



**RELATÓRIO DE PESQUISA
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA JÚNIOR
PIC JR 2018 – 2019**

Centro Universitário de Brasília – UniCEUB

CONFORTO ACÚSTICO EM AMBIENTES ESCOLARES

**Pedro Henrique Medeiros Pereira
Ana Cláudia Pereira de Resende**

**Brasília – DF
2019**



Conforto Acústico em Ambientes Escolares

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica Júnior em **Engenharia Civil** apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa do UniCEUB.

Orientador: Sérgio Luiz Garavelli.

Pedro Henrique Medeiros Pereira
Ana Cláudia Pereira de Resende

Brasília, DF – 2019

PIC JR

RESUMO

Condições adequadas de conforto acústico em ambientes escolares são fundamentais para o processo de ensino e aprendizagem, além de preservar a saúde física e mental dos estudantes e professores. Condições adversas provocam o aumento da dispersão de atenção, dificuldade de leitura e déficit motivacional, interfere na percepção da fala, aumenta o incômodo, o estresse levando à prejuízos a aprendizagem. Um dos principais problemas encontrados em ambientes escolares relacionados à acústica é a inteligibilidade da fala, que é afetada pelo som residual e pelas reverberações dos ambientes. As condições de conforto acústico nestes ambientes começam com o controle dos níveis de pressão sonora externos que atingem a escola. Além do isolamento acústico adequado, o controle das reflexões se faz necessário para que se tenha adequada inteligibilidade da palavra. A pesquisa teve como objetivo principal a avaliação do som residual e do tempo de reverberação. O estudo foi realizado no Campus de Taguatinga do Cento Universitário de Brasília – UniCEUB. Para avaliar o ruído externo, foi utilizado o modelo matemático RLS90, que faz a predição dos níveis de pressão sonora a partir do tráfego rodoviário, principal fonte de ruído externo no local. Os níveis preditos foram comparados com os medidos na vizinhança da instituição. O Noise Critéria, parâmetro que avalia o som residual no interior de ambientes, foi avaliado no corredor e em salas de aulas. Além disso, em três salas com diferentes tipologias e volume, foram medidos o tempo de reverberação e a coloração da reverberação. Os resultados referentes aos níveis de pressão sonora externos foram superiores ao limite estabelecido pela legislação, indicando a ocorrência da contaminação acústica do local devido ao tráfego rodoviário. O modelo matemático utilizado para a predição dos níveis de pressão sonora a partir do tráfego rodoviário mostrou-se eficiente, com desvio máximo entre os valores preditos e medidos menores que 1,5 dB(A). O som residual avaliado no interior da instituição, apresentaram grande diferença em relação aos níveis que atingem a fachada do edifício, indicando que o isolamento acústico entre as áreas internas e externas é eficiente. O Noise Critéria, avaliado do corredor foi adequado, nas outras salas foram ligeiramente superiores, porém próximos ao limite indicado pela norma legal. Os tempos de reverberação dos três ambientes avaliados, com diferentes volumes, apresentaram valores considerados ótimos pela literatura da área. Apesar do bom resultado obtido para o tempo de reverberação, a coloração da reverberação não teve um comportamento desejável, principalmente no regime de altas frequências. Com o trabalho realizado foi constatada a importância das condições adequadas de conforto acústico em ambientes escolares para o processo de ensino aprendido, e também para preservar a saúde física e mental de estudantes e professores. Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a avaliação da inteligibilidade da fala, que pode ser realizado por meio do método RASTI. A isolação acústica entre diferentes salas e entre salas e corredor também é recomendada. Estudo para avaliar a percepção dos usuários em ambientes escolares com coloração inadequada.

Palavras-chave: conforto acústico. ambientes escolares. tempo de reverberação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva Noise Critéria.....	9
Figura 2 - Tempo de reverberação.....	10
Figura 3 - Tempo de reverberação ótimo.....	11
Figura 4 - Coloração da reverberação.....	13
Figura 5 - Identificação do local de estudo - UniCEUB, campus Taguatinga.....	14
Figura 6 - Sonômetros: Solo (01dB) e Fusion (01dB).....	15
Figura 7 - Protetor auricular.....	16
Figura 8 - Trena a laser.....	16
Figura 9 - Locais das coletas dos dados do trânsito.....	17
Figura 10 - Coloração da reverberação.....	21
Figura 11 - NC: sala 131.....	25
Figura 12 - NC: sala 132.....	25
Figura 13 - NC: sala 134.....	26
Figura 14 - NC: sala 190.....	26
Figura 15 - NC: corredor.....	27
Figura 16 - Exemplo cálculo TR.....	27
Figura 17 - Exemplo: NPS em bandas de 1/3 de oitavas.....	28
Figura 18 - TR com a barra de erro, sala 190.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência para ambientes internos de ambientes escolares.....	9
Tabela 2 - Dimensões das salas avaliadas.....	16
Tabela 3 - Classificação dos veículos.....	17
Tabela 4 - Fluxo de veículos.....	18
Tabela 5 - NPS preditos e medidos.....	18
Tabela 6 - NPS que atingem as fachadas.....	19
Tabela 7 - NPS internos – som residual.....	20
Tabela 8 - Tempo de reverberação (s) avaliado e ideal.....	20
Tabela 9 - Coloração da reverberação.....	21

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVO E ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2.1. Objetivo Geral.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. Som residual	8
3.2. Tempo de Reverberação T60.	10
3.3. Coloração da reverberação.....	12
3.4. Modelos Matemáticos de predição dos NPS devido ao tráfego rodoviário	13
4. METODOLOGIA	14
4.1. Local do estudo	14
4.2. Parâmetros avaliados	14
4.3. Metodologia para a realização das medidas acústicas.....	15
4.4. Modelagem Matemática.....	17
4.5. Local da coleta de dados do tráfego rodoviário.....	17
5. RESULTADOS/DISCUSSÃO.....	18
5.1. Tráfego rodoviário	18
5.2. Níveis de Pressão Sonora internos.....	19
5.3. Tempo de reverberação (T60)	20
5.4. Coloração da reverberação	20
6. CONCLUSÃO.....	22
7. REFERÊNCIAS	23
APÊNDICE.....	25

1. INTRODUÇÃO

Condições adequadas de conforto acústico é importante para a realização qualquer atividade, principalmente as relacionadas ao ensino. Em se tratando de salas de aulas é fundamental que a comunicação seja eficiente, para tanto, os níveis de pressão sonora (NPS) referente ao som residual não devem ser elevados e ambiente não pode ser muito reverberante.

O aumento da população urbana e a mudança do comportamento das pessoas interferem de maneira significativa na relação com o espaço, assim os padrões de conforto acústico estão diretamente relacionados à qualidade de vida dos indivíduos. Cada espaço sofre variações no que tange às suas necessidades acústicas, um auditório ou de uma sala de aula, as reverberações e os ruídos ambientais, são fatores fundamentais que influenciam na comunicação da palavra falada.

O tempo de reverberação (TR) o som residual e o Noise Criteria, são parâmetros técnicos da área de acústica que servem para avaliar as condições de conforto acústico de salas de aulas.

2. OBJETIVO E ESTRUTURA DO TRABALHO

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo avaliar as condições de conforto acústico acústicas do Campus de Taguatinga, do UniCEUB.

2.2. Objetivos específicos

Avaliar o desempenho acústico do estúdio, por meio dos seguintes parâmetros:

- Som residual (Noise Critéria), tempo de reverberação e coloração da reverberação;
- Avaliar o impacto do tráfego rodoviário nos níveis de pressão sonora (NPS) que atingem a instituição;
- Comparar os resultados das avaliados *in situ* com os valores indicados pelas normas e bibliografias da área.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A acústica desempenha um papel fundamental nos ambientes de educacionais, como as salas de aulas. Nestes ambientes a principal forma de comunicação é oral, portanto se as condições de conforto acústico não forem adequadas, o aprendizado é prejudicado e em alguns casos até a saúde dos atores, professores e estudantes.]

Segundo Beranek (1954), as condições inadequadas conforto acústico em ambientes escolares resultam no comprometimento da comunicação verbal entre professores e estudantes, debilitando o desenvolvimento dos alunos e a voz dos professores.

