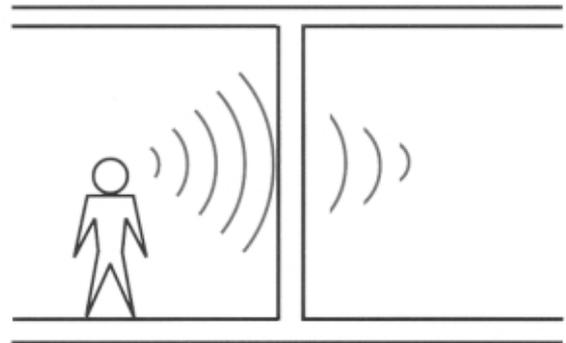


Figura 2 – Redução de ruído entre dois ambientes, através de uma parede divisória.

Uma importante medida acústica chamada **Tempo de Reverberação (RT ou RT(60))** é usada para determinar quanto rapidamente o som decai em uma sala. O Tempo de Reverberação depende do volume físico e dos materiais das superfícies de uma sala. Espaços grandes, como catedrais e ginásios, geralmente têm tempo de reverberação mais longo, dando a impressão de serem “vibrantes” ou às vezes, “estrondosos”. Salas pequenas, como quartos e estúdios de gravações, são geralmente menos reverberantes dando a impressão de serem “secos” ou “mortos”.

A **Redução de Ruído (NR)** de uma parede (também expressa em dB) entre duas salas é determinada pela medição da porcentagem do som produzido em uma sala que passa através da parede para a sala vizinha. (Ver figura 2). O NR é calculado subtraindo-se o nível de ruído, em dB, da sala receptora, do nível de ruído na sala emissora.

A **Relação Sinal/Ruído (S/N)** é uma simples comparação, que é útil para estimar o quanto compreensível é a fala em uma sala. O nível sonoro da voz da professora em dB, menos o nível de ruído de fundo na sala, em dB, é igual a S/N em dB. Quanto maior a S/N, maior é a inteligibilidade da fala. Se a S/N é negativa (o ruído de

fundo é maior que a voz da professora), será difícil de a professora ser compreendida. Note também que na sala a S/N varia, devido a variações dos níveis de ruído e do sinal. Tipicamente, a S/N é menor: (1) nos fundos da sala de aula, onde o nível sonoro da voz da professora cai para os menores valores; ou (2) perto da fonte de ruído, onde o nível sonoro é máximo, situação que ocorre por exemplo, perto de um ar condicionado de parede. Estudos têm mostrado que, em salas de aula que têm relação sinal/ruído menor que +10 dB, a inteligibilidade da fala é significativamente degradada para crianças com audição mediana. Crianças com alguma deficiência auditiva precisam no mínimo de +15 dB de S/N.

A **Inteligibilidade da fala** pode ser avaliada em salas através uso de uma **lista de palavras**. Vários testes são realizados, onde uma pessoa recita palavras de uma lista padrão, e os ouvintes escrevem o que eles escutam. A percentagem de palavras escutadas corretamente é uma medida da inteligibilidade da fala de uma sala.

Para aqueles interessados em aprender mais sobre esses tópicos, o Apêndice fornece informações adicionais.

---

### DIRETRIZES ACÚSTICAS PARA SALAS DE AULA

---

Agora que nos familiarizamos com alguns fundamentos da acústica, podemos aprender como aplicá-los para alcançar condições acústicas satisfatórias nas salas de aula. As diretrizes seguintes foram concebidas para uma sala de aula típica com aproximadamente 30 alunos, onde a aula é dada na frente da sala ou os alunos trabalham em pequenos grupos. As recomendações para ginásios, lanchonetes, e auditórios, são fornecidas em uma outra seção.

#### Reverberação

---

Tempo de Reverberação (RT) longo é uma deficiência comum de salas de aula. Porém há como resolver o problema. Idealmente, salas de aula devem ter RTs na faixa de 0,4 - 0,6 segundos, porém, muitas salas de aulas existentes tem RTs de um segundo ou mais. A Figura 3 fornece tempos de reverberação adequados para várias salas tipicamente

encontradas em instalações escolares. O RT pode ser facilmente estimado para salas de aula existentes ou em projeto, com o uso da equação de Sabine (ver página 10). As variáveis são o volume físico ( $m^3$ ) da sala, as áreas ( $m^2$ ) dos diferentes materiais das superfícies, e os coeficientes de absorção desses materiais em certas frequências. O coeficiente de absorção é uma medida da quantidade de energia de uma onda sonora que o material absorve.

Existem duas maneiras de reduzir o RT de uma sala: ou o volume é reduzido, ou a absorção do som é aumentada. Entretanto, reduzir o volume não é só uma opção, é sim uma alternativa viável para muitas salas de aulas antigas com tetos altos. Em tais espaços, adicionar um forro suspenso feito de placas absorventes sonoras, pode melhorar significativamente a acústica, com o decréscimo do volume e aumento da absorção. Porém, adicionar um forro suspenso frequentemente requer novas instalações elétricas e pode interferir com janelas altas. Um caso a ser discutido mais adiante apresenta uma solução alternativa para salas de aula com tetos altos

O aumento da absorção em uma sala é conseguido com a adição de materiais mais “macios”, tais como painéis para parede de fibra de vidro revestidos com tecido, carpetes ou forros acústicos. Existem muitos produtos comercialmente disponíveis para estas aplicações e - com premeditação - é possível projetar uma sala de aula com um RT aceitável usando materiais de construção comuns. Materiais absorventes apresentam melhor desempenho quando espalhados pela sala, e não concentrados apenas em uma parede, no piso ou no teto. Em muitas salas de aula, um forro suspenso de placas acústicas é suficiente para reduzir o tempo de reverberação para a faixa desejada; porém, isto não irá resolver o problema de ecos nas paredes. Nem todos os forros acústicos são do mesmo tipo. Verifique as especificações e procure forros acústicos com um NRC de 0,75 ou superior. Visando absorver os sons, tanto de baixa como de alta frequência, é necessário fixar o forro abaixo do teto estrutural. A simples adição de forração no piso das salas de aula não irá reduzir significativamente o tempo de reverberação, particularmente em baixas frequências; porém, tal medida irá reduzir o ruído proveniente dos alunos arrastando suas cadeiras e carteiras no piso.

Para aqueles interessados em calcular o RT de uma sala de aula existente ou em estimar a quantidade de absorção necessária, o Apêndice inclui exemplos e uma tabela de coeficientes de absorção para alguns materiais comuns.

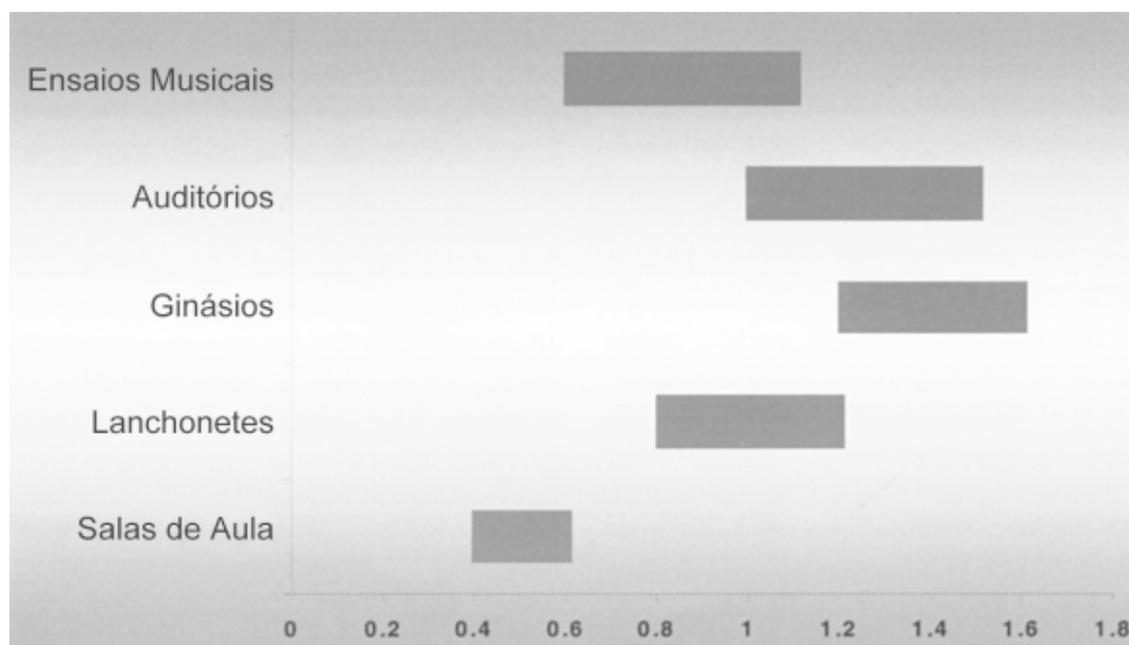


Figura 3 – Tempos de reverberação adequados (em segundos) para várias salas tipicamente encontradas em instalações escolares.

### Reflexões Indesejáveis

Conforme acima mencionado, ecos interferem com a inteligibilidade da fala. Ecos podem ser controlados usando absorção e/ou difusão. Quando for escolher a superfície para colocação do material absorvente com o objetivo de reduzir o tempo de reverberação, também considere como podem ajudar a reduzir ecos.

