

## Avaliação acústica e propostas para a adequação de ambientes educacionais

### *Acoustic evaluation and proposals for the adequacy of educational environments*

Gustavo Emmanuel Carvalho Borella Guidetti<sup>1</sup>; Ricardo Humberto de Oliveira Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudante do Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais Brasil. E-mail: gustavo\_guidetti@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba, Minas Gerais Brasil. Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-6077-9410> E-mail: ricardo.filho@uftm.edu.br

**RESUMO:** Em recintos dedicados a atividades educacionais tais como salas de aula, bibliotecas e laboratórios, um adequado condicionamento acústico é necessário. No caso das salas de aula e dos laboratórios de ensino, o propósito é a compreensão da palavra falada, já para bibliotecas e laboratórios de pesquisa, o silêncio é imprescindível. A acústica é um dos ramos da física responsável pelo estudo dos fenômenos do som e sua interação com o meio. Por sua vez, a acústica de salas destina-se ao condicionamento acústico de recintos, buscando solucionar os problemas associados ao som. Diversas normas foram elaboradas e são utilizadas para alcançar a qualidade necessária para o desenvolvimento das atividades. Neste trabalho, realizou-se a avaliação acústica de salas de aula, biblioteca, restaurante universitário e de um laboratório de ensino e pesquisa do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Foram realizados ensaios para a obtenção do nível de pressão sonora ambiente, tempo de reverberação e tempo de decaimento inicial. A partir destes parâmetros foi estimado o tempo central, a definição e a inteligibilidade da fala. Os valores obtidos foram comparados aos recomendados pelas normas vigentes e foi constatado que os ambientes não estavam acusticamente projetados. Assim, foram propostas alterações construtivas com o objetivo de reduzir a reverberação, alcançando assim o conforto acústico. Foram definidos os materiais e a quantidade necessária para a adequação acústica de cada um dos recintos de acordo com as normas NBR 10152:2017 e ANSI/ASA S12.60:2010-1.

**Palavras-chave:** Acústica Arquitetônica, Conforto Acústico, Adequação Acústica de Ambientes.

**ABSTRACT:** *In rooms dedicated to educational activities such as classrooms, libraries and laboratories, adequate acoustic conditioning is necessary. In the case of classrooms and teaching laboratories, the purpose is the correct understanding of the spoken word, already for libraries and research laboratories, silence becomes indispensable. Acoustics is one of the branches of physics responsible for the study of sound phenomena and their interaction with the environment. In turn, room acoustics are intended for the acoustic conditioning of rooms, seeking to solve the problems associated with sound. Several standards have been elaborated and are used to achieve the necessary quality for the development of the activities. In this work, the acoustic evaluation of the classrooms, the library, the university restaurant and a teaching and research laboratory of the Institute of Technological and Exact Sciences of the Federal University of the Triângulo Mineiro were carried out. Tests were carried out to obtain the ambient sound pressure level, reverberation time and initial decay time. From these parameters the central time, the definition and the intelligibility of the speech were estimated. The values obtained were then compared to those recommended by current standards and it was found that the environments weren't acoustically designed. In this way, constructive changes were proposed in order to reduce reverberation, thus achieving acoustic comfort. The materials and the quantity necessary for the acoustic adequacy of each of the enclosures were defined according to the norms NBR 10152:2017 and ANSI/ASA S12.60:2010-1.*

**Keywords:** *Architectural Acoustics, Acoustic comfort, Acoustical Suitability of Environments.*

## INTRODUÇÃO

Bistafa (2011) define o ruído como todo e qualquer som indesejável, sem harmonia e em geral de conotação negativa. O tratamento e amenização desse ruído em ambientes faz parte da área de acústica de salas, que tem por objetivo projetar a melhor qualidade sonora possível para seus usuários. Brooks (2003) afirma que o desempenho acústico de salas é notado pelo ser humano através da interação dos sinais sonoros que são emitidos pela fonte principal, pelo ruído externo e ainda por ruídos de outras fontes.

Diversas normas, como a ISO 1996-2:2007 - *Acoustic - Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels*, a NBR 10151:2003 – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade e a NBR 10152:2017 - Níveis de ruído para conforto acústico, regulamentam a medição e a qualidade acústica de ambientes fechados. Outras normas, como a ISO 3382:2009 – *Measurement of room Acoustic parameters – Part 1: Performance spaces* e a ISO 18233:2006 – *Application of The New Measurements Methods in Building and room acoustics*, citadas em Pereira (2010), apresentam parâmetros essenciais para a análise da qualidade acústica de um ambiente, dentre os quais se destaca o tempo de reverberação, um dos principais critérios utilizados em normas e regulamentações, compreendido como o tempo necessário para que a pressão acústica caia 60 decibéis (dB) após a interrupção da fonte sonora, é de modo geral, visto como positivo em termos de conforto acústico quando seu valor é baixo, uma vez que a fala é melhor compreendida devido à ausência de eco.