O problema da condição acústica inadequada em salas destinadas a educação é recorrente em instituições de ensino, pois a inteligibilidade da fala é baixa em muitas destas. Uma solução seria tratar o som residual, pois este atrapalha ou impede a comunicação, trazendo malefícios físicos, emocionais e educacionais. Como consequência nota-se alterações como o cansaço, ao aluno se esforçar mais para entender e ao professor para ser ouvido.

Entende-se há anos a necessidade de salas de aula com qualidade acústica mínima, porém o problema persiste, pois apesar de básica, a questão ainda não está incorporada à prática dos arquitetos, engenheiros, administradores, representantes e profissionais envolvidos, causando danos sociais difíceis de prever, afinal milhões de pessoas atingidas.

Em uma sala de aula inteligibilidade da fala é o fator mais importante, pois é através dela que se obtém o entendimento das palavras, sendo fundamental para o estabelecimento da comunicação professor aluno. Ela pode ser avaliada através da pronúncia de uma lista de palavras e depende de níveis aceitáveis do som residual. Diversos testes são realizados, de modo que ouvintes escrevem o que compreenderam durante o pronunciamento das palavras. A percentagem de palavras entendidas corretamente diz qual é a taxa de inteligibilidade na sala.

A fonte deve estar 25dB acima do nível de ruído de fundo para inteligibilidade adequada. Bradley (2010) afirma que de 10 – 15dB é uma margem mais adequada. Quando o ruído acontece devido apenas à reverberação é tolerável uma taxa Sinal – Ruído um pouco menor.

Durante uma aula, se espera que o aluno consiga se concentrar no estímulo principal que é o professor, porém o som residual age como uma fonte sonora secundária que quanto mais intensa for, maior será o esforço do aluno para compreender as palavras ditas pelo professor, por isso existe a taxa sinal ruído, que expressa a relação entre a fonte e os sons indesejáveis (LONG, 2014).

O nível sonoro da voz da professora em dB, menos o nível sonoro do som residual na sala em dB, é denominado Relação Sinal/Ruído (S/N). Esta relação ajuda a entender o quanto compreensível é uma sala de aula. Quanto maior o S/N maior será a compreensão das palavras ditas e menor o S/N menor a compreensão. No caso do S/N ser negativo nota-se que o nível do som residual é maior que o da fonte, tornando muito difícil que a professora seja entendida. O S/N pode variar dentro do ambiente, tipicamente quanto mais distante da fonte menor o S/N.

A tendência do locutor em manter uma taxa constante entre seu nível de voz e o ruído (S/N) é chamada de efeito Lombard, o professor constantemente tem que superar o ruído para ser compreendido, sobrecarregando suas cordas vocais. O instrumento de trabalho essencial de um professor é a voz, portanto estes devem tomar os cuidados necessários para preservá-la.

A NBR 10152 (ABNT,2017) trata os níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações, bem como os valores de referência para a avaliação dos resultados obtidos dependendo da finalidade de uso do ambiente e a forma correta de medição.

3.1. Som residual

O termo “som residual” está definido e apresentado na ISO 1996. As NBR 10.151 (2019) e NBR 10.152 (2017) adotaram este termo para substituir o ruído de fundo ou som ambiente.

A NBR 10.152 (2017), que trata dos níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações, traz os valores de referências para avaliação de diferentes ambientes. Segundo a norma, “considera-se adequado para uso o ambiente cujos níveis de pressão sonora

representativos sejam iguais ou inferiores aos valores de referência apresentados na Tabela 1, admitindo-se uma tolerância de até 5 dB para RL_{Aeq} e RL_{ASmax} e até 5 para $RLNC$ ".

Tabela 1 - Valores de referência para ambientes internos de ambientes escolares

Locais	RL_{Aeq} (dB)	RL_{max} (dB)	$RLNC$
Circulação	50	55	45
Salas de aula	35	40	30

Fonte: NBR 10.152 (2017), adaptada

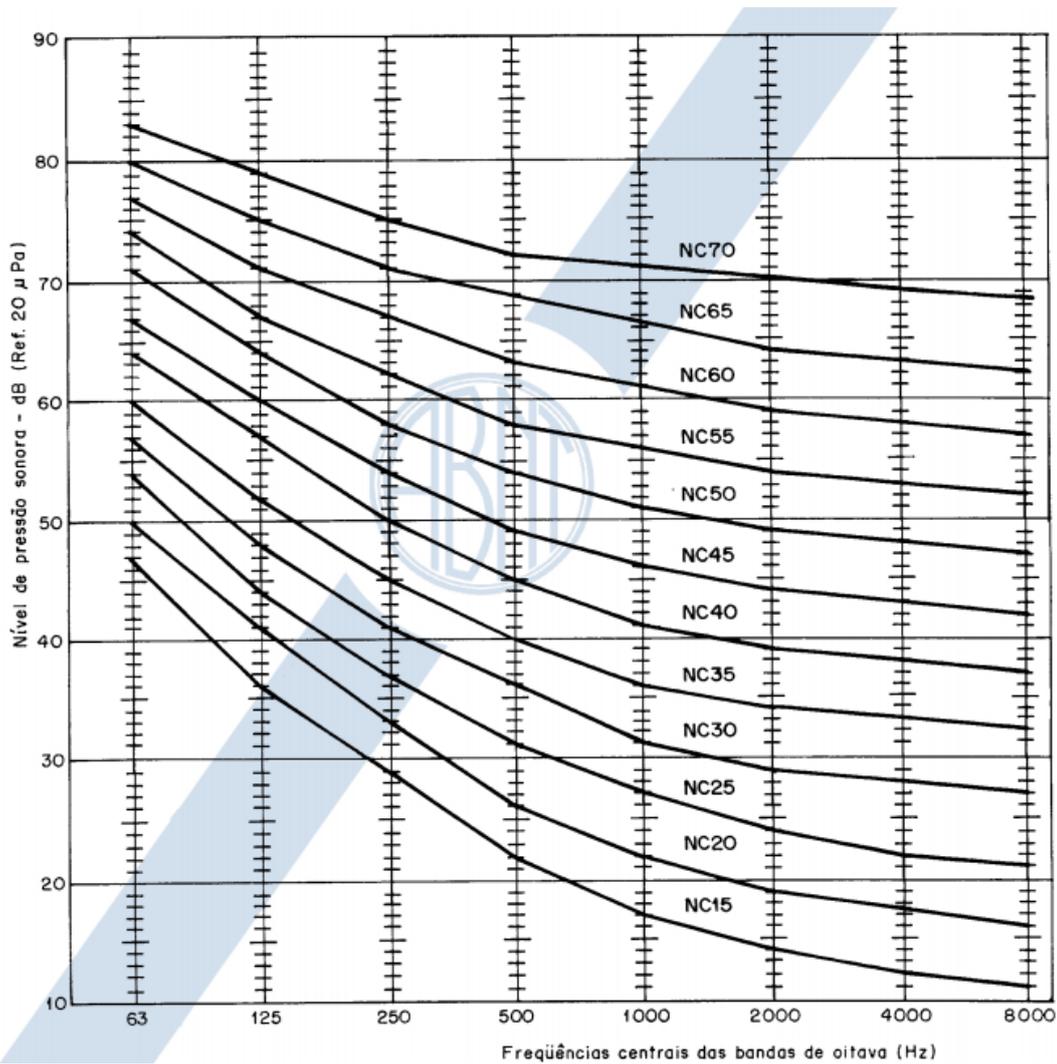


Figura 1 - Curva Noise Critéria
(Fonte: ABNT 12152-1987)

O parâmetro NC é baseado no som residual avaliado em bandas de oitavas levando em consideração as curvas de avaliação de ruído (NC), apresentadas na Figura 1. Conforme pode ser observado na figura, as curvas, indicadas por NC-20, NC-25. Segundo a NBR 10.152, "O nível NC representativo de um ambiente (LNC) é o menor valor da curva NC cujos níveis

de pressão sonora correspondentes não são ultrapassados pelos valores dos níveis de pressão sonora em bandas de 1/1 de oitava representativos do ambiente – Leq, fHz(1/1), para as bandas de 1/1 de oitava com frequências centrais de 63 Hz a 8 kHz.”