A colocação do material absorvente na parede posterior das salas de aula, evita que a voz do professor reflita de trás para a frente da sala. Enquanto a absorção é uma forma de minimizar a energia refletida dentro das salas de aula, outra forma é utilizar a difusão. A colocação de um elemento difusor na parede posterior da sala de aula, espalha o som em várias direções, de forma que diminui muito o nível em qualquer direção particular. Eco palpitante é um problema significativo quando ocorre entre as paredes da frente da sala de aula, onde o professor está falando. Um modo sim-

ples de testar se o eco está presente, é permanecer perto do centro da sala de aula, entre paredes paralelas, e bater palmas uma única vez com força. Se o eco palpitante estiver presente, um som tipo campainha será ouvido após as palmas, como o som refletindo rapidamente de um lado para outro entre duas paredes. Tente girar em direções diferentes e bater palmas novamente para determinar quais paredes estão causando o eco palpitante. Para eliminar o eco palpitante entre duas paredes paralelas e rígidas, revista uma delas ou ambas com painéis de fibra de vidro revestidos com tecido ou material similar absorvente sonoro. Isto funciona bem se os painéis forem intercalados ao longo das paredes opostas, de tal forma que um painel em uma parede se defronte com a superfície não tratada da parede oposta. A inclinação de paredes opostas, de no mínimo oito graus, também eliminará o eco palpitante entre elas.

### Reflexões Úteis

Até aqui discutimos métodos para redução de reflexões em salas de aula, porém em alguns casos, nós queremos reforçar certas reflexões. Isto é especialmente necessário em salas de aula grandes, com tempo de reverberação curto. A energia sonora da voz do professor pode ser absorvida pelo forro acústico antes que atinja os estudantes no fundo da sala. A voz do professor pode ser espalhada para toda a sala, com o uso de uma placa de gesso refletora de som, colocada no teto na parte frontal da sala, ou simplesmente deixando a região central do teto dura e reflexiva. Essas superfícies irão refletir o som para o fundo da sala. Visando manter um tempo de reverberação curto com refletores na sala, provavelmente será necessário adicionar materiais absorventes nas paredes laterais e do fundo. A necessidade de refletores depende do método de ensino empregado. Por exemplo, refletores são úteis em salas usadas no ensino usual, porém não são necessários em salas usadas apenas por pequenos grupos de trabalho ou em laboratórios.

### Ruído de Equipamentos Mecânicos

Ruído de fundo elevado proveniente de equipamentos mecânicos, como sistemas de calefação, ventilação e ar condicionado barulhentos são bastante comuns nas escolas existentes (americanas). Este é um problema sério para os professores e alunos. Os professores devem aumentar suas vozes para manter +10 dB de relação sinal/ruído necessária para uma boa inteligibilidade da fala. Isto resulta em vários dias de ausência de muitos professores devido a problemas de stress vocal, o que onera o contribuinte com recursos que poderiam ser melhor empregados em equipamentos mecânicos menos ruidosos. Simultaneamente, os alunos necessitam se concentrar para escutar, ou então, se distraem deixando de prestar atenção. Ruído mecânico é principalmente o resultado de um mau planejamento, podendo ser difícil e caro para eliminar em salas de aula existentes. Porém, ruído mecânico excessivo pode ser eliminado a baixo custo quando o sistema é projetado corretamente logo no início. Engenheiros mecânicos algumas vezes desconhecem ou são insensíveis para com este

### Problemas Comuns de Ruído Mecânico

**Problema:** O ar escoia com grandes velocidades através de dutos, provocando assovios e demais ruídos característicos ao passar pelos desviadores, aletas defletoras e difusores.

**Identificação:** Escute o ruído com diferentes velocidades do ventilador, para verificar se há redução dos níveis com velocidades mais baixas do ventilador. Abra e feche os desviadores, remova os difusores, tentando perceber diferenças nas características do ruído.

**Soluções:** Use ventiladores de menor velocidade, aumente as dimensões dos dutos, mude os desviadores de posição, e/ou silencie os difusores.

**Problema:** O ruído do ventilador propaga-se pelos dutos (de suprimento ou de retorno) até a sala.

**Identificação:** Compare o ruído da sala com o ruído na região próxima ao ventilador. Perceba se há ruídos característicos.

**Soluções:** substitua os tubos lisos por tubos revestidos com material absorvente (observe que poderá haver redução da área interna do duto com aumento da velocidade, de tal forma que a seção transversal do duto revestido poderá necessitar de aumento). Redirecione os lances de duto criando uma trajetória mais longa entre o ventilador e a sala. Insira um silenciador próximo ao ventilador. Substitua o ventilador por outro mais silencioso.

**Problema:** Unidades com ventilador próximo ou caixas de volume variável (VAV) geram ruído que se propaga para a sala através dos dutos ou do forro.

**Identificação:** Ligue e desligue a unidade e perceba alterações no ruído. Se possível remova as placas absorventes do forro e descubra as unidades ruidosas.

**Soluções:** Afaste a unidade da sala (talvez para dentro de um corredor adjacente no caso da caixa VAV), elimine-a, ou troque-a por um modelo mais silencioso. Adicione material absorvente ou um silenciador após a unidade na trajetória de propagação do som. Enclausure a unidade com placas de gesso densas revestidas internamente com material absorvente, evitando que o ruído da caixa se propague para a sala de aula através do forro.

Figura 4 - Problemas e soluções para ruídos mecânicos.

problema, devendo ser advertidos de que o controle de ruído é um assunto crítico que deve ser considerado durante o planejamento e o processo de compra.

Existem vários métodos para medir o nível do ruído mecânico. Uma boa diretriz é que o nível de ruído em salas de aula não deve exceder as curvas NC 25 a 30. A curva NC, ou **Critério de Ruído** é determinada medindo-se os níveis de ruído em certas frequências, os quais são plotados em um gráfico, e então comparados com as curvas NC padronizadas. (O Apêndice contém uma explanação mais detalhada.) Outra diretriz útil é que o nível de ruído não deve exceder 35 dBA. O dBA é uma medida fácil, expressa através de número único, que leva em consideração o nível de ruído em todas as frequências, reduzindo o nível de ruído nas frequências mais baixas, simulando a sensibilidade do ouvido. Tipicamente, o nível de ruído de uma sala em dBA é de 5 a 7 dB maior do que o valor da curva NC. (O Apêndice apresenta o procedimento para conversão em dBA dos níveis sonoros medidos em bandas de oitava).

Descobrir a fonte do ruído mecânico em uma sala é às vezes tão difícil quanto achar uma agulha no palheiro. O ruído pode originar de uma ou várias fontes, sendo os casos complexos melhor avaliados por um consultor profissional em acústica, que se utilizam de técnicas e equipamentos adequados para localizar e reduzir os níveis sonoros de todas as fontes ruidosas. Com isto em mente, a Figura 4 lista vários problemas comuns que você pode procurar em uma sala de aula com ruído mecânico excessivo, proveniente de um sistema mecânico central que distribui ar para salas de aula através de dutos.

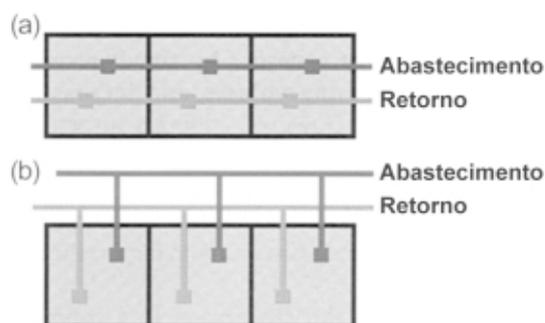


Figura 5 – Arranjos de dutos. (a) arranjo de duto ruim – o som propaga-se através do duto de sala para sala, ao contrário de (b) arranjo de duto bom – o som tem uma trajetória mais longa para se propagar nos dutos revestidos entre salas adjacentes.

Para ruído de sistemas mecânicos, o antigo provérbio “mais vale prevenir do que remediar” é certamente aplicável. Para limitar tal ruído, tenha as seguintes diretrizes em mente quando for projetar novas salas de aula:

1. Instale equipamentos mecânicos tais como sistemas de ventilação e ar condicionado e similares longe das salas de aula. Um bom arranjo é colocar tais unidades no forro de corredores de circulação e os dutos de distribuição próximos às salas de aula. Evite colocar os principais equipamentos mecânicos dentro, acima, abaixo ou adjacente às salas de aula.
2. Selecionar equipamentos de ventilação com baixos níveis sonoros.
3. Escolha dutos com dimensões suficientes para permitir baixas velocidades de ar. Selecione difusores com NC abaixo de 20 a 25.
4. Não economize no comprimento dos dutos. Há uma compensação na redução do ruído mecânico e na transmissão sonora entre salas via dutos. A Figura 5 mostra exemplos bons e ruins de arranjos de dutos.
5. Evite usar equipamentos de ventilação e ar condicionado dentro das salas de aula. Estas unidades contêm ventiladores e às vezes compressores que são notoriamente barulhentos e difíceis de tratar devido estarem dentro das salas.

### Fontes De Ruído Internas

O ruído de salas adjacentes interrompe o processo de aprendizagem, especialmente durante os períodos tranquilos de leitura e de provas. Há cinquenta anos atrás, quando as paredes das escolas eram construídas com tijolos maciços ou blocos de concreto, este não era um problema muito grave. Em décadas recentes, a necessidade de diminuir os custos da construção civil levou ao uso de paredes finas com materiais leves, que oferecem uma redução mínima do ruído. Ainda pior, nas décadas de 60 e 70, muitas salas de aula panorâmicas foram construídas sem quaisquer divisórias entre elas. Em algumas escolas, tais espaços foram sendo divididos, mas a redução de ruído entre as salas continuou insuficiente.