É fundamental garantir um espaço acusticamente adequado para qualquer recinto em que a escuta é importante. Salas de aula, bibliotecas e ambientes que envolvem um grande número de pessoas, sobretudo em escolas e universidades, são exemplos de espaços em que a má qualidade acústica pode interferir com o entendimento de seus usuários. As salas de aula, por exemplo, devem ser projetadas de forma que a voz do professor seja clara, livre de ecos e reverberações, para uma perfeita compreensão dos alunos. Estudos desenvolvidos por Zwirter (2006), Fernandes (2002), Ogasawara (2006) e Silva (2013) em ambientes escolares, visam identificar a causa de problemas relacionados ao som e, desta maneira, propor soluções. Estes estudos apontam que o ruído excessivo nesses ambientes é o principal causador do déficit de atenção de alunos, queda de desempenho e dificuldade de concentração e compreensão. Para Losso (2003) “é inegável que condições acústicas inadequadas influenciem no ambiente escolar de forma negativa” sendo um dos importantes fatores que afetam no desempenho acadêmico do aluno.

Embasado no exposto, neste trabalho foi proposta a avaliação acústica de alguns recintos do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas (ICTE) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), a fim de classificá-los quanto à qualidade acústica. A partir de então foram feitas propostas para adequar acusticamente os ambientes.

## METODOLOGIA

Tendo em vista as dimensões e a quantidade de salas que compreendem todo o ICTE, foi necessário definir o espaço amostral a ser trabalhado. Este foi definido levando em consideração parâmetros de singularidade geométrica das salas de aula e laboratórios de ensino e pesquisa, além de uma distribuição homogênea destes dentre os blocos existentes no ICTE. Desta forma, foram escolhidos 7 ambientes, listados na **Tabela 1**.

**Tabela 1.** Ambientes a serem avaliados no ICTE.

Ambientes	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Altura (m)	Cadeiras e Mesas
Sala A203	78,97	244,81	3,10	86 e 1
Sala B202	78,30	242,71	3,10	68 e 1
Sala C206	82,26	255,00	3,10	62 e 1
Sala C301	82,36	255,32	3,10	55 e 1
Laboratório D3	47,90	153,20	3,20	15 e 4
Biblioteca	627,00	1881,00	3,00	180 e 48
Restaurante Universitário (RU)	360,87	1082,70	3,00	244 e 56

Para cada recinto foi necessário um levantamento dos materiais construtivos, especificamente, portas, janelas, paredes, piso, teto, cadeiras e mesas permitindo identificar as propriedades acústicas destes.

Foi verificado que existem vários parâmetros que podem ser estudados a fim de definir a qualidade acústica de um ambiente, sendo escolhidos cinco a serem analisados neste trabalho, considerados suficientes para avaliar a acústica dos ambientes e explicados a seguir.

### Nível de Ruído de Fundo

O ruído de fundo ou nível sonoro do ambiente, elemento extremamente importante do meio (CAVANAUGH, 1999) obtido pelo nível de pressão sonora, é uma representação logarítmica de pressão sonora (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999).

O nível sonoro numa edificação se deve à combinação de duas fontes: ruído interior, produzido dentro da edificação, e ruído exterior. A fonte principal de ruído interior é devido ao uso e à ocupação da edificação, enquanto o ruído exterior consiste, principalmente, daquele originado do tráfego e de equipamentos externos, como aparelhos de ar condicionado (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999).

Os valores de referência são usados na NBR 10152:2017 para avaliar o conforto acústico em ambientes. Dentre eles destacam-se aqui salas de aula, restaurante e biblioteca. O laboratório não é abordado na norma para ambientes educacionais, sendo então adotado o mesmo limite das salas de aulas, pois ele é utilizado para fins didáticos. A **Tabela 2** mostra os valores de referência  $RL_{Aeq}$  e  $RL_{ASmax}$ . O valor inferior representa o nível sonoro para conforto e o valor superior o nível sonoro máximo aceitável para a finalidade do ambiente avaliado.

**Tabela 2.** Níveis de referência para ambientes internos de uma edificação de acordo com sua finalidade de uso.

Ambiente	$RL_{Aeq}$ (dB)	$RL_{ASmax}$ (dB)
Salas de aula	35	40
Restaurantes	45	50
Bibliotecas	40	45

Fonte: Adaptado de (NBR 10152:2017).

### Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ )

Quando uma fonte emite o som dentro de uma sala, a intensidade sonora cresce rapidamente com a chegada do som direto e continuará crescendo com as reflexões