3.2. Tempo de Reverberação T60.

Define-se o tempo reverberação, como o tempo que uma determinada onda sonora leva para sofrer uma redução em 60 dB na sua intensidade, podendo ser entendido simplificadaamente como grandeza do tempo que a energia sonora permanece no ambiente depois que a fonte cessa sua emissão. De acordo com Sabine (1964), o TR é diretamente proporcional ao volume do ambiente – dependendo de sua geometria - e inversamente proporcional às áreas das superfícies de contato os coeficientes de absorção – estando relacionado ao material de revestimento. Já o som ambiente/residual corresponde aos ruídos produzidos na escola e na sua vizinhança, sendo medido em dB (decibéis) e quantificado pelos Níveis de Pressão Sonora (NPS).

Desde o momento em que o som é gerado até que ele definitivamente se dissipe, ele percorre vários caminhos, sendo o mais forte o som direto que não provêm de nenhuma reflexão no ambiente, e as reflexões geradas nas superfícies, mais fracas que o direto, e que podem causar uma sensação de prolongamento do som original. (VALLE, 2009, p. 94), como indicado na Figura 4.

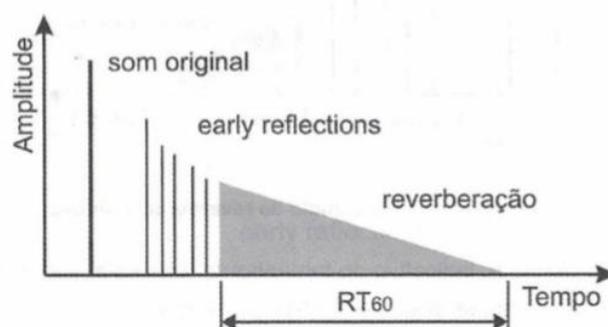


Figura 2 - Tempo de reverberação

(Fonte: VALLE, 2009, p. 94)

Como o Tempo de reverberação T_{60} é um dos parâmetros mais importantes no estudo das ondas acústicas em ambientes, é preciso compreender como as ondas mecânicas se comporta com os obstáculos que encontra pelo caminho e como ela é recebida pelo

receptor. As alterações que podem ser percebidas e registradas no ambiente devem ser devidamente parametrizadas para se evitar distorções indesejadas no som percebido pelo usuário final.

Wallace Sabine criou, em 1900, a fórmula que leva seu nome, para cálculo do tempo de reverberação num ambiente:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \alpha} (S)$$

Onde: V é o volume da sala, medido em m³ (metros cúbicos) e S.α é a absorção do ambiente, sendo α a média dos coeficientes de absorção dos materiais presentes na sala e S a área total da sala em m².

De acordo com a formula de Sabine (1964), podemos perceber que o tempo de reverberação é inversamente proporcional a absorção do ambiente, ou seja, quanto maior a absorção do ambiente, menor é o tempo de reverberação T₆₀.

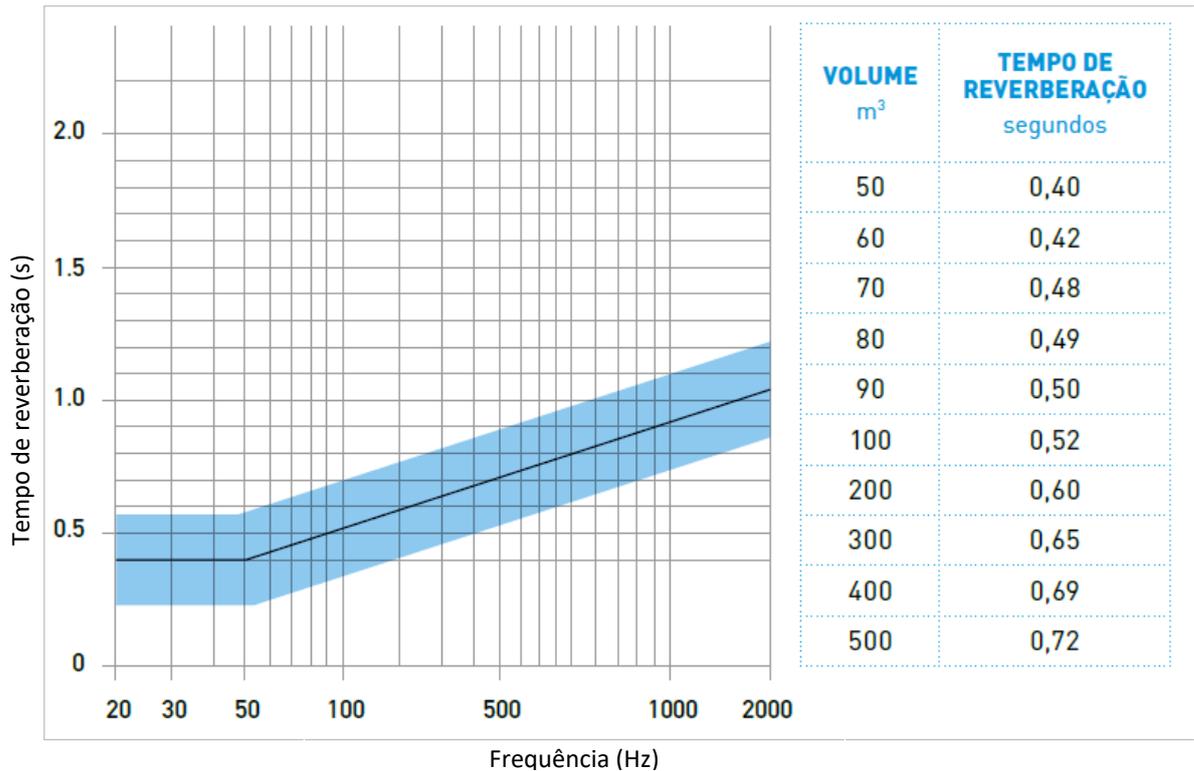


Figura 3 - Tempo de reverberação ótimo

Fonte: Manual Pro Acústica (2019), adaptado

A Figura 3 apresenta o tempo de reverberação ideal para a fala em função do volume da sala, para as frequências médias em salas de aula desocupadas, a média é realizada entre os tempos de reverberação das frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz (Pro Acústica, 2019). As recomendações da Pró Acústica estão baseadas no trabalho de Building Bulletin (2003)

Segundo Seep *et al.* (2000), a principal deficiência encontrada nas salas de aulas é o TR elevado, o ideal é as salas tenham TR entre 0,4 - 0,6 para a frequência de 500 Hz. O TR é um parâmetro importante na inteligibilidade da fala, de modo que, quanto mais favoráveis os valores do TR e os NPS, maior a eficiência na comunicação, e, no que concerne aos centros de ensino, avalia-se a eficiência da fala do professor e sua compreensão por parte dos alunos.

Estudos realizados e publicados entre os anos de 2000 e 2015 apontam que cerca de 90% das escolas avaliadas, no Distrito Federal, não estão de acordo com as normas que regem a acústica ambiental de espaços educacionais. Enquanto a faixa recomendada de ruído está entre 55 e 65 dB em salas de aulas (30 dB se vazias), a maioria das escolas tem esse valor alcançando a faixa de NC 80. Os menores índices se enquadram na faixa de NC 60 a NC 70. Com relação ao TR, as discrepâncias são comparáveis, visto que as médias mais comuns estão entre 2 e 2,5s – um valor altíssimo em relação aos parâmetros preestabelecidos, e as melhores variam de 0,9 a 1,5s.

Desse modo, é perceptível que a inteligibilidade da fala no ambiente de sala de aula está ligeiramente afetada em grande parte das instituições de ensino, situação essa que urge ser reparada.

3.3. Coloração da reverberação

Como foi visto, o tempo de reverberação ótimo varia em função do volume do ambiente e da destinação, este parâmetro é expresso para a frequência de 500Hz (VALLE, 2009), porém o valor do TR varia em função da frequência. Assim em cada banda de frequência analisada pode-se obter condições acústicas diversas.

Como os coeficientes de absorção dos materiais variam para as diferentes bandas de frequências, o tempo de reverberação também varia, este conceito está relacionado com a coloração do ambiente (VALLE, 2009). Um ambiente cujo RT suba muito mais que 50% para as frequências graves será "retumbante". Caso o TR não aumente o suficiente para baixas

frequências, ela soará "magra". Por outro lado, se não houver queda suficiente do RT para altas frequências, a sala ficará "brilhante" demais ou "áspera", e se a queda nas altas frequências for excessiva, teremos uma sala "abafada" ou "escura". A figura 5 apresenta os níveis ótimos de coloração.