Se você está inseguro se a parede entre duas salas de aula é adequada, aplique este teste simples: instale um televisor ou um monitor de vídeo em uma sala e

ajuste o nível sonoro para que possa ser confortavelmente escutado no fundo da sala. Então vá para a sala de aula vizinha e escute os sons vindos dos equipamentos da outra sala. Se os sons forem lânguidos ou inaudíveis, a barreira é suficiente. Se os sons forem altos, e se particularmente as palavras forem inteligíveis, então a divisória entre as salas precisa ser melhorada.

A figura 6 mostra exemplos de paredes boas e ruins construídas com placas de gesso. Em geral, quanto mais se aumenta a massa de uma parede, mais se reduz o ruído. Porém, uma parede sólida grossa é geralmente muito cara e ocupa muito espaço no piso. Desta forma, uma solução eficaz é construir uma parede com uma camada de um material pesado, um espaço vazio e outra camada de material pesado. Um exemplo típico é o de uma parede com duas placas de gesso de 15 mm de cada lado. Quando for construir uma parede com estas características, certifique-se de sobrepor as placas de gesso de cada camada, de tal forma que as juntas não se alinhem e criem uma fresta por onde o som possa passar. A incorporação de lã de vidro ou fibra mineral na cavidade formada entre as camadas da parede pode também reduzir a transmissão de ruído.

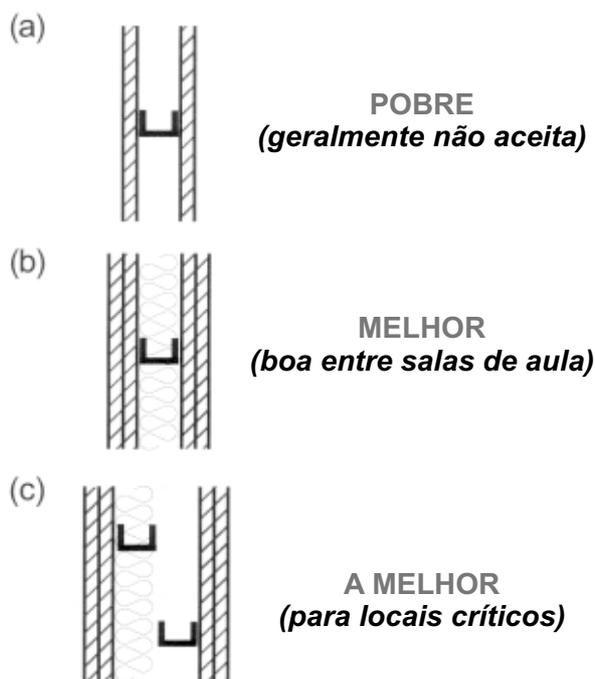


Figura 6 – Paredes de placas de gesso.

Em termos de redução de ruído, uma parede é como uma corrente: a sua resistência é dada pelo elo mais fraco.

Janelas, portas, pequenas aberturas, rachaduras, etc. podem reduzir a eficiência de uma parede. Pequenos vãos entre paredes e o piso ou teto devem ser vedados com um selante acústico. Portas finas ou com internos vazados, com vãos na região próxima ao piso, comumente causam vazamentos sonoros. Portas maciças ajustadas e vedadas nos batentes são melhores. A sua localização é também importante. Por exemplo, é melhor não colocar as portas de salas adjacentes, lado a lado, pois isto confere uma pequena trajetória entre as salas que facilita a propagação sonora. (A figura 7 mostra arranjos bons e ruins de portas). Adicionalmente, as portas das salas de aula não devem ser colocadas frente a frente em um corredor. O espessamento das portas ao longo do corredor cria um caminho longo, menos direto para o ruído viajar de uma sala para outra.

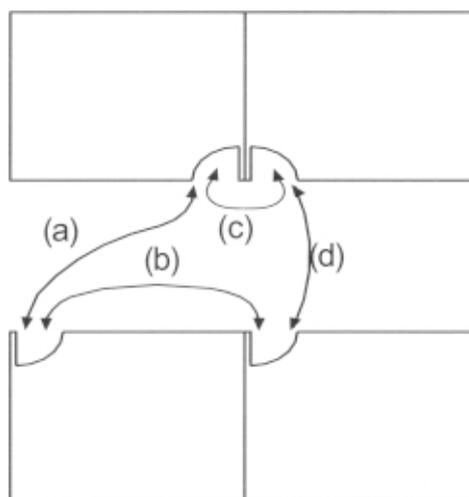


Figura 7 – Arranjos de portas: (a) e (b) são bons arranjos porque o som percorre uma maior distância ao se propagar de uma sala a outra; os arranjos (c) e (d) são ruins porque a distância entre as salas é pequena.

Para serem efetivas, as divisórias devem se estender desde a estrutura do piso até a estrutura do teto. Caso contrário, o som pode facilmente passar através do forro acústico, de uma sala para a outra. (Ver Figu-

ra 8.) Isto é comumente negligenciado quando paredes são adicionadas durante reformas, assim como quando salas de aulas panorâmicas são divididas.

Projetos criteriosos podem freqüentemente eliminar a necessidade de paredes espessas e caras. Na fase de planejamento, verifique quais salas serão barulhentas (salas com equipamentos mecânicos, ginásios, lanchonetes, salas de música, oficina, etc.) e use áreas abafadoras (corredores, armazéns, e banheiros) para separar estes espaços das áreas de audição críticas (salas de aula, bibliotecas, áreas para educação especial e escritórios).

### Fontes de Ruído Externas

A isolamento sonora das paredes externas é também importante já que muitas atividades ruidosas e potencialmente perturbadoras existem externamente à escola. A maioria das escolas possuem paredes externas construídas de tijolos ou blocos de concreto, que são boas barreiras acústicas, mas com janelas inadequadas que permitem considerável transmissão do som. Para que ocorra a redução do ruído, as janelas devem ser bem lacradas. Janelas com dupla camada de vidro conferem melhor isolamento sonora do que janelas com vidro simples (assim como um melhor isolamento térmico e redução no custo de energia). Um outro ponto crítico para vazamento de som, são os ventiladores de parede que se comunicam diretamente com a parte externa do prédio. Estas unidades não apenas transmitem ruído do exterior, como geram ruídos próprios que devem ser evitados sempre que possível.

Na fase de layout da edificação no terreno, considere as fontes de ruído externas que podem perturbar a aprendizagem, procurando localizar as salas de aula longe de tais fontes. Fontes comuns de ruído incluem: sobrevôos de aeronaves, estradas movimentadas, pátio de manobras de ônibus escolares, parques infantis, campos de jogos, equipamentos mecânicos exteriores, áreas de coleta de lixo, cortadores de grama, e máquinas barulhentas em construções próximas.

### Amplificação Sonora

Sistemas de amplificação sonora, muitas vezes chamadas de sistemas de “campo sonoro” ou “campo sonoro FM”, são às vezes sugeridos como soluções relativamente baratas para salas de aulas com baixa relação sinal-ruído.

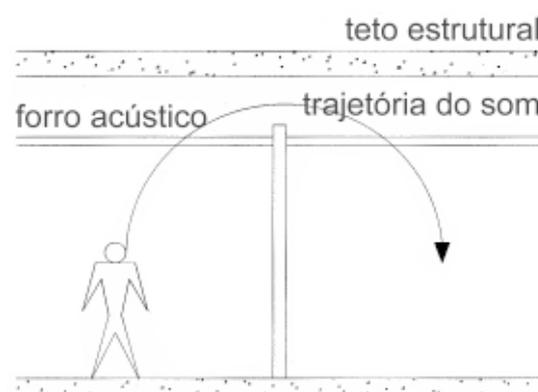
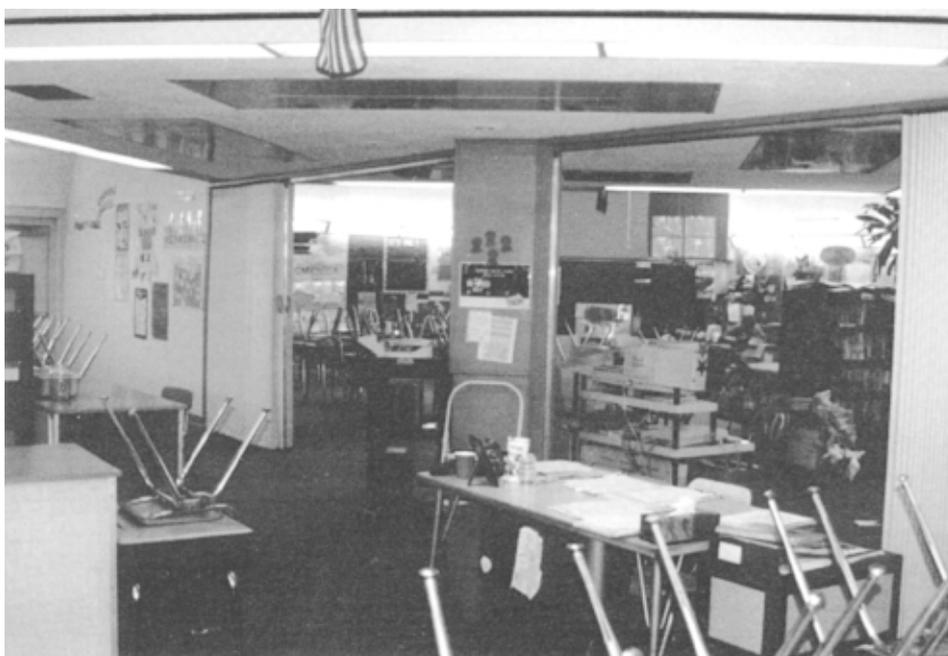


Figura 8 – O som viaja através do forro. As divisórias devem se estender até o teto estrutural para que funcionem como barreiras sonoras.