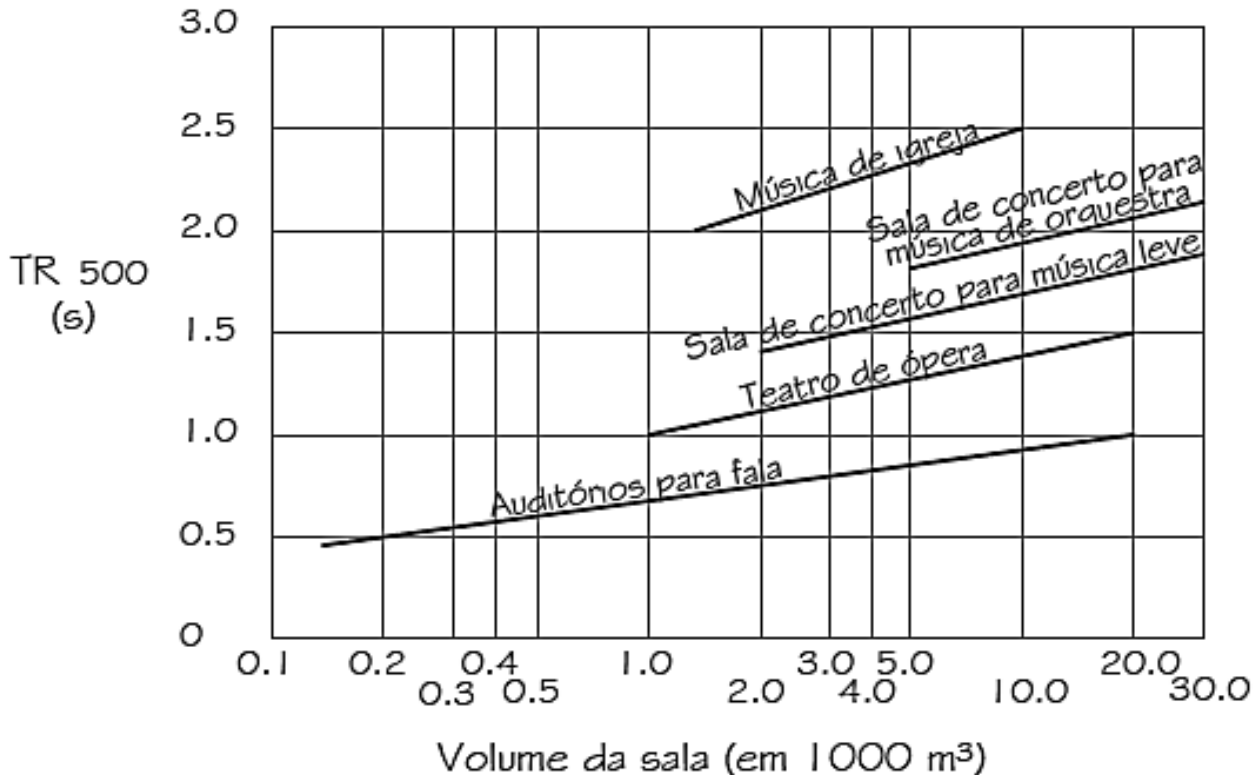
indiretas, e se essa fonte é repentinamente desligada, a intensidade sonora enfraquecerá gradualmente. Esse fenômeno pode ser entendido como a persistência do som em um espaço fechado, resultante das múltiplas reflexões nas paredes e pertences da sala (SILVA, 1983). Este decaimento de energia sonora ocorre em função da forma da sala e a quantidade e localização dos materiais absorventes, é conhecido como reverberação (OGASAWARA, 2006).

O tempo entre a interrupção da fonte sonora e o momento em que a pressão acústica do recinto atinge um milésimo do valor de nível estabelecido ou ainda para que o nível de pressão sonora diminua 60 dB, é definido como tempo de reverberação ( $T_{60}$ ) (BERANEK, 1990). Normalmente, devido à presença de ruído de fundo no interior da sala em estudo, raramente é possível medir o decréscimo total de 60 dB no ruído teste. Usa-se, portanto, 30 dB e 20 dB de decréscimo, extrapolando os resultados para 60 dB. Quando assim disposto, o tempo de reverberação é chamado de  $T_{20}$  e  $T_{30}$ , respectivamente. E assim, para avaliar o tempo de reverberação de uma sala, estabeleceu-se uma relação entre este e o tempo ótimo de reverberação, comparado ao tipo de uso do recinto e seu volume.

O tempo de reverberação é um parâmetro útil para projetar e adequar salas acusticamente pois, de acordo com o tempo de reverberação desejado, é feita uma relação entre a quantidade de absorção nas superfícies e o volume do ambiente.

A **Figura 1** ilustra o tempo ótimo de reverberação na banda de frequência de 500 Hz para alguns tipos de ambientes.

**Figura 1.** Tempo ótimo de reverberação para várias atividades na banda de frequência de 500 Hz.



Fonte: Ogasawara (2006).

## Tempo central ( $T_C$ )

O tempo central caracteriza a duração da resposta impulsiva, tratando-se de uma medida do grau de interferência da sala no sinal (BISTAFA, 2011). Segundo Rosão (2012), o tempo central é diretamente proporcional ao tempo de reverberação, conforme **Equação 01**.

$$T_C = \frac{T_{60}}{13,8} \quad (01)$$

Quando se tem a sensação de clareza, o tempo central será pequeno, já para a sensação de um som reverberante, o tempo central é grande. Para salas de conferências, por exemplo, o valor recomendado deve ser abaixo de 80 ms (RIBEIRO, 2002).

## Inteligibilidade da fala

A inteligibilidade da fala é um parâmetro subjetivo que mensura a capacidade de compreensão da fala por meio da perda de articulação de consoantes. A princípio, o teste era realizado com um locutor com boa dicção ditando os monossílabos e um grupo de ouvintes anotando em um papel as palavras. Conforme Valle (2007), verificou-se que a maior margem de erro na compreensão dos ditados estava nas consoantes.

A distância crítica é o parâmetro fundamental para avaliação da inteligibilidade da fala, obtida através da interseção das curvas de queda do nível de pressão sonora, medido em campo livre e no campo reverberante do ambiente analisado, com o aumento da distância de medição em relação à fonte sonora.