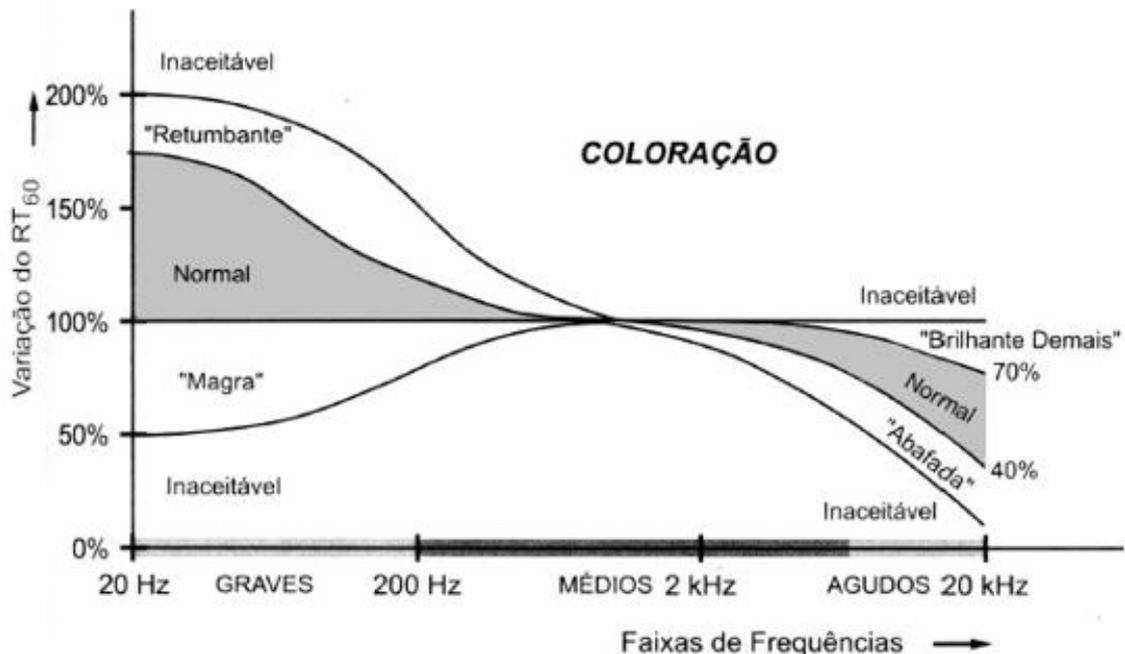


Figura 4 - Coloração da reverberação

Fonte - (VALLE, 2009, p.98)

Para a análise da coloração utiliza-se a frequência de 1000 Hz como referência, o valor obtido para esta frequência é normalizado, ou seja, considerado como unitário, ou 100%. Assim os tempos de reverberação das outras bandas de frequência são divididos pelo valor obtido em 1000 Hz, obtendo assim a coloração do ambiente.

3.4. Modelos Matemáticos de predição dos NPS devido ao tráfego rodoviário

O ruído provocado pelo tráfego de veículos no meio urbano é uma das principais causas da poluição sonora, e em diversos países, tal problemática gera danos graves à população local, tais como insônia, estresse e irritabilidade, bem como tem relação com disfunções no sistema imunológico humano e com doenças respiratórias.

O desconforto causado por esses ruídos é motivo de perda de movimentação turística, por exemplo, visto que as pessoas se utilizam do turismo como uma atividade econômica para fins de entretenimento.

Para quantificar os NPS gerados pelo tráfego rodoviário existem vários modelos matemáticos (Brito e Toledo, 2017), dentre as várias formulações desenvolvidas pela acústica, optamos pela norma alemã RLS 90, “*Guideline for Noise Prediction on Streets*”, que propõe um algoritmo para um período de 1 hora a 25 m de distância contados a partir do eixo central da via, a partir da equação seguinte:

$$L_{Aeq(1h)} = 37,3 + 10 * \log_{10}(n * (1 + 0,082 * p))$$

sendo que n corresponde ao fluxo total de veículos em uma via e p à quantidade de veículos pesados em relação aos leves (fração percentual).

4. METODOLOGIA

4.1. Local do estudo

O estudo foi realizado no Campus de Taguatinga do Centro Universitário de Brasília - UniCEUB. O local está identificado na Figura 5.



Figura 5 - Identificação do local de estudo - UniCEUB, campus Taguatinga

4.2. Parâmetros avaliados

Neste estudo foram avaliados os seguintes parâmetros:

- NPS externos para calibração do modelo matemático;
- Contagem do fluxo de veículos;

- NPS internos;
- Curva Noise Criteria (NC);
- Tempo de Reverberação (T60);
- Coloração da reverberação.

4.3. Metodologia para a realização das medidas acústicas

Os níveis de pressão sonora internos e externos foram medidos utilizando o sonômetro FUSION, com protetor de vento e tripé. O equipamento foi ajustado para 1,2 m do nível do solo e pelo menos 1,5 m de qualquer superfície refletora. Para a avaliação do tempo de reverberação foi utilizado o SOLO sendo ambos da 01dB®. Na Figura 6 estão apresentados os sonômetros. As medidas foram realizadas durante 10 minutos e utilizando o filtro de frequência em banda de 1/3 de oitavas, os equipamentos foram calibrados antes de cada medição.



Figura 6 - Sonômetros: Solo (01dB) e Fusion (01dB)
(Fonte: Autor)

Para a análise dos resultados, foram utilizados os softwares – dBTrait e o dBbati, empresa 01dB, fabricante dos sonômetros utilizados para a coleta de dados.

O tempo de reverberação foi avaliado por meio do método do ruído impulsivo, utilizando balões de látex de 12 polegadas. Durante os estouros foram utilizados os protetores auriculares da 3m, apresentados na Figura 7.



Figura 7 - Protetor auricular

As dimensões dos ambientes foram realizadas utilizando uma trena – laser da fabricante Bosch®, que está apresentada na Figura 8.



Figura 8 - Trena a laser

(Fonte: www.ferramentaskennedy.com.br)

Devido as diferentes dimensões das salas, o número de balões utilizados para a avaliação do TR foi diferente, na sala 134 foram utilizados 6 balões, na 131, 9 e na 190, 15. Na tabela 2, estão apresentadas as dimensões das salas avaliadas.

Tabela 2 - Dimensões das salas avaliadas

Sala	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Volume (m ³)
134	8,43	4,03	3,50	118,91
131	8,46	8,01	3,50	237,18
132	8,42	8,00	3,50	235,76
190	10,40	7,80	3,50	283,92

Fonte: Autor

As salas avaliadas são utilizadas para diferentes atividades. A sala 134, em função de suas dimensões reduzidas é utilizada para reuniões e apresentações, seminários para pequenos grupos, até 12 pessoas. As salas 131 e 132 são utilizadas como salas de aulas

convencionais. A 190 tem dimensões maiores, é utilizada como um auditório até para 90 pessoas.

4.4. Modelagem Matemática

Para a modelagem matemática foram coletados os dados da via, por meio de medições *in situ*. O fluxo e velocidade média dos veículos foram avaliados realizando a filmagem durante 15 minutos. Os veículos foram classificados em pesados, leves, intermediários e motos, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 3 - Classificação dos veículos

Veículos	Classificação
Pesados	$\geq 3.500\text{kg}$
Leves	$< 3.500\text{kg}$

4.5. Local da coleta de dados do tráfego rodoviário

Na figura 9 estão apresentados os locais das medições do NPS assim como a identificação das vias de trânsito avaliadas.



Figura 9 - Locais das coletas dos dados do trânsito

- **P1:** ponto parte frontal do campus;
- **P2:** ponto na lateral do campus;
- **A1:** via lateral ao campus – Av. Araucárias, trajeto CEUB → Águas Claras;
- **A2:** via lateral ao Condomínio Residencial Península – Av. Araucárias

- **B1:** via em frente ao campus – Rua 210, trajeto CEUB → Águas Claras;
- **B2:** Rua 210, trajeto Águas Claras → Condomínio Residencial Península.

5. RESULTADOS/DISCUSSÃO

5.1. Tráfego rodoviário

Os resultados referentes ao fluxo de veículos, avaliado por meio de filmagens, estão apresentados na Tabela 4. Conforme pode ser observado o fluxo deve-se predominantemente aos veículos leves.

