

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Avaliação da qualidade acústica de escola estadual do projeto Governo Cidadão como parâmetro para adequação das diretrizes de padrões referenciais de projeto

Sicolo, D. A.¹; Araújo, B. C. D.²

¹ Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, david.sicolo.082@ufrn.edu.br

² Departamento de Arquitetura (DARQ), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, dantasbianca@gmail.com

Resumo

Os ambientes escolares no Brasil sofrem de um problema endêmico de falta de tratamento acústico, o que dificulta significativamente o processo de ensino. As soluções para isso são, muitas vezes, acessíveis e implementáveis, especialmente se essas questões forem consideradas ainda na fase de projeto. Visando contribuir para a melhoria da qualidade acústica das escolas no estado do Rio Grande do Norte, este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade acústica da Escola Estadual Ivani Machado Bezerra e propor diretrizes para a melhoria das especificações de conforto acústico do manual “Padrões Referenciais de Funcionamento da Escola” (documento em desenvolvimento pela Secretaria do Estado de Educação, Cultura, do Esporte e do Lazer), o qual fundamentou o projeto do edifício analisado. Para isso, os procedimentos metodológicos consistiram da coleta de dados sobre a escola e seus ambientes, de medições de parâmetros de inteligibilidade da fala (tempo de reverberação, tempo de decaimento inicial, índice de transmissão da fala, relação sinal ruído, entre outros) de ambientes específicos, e da análise qualitativa de decisões projetuais da escola e do conteúdo do manual com base na literatura científica. O estudo indicou que o tratamento acústico dos ambientes e as diretrizes do manual se encontram aquém dos padrões referenciados em diferentes fontes técnicas. Foram sugeridas diretrizes projetuais para o documento de padrões referenciais, de forma que futuras escolas possam ser construídas e escolas existentes possam ser reformadas de uma maneira que atenda às necessidades acústicas das atividades no ambiente escolar.

Palavras-chave: arquitetura escolar; qualidade acústica; inteligibilidade da fala; acústica em escolas.

PACS: 43.55.-n; 43.55.Br; 43.55.Gx; 43.55.Hy.

Evaluation of the acoustic quality of a state school of the Governo Cidadão project as a parameter for the adequacy of the guidelines of referential design standards

Abstract

School environments in Brazil suffer from an endemic problem of lack of acoustic treatment, which significantly hinders the teaching process. Solutions to this are often affordable and implementable, especially if these issues are considered at the design stage. Aiming to contribute to the improvement of the acoustic quality of schools in the state of Rio Grande do Norte, this work aims to evaluate the acoustic quality of the Ivani Machado Bezerra State School and propose guidelines for the improvement of the acoustic comfort specifications of the manual “Padrões Referenciais de Funcionamento da Escola” (document under development by the State Department of Education, Culture, Sport and Leisure), which guided the project of the analyzed building. For this, the methodological procedures consisted of collecting data about the school and its environments, measuring speech intelligibility parameters (reverberation time, initial decay time, speech transmission index, signal-to-noise ratio, among others) and specific environments, and qualitative analysis of school design decisions and manual content based on scientific literature. The study indicated that the acoustic treatment of the rooms and the guidelines of the manual are below the standards referenced in different technical sources. Design guidelines were suggested for the reference standards document, so that future schools can be built and existing schools can be renovated in a way that meets the acoustic needs of activities in the school environment.

Keywords: school architecture; acoustic quality; speech intelligibility; school acoustics.



1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa se inspira em alguns estudos locais sobre a qualidade acústica de ambientes, como as dissertações de Alves [1] e Moraes Júnior [2]. Estes trabalhos procuraram diagnosticar possíveis problemas de inteligibilidade acústica causados por características arquitetônicas de edificações, levantando diversas variáveis para tecer uma análise robusta, e, finalmente, propuseram soluções projetuais para mitigar ou solucionar os problemas encontrados. Em uma linha similar, o tema desta pesquisa compreende uma investigação da qualidade acústica de ambientes escolares, abrangendo não só as salas de aula como também outros espaços onde ocorra a dinâmica de ensino-aprendizagem, e o zoneamento da escola como um todo.

Em conversa com arquitetos da Secretaria do Estado de Educação, Cultura, do Esporte e do Lazer (SEEC) do Governo do Rio Grande do Norte, foi mencionado a existência do Projeto Governo Cidadão, que envolve uma diversidade de serviços e investimentos. Na área da educação, há o esforço de promover padrões mínimos operacionais para escolas, o que toma forma em Manual de Padrões Referenciais de Funcionamento da Escola (ainda não finalizado e não publicado) [3], com o intuito de garantir a qualidade de funcionamento das escolas da rede pública estadual. Esse manual se aplica tanto a escolas a serem construídas como a escolas a serem reformadas, com indicações distintas para ambos os casos. O documento está sendo desenvolvido pela SEEC em conjunto com a Secretaria do Planejamento e das Finanças (SEPLAN) e a Secretaria de Gestão de Projetos e Metas de Governo (SEGEPRO).

Com as orientações já existentes nesse manual, a Escola Estadual Professora Ivani Machado Bezerra foi construída no município de São Gonçalo do Amarante/RN. Nessa instituição, então, se encontrou a oportunidade de avaliar sua qualidade acústica para aferir a efetividade das diretrizes desse novo manual em relação a condições de conforto acústico, as quais poderão ser aplicadas nas demais escolas estaduais, assim como das decisões projetuais dessa escola em particular.