Dentro de um campo reverberante, a perda de articulação permanece constante a partir da distância limite, dada pela **Equação 02**.

$$D_L = 3,16D_C \quad (02)$$

Assim, pode-se avaliar um ambiente quanto à inteligibilidade da fala a partir da distância limite. Se a distância limite for inferior ao comprimento da sala estará inapropriada em relação a este parâmetro.

Os resultados que serão apresentados se referem às distâncias crítica (mínima) e limite (máxima) dentro de um campo reverberante, no qual a perda de articulação permanece constante. Tais valores, foram comparados ao comprimento total de cada ambiente.

## Definição

Trata-se de um parâmetro que mensura o som que chega ao receptor. A definição ( $D_{50}$ ) expressa a razão da energia sonora, direta e refletida, contida nos primeiros 50 ms da curva de decaimento e a energia total do impulso sonoro para a fala.

Quando se ouve de maneira clara e limpa, é dito que o som apresenta bom grau de clareza. Combinadas ao som direto, as primeiras reflexões impressionam o aparelho auditivo de maneira desejável, produzindo um efeito de reforço natural do som. (SANT'ANA, 2008)

A definição é expressa como uma porcentagem, e calculada separadamente para cada banda de 1/1 oitava de frequência, avaliadas de 125 Hz a 4000 Hz. Convencionou-

se o valor obtido pela média das bandas de 500 e 1000 Hz para a expressão de um valor único (CREMER; MÜLLER, 1978). Rocha (2004), recomenda valores entre 50 e 65%. A definição pode ser dada por uma aproximação, em função do tempo de reverberação, conforme a **Equação 03** (ROSÃO, 2012).

$$D_{50} = 1 - e^{-\frac{0,7}{T_{60}}} \quad (03)$$

## Análise experimental

Para a análise experimental, foi utilizado um medidor de pressão sonora classe 1 com um sistema de análise em frequência e cálculo do tempo de reverberação (modelo 2250), um microfone pré polarizado (modelo 4189), um calibrador de microfone classe 1, uma fonte sonora omnidirecional (dodecaedro modelo 4292-L) e um amplificador/gerador de sinais (modelo 2734). Todos os equipamentos da marca *Brüel & Kjaer*<sup>®</sup>.

A metodologia utilizada para a medição do tempo de reverberação foi semelhante para todos os ambientes analisados. Embora as salas de aula tenham dimensões semelhantes, a biblioteca e o restaurante universitário (RU) são maiores, e por este motivo mais pontos de medição foram necessários durante a aquisição dos dados para estes ambientes.

As medições foram feitas determinando-se locais distintos onde foram posicionados o microfone e a fonte sonora. Os pontos foram escolhidos de acordo com as normas ISO 3382-1:2009 e ISO 3382-2:2009, adotando a categoria engenharia, com 4 posições de medição para os microfones em cada posição da fonte sonora. Para as quatro salas de aula e para o laboratório D3 foram definidas 2 posições para a fonte sonora, para a biblioteca foram definidas 10 posições para a fonte sonora e para o RU foram definidas 6 posições para a fonte sonora, de forma a obter uma resposta ao impulso gerado pela fonte sonora de maneira bem distribuída em todo ambiente.

A fonte sonora, por sua vez, emitia um ruído rosa configurado junto ao gerador de sinais, o qual possui uma faixa de frequência ampla e que abrange todo o espectro audível pelo ser humano – 20 a 20000 Hz. O microfone, acoplado ao medidor de pressão sonora é capaz de captar ruídos na faixa de 6,3 a 20000 Hz.

O medidor de pressão sonora retornava como resposta alguns parâmetros de maneira direta como *EDT*, *T<sub>20</sub>* e *T<sub>30</sub>* e *NPS - LA<sub>eq</sub>*. Os demais parâmetros necessários para caracterização da sala eram e estimados a partir destes.

Para estimativa da distância crítica, a fonte sonora foi posicionada no ponto onde normalmente se localiza o orador no interior dos recintos e medições de *NPS* foram realizadas em diferentes distâncias a partir da fonte sonora, e o mesmo procedimento foi realizado em campo livre. Traçando as duas curvas de redução do nível sonoro de acordo com o aumento da distância em relação à fonte sonora no mesmo gráfico, o ponto de interseção define a distância crítica.

## Adequação Acústica de Ambientes

Para analisar a possibilidade de adequação acústica dos ambientes, foi utilizada a formulação de Sabine para estimativa do tempo de reverberação (BISTAFA 2011).

A absorção sonora de uma superfície pode ser calculada através da **Equação 04**.

$$A_{sup} = \alpha S \quad (04)$$

onde  $S$  é a área da superfície em  $m^2$ , e  $\alpha$  o coeficiente de absorção sonora do material da superfície.