Um sistema típico consiste em um microfone sem fio usado pelo professor e um ou mais alto-falantes localizados na frente da sala, no teto, ou ao longo das paredes para distribuir o som para os alunos. A amplificação da voz do professor, eleva a relação sinal-ruído, melhorando a inteligibilidade da fala com redução do stress vocal. Este sistema pode ser útil em uma sala com nível moderado de ruído mecânico, o qual seria difícil ou caro para ser silenciado. Porém, estes sistemas também têm limitações. Por exemplo, uma sala de aula com excesso de reverberação, elevará o som dos alto-falantes continuando ininteligível. É vital empregar tratamentos acústicos que reduzam o tempo de reverberação em salas de aula quer elas sejam equipadas com sistemas de amplificação ou não.

Outra desvantagem dos sistemas de amplificação sonora é que eles amplificam apenas a voz do professor. A voz dos alunos não é amplificada quando eles questionam os professores ou conversam entre si en-

quanto trabalham em grupos. Alguns sistemas oferecem um microfone extra que pode ser usado pelos alunos. Porém, esta é uma solução incômoda, que interfere com as discussões espontâneas. Adicionalmente, se o microfone não estiver próximo da pessoa que está falando, captará tanto o ruído ambiente, como a fala, e a S/N não será melhorada. Ainda, outro problema, é que o som ampliado será barulho para as salas de aulas adjacentes. Apesar destas dificuldades, os sistemas de amplificação sonora podem representar melhorias a custo compatível para salas de aula com altos níveis de ruído, e são geralmente aceitáveis quando nenhuma modificação for feita.



*Figura 9 – Salas de aula panorâmicas. Vantajosas para certos métodos pedagógicos ou para interação dos alunos, porém com sérias desvantagens acústicas. Embora as divisórias parciais ou funcionais eliminem as distrações visuais, elas reduzem pouco o ruído entra as salas de aula.*

---

## EXEMPLOS DE SALAS DE AULAS BOAS E RUINS

---

Como todas as peças desse quebra-cabeça se encaixam? Esta seção mostra exemplos de salas de aula com boa e má acústica para ilustrar como os acabamentos

arquitetônicos podem ser usados para controlar reverberação e eco.

Do ponto de vista acústico, salas de aula panorâmicas são talvez as piores. Se por um lado elas podem ser vantajosas para certos métodos pedagógicos ou por propiciar a interação dos alunos, por outro lado, elas têm sérias desvantagens acústicas. Os alunos são facilmente distraídos por sinais acústicos e visuais das aulas adjacentes. Se para um aluno com deficiência auditiva ou concentração deficitária, já é difícil a concentração na voz do professor em salas de aula com alto ruído mecânico, imagine a sua dificuldade em uma sala de aula onde o ruído de fundo não é ocasional,

mas sim um sinal inteligível. Para combater estes problemas, muitas salas de aulas panorâmicas têm sido divididas com biombos ou divisórias que se deslizam como cortinas. Enquanto essas barreiras ajudam os alunos a se concentrarem com a eliminação das distrações visuais, elas oferecem uma pequena redução de ruído entre as salas de aulas. (A Figura 9 mostra exemplo de uma sala panorâmica).

Outro projeto indesejável é a sala de aula com pé direito alto, paredes e piso reflexivos. Em salas de aula com tais características, ecos e reverberações tendem a destruir a inteligibilidade da fala, espe-

cialmente para crianças pequenas. Ao contrário do ruído mecânico, a reverberação não pode ser superada com a elevação do nível da voz do professor. Um tratamento acústico deve ser incorporado para aumentar a absorção e reduzir os ecos nocivos. (Ver Figura 10a.). O item do Apêndice relativo a tempo de reverberação apresenta sugestões de materiais. Para uma solução não tradicional, leia o caso apresentado abaixo.

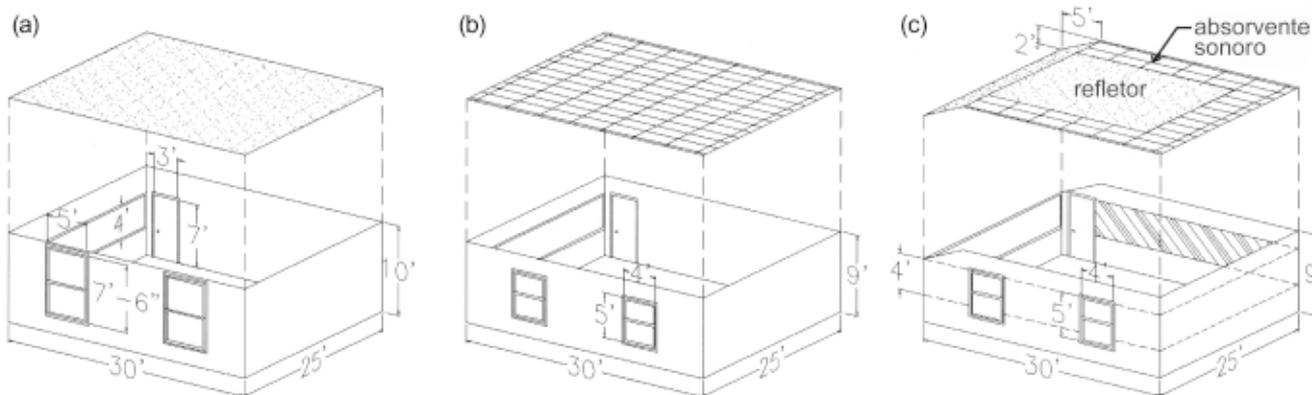


Figura 10 – Layouts de salas de aula. Sala de aula (a) é uma típica sala de aula indesejável, sem material absorvente sonoro e sem reflexões úteis. Sala de aula (b) é melhor pois possui forro absorvente e forração no piso. Sala de aula (c) é a sala ideal, com absorventes sonoros em três paredes, forração no piso, com teto refletor inclinado na região frontal, com superfícies refletoras no centro e superfícies absorventes de som no entorno.

A simples inclusão de um forro acústico absorvente sonoro e forração no piso irá em geral resultar em uma sala de aula com boa acústica e tempo de reverberação curto. Esta solução é barata para novas construções sendo também uma solução a custo compatível para renovar salas de aula existentes. Para salas de aula pequenas e médias, o forro acústico irá conferir um tempo de reverberação aceitável, desde que sejam utilizadas placas acústicas com um NRC maior que 0.75. Forrações no piso ajudam na absorção das altas frequências, mas são principalmente utilizadas com o objetivo de reduzir o barulho de pisadas das crianças. (Ver Figura 10b.) Infelizmente, este procedimento não evita os ecos das paredes. No entanto, um layout adequado do mobiliário, como armários e estantes de livros podem ajudar a quebrar a continuidade das paredes planas, reduzindo os ecos.

O melhor projeto para uma sala de aula normal poderia ser obtido movendo parte da absorção do forro para as paredes, mantendo a região central do teto sem qualquer revestimento para reflexão da voz do professor na direção ao fundo da sala. Isto é aparentemente complexo, mas um teto que parcialmente absorve e parcialmente reflete pode ser facilmente construído com uma grade de sustentação padrão. Simplesmente coloque as placas acústicas ao redor do perímetro do teto e as placas de gesso no centro da grade. Para refletir mais som para o fundo da sala, o teto pode ser perfilado aci-

ma da posição do professor, na frente da sala de aula. Esta superfície refletora deve ser construída com um material duro, como compensado ou placa de gesso, podendo ser pintada no mesmo padrão da sala. Situar materiais absorventes nas paredes reduz simultaneamente o tempo de reverberação e acaba com os ecos. Painéis de lã de vidro de 2 polegadas revestidos com tecido são uma boa opção por serem visualmente atraentes, razoavelmente robustos, conferindo uma boa absorção em baixas frequências. Adicione forração no piso, e o resultado pode ser uma sala de aula com acústica maravilhosa; com um tempo de reverberação curto, sem ecos, distribuição adequada das reflexões e com baixo ruído interno todos estes benefícios obtidos com materiais de construção comuns. (Ver Figura 10c).