Este trabalho está estruturado em cinco seções, sendo o primeiro a presente introdução, seguindo-

se com o segundo sobre o fundamento teórico que embasa a análise, o que inclui como o som se comporta em recintos fechados, e quais são os parâmetros existentes que podem ser medidos para avaliar o comportamento do som em um dado ambiente. A terceira seção traz os procedimentos metodológicos, descrevendo o cenário da pesquisa (a escola e seus ambientes) e a forma como as medições foram executadas, seguindo as normas relevantes. A quarta seção discorre sobre os resultados das medições, comparando-as com os valores de referência estabelecidos pela literatura, e sobre uma análise qualitativa das características físicas do espaço, considerando diversas diretrizes para tratamento acústico. Finalmente, a quinto e última seção propõe diretrizes a serem incluídas no Manual de Padrões Referenciais de Funcionamento da Escola, com base em toda a análise e pesquisa literária construídas pelo trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção o tem por objetivo apresentar a fundamentação teórica necessária para a análise da qualidade acústica de ambientes fechados, incluindo o comportamento do som em salas fechadas, e os parâmetros de inteligibilidade de fala.

2.1 Propagação do Som em Recintos Fechados

Diferente do som em campo livre, que se propaga sem interferência de outras ondas, o som em recintos fechados sofre interferência das suas próprias reflexões no invólucro do ambiente [4], e, portanto, tem um comportamento e análise próprias. Um usuário (receptor do som) no recinto está sujeito a captar não somente o som direto da fonte, mas também suas reflexões. Tais reflexões podem em si ser refletidas múltiplas vezes antes de chegar ao receptor, e, a cada reflexão, parte da energia é absorvida pela superfície. Não obstante essa perda, tais reflexões ainda ajudam na percepção e entendimento do som direto, que por si só pode ser insuficiente [4].

Além disso, Seep *et al.* [5] coloca como o controle adequado de tais reflexões depende em grande parte da forma como a sala é usada, e da distribuição da fonte e dos receptores sonoros no ambiente.

2.1.1 Efeitos acústicos da geometria do ambiente

Dada a interação de reflexão-absorção do som com os objetos físicos que compõem um ambiente, é evidente então que a geometria do ambiente e a disposição de seus elementos é um fator essencial para o condicionamento acústico de uma sala [6]. No contexto de um ambiente onde o uso se centra na fala direcionada, as primeiras reflexões são essenciais para inteligibilidade da fala [7].

Adicionalmente, é necessário ter cautela com o paralelismo entre as paredes do ambiente, que podem levar ao que é chamado de eco palpitante [6]. Outro elemento importante é a distância entre a fonte sonora e o receptor. O som direto precisa chegar ao receptor com uma intensidade mínima necessária para o entendimento. No contexto da fala como uso principal, Souza; Almeida; Bragança [8] classificam essa distância da seguinte forma:

- Até 15 metros: Excelente;
- De 15 a 20 metros: Bom;
- De 20 a 25 metros: Satisfatório;
- 30 metros: Limite para fala sem uso de amplificação sonora.

2.2 Parâmetros de Inteligibilidade da Fala

A inteligibilidade da fala é um elemento chave para o uso escolar, já que a capacidade de compreender o que se fala em uma sala de aula afeta diretamente a eficácia do ensino [5]. Tal inteligibilidade é, essencialmente, subjetiva e não pode ser universalmente e absolutamente determinada. Contudo, há uma variedade de parâmetros objetivamente aferíveis que tem um impacto significativo e experimentalmente comprovado na inteligibilidade da fala [9][5]. Os parâmetros utilizados neste estudo são: nível de pressão sonora (NPS), tempo de reverberação (TR), relação sinal ruído (SNR), tempo de decaimento inicial (EDT), índice de transmissão da fala (STI) e definição (D50). Estes são definidos a seguir.

2.2.1 Relação Sinal-Ruído (SNR)

A relação sinal-ruído (em inglês, *Signal-to-Noise Ratio*, SNR) é, fundamentalmente, uma razão entre a potência de um sinal e a potência do ruído

de fundo [10]. Esta razão é aplicável a diferentes tipos de sinal e ruído, e no contexto da análise acústica, se torna uma razão entre a potência sonora de ambos, ou de seus níveis de pressão sonora. Seep *et al.* [5] recomenda um valor de +10 dB para salas de aula.

2.2.2 Tempo de Reverberação (TR)

O tempo de reverberação é definido como o “tempo necessário para que o nível sonoro do recinto caia 60 dB, após o desligamento da fonte sonora” [4]. Essa grandeza está diretamente ligada à absorção sonora das superfícies do recinto, uma vez que quanto mais absorventes forem, mais rapidamente o som decai, desaparecendo ao ser absorvido completamente pelo invólucro do recinto [4].

O tempo de reverberação ideal depende do uso e do volume da sala. ProAcústica [11] sintetiza os padrões da norma BB93 [12] em relação a isso no gráfico a seguir (Figura 1). É importante frisar que esses valores são especificados para frequências médias (500 a 2000 Hz). Para frequências menores, um aumento de 50% no TR é admissível [11].

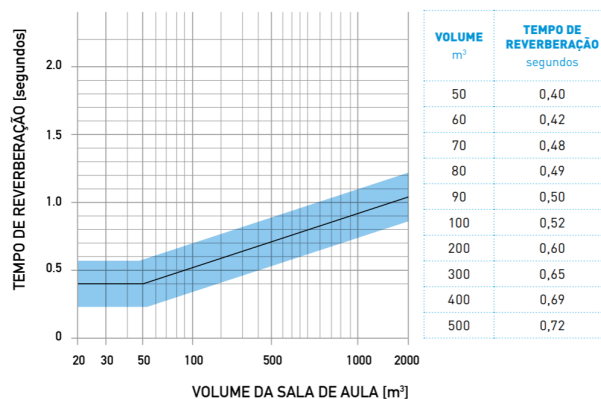


Figura 1: Tempo de reverberação ideal para salas de aula em frequências médias, de acordo com seu volume (retirado de ProAcústica [11]).