Como a absorção sonora do ambiente é constituída pela absorção sonora de todos os materiais existentes no mesmo, a absorção sonora superficial total é calculada pela **Equação 05**.

$$A_{sup.recinto} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i \quad (05)$$

sendo  $\alpha_i$  o coeficiente de absorção sonora da  $i$ -ésima superfície de área  $S_i$ . Para o cálculo do tempo de reverberação, é utilizada a **Equação 06**.

$$T_{60} = \frac{0,161V}{A_{sup.recinto}} \quad (06)$$

Como o volume do recinto normalmente não deve ser alterado, para a adequação acústica opta-se pela modificação das propriedades de absorção sonora das superfícies.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises a seguir se darão para o nível de ruído de fundo, o tempo de reverberação, o tempo central, a definição, a inteligibilidade da fala e, por fim, será feita uma análise e comparação do tempo de reverberação medido com o tempo de reverberação teórico calculado através do método de Sabine.

Avaliando o nível de pressão sonora dos ambientes (NPS) de acordo com a NBR10152:2017, mostrados na **Tabela 3**, pode-se afirmar que as salas de aula apresentaram valores satisfatórios para ambientes de estudos. Mesmo que na sala A203 os valores de NPS tenham sido de 40,4 dB(A), enquanto a NBR 10152:2017 admite valores de até 40,0 dB(A), essa pequena diferença pode ser aceita devido à incerteza de medição de aproximadamente 1,0 dB, calculada conforme Anexo C da referida norma. No laboratório D3 os níveis de ruído de fundo foram significativamente inferiores aos recomendados.

**Tabela 3.** Níveis de ruído de fundo medidos nos ambientes e níveis de referência para ambientes internos de uma edificação de acordo com sua finalidade de uso.

Ambiente	NPS dB(A)	RL <sub>Aeq</sub> (dB)	RL <sub>ASmax</sub> (dB)
Sala de aula A203	40,4	35,0	40,0
Sala de aula B202	38,3	35,0	40,0
Sala de aula C206	33,3	35,0	40,0
Sala de aula C301	33,3	35,0	40,0
Laboratório D3	31,2	35,0	40,0
Restaurante Universitário	49,4	45,0	50,0
Biblioteca	49,9	40,0	45,0

Verifica-se ainda pela **Tabela 3** que a biblioteca apresentou níveis de ruído de fundo acima do recomendado, que pode ser atribuído ao funcionamento dos equipamentos de ar condicionado existentes. O RU ficou dentro da faixa de aceitação.

Os tempos de reverberação ( $T_{60}$ ) medidos (**Tabela 4**) foram comparados com os limites propostos pela norma ANSI/ASA S12.60, sendo o valor indicado para salas de aula inferior a 0,6 s e para bibliotecas e cantinas inferior a 1,0 s. Para o laboratório D3 adotou-se o mesmo limite recomendado para salas de aula. Em todos os ambientes avaliados, o tempo de reverberação foi superior ao recomendado.

**Tabela 4.** Tempo de reverberação para cada ambiente [segundos]

Recinto	Sala A203	Sala B202	Sala C206	Sala C301	Biblioteca	Laboratório D3	RU
$T_{60}$	1,29	1,25	1,43	1,49	1,90	1,20	2,95

A **Tabela 5** apresenta os tempos centrais obtidos. Todas as salas de aula apresentaram valores inadequados para este parâmetro, que segundo Ribeiro (2002) não deve exceder 80 ms para salas de conferência, caso semelhante a uma sala de aula em que o uso da palavra falada se faz importante. O laboratório D3, avaliado da mesma forma apresentou valor próximo ao recomendado. Para a biblioteca e o RU este parâmetro foi calculado, mas não foi analisado, uma vez que estes ambientes não são projetados para a compreensão da fala de um orador.