Tabela 4 - Fluxo de veículos

	A1	A2	B1	B2
Veículos Leves	252	168	219	141
Veículos Pesados	4	0	6	5
Motos	14	18	5	12
Total (15 min)	270	186	230	158
Percentual de veículos pesados	1,5%	0,0%	2,6%	3,2%

Fonte: Autor

Utilizando o modelo matemático RLS 90 e os dados do fluxo de veículos, determinou-se os níveis de pressão sonora gerados pelo tráfego rodoviário de cada via. A partir da distância dos pontos P1 e P2 até o centro da via foram feitos os cálculos preditivos dos NPS gerados pelo tráfego nestes pontos. Os resultados estão apresentados na Tabela 5. Na mesma tabela estão os resultados dos NPS avaliados nos pontos P1 e P1 assim como a diferença entre os valores preditos através da modelagem matemática e os valores efetivamente medidos.

Os resultados apresentados indicam os valores preditos na modelagem matemática se aproximam dos valores medidos com a diferença máxima de 1,5 dB(A). Diferenças menores que 2,0 dB(A) são consideradas boas para a área de modelagem em Acústica Ambiental.

Tabela 5 - NPS preditos e medidos

	NPS* (dBA)	NPS**(dBA)	Dif. (dBA)
P1	74,3	75,4	1,1
P2	74,0	75,5	1,5

* (preditos); ** (medidos), Dif. – diferença. (Fonte: Autor)

A partir do modelo RLS 90, que faz a predição dos NPS para 25 m da fonte emissora e considerando um decaimento de 3 dB(A) quando a distância fonte/receptor é duplicada foram obtidas as equações, que representam os NPS gerados por cada via.

$$NPS_{A1} = 82,032 - 4,328 * \ln(x) \quad (1)$$

$$NPS_{A2} = 79,932 - 4,328 * \ln(x) \quad (2)$$

$$NPS_{B1} = 81,732 - 4,328 * \ln(x) \quad (3)$$

$$NPS_{B2} = 80,232 - 4,328 * \ln(x) \quad (4)$$

O "x" representa a distância entre a fonte (via) e o receptor. Utilizando-se as equações acima pode-se calcular os NPS gerados pelo tráfego rodoviário das vias para quaisquer distâncias.

Utilizando os modelos matemáticos obtidos foram calculados os NPS que atingem as fachadas próximas as vias A e B, conforme Figura 7. Na Tabela 7 estão apresentados os NPS que atingem as duas fachadas.

Tabela 6 - NPS que atingem as fachadas

Vias	NPS (dBA)
A1/A2	71,6
B1/B2	68,8

Fonte: Autor

Os resultados indicam que os NPS que atingem as fachadas do edifício estão acima do limite estabelecido pela NBR 10.151 (2019) que é de 55 dB(A) para o período diurno, considerando a região como área mista, predominantemente residencial.

5.2. Níveis de Pressão Sonora internos

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados dos NPS e NC para os ambientes avaliados, sala 131, 132, 134 e 190 e também do corredor próximos as primeiras salas.

De acordo com a NBR 10.152 (2017) os limites indicados são de 35 (NPS) e 30 (NC) para sala de aulas e 50 (NPS) e 45 (NC) para as áreas de circulação. A norma prevê ainda uma tolerância de 5 dB. No Apêndice estão apresentadas as figuras com os cálculos dos NC para os diversos ambientes.

Tabela 7 - NPS internos – som residual

Sala	NPS (dBA)	VR (dBA)	NC (dBA)	VR (dBA)
131	47,9	35	40	30
132	45,5	35	40	30
134	41,3	35	35	30
190	40,5	34	40	30
Corredor	43,0	45	40	45

VR - Valor referência – NBR 10.152 (2017)

Para o corredor os valores dos NPS, estão abaixo do limite indicado pela norma, já para as salas de aulas os valores foram ligeiramente superiores. Apesar de ultrapassar são muito abaixo dos NPS que atingem a fachada do edifício, indicando que o isolamento acústico proporcionado pelas esquadrias e paredes, que compõem a fachada, é eficiente.

5.3. Tempo de reverberação (T60)

O tempo de reverberação foi avaliado nas salas 131, 134 e 190, os resultados do tempo médio de reverberação, calculado nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, estão apresentados na Tabela 8. A avaliação não foi feita na sala 132, pois ela é semelhante à 131.

Tabela 8 - Tempo de reverberação (s) avaliado e ideal

f (Hz)	Sala 131	Sala 134	Sala 190
TR _m (s)	0,650	0,710	0,980
TR _{ótimo} (s)	0,530 (±0,175)	0,620 (±0,175)	0,650 (±0,175)

Fonte: Autor

De acordo com a ProAcústica (2019) os tempos de reverberação, avaliados *in situ*, estão dentro dos limites considerados ideais.

5.4. Coloração da reverberação

Utilizando os tempos de reverberação para as salas avaliadas, foi obtida a coloração da reverberação para os ambientes. O resultado está expresso na Tabela 9.

Com o objetivo de apresentar uma melhor visualização da coloração, foi elaborado o gráfico da variação do TR, que representa a coloração para as bandas de frequências estudadas, o resultado está apresentado na Figura 10. Comparando o resultado com a coloração ideal, podemos observar que o comportamento esperado para altas frequências

não é observado, isto é, não ocorre uma diminuição no TR, mas sim um aumento. Já para a sala 134, o TR permanece constante. Desta forma, neste regime de frequência, a coloração das salas é “inaceitável”.

Tabela 9 - Coloração da reverberação

f(Hz)	TR (134)	VT (134)	TR (131)	VR (131)	TR (190)	VR (190)
63	0,62	0,95	0,95	1,36	1,34	1,76
80	1,39	2,14	1,00	1,43	1,52	2,00
100	1,31	2,02	0,78	1,11	1,23	1,62
125	0,96	1,48	0,87	1,24	1,01	1,33
160	0,93	1,43	0,90	1,29	1,22	1,61
200	0,84	1,29	0,76	1,09	1,45	1,91
250	0,77	1,18	0,74	1,06	1,49	1,96
315	0,80	1,23	0,62	0,89	1,21	1,59
400	0,75	1,15	0,58	0,83	1,04	1,37
500	0,67	1,03	0,49	0,70	0,85	1,12
630	0,69	1,06	0,51	0,73	0,79	1,04
800	0,65	1,00	0,55	0,79	0,71	0,93
1000	0,65	1,00	0,70	1,00	0,76	1,00
1250	0,65	1,00	0,83	1,19	0,90	1,18
1600	0,64	0,98	0,91	1,30	1,05	1,38
2000	0,62	0,95	0,94	1,34	1,34	1,76
2500	0,65	1,00	0,95	1,36	1,52	2,00
3150	0,71	1,09	1,13	1,61	1,23	1,62
4000	0,75	1,15	1,14	1,63	1,01	1,33
5000	0,72	1,11	1,17	1,67	1,22	1,61

VT – Variação da reverberação

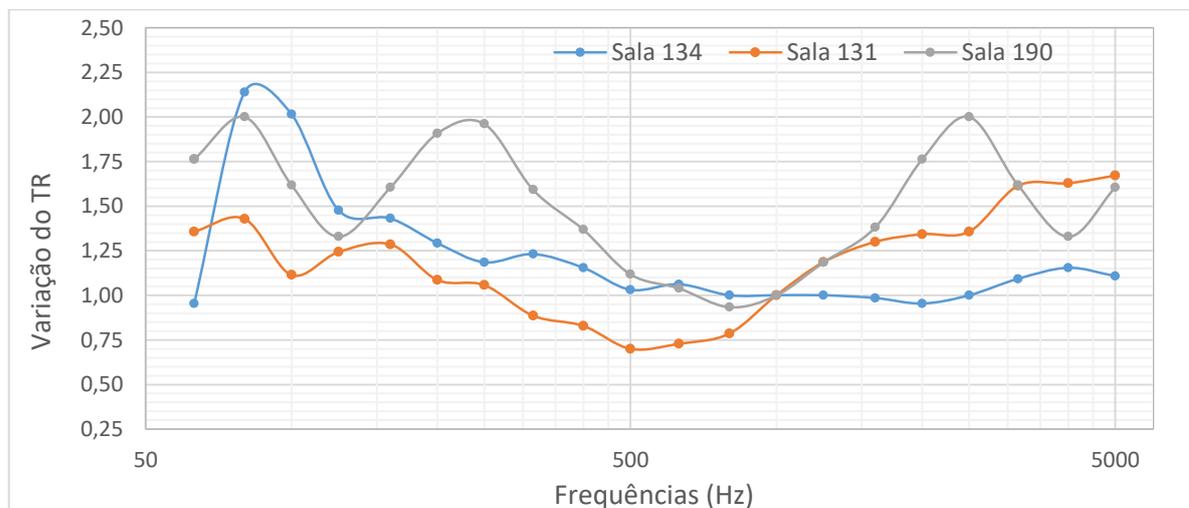


Figura 10 - Coloração da reverberação

Em baixas frequências, o TR das salas 134 e 190 aumentam atingindo o valor de duas vezes o TR de 1000 Hz, apresentando ainda oscilações. Então para os sons graves a classificação também é inaceitável. Na sala 131 observa-se inicialmente uma diminuição, para frequências acima de 1000 Hz e depois ocorre o esperado aumento ficando dentro do parâmetro considerado normal.