---

### ESTUDO DE CASO: SALA DE AULA ANTIGA

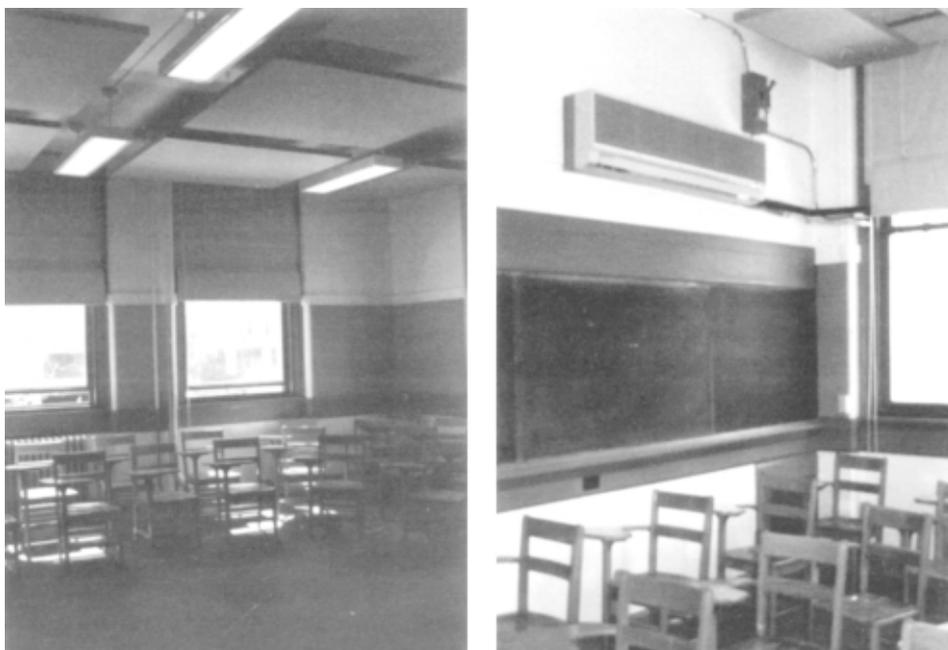
---

O tópico deste estudo de caso é uma sala de aula em um antigo prédio de uma universidade, que era alvo de reclamações dos professores com relação às condições acústicas, incluindo altos níveis de ruído e baixa inteligibilidade da fala. Apesar de ser uma sala de aula de uma universidade, o seu projeto é típico de muitas salas de aulas em antigas escolas elementares e secun-

dárias. A sala, mostrada na Figura 11, tem paredes e janelas altas. O prédio foi originalmente construído sem sistema de ar condicionado central, então vários aparelhos de ar condicionado foram colocados nas janelas os quais são muito barulhentos. A fim de fornecer recomendações corretas para melhorar as condições acústicas desta sala, os níveis de ruído ambiente gerados pelos aparelhos de ar condicionado e o tempo de reverberação da sala foram medidos. Era importante que as condições acústicas fossem melhoradas sem afetar a estética da sala.

Devido ao teto alto e a falta de materiais absorventes na sala, o tempo de reverberação medido foi de 1,5 segundos em frequências médias. Adicionar um forro acústico poderia melhorar o espaço acusticamente, mas não visualmente. Para evitar interferência com as janelas altas, as laterais do forro suspenso teriam que ser inclinadas para cima, sendo que um novo forro não combinaria com a arquitetura tradicional da sala de aula. Alternativamente, suspendeu-se placas de lã de vidro densa de 2 polegadas recobertas com tecido, que complementou o sistema de cores da sala, no mesmo nível das luminárias pendentes. Esta opção resultou em uma solução esteticamente agradável sem o custo de reparar as luminárias que seria normalmente necessário no caso do forro acústico. Painéis de lã de vidro revestidos com tecido foram também montados nas paredes entre as janelas para impedir ecos com redução adicional do tempo de reverberação. Após a modificação, o tempo de reverberação para a sala não ocupada foi reduzido para 0,5 segundo nas frequências médias. Soluções similares podem ser aplicadas em muitas salas de aulas onde a colocação de forro acústico não é adequada.

O sistema de ar condicionado da sala foi também modificado, porém com resultados acústicos sofríveis. Os aparelhos de ar condicionado originais geravam um alto nível de ruído descrito pelos inaceitáveis NC-57. A escola decidiu substituir as unidades das janelas por uma unidade de parede com ventilador de duas velocidades e com o compressor localizado externamente e de forma adequada. A temperatura da sala melhorou mas não resolveu totalmente o problema de ruído. Com o ventilador em alta velocidade, o ruído nos assentos próximos ao ventilador correspondeu à NC-47, 10 pontos abaixo do inicial NC-57, mas ainda insatisfatório. No lado oposto da sala, o ruído corresponde à NC-43. Com o ventilador em baixa velocidade, o ruído corresponde à NC-36 e NC-33 respectivamente. Com o ventilador em baixa velocidade, o ruído se situa relativamente próximo ao critério (Ver página 4). Porém, em alta velocidade, o ruído se situa significativamente acima do critério. Quando unidades internas devem ser usadas por razões econômicas ou físicas, ventiladores com várias velocidades devem ser empregados, devendo as unidades ser capazes de resfriar com o ventilador operando em baixa velocidade.



*Figura 11 – Renovações em Salas de Aula antigas. A fotografia (a) mostra a incorporação dos painéis absorventes de parede e painéis pendentes no teto, ambos em lã de vidro revestidos com tecido, e com forração no piso. A fotografia (b) mostra a unidade de condicionamento de ar de parede com ventilador de duas velocidades relativamente barulhento.*

---

### DIRETRIZES ACÚSTICAS PARA SALAS ESPECIAIS

---

Apesar do objetivo desta publicação ser o de fornecer orientações sobre acústica de salas de aula, esta seção cobre outras questões acústicas para salas de outros tipos existentes em escolas. Embora estas diretrizes não sejam tão abrangentes quanto aquelas apresentadas para salas de aulas, grande parte do material apresentado até aqui, como a necessidade de eliminar o ruído mecânico e o de prover uma efetiva redução de ruído, também se aplicam a salas como lanchonetes, ginásios e auditórios.

Esta seção não abrange as salas de educação musical, já que a acústica destes espaços é especialmente crítica. Salas para fins especiais são complexas, podendo ser melhor projetadas por um consultor acústico profissional.

O problema mais comum em lanchonetes e ginásios é o longo tempo de reverberação (RT), já que esses lugares têm tipicamente grande volume físico e acabamento superficial duro. Em lanchonetes, o RT longo causa o aumento do ruído, fazendo com que os alunos tenham que falar cada vez mais alto para escutar uns aos outros, resultando em verdadeira algazarra. Em ginásios, que são freqüentemente usados para reuniões animadas e assembléias, geralmente a acústica pobre juntamente com um sistema sonoro mal projetado, fazem com que a fala fique ininteligível e acarreta a destruição na música.

Existem várias opções para melhoria da absorção sonora nesses espaços grandes. Em construções novas, se o teto foi construído como uma cobertura exposta de metal, considere colocar lã de vidro sobre a placa metálica após perfurá-la para absorver o som. Isto reduzirá significativamente o tempo de reverberação com pouco aumento dos custos. Outra opção para construções novas ou renovações é pendurar placas ou estandartes absorventes no teto. Placas absorventes e estandartes são produtos comercialmente disponíveis, feitos de várias camadas de lã de vidro em várias espessuras e revestido com plástico ou te-

cido. Eles são de instalação fácil, disponíveis em várias cores e não prejudicam a aparência da sala. A colocação de painéis de lã de vidro ou fibra de madeira nas paredes também irá reduzir o RT e os ecos.

Ginásios e lanchonetes tendem a ser espaços barulhentos, e este ruído pode atrapalhar salas de aula próximas. Deste modo, separe essas áreas das salas de aula e não situe salas de aula sob ginásios. O ruído do impacto de bolas de basquete e similares é um problema sério, caro para corrigir em construções novas e muito mais caro em renovações.

Auditórios escolares são utilizados numa variedade de atividades, incluindo fala, teatro, dança e música. Todas essas atividades requerem boa acústica, mas cada uma têm requisitos acústicos específicos. Para atender as necessidades de todas essas atividades, a acústica de um auditório deve ser uma solução de compromisso, funcionando adequadamente para todas as atividades, sem favorecer nenhuma delas. De outra forma a técnica de “acústica variável” deverá ser empregada para atender a cada função. Acústica variável envolve o uso de painéis, cortinas e outros materiais que podem ser facilmente rearranjados para modificar as reflexões, tempo de reverberação e outras propriedades acústicas. Para alcançar resultados satisfatórios nessas salas complexas, o melhor é buscar a assistência de um consultor acústico profissional. Os parágrafos seguintes fornecem algumas noções de planejamento a serem seguidas e armadilhas comuns a serem evitadas.

Combinar auditório com lanchonete ou ginásio é uma maneira tentadora para redução de custo e área construída. Infelizmente, tal solução raramente resulta em um auditório acusticamente satisfatório, já que estes espaços têm exigências acústicas conflitantes. Em um auditório, o objetivo é reforçar o som de um único local, enquanto em lanchonetes e ginásios, a meta é eliminar o ruído de várias fontes. Este conflito não pode ser resolvido efetivamente, então essas combinações de salas devem ser evitadas. Em um auditório, a forma da sala é importante para refletir o som adequadamente sobre o público. Evite salas largas em forma de leque com a parede de fundo côncava.

va com centro de curvatura no palco ou próximo. A parede de fundo côncava irá focar ecos incômodos para os artistas no palco, e se as paredes laterais forem muito inclinadas, elas não irão prover reflexões úteis para a região dos assentos. Para permitir reflexo sonoro que alcance os que estão sentados no fundo, a profundidade do balcão deve ser menor que duas vezes a distância até o piso abaixo. Um teto plano irá refletir somente para o fundo da sala, então as seções do teto devem ter angulações para prover reflexões em toda da sala. Painéis difusores, moldados na superfície como pirâmides ou cilindros, ou difusores especiais “QRD” \*, ajudam a espalhar o som pelo auditório e reduzem os ecos discretos. As paredes podem ser revestidas com cortinas pesadas que se deslizam horizontalmente ou sobem verticalmente para adicionar absorção quando necessário e removê-la quando for dispensável.