2.2.3 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

O tempo de decaimento inicial (em inglês, *Early Decay Time*, EDT) é análogo ao tempo de reverberação – mede a variação de NPS em um dado intervalo de tempo. Contudo, o EDT se limita a um decaimento de 10 dB, não de 60 dB. Essa escolha de variação menor, se limitando ao período iniciação da reverberação, é mais adequada ao contexto onde a fala é o foco do uso, já que o



decaimento mais tardio (se aproximando do TR) se mistura ao ruído de fundo e/ou fica mascarada pelos sons das sílabas seguintes [13]. O EDT é apresentado ao se extrapolar o valor medido multiplicando o tempo de duração do decaimento por seis, o que é comparado ao TR [9]. Tal comparação ajuda a revelar a sensação do usuário de reverberação da sala, que pode não corresponder ao que indica o TR [2].

2.2.4 Definição (D_{50})

Como coloca Everest ([14], tradução nossa), definição “é uma razão percentual do som que chega nos primeiros 50 ms seguindo o som direto do som total”. Essa proporção está relacionada à inteligibilidade da fala pois quanto mais dispersa no tempo estiver a energia das reflexões do som que chega ao receptor, mais difícil fica a compreensão dos fonemas – isto é, uma intensidade energética focada nas primeiras reflexões confere mais clareza à fala [1]. Consequentemente, ambientes com superfícies absorventes apresentam um D_{50} maior. De acordo com Brandão [9], para ambientes onde a fala está no foco do uso, valores acima de 50% são indicados – ou seja, a maioria da energia sonora está concentrada nos primeiros 50 ms da recepção do sinal sonoro.

2.2.5 Índice de Transmissão de Fala (STI)

O Índice de Transmissão de Fala (em inglês, *Speech Transmission Index*, STI) compara, em uma razão, as modulações das amplitudes sonoras entre emissor e receptor. Essa amplitude de modulação é afetada por ruído de fundo e por reverberações no ambiente [9]. Para que a fala seja inteligível, o STI deve superar um valor mínimo. Na norma IEC 60268-16 [15], as categorias dos valores para STI são dados:

- Aceitável: 0,45 a 0,6
- Bom: 0,6 a 0,75
- Excelente: Maior que 0,75

2.3 Normas

As análises e métodos empregados neste estudo se baseiam em quatro normas principais:

- **NBR 10.151/2019:** Acústica – Avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento [16];

- **NBR 10.152/2017:** Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações [17];
- **ISO 3382-2:2008:** Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms [18];
- **BB93** – Acoustic design of schools – performance standards [12].

A primeira norma [16] estabelece valores de nível de ruído equivalente máximo para ambientes externos. Áreas escolares tem um limite diurno de 50 dB(A), e noturno de 45 dB(A). Como o funcionamento da escola em estudo se limita ao período diurno, o segundo valor não é considerado na análise.

A segunda [17] é utilizada aqui para os valores de referência de ruído de fundo medidos dentro dos ambientes. Para ambientes escolares, os valores são apresentados na Tabela 1. Há uma tolerância de 5 dB para o nível de ruído médio. Nota-se que a medição em decibel está na ponderação A.

Tabela 1: Valores de ruído de fundo máximo para ambientes internos. Elaborado a partir da NBR 10.152 [?].

LOCAIS	L_{Aeq}	L_{ASmx}	L_{NC}
Salas de aula, Laboratórios	35	40	30
Circulação	50	55	45

A terceira norma [18] é utilizada como referência para os procedimentos de medição de tempo de reverberação e variáveis relacionadas.

A quarta [12] é empregada como referência de valores de desempenho acústico de ambientes escolares, em particular o tempo de reverberação. Seus dados e valores são apresentados através de ProAcústica [11] que traduz e sintetiza seu conteúdo, além de trazê-la para o contexto brasileiro.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção são descritos os procedimentos de coletas de dados, medições *in loco* e simulações em *software* dos ambientes escolhidos.

3.1 Coleta de Dados

A partir de levantamento documental, análise cartográfica e de imagens de satélite, a escola foi

caracterizada tanto em relação ao prédio como um todo e também os aspectos geométricos e tectônicos da sala de aula padrão.

3.1.1 Caracterização da escola

A escola inaugurada em 27 de dezembro de 2018, atende ao nível médio de ensino, com capacidade de atender 640 alunos – 320 em cada turno – e se encontra no município de São Gonçalo do Amarante, parte da região metropolitana de Natal, no estado do Rio Grande do Norte.

O município é adjacente a oeste da capital estadual. A escola fica no Bairro Jardins, na parte leste do município, próxima à BR 101, que marca o limite entre os municípios de São Gonçalo e de Natal (Figura 2). Com base em investigação do entorno, visível na Figura 3, o uso principal da área é residencial, com apenas um ou dois pavimentos, com algumas poucas ocorrências de uso misto (residencial e comercial), e uma área considerável de terrenos baldios.



Figura 2: Localização da escola estadual, marcado pelo alfinete à esquerda.

3.1.2 Caracterização da sala de aula

A sala de aula (Figura 4) é em sistema construtivo de alvenarias em tijolo cerâmico, com cobertura em laje maciça e contrapiso de argamassa. Seus revestimentos são Piso de granilite, paredes com cerâmica até 1 m de altura, e reboco com argamassa pintada acima de 1 m das paredes e na laje.

- **Dimensões:** 7,05 x 7,05 x 3,30 m
- **Volume:** 164,02 m³



Figura 3: Visão de satélite da E.E. Ivani Machado Bezerra, no destaque ao centro.



Figura 4: Sala de aula padrão.