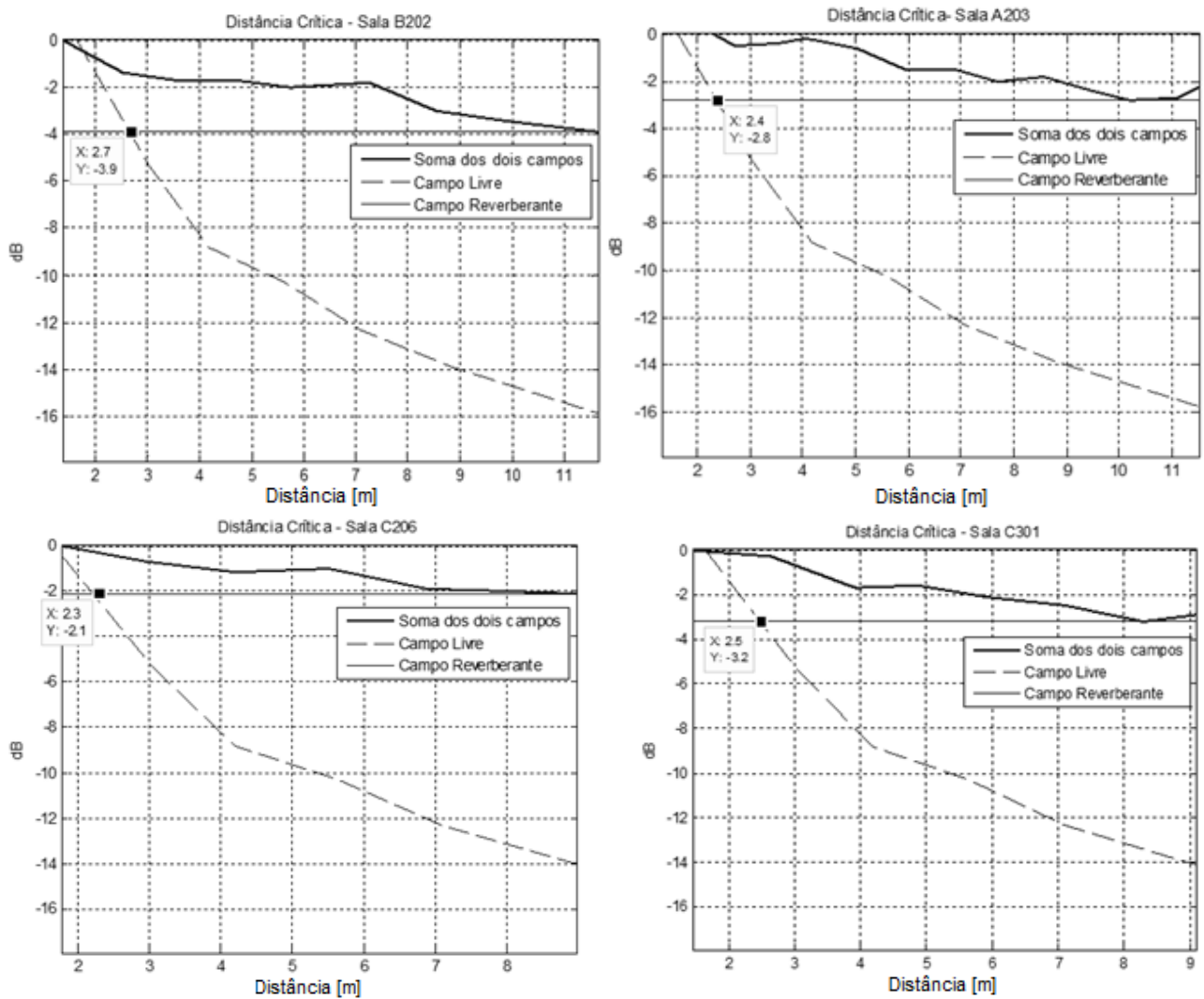
**Tabela 5.** Tempo central para cada ambiente [milissegundos]

Recinto	Sala A203	Sala B202	Sala C206	Sala C301	Biblioteca	Laboratório D3	RU
$T_c$	93,4	90,5	103,6	107,9	137,6	86,9	213,7

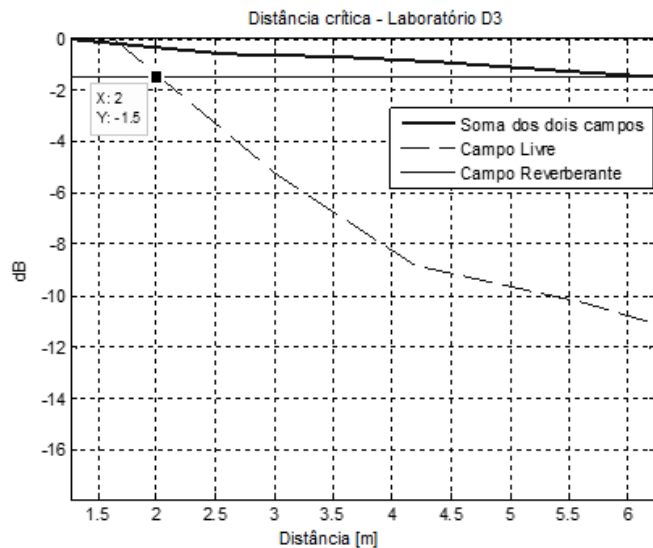
As **Figuras 2 e 3** mostram as curvas de redução de NPS a partir da fonte sonora medidos em campo livre e também medidos nas salas de aula e no laboratório D3, definindo a distância crítica no ponto de interseção das curvas.



**Figura 2.** Curvas de redução de NPS com a variação da distância a partir da fonte sonora medidos no interior das salas de aula e em campo livre.



**Figura 3.** Curvas de redução de NPS com a variação da distância a partir da fonte sonora medidos no Laboratório D3 e em campo livre.



A **Tabela 6** apresenta os resultados encontrados para as distâncias crítica (mínima) e limite (máxima) e o comprimento de cada recinto. A partir destes valores pode-se estimar uma determinada região do recinto em que o ouvinte terá a melhor qualidade sonora, isto é, em que as reflexões não prejudicarão a audição. Avaliando a inteligibilidade da fala, os resultados encontrados para as salas de aula e para o laboratório D3 mostram que o comprimento destes ambientes é superior à distância limite recomendada. Para a biblioteca e o RU este parâmetro não foi analisado, uma vez que estes ambientes não são projetados para a compreensão da fala de um orador.