**Nota:** Encontra-se presentemente em desenvolvimento uma norma ANSI sobre acústica das salas de aula. Para maiores informações, contactar a “Sociedade Americana de Acústica”.

---

## APÊNDICE

---

### Frequência

---

Frequência é um fator importante na maioria das medidas acústicas. O som ocorre quando uma fonte vibratória causa pequenas flutuações no ar; e frequência é a taxa de repetição dessas vibrações. A frequência é medida em Hertz (Hz), onde 1 Hz = 1 ciclo por segundo. Um jovem, com audição normal, pode detectar uma ampla gama de frequências, de aproximadamente 20 a 20000 Hz. Para lidar com um largo espectro, acústicos geralmente dividem a gama de frequências em seções chamadas de **bandas de oitava**. Cada banda de oitava é identificada pela frequência

central. Para as bandas de oitavas padrão, estas frequências centrais são: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 Hz. Como pode-se observar, a razão entre sucessivas frequências é de 2:1, assim como uma oitava na música. Esta característica também está relacionada com a sensibilidade do ouvido com a frequência, onde uma mudança na frequência é mais facilmente distinguível em frequências baixas do que em altas. Por exemplo, a variação de 100 para 105 Hz é mais facilmente perceptível do que a variação de 8000 para 8005 Hz. Bandas de oitavas de alta frequência contêm uma gama maior de frequências do que as bandas de oitava de baixa frequência, mas nós as percebemos igualmente. Para obter uma informação mais detalhada do espectro sonoro, são frequentemente utilizadas bandas de um terço de oitavas. As frequências centrais padronizadas para as bandas de um terço de oitavas são: 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000 Hz, etc. Note que uma banda de oitava contém a banda de um terço de oitava da frequência central mais as bandas de um terço de oitava adjacentes.

### Decibéis

---

A medida mais comum de um nível sonoro é o Nível de Pressão Sonora, ou NPS, expresso em decibéis, abreviado dB. Decibéis não são unidades como centímetros ou kilogramas, no sentido de que não estão linearmente relacionados a uma grandeza específica. Na realidade, decibéis expressam a razão logarítmica entre a potência ou intensidade sonora e uma potência ou intensidade de referência. Potência e intensidade sonoras não são fáceis de medir. Porém, a pressão sonora é facilmente medida com um medidor de nível sonoro. A pressão sonora pode também ser expressa em dB já que o quadrado da pressão sonora é proporcional à potência ou intensidade sonora. Utiliza-se o dB no lugar da amplitude real do som em unidades de pressão, porque o seu valor logarítmico representa a forma como o ouvido humano interpreta o som, e porque os números são mais facilmente manipuláveis nos cálculos. A maioria dos

---

\* QRD – quadratic residue diffusers

## Acústica de Salas de Aulas

sons estão na faixa de 0 a 140 dB, que equivalem a ondas com pressões sonoras de 20 a 200.000.000 micropascal (ou  $2 \times 10^{-10}$  a  $2 \times 10^{-2}$  atm). Para auxiliar na sensação subjetiva de níveis de pressão sonora (em dB), os NPSs aproximados de algumas fontes sonoras comuns são apresentados na Figura 12.

Fonte	NPS (dBA)
Som menos intenso audível	0
Sussurro	20
Residência silenciosa	30
Estéreo baixo em Residência	40
Faixa da fala	50 - 70
Lanchonete	80
Martelo pneumático	90
Barulho alto de uma Multidão	100
Motorcicleta acelerando	100
Show de rock	120
Motor a jato (a 25 m de distância)	140

Figura 12 – Níveis de Pressão Sonora de fontes sonoras comuns.

Um medidor simples de nível sonoro combina os níveis de pressão sonora em todas as freqüências fornecendo o NPS global, em dB. Medidores mais complexos têm filtros que podem medir o NPS em cada banda de oitava ou em bandas de um terço de oitavas

separadamente, fornecendo o nível em cada banda, assim identificando o espectro do som. Medidores de nível sonoro podem também “ponderar” o nível de pressão sonora ajustando o nível em freqüências diferentes, antes de combinar os níveis em um nível global ponderado. Por exemplo, a ponderação-A reduz o nível do som em baixas freqüências para simular as variações da sensibilidade do ouvido em freqüências distintas. Os valores da ponderação-A são indicados como dBA para diferenciá-los dos níveis não ponderados em dB. Similarmente, valores da ponderação-C são indicados como dBC. A ponderação-C reduz ligeiramente o nível sonoro abaixo de 50 e acima de 5000 Hz, mas é quase uniforme no região central deste intervalo, podendo ser usada para aproximar uma leitura não ponderada, em dB, do medidor de nível sonoro que oferece apenas ponderações-A ou -C. A comparação dos níveis de ponderação-A e -C para uma dada fonte sonora, pode fornecer uma estimativa aproximada da distribuição de freqüências. Se os dois níveis estiverem próximos em 1 ou 2 dB, a maior parte do ruído está acima de 500 Hz. Se os dois níveis variarem mais que alguns dB, uma parcela significativa do ruído está nas baixas freqüências. Para converter os níveis de pressão sonora não ponderados de banda de oitava em níveis ponderados A ou C, adicione ou subtraia os valores indicados na Figura 13 das bandas de freqüência correspondentes. Em seguida, some os níveis das bandas de oitavas (dois de cada vez, conforme explicado abaixo) para obter o valor global em dBA ou dBC.

	Freqüências Centrais das Bandas de Oitavas (Hz)								
	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ponderação-A	-40	-26	-16	-9	-3	0	1	1	-1
Ponderação-C	-2	0	0	0	0	0	0	0	-3

Figura 13 – Valores de Ponderação A e C discriminados em freqüência.

Conforme mencionado anteriormente, calcular o NPS de duas fontes não é tão simples como adicionar os seus níveis individuais em decibéis. Duas pessoas conversando, produzindo cada uma 70 dBA, não é tão alto como os

140 dBA de um motor a jato. Para combinar dois valores em decibéis, estes devem ser convertidos para pressão ao quadrado, somados e convertidos novamente para decibéis. Os cálculos podem ser aproximados usando a Figura 14.

Diferença entre dois valores em decibéis	Quantidade a ser adicionada ao maior valor
0 ou 1	3
2 ou 3	2
4 a 9	1
10 ou mais	0

Figura 14 – “Adição” de decibéis.

Se um som é muito maior que outro, o som maior mascara o mais baixo, sendo o nível em decibéis combinado igual ao nível do som maior. Se os dois sons são igualmente altos, então o nível combinado é 3 dB maior. Mais do que duas fontes podem ser combinadas, mas elas devem ser consideradas em pares. Por exemplo, espera-se para uma sala de aula não construída 34 dBA de ruído do sistema mecânico, 32 dBA de um computa-

dor e 43dBA de um retroprojektor. Qual será o nível de pressão sonora total das três fontes ruidosas? A diferença entre os dois primeiros valores em decibéis é:  $34 - 32 = 2$ , então adicione 2 dB ao valor maior:  $34 + 2 = 36$  dBA. Em seguida combine este resultado com o ruído do retroprojektor:  $43 - 36 = 7$ , adicionando então 1 dB ao valor maior:  $43 + 1 = 44$  dBA total proveniente das três fontes ruidosas. Se o NPS da voz do professor for de 55 dBA, qual será a relação sinal/ruído na sala? Aqui,  $55 - 44 = + 11$  dB, o qual é suficiente para uma boa inteligibilidade da fala. Quão alto são os 44 dBA total quando comparado com cada fonte ruidosa individualmente? Devido à resposta do nosso sistema auditivo, nós percebemos apenas uma diferença de 3 dB. Um acréscimo de 10 dB é percebido como aproximadamente duas vezes mais alto, e o acréscimo de 20 dB é percebido quase quatro vezes mais alto.

	Coeficiente de Absorção do Som ( $\alpha$ )					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Forro de lã de vidro	0.70	0.85	0.75	0.85	0.90	0.90
Painel de lã de vidro de 2 polegadas para paredes	0.30	0.50	0.80	0.90	0.80	0.75
Bloco de concreto pintado	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Placa de gesso	0.25	0.15	0.08	0.06	0.04	0.04
Parede ou teto de argamassa	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03
Piso de linóleo ou ladrilho	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Carpete fino sobre concreto	0.05	0.10	0.25	0.30	0.35	0.40
Porta de madeira	0.15	0.11	0.09	0.07	0.06	0.06
Vidro	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Quadro Negro	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

Figura 15 – Coeficientes de Absorção Sonora típicos para materiais de construção geralmente usados em instalações escolares.