3.2 Medições *in loco*

A condição meteorológica no momento das medições (8 out. 2020, São Gonçalo do Amarante/RN) era ensolarada, com temperatura usual, variando de 29 a 31. As medições de condicionamento acústico foram realizadas com todas as portas e janelas fechadas, e com os aparelhos de ar-condicionado ligados. Para as medições de ruído de fundo, os aparelhos de ar-condicionado foram ligados, já que são uma fonte de ruído presente durante o uso dos ambientes. Uma das medições foi feita com o aparelho desligado para fornecer um valor comparativo.

Seguindo as recomendações da norma ISO 3382-2 [18], para realizar as medições dos parâmetros de condicionamento acústico (TR, D50, STI, EDT), em cada ambiente foram escolhidos um ponto onde se localiza o orador (fonte sonora) e pelo menos quatro pontos para localização de receptores (microfones). Os receptores foram posicionados de forma a ocupar lugares onde os alunos estariam durante o uso comum da sala em questão, representando as condições acústicas às



quais os usuários estariam sujeitos.

Ainda de acordo com a norma, a posição de todos os pontos, fontes ou receptores deve estar a pelo menos um metro de qualquer superfície refletora significativa (o que inclui o piso e as paredes), e que se deve evitar a simetria na distribuição dos pontos, tanto quanto possível. Também foi respeitada a distância mínima entre os pontos de medição e a fonte sonora, se utilizando da Equação 1 estabelecida pela ISO 3382-2 [18].

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (1)$$

Onde:

- d_{min} = distância mínima, em metros (m);
- V = volume do recinto, em metros cúbicos (m^3);
- c = velocidade do som, em metros por segundo (344 m/s);
- T = estimativa do tempo de reverberação, em segundos (s).

Dada a distribuição de pontos (Figura 5), respeitando as quantidades de pontos e distâncias mínimas, a medição dos parâmetros foi feita da mesma forma que em Alves [1], “através da técnica da resposta impulsiva da sala, geradas pelo software DIRAC® 6.0 e pelos equipamentos de medição, todos da fabricante Brüel & Kjær e pertencentes ao Laboratório de Conforto Ambiental

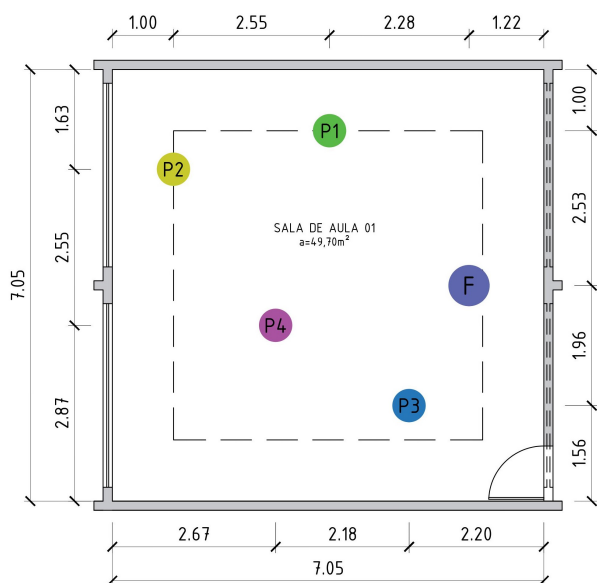


Figura 5: Pontos de fonte sonora (F) e de medição (P1 a P4) da sala de aula.

da UFRN".

Para a medição do ruído de fundo, foi utilizado um MNPS montado em tripé a 1,20 m do piso. A coleta foi realizada por 5 minutos em cada ambiente, sendo retornado um valor médio para o período (denominado LAeq), um valor máximo (LASmáx), e um perfil de NPS por banda de frequência (que se relaciona às curvas NC) – todos comparados com a norma. Para a medição de ruído de fundo, os aparelhos de ar-condicionado foram ligados, já que contribuem para o ruído durante o uso da sala. Um único ponto central de medição em cada ambiente foi empregado.

4. ANÁLISE DOS DADOS LEVANTADOS

Esta seção se divide em quatro partes: a primeira é relativa ao manual em desenvolvimento “Padrões Referenciais de Funcionamento da Escola” [3], e quaisquer orientações e diretrizes sobre tratamento acústico que contém; a segunda discorre sobre o zoneamento do projeto da escola e suas características arquitetônicas (este último com foco no ambiente de medição); e a terceira traz os parâmetros de inteligibilidade da fala medidos nos quatro ambientes descritos anteriormente, comparando-os com os valores normativos.

4.1 Análise do Manual de Padrões Referenciais

O manual apresenta especificações para diversas características de um edifício escolar, incluindo dimensões mínimas dos ambientes, níveis de iluminação artificial, obrigatoriedade ou não de ventilação cruzada, área de aberturas para ventilação, etc. Para cada tipo de ambiente escolar, o manual apresenta uma tabela com essas informações – o que inclui, para a maioria dos ambientes, um nível máximo de ruído externo (ruído de fundo). Destaca-se que para salas de aula, um dos ambientes mais críticos e importantes, esse valor não é especificado. A fim de avaliar os valores colocados pelo manual, é aqui feita uma comparação entre estes e o que é determinado pela NBR 10.152 [17].

É importante frisar que os valores da norma admitem uma tolerância de 5 dB, então quaisquer valores que superem o determinado pela NBR, mas o façam dentro dessa tolerância, são considerados como atendendo ao exigido. Valores que

não atendem à norma são destacados. Outra observação é de que a norma diz respeito a ambientes internos, então para alguns dos ambientes citados (como recreio coberto e quadra poliesportiva) há a possibilidade de que sejam ambientes externos. Nestes casos, os valores são comparados ao que estabelece a NBR 10.151 [16]. A Tabela 2 apresenta a comparação.