6. CONCLUSÃO

Os resultados referentes aos níveis de pressão sonora medidos na vizinhança da instituição, assim como os níveis que atingem a fachada do edifício foram superiores ao limite estabelecido pela legislação (NBR 10.151, 2019), indicando a ocorrência da contaminação acústica do local, devido ao tráfego rodoviário.

O modelo matemático utilizado para a predição dos níveis de pressão sonora a partir dos dados do tráfego rodoviário mostrou-se eficiente, com desvio máximo entre os valores preditos e medidos de 1,5 dB(A).

O som residual avaliado nos diversos ambientes internos, apresentaram grande diferença em relação aos NPS que atingem a fachada do edifício, indicando que o isolamento acústico entre as áreas internas e externas são eficientes. O Noise Critéria avaliado no corredor foi abaixo do limite indicado pela NBR 10.152 (2017), nas outras salas foram ligeiramente superiores, porém não comprometem a qualidade acústica destes ambientes.

Os tempos de reverberação dos três ambientes avaliados, com diferentes volumes, valores foram classificados como ótimos, quando comparados com valores indicados pela literatura da área.

Apesar do tempo de reverberação ser considerado ideal, a coloração da reverberação não teve um comportamento desejável, principalmente em altas frequências, nesta faixa o tempo de reverberação aumentou ao invés de diminuir.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a avaliação da inteligibilidade da fala e um estudo mais aprofundado para avaliar os efeitos da coloração inadequada no conforto acústico de ambientes escolares. A isolação acústica entre diferentes salas e entre salas e corredor também poderia ser realizada.

7. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151. Acústica: Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando ao conforto da comunidade – Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152. Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações.** 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179. Tratamento acústico em recintos fechados.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- BERANECK L. L., *Acoustics*, McGraw-Hill, 1954
- BRADLEY, J.S. *Review of objective room acoustics measures and future needs.* Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010. Melbourne – Australia, 2010.
- BRITO, L. A. P. F.; TOLEDO, V. D. **Avaliação de algoritmos matemáticos na previsão de ruído de tráfego.** XXVII Encontro da SOBRAC – Sociedade Brasileira de Acústica. Brasília, 2017.
- BUILDING BULLETIN 93. *Acoustic Design of Schools. Part E4 of Building Regulations 2000, United Kingdom (2003).*
- DROSSI, R. C. F.; MOMENSOHN-SANTOS, T. **O Ruído e sua interferência sobre estudantes em uma sala de aula: revisão de literatura.** V. 17, n. 2, p. 251-258. Barueri: Pró-Fono Revista de Atualização Científica, 2005.
- ENIZ, A.; GARAVELLI, S. L. **A contaminação acústica de ambientes escolares devido aos ruídos urbanos no Distrito Federal, Brasil.** V.6 n.2 – p. 137. São Paulo: Holos Environment, 2006.
- ERCOLI, L.; AZZURRO, A. P.; MÉNDEZ, A.M.; STORNINI, J. *Caracterización sonora de aulas: un estudio de los principales parámetros acústicos en aulas argentinas - Parte 1: Diagnóstico.* Santa Fe - Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, 1998.
- GONÇALVES, V. S. B.; SILVA, L. B.; COUTINHO, A. S. **Ruído como agente comprometedor da inteligibilidade de fala dos professores.** Revista Produção [online], v. 19, n. 3, p. 466-476, 2009.
- JAROSZEWSKI, G. C.; ZEIGELBOIM, B. S.; LACERDA, A. **Ruído escolar e sua implicação na atividade de ditado.** Revista. CEFAC [online], vol.9, n.1, pp.122-132. Rio de Janeiro, 2007.
- KRÜGER, E. L.; ZANNIN, P. H. T. *Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms.* Building and Environment Magazine. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.
- LUCENA, T. G. S.; BARROS, A. A.; MAROJA, A. M.; CARVALHO JR, E.B.; GARAVELLI, S. L. **Avaliação do ruído ambiental em uma escola de Planaltina-DF.** XXV Encontro da SOBRAC – Sociedade Brasileira de Acústica. Campinas, 2014.
- LONG, Marshall. **Architectural Acoustics.** 2. ed. LONDON: Elsevier Inc, 2014

Manual ProAcústica - Qualidade Acústica em Escolas (2019). Disponível em <http://www.proacustica.org.br/publicacoes/manuais-tecnicos-sobre-acustica/manual-proacustica-qualidade-acustica-em-escolas.html> Acesso em 12/06/2019

OLIVEIRA, A. L. A. **Avaliação das condições de desempenho acústico, lumínico e térmico em edificações de porte monumental: um estudo de caso da Biblioteca Central e do Restaurante Universitário da Universidade de Brasília.** Brasília: Universidade de Brasília – UnB, 2016.

OLIVEIRA, N. F. **Avaliação acústica de salas de aula de dimensões reduzidas através da técnica impulsiva.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2006.

SABINE, W. C., *Collected papers on acoustics*, Dover Publisher, New York, 1964.

SATO, H. **Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms.** The Journal of the Acoustical Society of America, 123. Melville – USA, 2004.

SCHICK, A.; KLATTE, M.; MEIS, M. **Noise Stress in classrooms.** Contributions to Psychological Acoustics: Results of the 8th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, pp. 533-569. Oldenburg – Germany, 2000.

SEEP, B.; GLOSEMEYER, R.; HULCE, E.; LINN, M.; AYTAR, P.. **Acústica de salas de aulas.** Revista de Acústica e Vibrações, nº 29. Santa Catarina: Sociedade Brasileira de Acústica, 2002.

SEEP, B.; GLOSEMEYER, R.; HULCE, E.; LINN, M.; AYTAR, P.; COFFEEN, R. *Classroom Acoustics: A resource for creating learning environments with desirable listening conditions.* Acoustical Society of America, 2000.

SILVA, M. S. **O impacto da poluição sonora nos usuários do transporte coletivo da cidade de Goiânia.** Brasília: Universidade Católica de Brasília – UCB, 2003.

TELLES, A. M.; CARVALHO JR, E. B.; MAROJA, A. M.; GARAVELLI, S. L. **Condições de conforto acústico e a voz do professor no ambiente escolar.** XXV Encontro da SOBRAC – Sociedade Brasileira de Acústica. Campinas, 2014.

VALLE, S. **Manual Prático de Acústica.** 2. Ed.. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2007.

WARZYBOK, A.; RENNIES, J.; DOCLO, S.; KOLLMEIER, B.. **Influence of early reflections on speech intelligibility under different noise conditions.** Forum Acusticum. Aalborg – Denmark, 2011.

YANG, W.; BRADLEY, J. S. **Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children.** Ottawa – Canada: Acoustical Society of America, 2009.

ZANNIN, P.H. T.; FERREIRA, A. M. C.; ZWIRTES, D. P.; NUNES, E. ; STUMM, S. B.; TÖWS, M. **Comparação entre tempos de reverberação calculados e medidos.** V. 5, n. 4, p. 75-85. Porto Alegre: Ambiente Construído, 2005.

ZANNIN, P. H. T.; ZWIRTES, D. P. Z. **Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools.** Applied Acoustics Magazine. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

ZWIRTES, D. P. Z. **Avaliação do desempenho acústico de salas de aula: estudo de caso nas escolas estaduais do Paraná.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2006.