### Tempo De Reverberação

Há mais de 100 anos, um professor de física de Harvard chamado Wallace Clement Sabine desenvolveu a primeira fórmula para o tempo de reverberação, a qual recebeu o seu sobrenome, sendo ainda bastante útil. O tempo de reverberação é definido como o intervalo de tempo necessário para o som decair em 60 dB a partir do seu nível inicial. A fórmula de Sabine é simplesmente dada por:

$$RT(60) = \frac{0,161 V}{\sum S \alpha}$$

Onde:

RT(60) = tempo de reverberação (segundos)

V = volume da sala (m<sup>3</sup>)

S = área da superfície (m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = coeficiente de absorção do material(ais) em uma dada freqüência

$\sum$  = indica o somatório de S vezes  $\alpha$  para todas as superfícies da sala

Para usar esta fórmula, o volume da sala, área de cada material na sala e os coeficientes de absorção desses materiais devem ser conhecidos. Os coeficientes de absorção são medidos em laboratórios especializados, e representam a fração da energia sonora (não nível sonoro-dB) que o material absorve entre 0 e 1. A Figura 15 mostra os coeficientes de absorção para materiais usados em salas de aula.

Um número geralmente usado é o **NRC, Coeficiente de Redução de Ruído**, o qual é simplesmente a média dos coeficientes de absorção em 250, 500, 1000 e 2000 Hz. Este número único pode ser útil para comparar a absorção relativa de dois materiais; entretanto, examinando os coeficientes de absorção em cada banda de oitavas fornece uma melhor idéia do desempenho do material em várias freqüências.

O tempo de reverberação é freqüentemente calculado com a sala desocupada. Como as pessoas e suas vestimentas oferecem uma absorção sonora adicional, uma sala desocupada representa o pior caso,

entretanto ainda realista, considerando que a ocupação da maioria das salas varia. Numa análise completa, este cálculo deve ser feito em cada banda de oitava, já que o RT pode variar consideravelmente em diferentes freqüências. Porém, para uma estimativa rápida, o RT de uma sala de aula pode ser calculado para apenas uma banda de oitava representativa da freqüência da fala, como 1000 Hz. Se esse RT é aceitável, então o RT para as outras bandas de freqüência da fala será provavelmente aceitável.

Para demonstrar o uso da fórmula de Sabine, a Figura 16 fornece um exemplo de cálculo de RT em 500 Hz para a sala de aula acusticamente pobre usada no exemplo 10a. Tente calcular o RT em 500 Hz da sala de aula acusticamente satisfatória da Figura 10b somente com a adição do forro absorvente. Note que o forro está mais baixo naquele exemplo, então o volume e áreas das superfícies irão mudar. O RT da sala de aula satisfatória é aproximadamente 0,4 segundos.

Material	S(m <sup>2</sup> )	$\alpha(500\text{Hz})$
<b>Piso</b>	(8)(10) =80	0,03
<b>Janelas</b>	(2)(1,7)(2,5) =8,5	0,18
<b>Porta</b>	(1)(2) =2	0,09
<b>Quadro negro (1,3)(8)</b>	0,01 =10,4	0,01
<b>Argamassa (paredes e teto)</b>	(80) + (3) (36) -8,5 - 2 -10,4 = 167,1	0,06

$V = (10\text{m})(8\text{m})(3)$ $= 240 \text{ m}^3$
$\sum S\alpha = (80)(0,03) + (8,5)(0,18)$ $+ (2)(0,09) + (10,4)(0,01)$ $+ (167,1)(0,06)$ $= 14,2$
$RT(60) = \frac{(0,161) 240}{14,2}$ $= 2,7 \text{ seg em } 500 \text{ Hz}$

Figura 16 – Exemplo de cálculo de RT.

## Inteligibilidade Da Fala

Existem vários métodos para estimar ou prever a inteligibilidade da fala, desde o simples nível sonoro de ponderação-A até o complexo **Índice de Transmissão da Fala (STI)**. Para salas de aulas, a inteligibilidade da fala pode ser prevista a partir do tempo de reverberação e da relação sinal/ruído. Uma sala de aula com 0,5 segundo de RT e +10 dB de S/N terá aproximadamente 90 % de inteligibilidade da fala. Se o RT for mantido em 0,5 segundo, mas a S/N for reduzida para 0 dB, a inteligibilidade cai para aproximadamente 55%. Similarmente, se a S/N é de + 10 dB, e o RT for aumentado para 1,5 segundos, a inteligibilidade cai para aproximadamente 75%. E se a S/N cai para 0 dB e o RT é de 1,5 segundos, a inteligibilidade cai dramaticamente para aproximadamente 30 %. Infelizmente, esta última condição é uma realidade em algumas salas de aula nos Estados Unidos.

Testes de inteligibilidade da fala podem ser usados para medir a inteligibilidade em salas de aula. Tais testes podem ser de várias formas. Tipicamente, o orador lê sílabas sem sentido, palavras monossilábicas, ou sentenças e os ouvintes escrevem o que ouviram ou escolhem de uma lista de alternativas possíveis. A porcentagem dos itens corretamente ouvidos é uma medida da inteligibilidade da fala. Procedimentos padronizados foram desenvolvidos, que orientam na aplicação de testes, na seleção de ouvintes, no treinamento de ouvintes e oradores, e assim por diante. Existem também gravações de listas de palavras padronizadas que podem ser reproduzidas sem a necessidade do orador. Isto elimina a “leitura” de lábios e variações de fala e do nível da fala

dos oradores. Antes de iniciar o teste real, ouvintes devem praticar os testes em ambientes tranquilos, até familiarizarem-se com os procedimentos e para que os resultados estabilizem-se. (As palavras usadas são aleatoriamente escolhidas de uma lista padrão, de tal forma que os ouvintes não possam simplesmente memorizar a ordem das palavras).

Quando o teste for aplicado em sala de aula, o orador deve ler a lista do local que o professor normalmente fala. Para garantir resultados conservadores, vários ouvintes devem sentar-se juntos em qualquer área da sala de aula que tenha a mais baixa relação sinal/ruído. Este local é tipicamente no fundo, ou perto das fontes de ruído mecânico mais elevado. Qualquer ruído presente durante o uso normal da sala de aula, barulho exterior ou barulho do corredor, devem estar presentes para assegurar valores representativos da inteligibilidade da fala.

Em testes de inteligibilidade a média dos resultados dos adultos é aproximadamente 10% maior do que das crianças. Por exemplo, em uma sala de aula da série elementar, onde os ouvintes adultos obtiveram 90%, os alunos irão provavelmente obter somente 80%. Os alunos com problemas de audição ou aprendizagem, ou para aqueles que língua inglesa é uma segunda língua, irão apresentar porcentagem ainda mais baixa. Se a inteligibilidade da fala de uma sala é menor que 90%, devem ser implantados tratamentos acústicos para reduzir a reverberação e/ou melhorar a relação sinal/ruído.

**Nota:** Testar a inteligibilidade da fala não é um procedimento simples, sugerindo-se consultar profissionais. O audiólogo escolar pode ser um bom conselheiro neste caso.

	Frequência Central de Banda de Oitava (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	NC
Condicionador de ar de janela	62	67	63	60	55	50	50	40	57
Unidade com ventilador		46	47	54	48	41	30	23	50
Ruído de fundo	51	42	32	24	25	16	10	6	23

Figura 17 - Níveis de Pressão Sonora para fontes ruidosas medidas no estudo de caso. Ver as curvas NC na Figura 18

### Curvas Critério de Ruído

---

O nível de ruído em um ambiente pode ser efetivamente descrito com um número único chamado de critério de ruído NC. O NC é determinado pela medida do nível de pressão sonora do ruído em cada banda de oitava, plotando estes níveis em um gráfico, comparando então os resultados com as curvas NC padrão. A curva de NC mais baixa, que não exceda o espectro de ruído plotado no gráfico, corresponde ao NC do ruído. Na maioria das publicações as curvas de NC são apresentadas em intervalos de 5 para economizar espaço, mas o NC pode ser dado por qualquer outro número intermediário, não apenas em múltiplos de 5. Como ilustração do procedimento, nós iremos determinar o NC dos aparelhos de ar condicionado de janela, de unidades com ventilador e com o ruído de fundo do estudo de caso apresentado acima. (Ver Figuras 17 e 18). Foi fornecido gráfico contendo as curvas NC (Ver Figura 19).

### Nível Sonoro versus Distância

---

Todos nós sabemos que o nível sonoro decresce quando a distância da fonte sonora aumenta. Este decréscimo em nível sonoro é quantificado pela *lei do inverso da distância ao quadrado*. Isto é, o decréscimo da energia sonora é proporcional ao aumento do quadrado da distância. Por exemplo, se a distância do ouvinte até a fonte sonora for duplicada, a energia do som direto decresce do fator 4 ou 2 ao quadrado (2 vezes 2). Isto implica numa redução de 6 dB nível de intensidade sonora e do nível de pressão sonora do som direto para cada duplicação da distância da fonte sonora.

Vamos assumir que, em uma determinada sala de aula, a diferença média entre o nível sonoro da voz do professor e o nível de ruído de fundo da sala de aula, produzido pelo sistema de ar condicionado, é 10 dB na região dos ouvintes que estão a 3m de distância do professor. Com estes 10dB de relação sinal-ruído, a inteligibilidade da fala do professor é provavelmente satisfatória, conforme discutido na seção anterior sobre inteligibilidade da fala. Porém, se a distância entre o professor e o aluno for dobrada para 6m, a relação sinal/ruído será reduzida para aproximadamente 4 dB

(assumindo que o ruído de fundo permaneça constante e que o campo sonoro direto produzido pela voz do professor continue a predominar). Para uma distância de 9m o nível do som direto produzido pelo professor será reduzido de aproximadamente 10 dB, sendo que a relação sinal/ruído será de 0 dB, com baixa inteligibilidade da fala. Deste modo, é muito importante que o nível de ruído de fundo seja aceitável em todos os locais da sala de aula para que a relação sinal-ruído adequada seja mantida permitindo uma satisfatória inteligibilidade da fala.