Como mostra a comparação, a maioria dos valores se encontra dentro da tolerância, sendo a maioria dos que não se encontram sendo aqueles especificados para reforma de escolas existentes. Os valores maiores se baseiam no pressuposto de que adaptar um ambiente existente às exigências de conforto ambiental é mais desafiador ou oneroso do que conceber uma edificação já com questões de acústica em mente. Dito isso, também é válido pontuar que, sendo o NPS da fala humana em torno de 65 dB a 70 dB [4], os ambientes onde o uso da fala é principal com valores de ruído que ultrapassam a tolerância apresentam números que resultam em um SNR aceitável. No caso específico dos laboratórios, o valor de 45 dB colocado ainda resultaria em um SNR de 20 dB, acima dos 10 a 15 dB recomendados.

A tabela referente à sala de aula no manual, além de não especificar valor de ruído externo, não indica a necessidade de forro (apenas laje), o que contribui para um aumento do TR tanto pelo volume maior da sala quanto pela natureza refletora da laje de concreto, com α em torno de 0,02 [4]. O mesmo acontece para outros ambientes onde são conduzidas aulas, como o laboratório de matemática, laboratório de línguas e a sala multimídia.

Outra parte do documento que trata sobre elementos de acústica é a seção “Orientações Técnicas Gerais dos Ambientes”. O tópico sobre acústica é citado a seguir na íntegra:

"Nos ambientes onde se exigem cuidados arquitetônicos especiais de acústica (teto e paredes) e iluminação, tais como auditório, salas multiuso e salas de vídeo. (...) O tratamento acústico se faz necessário para evitar que os ruídos produzidos no ambiente interno interfiram nas atividades pedagógicas e administrativas." [3]

O tópico faz menção geral da necessidade de evitar a interferência do ruído de fundo no uso dos ambientes (isolamento acústico), o que se reflete

concretamente na especificação de valores máximos de nível de pressão sonora já analisados. Outra observação é de que o parêntese que implica que os cuidados especiais de acústica são focados no teto e nas paredes é demasiado limitante. Mais elementos que também podem fazer parte do tratamento acústico do ambiente incluem:

- O piso, que pode contribuir para a absorção/reflexão das ondas sonoras, assim como qualquer outra superfície do recinto, além de ser especialmente relevante caso o edifício tenha múltiplos pavimentos, onde o ruído de impacto se torna uma questão mais pronunciada [11];
- As esquadrias, cuja estanqueidade e coeficiente de absorção já foram discutidos anteriormente;
- E o mobiliário, que também reflete/absorve as ondas sonoras e pode ser projetado para atender a demandas acústicas específicas.

4.2 Análise de Zoneamento e Características Arquitetônicas

4.2.1 Zoneamento

A análise que se segue no zoneamento mostrado na Figura 6. Considerando-se a implantação da escola não foi observada em campo uma fonte de ruído ambiental significativa a partir das edificações (sem boates, bares ou afins nas imediações), havendo, pelo contrário, vários terrenos baldios próximos, além das edificações uso residencial e misto.

Para avaliar a posição dos blocos dentro do terreno, é definido aqui que o tipo de ambiente com maior prioridade de afastamento das fontes de ruído são as salas de aula comuns. Outras salas onde ocorrem processos de ensino-aprendizagem, como os laboratórios e o auditório, tem uma prioridade secundária. Em último nível estão as áreas de convivência e para funcionários. Essa ordem de prioridade é justificada pelo tempo de permanência dos alunos no ambiente.

A quadra se encontra mais próxima ao bloco dos laboratórios, assim como da biblioteca e do auditório. Nessa configuração, o impacto nas salas de aula é menor. O refeitório se encontra no centro da edificação, estando próximo de todos os demais ambientes. Outros ambientes, como os da



Tabela 2: Comparação de valores de ruído máximo entre manual de padrões referenciais e as NBR 10.151 [16] e NBR 10.152 [17], com destaque em valores acima da tolerância de 5 dB ou omissos.

Ambientes	Nível de ruído máximo para escolas novas	Nível de ruído máximo para escolas existentes	Nível de ruído máximo de acordo com as NBRs (RL_{ASmx})
Recepção	45	50	50
Secretaria	45	50	45
Arquivos	45	50	-
Sala da Direção	45	50	45
Almoxarifado	45	50	-
Sala de Aula	-	-	40
Lab. de Informática	40	45	40
Lab. de Ciências	40	45	40
Lab. de Biologia	40	45	40
Lab. de Química	40	45	40
Sala de Preparo	40	45	50
Lab. de Física	40	45	40
Lab. de Matemática	40	45	40
Lab. de Línguas	40	45	40
Auditório	60	70	40
Recreio Coberto	60	70	50
Quadra Poli.	60	70	50
Refeitório	60	70	55
Biblioteca	40	45	45
Sala multimídia	40	45	40
Sala de multimeios	40	45	40
Sala de recursos multifuncionais para educação especial	40	45	40
Depósito Ed. Física	60	70	-
Sala de profs.	45	50	50
Sala de coord. pedagógica	45	50	45
Cozinha	60	70	55
Área de serviço	60	70	55
Despensa	60	70	-
DML	60	70	-
Sanitário/vestiário	60	70	-
Grêmio estudantil	45	50	40

área administrativa e a sala de professores, não necessariamente interrompem suas atividades nos intervalos dos alunos, e é preciso considerar o impacto do refeitório neles. Similarmente, a biblioteca é um espaço que pode ser utilizado em diversos horários.

O estacionamento, apesar de ser uma fonte de

ruído, não é considerado significativo por seu porte reduzido, que indica um uso mais dedicado a funcionários, que entram e saem antes e após o horário de aulas.



Figura 6: Zoneamento da escola.