**Tabela 6.** Distância crítica, distância limite e comprimento dos recintos [m].

Parâmetro	A203	B202	C206	C301	Laboratório D3
Distância crítica (m) (min.)	2,40	2,70	2,30	2,50	2,00
Distância limite (m) (máx.)	7,58	8,53	7,20	7,90	6,30
Comprimento do recinto (m)	13,25	13,27	10,36	10,36	7,80

A **Tabela 7** apresenta os valores de definição estimados para os ambientes analisados. A compreensão da fala no interior de cada recinto pode ser mensurada a partir deste parâmetro, que se mostrou inadequado quando comparado com a faixa de valores proposto por Rocha (2004), entre 50 e 65%. Para todos os ambientes analisados este valor foi inferior a 50%. Estes resultados evidenciam o que os demais parâmetros acústicos já vinham apontando, os ambientes analisados apresentam uma perda da qualidade acústica sobretudo devido à ausência de projeto adequado.

**Tabela 7.** Definição para cada ambiente [%].

Recinto	Sala A203	Sala B202	Sala C206	Sala C301	Biblioteca	Laboratório D3	RU
D <sub>50</sub>	41,88	42,79	38,64	37,36	30,29	44,19	21,11

De acordo com as análises feitas, todos os ambientes foram considerados acusticamente inadequados para o uso. A **Tabela 8** sintetiza os resultados das avaliações.

**Tabela 8.** Avaliação dos recintos segundo os valores dados pelas normas vigentes.

Recinto	Ruído de fundo	T <sub>60</sub> [s]	Ideal [s]	T <sub>C</sub> [ms]	Ideal [ms]	D <sub>50</sub> [%]	Ideal [%]	Comp. [m]	Ideal [m]
A203	Aceitável	1,29	< 0,60	93,4	80,00	41,88	50 - 65	13,25	2,40 - 7,58
B202	Aceitável	1,25	< 0,60	90,5	80,00	42,79	50 - 65	13,27	2,70 - 8,53
C206	Aceitável	1,43	< 0,60	103,6	80,00	38,64	50 - 65	10,36	2,30 - 7,20
C301	Aceitável	1,49	< 0,60	107,9	80,00	37,36	50 - 65	10,36	2,50 - 7,90
Biblioteca	Inadequado	1,90	< 1,00	136,7	80,00	30,29	50 - 65	-	-
Laboratório D3	Aceitável	1,20	< 0,60	86,9	80,00	44,19	50 - 65	7,80	2,00 - 6,30
RU	Inadequado	2,95	< 1,00	213,7	80,00	21,11	50 - 65	-	-

A partir dos resultados apresentados, fica evidente a necessidade de adequação acústica de todos os recintos visando a qualidade e o conforto. Sugere-se para tanto o revestimento do teto dos ambientes com materiais de alto coeficiente de absorção sonora. A adequação sugerida neste trabalho contemplou essencialmente a análise sobre os diferentes valores de tempo de reverberação obtidos para cada ambiente, haja visto que este parâmetro é o mais aceito e acessível na adequação acústica de ambientes.

Através do método de Sabine, que leva em consideração as áreas e os valores dos coeficientes de absorção para cada material presente no recinto, foram estimados valores do  $T_{60}$  teórico para os ambientes totalmente ocupados ( $T_{60\_t1}$ ) e desocupados ( $T_{60\_t0}$ ), sendo este último utilizado apenas para comparação com os resultados encontrados nas medições.

A partir de então, foi considerado o revestimento parcial do teto com material de alto coeficiente de absorção sonora, tomando como base seu valor *NRC* (*Noise Reduction Coefficient*, ou Coeficiente de Redução de Ruído), sendo então calculados os tempos de reverberação após a adequação acústica para os ambientes totalmente ocupados ( $T_{60\_t1a}$ ).

Devido à grande quantidade de dados utilizados para o cálculo do tempo de reverberação pelo método de Sabine (coeficiente de absorção sonora e área de cada material, além do quantitativo de mobiliário por ambiente), estes não foram expostos no trabalho.

Nas salas de aula e laboratório D3, recomenda-se que a área acima do quadro fique sem revestimento. Na biblioteca é aconselhável que a área sem revestimento fique sobre as prateleiras com livros, no RU sobre as pistas quentes e nas proximidades da cozinha.

Os valores para o  $T_{60}$  estimados teoricamente para os ambientes antes e após a adequação acústica são apresentados na **Tabela 9**.

**Tabela 9.** Valores teóricos do tempo de reverberação (em segundos) para os ambientes com e sem adequação acústica.

Recinto	$T_{60\_t0}$ [s]	$T_{60\_t1}$ [s]	<i>NRC</i>	Área do teto revestida [m <sup>2</sup> ]	$T_{60\_t1a}$ [s]
Sala A203	1,837	1,294	0,65	64,00	0,490
Sala B202	2,057	1,483	0,65	68,00	0,510
Sala C206	2,225	1,632	0,65	74,00	0,530
Sala C301	2,331	1,724	0,65	76,00	0,540
Biblioteca	2,095	1,648	0,65	300,00	0,537
Laboratório D3	1,680	1,524	0,65	38,00	0,506
RU	3,113	2,267	0,90	351,00	0,436

Analisando os resultados estimados após a adequação acústica dos ambientes, constata-se que os tempos de reverberação após a adequação para os recintos totalmente ocupados ( $T_{60\_t1a}$ ) ficaram abaixo dos limites impostos pela norma ANSI/ASA S12.60, sendo de 0,6 segundos para salas de aula e laboratório D3 e 1,0 segundo para a biblioteca e RU.