---

### REFERÊNCIAS:

---

- M. Mehta, J. Johnson and J. Rocafort. *Architectural Acoustics, Principles and Design*. Prentice Hall, Columbus, Ohio, 1999
- W. J. Cavanaugh and J. A. Wilkes. *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. John Wiley & Sons, New York, 1999
- C.M. Salter, Ed. *Acoustics, Architecture, Engineering, the Environment*. William Stout Publishers, San Francisco, 1998.
- C. M. Harris. *Noise Control in Buildings*. Institute of Noise Control Engineering, Poughkeepsie, New York, 1997.
- R. E. Apfel. *Deaf Architects and Blind Acousticians? A Guide to the Principles of Sound Design*. Apple Enterprises Press, New Haven, Connecticut, 1998
- M. D. Egan. *Architectural Acoustics*. McGraw Hill, New York, 1988
- L. K. Irvine and R. L. Richards. *Acoustics and Noise Control Handbook for Architects and Builders*. Krieger Publishing Co., Melbourne, Florida, 1998.

---

### Endereço para contato

---

Acoustical Society of America  
Suite 1NO1  
2 Huntington Quadrangle  
Melville, NY 11747  
Phone: (516) 576-2360  
Fax: (516) 576-2377  
E-mail: [asa@aip.org](mailto:asa@aip.org)  
<http://asa.aip.org>

### Curvas de Critério de Ruído

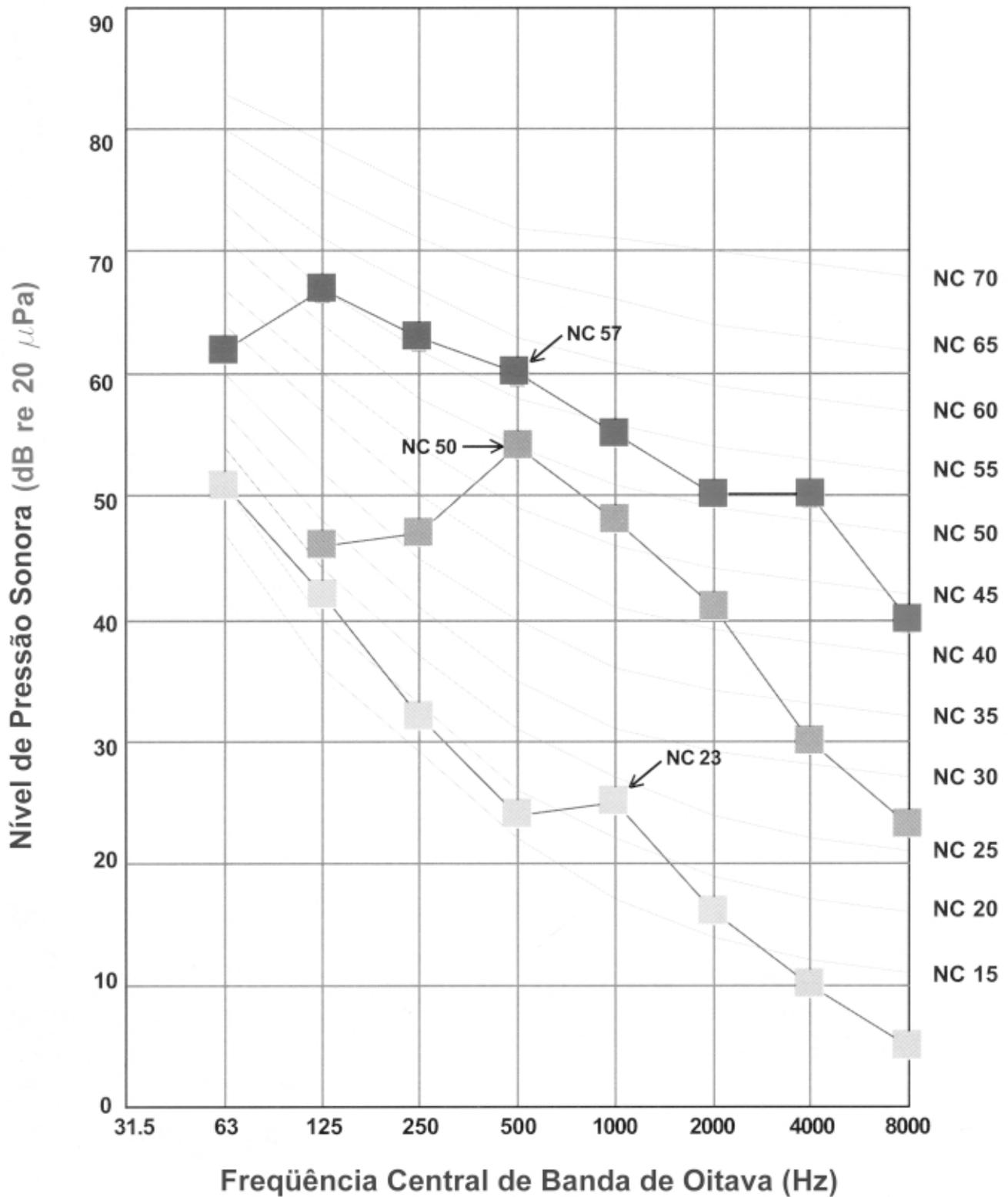


Figura 18 - Curvas Critério de Ruído para o Estudo de Caso

### Curvas de Critério de Ruído

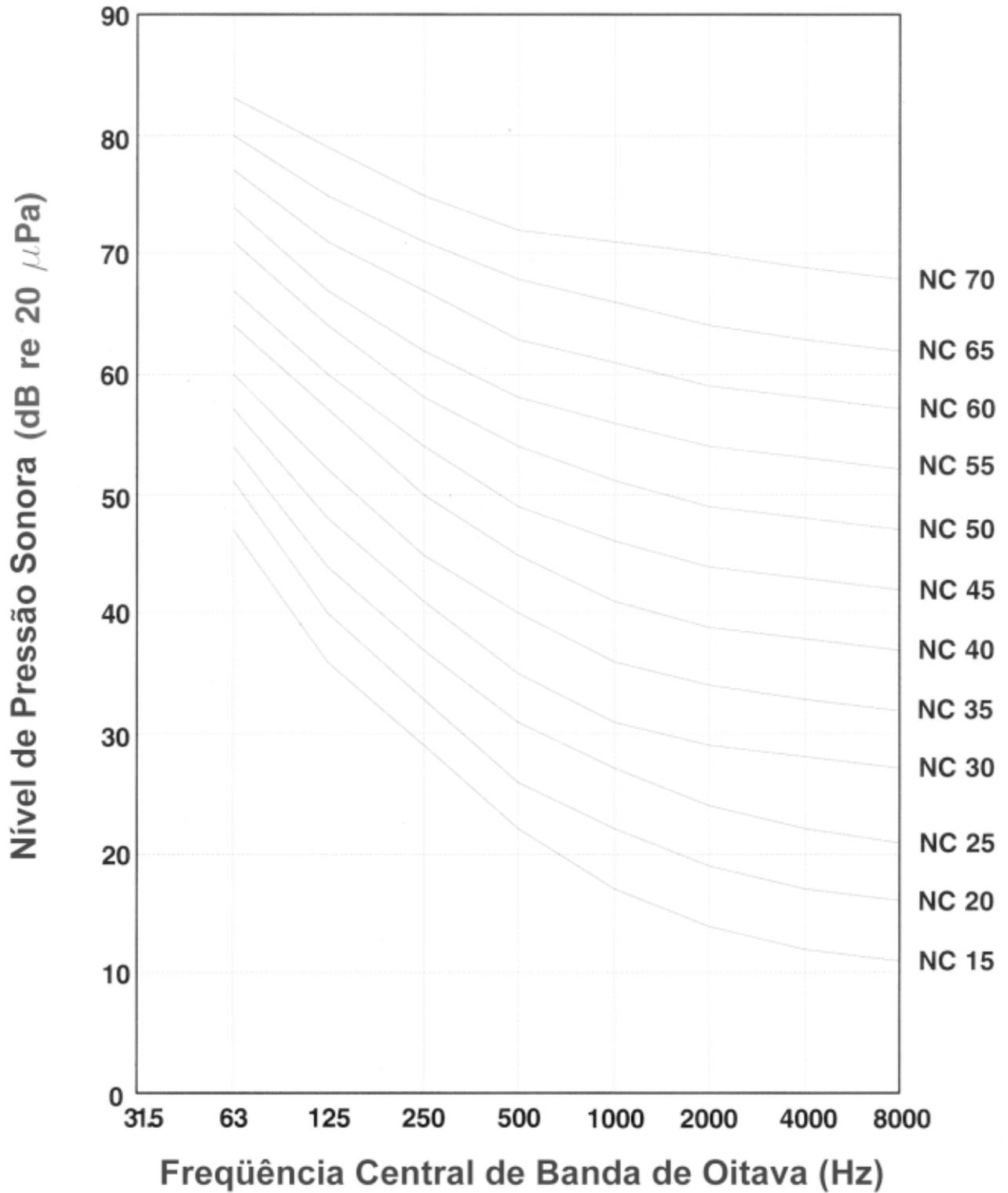


Figura 19 - Curvas Critério de Ruído