4.2.2 Geometria e tectônica

A estrutura da escola é em vigas e pilares de concreto armado, com a cobertura sendo apoiada em lajes maciças. As vedações são em alvenaria de tijolo cerâmico rebocado. Dado que as alvenarias seguem a espessura padrão de 15 cm, propiciam um isolamento (perda de transmissão) de 30 dB a 63 Hz, chegando a 40 dB a 500 Hz e a 59 em 8.000 Hz [4]. Lajes de concreto maciço apresentam um desempenho ainda melhor de isolamento. Todavia, é típico que materiais e sistemas que oferecem bom isolamento sejam densos e reflexivos [4], comprometendo o condicionamento acústico.

Os revestimentos dos ambientes são principalmente três: reboco liso pintado, pastilhas cerâmicas, e piso de granilite. Estes são revestimentos refletoras, contando com um α igual ou inferior a 0,05 em todas as frequências de 125 Hz a 4000 Hz [4], isto é, refletem 95% ou mais do som incidente.

A escola apresenta janelas altas ligando as salas de aula aos corredores para ventilação cruzada, que, estando abertas, agravam o impacto do ruído de fundo. Como os blocos contam com laje inclinada, esse problema pode ser evitado colocando as janelas altas acima da cobertura da circulação (Figura 7).

Aberturas no invólucro do ambiente, ainda que relativamente pequenas, diminuem consideravelmente o isolamento acústico da barreira. É evidente, então, que a estanqueidade das esquadrias é um elemento relevante a ser considerado. A escola apresenta nos ambientes analisados esquadrias de giro e basculantes, o que é preferível à

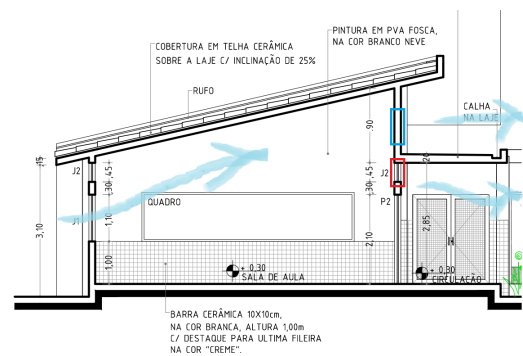


Figura 7: Na imagem acima, pontos favoráveis (azul) e desfavoráveis (vermelho) de ventilação cruzada em relação à atenuação de ruído.

esquadrias corredeiras [6].

4.3 Análise das Medições de Parâmetros

As medições de ruído de fundo equivalente e máximo (L_{Aeq} e $L_{ASmáx}$), assim como de SNR, são apresentados na Tabela 3. Para os limites de ruído, a sala de aula ultrapassa os valores normativos por uma margem significativa, e acima da tolerância de 5 dB. Considerando o sistema construtivo, isso se deve, em grande parte, pelas esquadrias e sua falta de estanqueidade.

Tabela 3: Valores medidos e referências de L_{Aeq} , $L_{ASmáx}$ e SNR.

	$L_{Aeq}(dB)$	$L_{ASmáx}(dB)$	SNR
Valor de Referência	≤ 35	≤ 40	≥ 10
Valor Medido	54	56	11