APÊNDICE

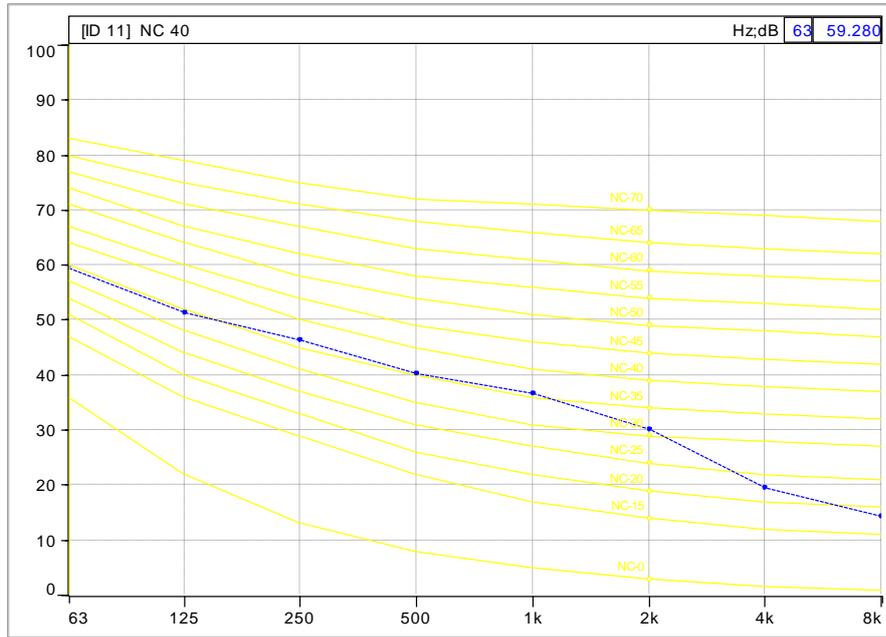


Figura 11 - NC: sala 131

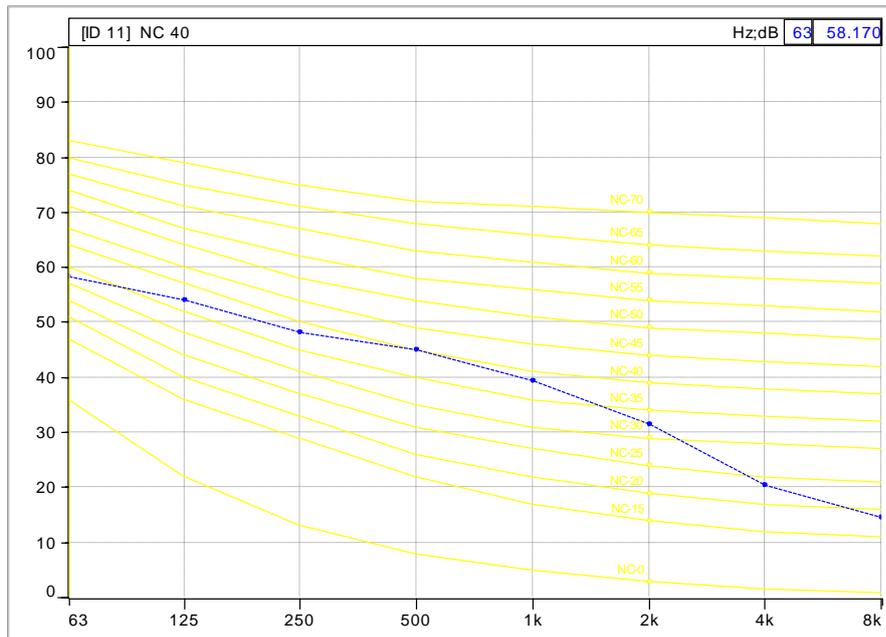


Figura 12 - NC: sala 132

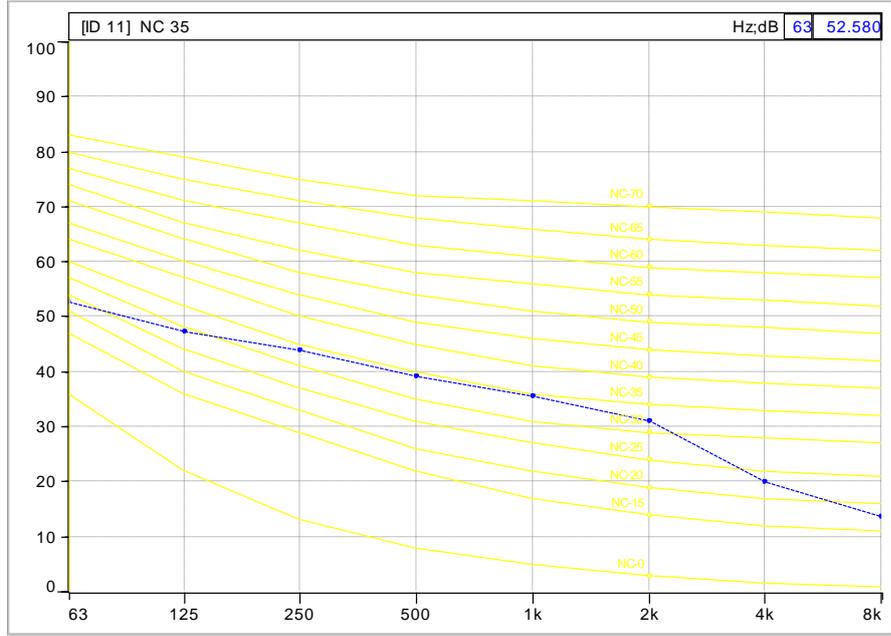


Figura 13 - NC: sala 134

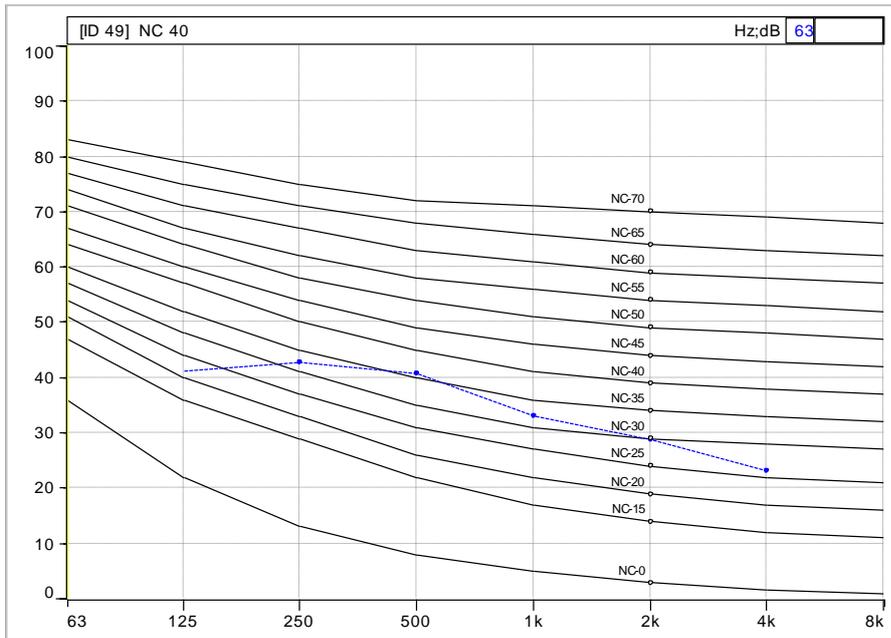


Figura 14 - NC: sala 190

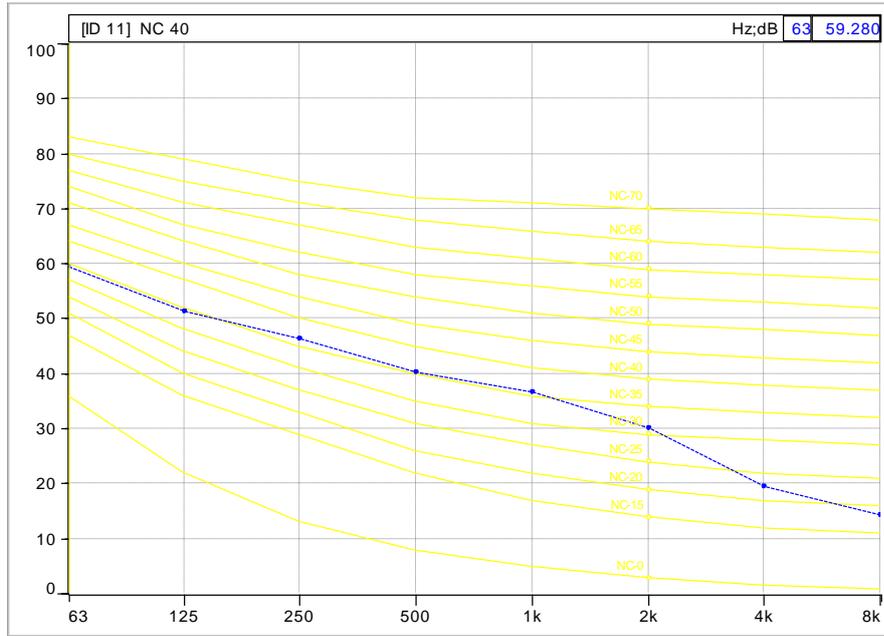


Figura 15 - NC: corredor

Os tempos de reverberação foram obtidos utilizando o software dBbati da 01 dB, na Figura 16 está apresentada um exemplo dos cálculos do TR.