## CONCLUSÕES

Tendo em vista a importância da qualidade acústica de ambientes de ensino, como salas de aula e laboratórios, locais em que a fala e a escuta são essenciais, e bibliotecas, onde o foco é o silêncio, neste trabalho foi realizada uma análise acústica dentro das instalações do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro com o objetivo de verificar a qualidade acústica dos recintos e propor melhorias para os locais considerados inadequados segundo as normas vigentes.

As análises feitas dentro do instituto compreenderam quatro salas de aula, biblioteca, um laboratório didático e restaurante universitário. Os resultados revelaram, na

maior parte dos casos, que os ambientes são inadequados para o desenvolvimento das atividades para as quais foram construídos. Os parâmetros analisados que levaram a esta conclusão foram: nível de ruído de fundo (avaliado pelo nível de pressão sonora), tempo de reverberação, tempo central, definição e inteligibilidade da fala.

A análise a partir dos parâmetros acústicos acima relacionados contribuiu para comprovar a inexistência de um projeto dos ambientes para o propósito a que se destinam. A readequação acústica destes ambientes é um processo que contribuirá significativamente para a qualidade dos ambientes. O estudo da correção necessária foi realizado partindo-se do método teórico de Sabine para estimar o tempo de reverberação antes e após a implantação das alterações através do uso de revestimentos.

Desta forma, propôs-se a adequação dos ambientes através da instalação de revestimentos no teto visando a absorção da quantidade necessária de energia sonora. Com o uso dos revestimentos indicados, é esperada a redução significativa do campo reverberante dos ambientes em questão, promovendo assim recintos adequados para suas atividades fins.

## REFERÊNCIAS

- ANSI/ASA S12.60-2010/PART1, American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. Estados Unidos: Acoustical Society of America (ASA), 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10151: Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10152: Níveis de ruído para o Conforto acústico. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 7p.
- BERANEK, L. L. Acoustics. New York: Acoustical Society of America - American Institute of Physics, 1990.
- BISTAFA, S. R. Acústica aplicada ao controle de ruído. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- BROOKS, C. N. Architectural Acoustics. North Carolina: McFarland & Co, 2003.
- CAVANAUGH, W. J.; WILKES, J. A. Architectural Acoustics: Principles and Practice. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- CREMER, L.; MÜLLER, H. A. Die wissenschaftlichen grundlagen der raumakustik. 2. aufl. S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1978.
- FERNANDES, A. G.; VIVEIROS, E B. Impacto do ruído de tráfego em edificações escolares: uma metodologia de avaliação para o planejamento urbano. In: XX ENCONTRO DA SOBRAC, II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METROLOGIA EM ACÚSTICA E VIBRAÇÕES – SIBRAMA, 2002, Rio de Janeiro: [s.n.].
- ISO 3382-1:2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces. United States: International Organization for Standardization (ISO), 2009.
- ISO 3382-2:2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. United States: International Organization for Standardization (ISO), 2009.
- ISO 18233:2006, Acoustics - Application of The New Measurements Methods in building and room acoustics. United States: International Organization for Standardization (ISO), 2006.

- LOSSO, M. A. F. Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em : <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86031/191673.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORD, J.. Architectural Acoustics: Principles and Design. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- OGASAWARA, A. P. Avaliação acústica de oito salas destinadas a apresentações teatrais da cidade de Campinas, SP, através da técnica impulsiva. 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em : <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258528>> . Acesso em: 19 jul. 2018.
- PEREIRA, R. N. Caracterização Acústica de Salas. 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Física Tecnológica. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010. Disponível em : <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142240629/Tese.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- RIBEIRO, M. R. Sá. Room Acoustic Quality of a Multipurpose Hall: A Case Study. In FORUM ACUSTICUM SEVILLA, n. 1., 2002, Sevilla. Anais... Sevilla: FORUM ACUSTICUM, 2002. Disponível em : <[http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02\\_rba02013.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02_rba02013.pdf)>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- ROCHA, L. Z. Estudo e análise da acústica de ambientes submetidos a sistemas de áudio. 2004. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/6813>> Acesso em: 19 jul. 2018.
- ROSÃO, V. C. T. Contributo para a Caraterização da Qualidade Acústica de Casas de Fado. 2012. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Física. Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <<http://www.schiu.com/sectores/artigos/TeseFinalVCR-02.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- SANT'ANA, D. Q. Avaliação acústica de edifícios religiosos. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/18673> >. Acesso em: 19 jul. 2018.
- SILVA, C. M. F. O tempo de reverberação e a inteligibilidade da palavra. 2012. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013. Disponível em: <[https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub\\_geral.show\\_file?pi\\_gdoc\\_id=350760](https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=350760)>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- SILVA, R. S. N. Inteligibilidade da palavra falada em salas destinadas a comunicação verbal. São Carlos, 1983, 230p. Dissertação em Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.
- VALLE, S. Manual Prático de Acústica. 2. ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2007.
- ZWIRTES, D. P. Z. Avaliação do desempenho acústico de salas de aula: estudo de caso nas escolas estaduais do Paraná. 2006. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <<https://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/5955/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20final%20corrigida.pdf?sequence=1>> Acesso em: 19 jul. 2018.

Recebido em: 13/08/2018

Aprovado em: 08/10/2018