Em relação ao SNR, usando como referência de

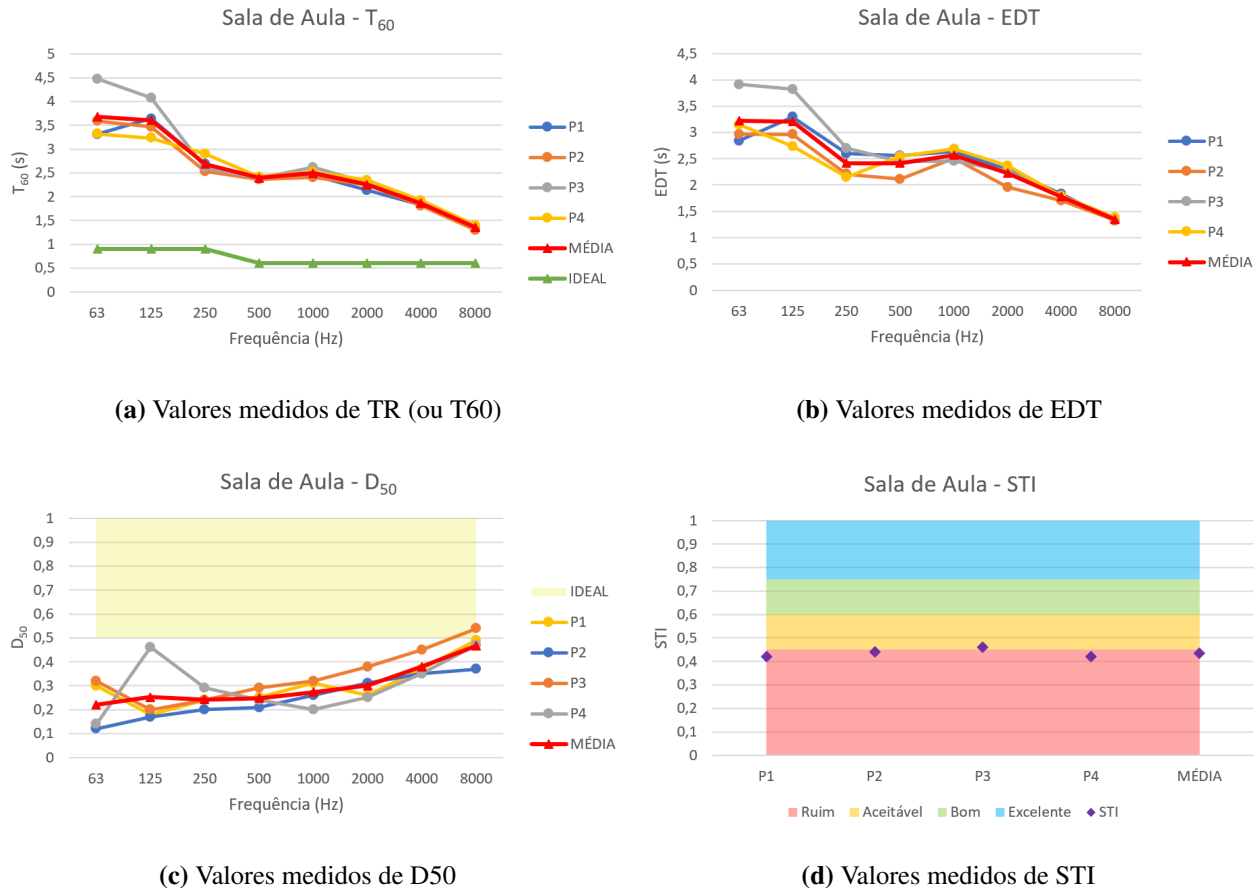


Figura 8: Medições de TR, EDT, D₅₀ e STI da sala de aula.

sinal um nível de pressão sonora de 65 dB para a fala humana [4], se atinge um valor satisfatório de +10 dB. Contudo, é importante lembrar que as condições de medição se deram sem alunos nos ambientes do entorno e com tráfego baixo, o que indicam que, possivelmente, em condições normais o SNR não seria satisfatório.

Em relação aos parâmetros de condicionamento acústico, as medições são dadas na Figura 8.

As medidas de EDT e TR (Figuras 8a e 8b) são consideravelmente acima dos valores normativos. Os valores de D₅₀ e STI (Figuras 8c e 8d), abaixo do recomendado, corroboram as constatações feitas com os valores de tempo de reverberação. Estes eram os resultados esperados, dada a predominância de superfícies refletoras na sala de aula, assim como o volume a mais criado pela inclinação da laje.

5. PROPOSIÇÃO DE DIRETRIZES

As diretrizes propostas ao manual são as seguintes:

- **CONSIDERAÇÕES DE ZONEAMENTO:** No zoneamento há que se considerar tanto fontes externas quanto fontes internas de ruído. Em uma análise do entorno da edificação, havendo fontes externas de ruído (e.g. bares, casas de show, vias de tráfego intenso), os ambientes mais sensíveis devem ser posicionados o mais distante possível dessas fontes. Quando isto não é possível, atenção especial deve ser dada ao isolamento acústico tanto do ambiente que é fonte de ruído quanto do ambiente que se procura proteger dessa exposição [11].
- **FORMA E PROPORÇÃO DOS AMBIENTES:** Ao definir as dimensões recomendadas, assim como na escolha das dimensões em projeto, dos diversos ambientes, é importante evitar proporções alongadas (1:2 ou superior), assim como o paralelismo entre as paredes, que causam eco palpitante. Uma proporção recomendada para ambientes retangulares é de 1:1,618, evitando que os am-

bientes tenham medidas que sejam múltiplas entre si [6]. O formato de leque é particularmente recomendado para auditórios e salas de música e teatro.

- **DIVISÓRIAS DOS AMBIENTES:** As divisórias dos ambientes (sejam estas alvenarias, partições compostas ou outros) devem ir de piso à laje, sendo completamente estanques. Quando isso não for possível (seja pela ausência de laje ou pela necessidade de passagem de instalações pelo forro), é indispensável o uso de um forro, sobre o qual deve ser empregado um septo acústico na parte acima das divisórias para isolar acusticamente os ambientes [11]. Quando divisórias que não sejam de alvenaria de tijolo cerâmico (que usualmente possuem uma perda de transmissão suficiente) forem escolhidas em projeto (e. g. drywall), é necessário dimensioná-las de forma que garantam um isolamento adequado, o que geralmente implica em conjugá-las a algum material absorvente.
- **CONFIGURAÇÃO DE MATERIAIS DE REVESTIMENTO:** Existem materiais de alta absorção acústica para diferentes tipos de revestimento. A aplicação de materiais acústicos no contexto escolar é mais comum e de fácil aplicação em forros. Estes podem ser aplicados em todo o forro, mas também é útil que existam superfícies refletoras próximos à fonte sonora (professor), de preferência com inclinação que direcione as reflexões do som aos receptores (alunos) [5]. As áreas que mais necessitam de revestimento acústico são a parte posterior do forro, assim como as partes superiores tanto da vedação posterior e quanto da parte posterior das vedações laterais.
- **ISOLAMENTO E ESTANQUEIDADE DAS ESQUADRIAS:** As esquadrias comumente são um ponto problemático no isolamento acústico dos ambientes, sendo feitas, normalmente, de material menos denso. Nesse sentido, é útil que janelas (assim como outros elementos transparentes/translúcidos em portas, como bandeiras) sejam de folha dupla, com um espaço entre as folhas [4]. Também é importante que as esquadrias tenham um fechamento estanque, evitando a

passagem de ondas sonoras por frestas. Isso geralmente é alcançado se aplicando um elemento resiliente na interface entre a esquadria e sua caixa. Esquadrias de giro ou pivotantes geram melhor estanqueidade do que esquadrias corredeiras [4].