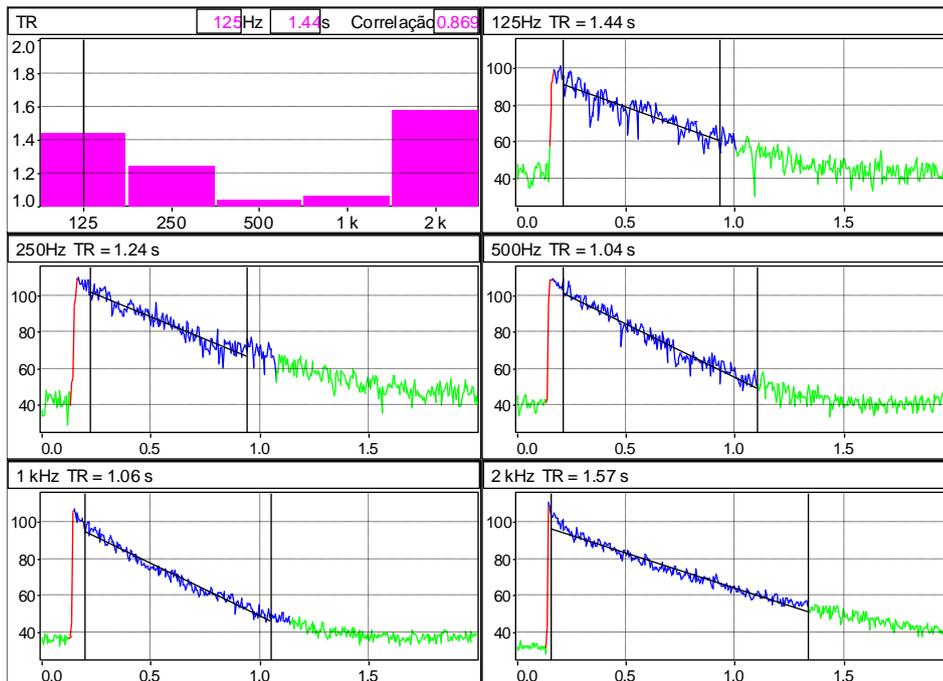


Figura 16 - Exemplo cálculo TR

Todos os arquivos de medidas do som residual foram analisados utilizando o filtro de frequências em 1/3 de oitavas, visando identificar componentes toais. Em nenhuma medida foram encontradas componentes tonais. A Figura 17 apresenta um exemplo do gráfico utilizado para a avaliação.

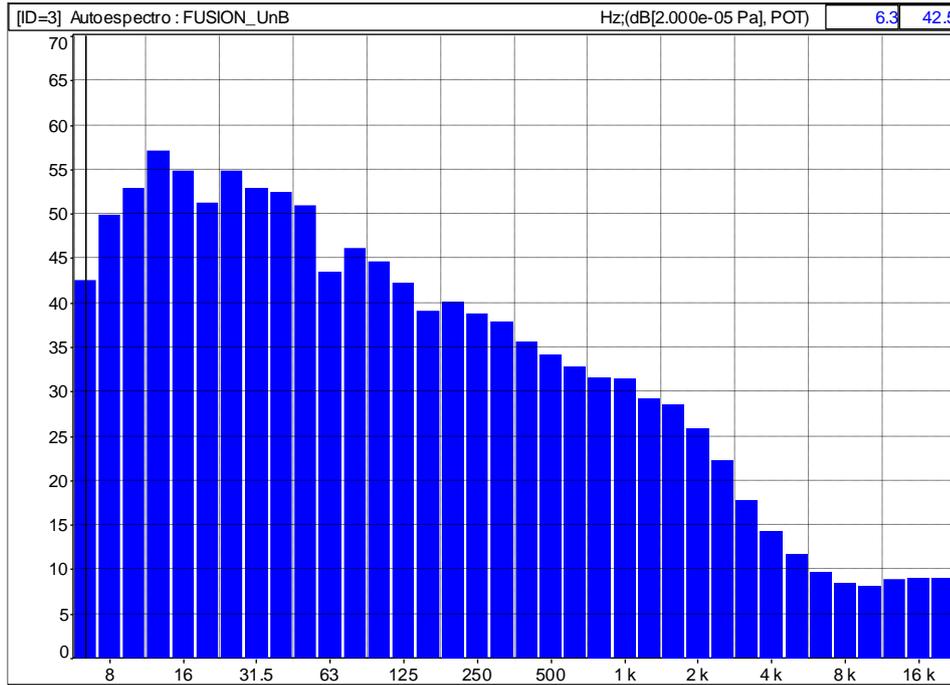


Figura 17 - Exemplo: NPS em bandas de 1/3 de oitavas

Nos estudos mais detalhados, sala 190, foram utilizadas 15 medidas do ruído impulsivo, os resultados estão na Figura 18, onde estão apresentados os tempos de reverberação médio da sala 190, juntamente com a barra de erro. Os resultados indicam que para altas frequência os desvios foram menores, quando comparados com os de baixa frequência.

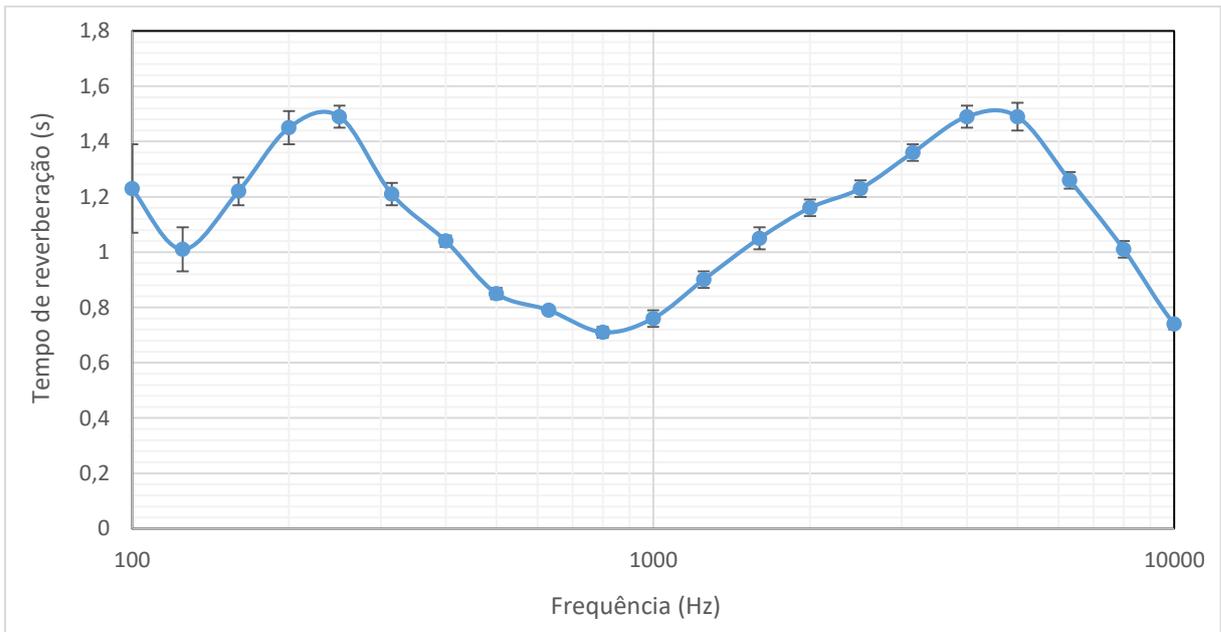


Figura 18 - TR com a barra de erro, sala 190