- **POSICIONAMENTO DAS PORTAS:** A fim de evitar o impacto do ruído de uma sala nas demais, as portas dos ambientes devem estar o mais distante possível umas das outras, evitando o pareamento lateral ou frontal.
- **CUIDADOS COM VENTILAÇÃO CRUZADA:** O emprego da ventilação cruzada cujas aberturas estejam conjugadas a ambientes que são fonte de ruído (as circulações, por exemplo) acabam comprometendo o isolamento acústico. Outras opções de ventilação devem ser consideradas que evitem a passagem de ruído, sendo a ventilação zenital um exemplo.
- **RUÍDO DAS INSTALAÇÕES:** Instalações prediais podem ser uma fonte de ruído, e devem ser compatibilizadas com o uso dos ambientes tendo isso em mente. Geradores elétricos, por exemplo, são uma fonte de ruído. Encanamento cuja pressão esteja excessiva também pode gerar ruído. Para unidades de ar-condicionado, os condensadores devem estar tão afastados do ambiente quanto possível. O ruído que gera a evaporadora (assim como o ruído externo no geral que chega à sala) deve ser menor que o especificado pela curva NC (estabelecida pela NBR 10.152 [17]) estipulada para o ambiente.
- **USO DE VEGETAÇÃO:** Vegetação como barreira acústica somente é eficaz a partir de uma largura de barreira de 15 metros [4], e desde que conte com uma variedade de portes, com diferentes alturas, e contando com folhagem densa.
- **RUÍDO DE IMPACTO:** Caso a edificação conte com mais do que um pavimento, é necessário considerar o ruído de impacto. Ambientes ocupados acima de salas sensíveis (salas de aula, biblioteca, etc.) geram ruídos pelos passos dos ocupantes, pelo atrito de mobiliário sendo movido junto ao piso, pela queda de objetos, etc. Nessas circuns-



tâncias, é recomendado aplicar uma manta isolante entre o contrapiso e o revestimento do piso, que absorve a vibração dos impactos [4] [11].

Além do que apontam as diretrizes, é recomendado revisar os valores de ruído de fundo para que se adequem às NBR 10.151 [16] e NBR 10.152 [17].

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do manual “Padrões Referenciais de Funcionamento da Escola” revelou que este carece de orientações concretas sobre cuidados de tratamento acústico. Além disso, algumas de suas especificações arquitetônicas vão de encontro às práticas recomendadas para um bom desempenho acústico dos edifícios. Sendo a Escola Estadual Ivani Machado Bezerra a primeira escola construída dentro destes padrões, foi feita também análise de uma de suas salas de aula padrão, onde a fala constitui o uso principal. As medições de parâmetros acústicos nas salas confirmaram os problemas apontados pela literatura.

Como parte das considerações para elaborar proposições de melhora, foram analisados também o zoneamento e características arquitetônicas dos ambientes, que complementam as medições realizadas. Enquanto o zoneamento não apresentou problemas significativos, os materiais de revestimento dos ambientes são reflexivos em sua totalidade, o que explica o resultado insatisfatório das medições. Outro elemento de impacto significativo visto na análise são as esquadrias, muitas das quais não são estanques, por vezes apresentando frestas largas que permitem a passagem do ruído de fundo.

As diretrizes propostas constituem um passo na direção de sanar estes problemas, caso incorporadas ao manual. Contudo, ainda não dão subsídio suficiente para decisões projetuais mais precisas, como a escolha de modelo e área de superfície de materiais fonoabsorventes para revestir salas.

REFERÊNCIAS

[1] Alves, Luciana da Rocha. *Todos Entenderam?: Compatibilização das características arquitetônicas e qualidade acústica em salas de aula nas instituições federais de ensino superior de Natal/RN*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do

Norte, Natal, RN, 2019.

- [2] Moraes Junior, José Eugênio Silva de. *Acústica de Igrejas: Estudos de caso de qualidade acústica em templos evangélicos com diferentes usos sonoros*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2020.
- [3] *Padrões Referenciais de Funcionamento da Escola*. Secretaria do Estado de Educação, Cultura, do Esporte e do Lazer, Secretaria do Planejamento e das Finanças, Secretaria de Gestão de Projetos e Metas de Governo, No plero, 2018.
- [4] Bistafa, Sylvio Reynaldo. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2006. ISBN 978-8521205814.
- [5] Seep, B. *Acústica Arquitetônica*. 2ª ed. Melville: Acoustical Society of America, maio 2003.
- [6] Carvalho, Regio Paniago. *Acústica Arquitetônica*. 1ª ed. São Paulo: Thesaurus, 2006. ISBN 8570625405.
- [7] Ermann, Michael. *Architectural Acoustics Illustrated*. 1ª ed. Hoboken: John Wiley Sons, 2015. ISBN 978-1118568491.
- [8] Souza, Léa Cristina de; Almeida, Manuela de; Bragança Luís. *Bé-Á-Bá Da Acústica Arquitetônica*. 1ª ed. São Carlos: EdUFSCar, 2012. ISBN 978-8576000730.
- [9] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
- [10] Kieser, Robert; Reynisson, Pall; Mulligan Timothy J. Definition of signal-to-noise ratio and its critical role in split-beam measurements. *ICES Journal of Marine Science*, 62:123–130, 2005. ISSN 1054-3139. doi: [10.1016/j.icesjms.2004.09.006](https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.09.006).
- [11] *Manual ProAcústica para Qualidade Acústica em Escolas*. ProAcústica, São Paulo, abr. 2019.
- [12] *Building bulletin 93*. Education Funding Agency, Reino Unido, fev. 2015.
- [13] Long, Marshall. *Architectural Acoustics*. 1ª ed. Burlington: Elsevier Academic Press, 2006. ISBN 978-0124555518.
- [14] Everest, Alton F. *Master Handbook of Acoustics*. 4ª ed. New York: McGraw Hill, 2001. ISBN 978-0071603324. doi: [10.1036/0071399747](https://doi.org/10.1036/0071399747).
- [15] *IEC 60.268-16*. International Electrotechnical Commission, Suíça, jun. 2011.
- [16] *NBR 10151*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, maio 2019.
- [17] *NBR 10152*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, nov. 2017.
- [18] *ISO 3382-2*. International Organization for Standardization, Suíça, jun. 2008.