



Centro Universitário de Brasília - UNICEUB
Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas -
FATECS Curso: Engenharia Civil

FELIPE FAJOLI GOMES

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO ACÚSTICO DE UM
AUDITÓRIO DE MÚLTIPLO USO**

Brasília
2019

FELIPE FAJOLI GOMES

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO ACÚSTICO DE UM
AUDITÓRIO DE MÚLTIPLO USO**

Trabalho de Curso apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília.

Orientador: Dr. Sérgio Garavelli.

Brasília
2019

FELIPE FAJOLI GOMES

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO ACÚSTICO DE UM AUDITÓRIO DE MÚLTIPLO USO

Trabalho de Curso apresentado como
um dos requisitos para a conclusão do
curso de Engenharia Civil do UniCEUB
- Centro Universitário de Brasília.

Orientador: Dr. Sérgio Garavelli.

Banca Examinadora

Dr. Sérgio Luiz Garavelli
Orientador

Eng^a. Civil: Erika Regina Costa Castro, M. Sc. UniCEUB.
Examinador Interno

Eng^a. Civil: Rosanna Duarte Fernandes Dutra, M. Sc. UniCEUB.
Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por abençoar esse trajeto, permitindo que fosse possível a conclusão deste trabalho e dando forças para continuar persistindo e vencendo.

À minha família por sempre dar o suporte, o incentivo e a motivação necessários para realização dos meus sonhos.

Aos meus pais, Júnia Cristina F. da Silva e Diógenes João Gomes Dias por me apoiarem e me ajudarem a me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram nos momentos difíceis e que estiveram do meu lado por vários anos aturando minhas manias e defeitos. Como também compartilhando momentos de felicidade e alegria, tão importantes para aliviar os estresses.

Aos meus professores que me deram o exemplo e a vontade de seguir em frente, demonstrando não só com palavras que a carreira de engenheiro vale a pena ser vivida e que há pessoas iluminadas e nesta área.

Ao meu orientador Sergio Garavelli por sua paciência e ainda pelos seus conselhos que vão além da elaboração deste trabalho, mas para a vida.

E por fim, agradeço aos funcionários do UniCEUB por todo aprendizado durante a caminhada acadêmica.

“A verdadeira viagem do descobrimento
não consiste em procurar novas
paisagens, mas em ter novos olhos”.

(Marcel Proust)

RESUMO

Ambientes de ensino precisam que o conteúdo ministrado seja bem entendido, portanto antes da qualidade do conteúdo ensinado vem a inteligibilidade da fala, pois é através desta que o ouvinte discerne as palavras ditas e sem ela não é possível estabelecer qualquer tipo de comunicação entre palestrante e plateia. Para que se consiga uma boa inteligibilidade é preciso que o ambiente tenha qualidade acústica em todo seu espaço, que é obtida através do controle de parâmetros acústicos específicos. Em vários países, assim como no Brasil, a questão da má qualidade acústica nas salas de aula ainda é um problema social, gerando uma série de outros problemas sociais como em uma reação em cadeia. Este trabalho apresenta um estudo acústico realizado em um auditório de uso múltiplo, do Centro Universitário de Brasília (UniCeub). O estudo consiste na avaliação das condições de conforto acústico encontradas e propor alterações que visem melhorar essas condições. Para tanto foram analisados dois parâmetros acústicos: som residual e o tempo de reverberação. Para classificar o nível de som residual utilizou-se as curvas-critérios de ruídos, Noise Critéria. Os tempos de reverberação foram determinados experimentalmente, através de medidas in situ e calculados teoricamente, através da fórmula de Sabine. Os parâmetros obtidos foram comparados com os especificados por normas da ABNT. Os resultados indicam que o tempo de reverberação se encontram dentro da normalidade, porém a coloração da reverberação apresenta níveis fora dos limites aceitáveis em sons agudos. Se percebeu um padrão quanto ao excesso de reverberação em altas frequências em medições feitas em outras salas que apresentam o mesmo tipo de forro, piso e paredes, apresentando estado inaceitável de coloração.

Palavras-chave: Ambientes de ensino. Inteligibilidade da fala. Parâmetros acústicos, Som residual. Reverberação. Coloração.

ABSTRACT

Teaching environments need that the content taught is well understood, therefore before the quality of the content taught comes the intelligibility of speech, because it is through this that the listener discerns the words spoken and without it it is not possible to establish any kind of communication between the speaker and audience. In order to achieve good intelligibility it is necessary that the environment has acoustic quality throughout its space, which is obtained through the control of specific acoustic parameters. In many countries, as in Brazil, the issue of poor acoustic quality in classrooms is still a social problem, generating a host of other social problems as in a chain reaction. This work presents an acoustic study carried out in an auditorium of multiple use, from the University Centro Universitário de Brasília. The study consists of the evaluation of the acoustic comfort conditions found and propose changes aimed at improving these conditions. Two acoustic parameters were analyzed: residual sound and reverberation time. To classify the residual sound level was used the noise-criterion curves, Noise Criteria. The reverberation times were determined experimentally, through in situ measurements and theoretically calculated, using the Sabine formula. The parameters obtained were compared with those specified by ABNT norms. The results indicate that the reverberation time is within the normal range, however the reverberation coloration shows levels outside the acceptable limits in high sounds. If one perceived a pattern regarding the excess of reverberation in high frequencies in measurements made in other rooms that present the same type of lining, floor and walls, presenting an unacceptable staining state.

Key words: Teaching environments. Intelligibility of speech. Acoustic parameters. Residual sound. Reverberation. Coloration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas de nível de pressão sonora.....	16
Figura 2 – Caminho das ondas sonoras.....	19
Figura 3 – Decaimento sonoro	29
Figura 4 – Tempo de reverberação ótimo	21
Figura 5 – Coloração da reverberação.....	22
Figura 6 – Ondas sonoras refletidas por teto segmentado.....	23
Figura 7 – Interior do auditório	24
Figura 8 – Aparelho Medidor	25
Figura 9 – Tripé.....	26
Figura 10 – Balões de 18”	26
Figura 11 –Curva NC do auditório.....	29
Figura 12 – Gráfico da coloração do auditório	32
Figura 13 – Gráfico da coloração da sala 131.....	34
Figura 14 – Gráfico da coloração da sala 134.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dB(A) e NC.....	17
Tabela 2 – Curva de avaliação de ruído.....	18
Tabela 3 – Som residual (NC).....	28
Tabela 4 – Tempo de reverberação medidos.....	31
Tabela 5 – Medição sala 131	33
Tabela 6 – Medição sala 134	34
Tabela 7 – Coeficiente de absorção sonora SONEX illtec	36

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

NC – *Noise Criteria*

S/N – Relação Sinal-Ruído

TR – Tempo de Reverberação

TRO – Tempo de Reverberação Ótimo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Revisão Histórica.....	13
3.1.1	A importância da acústica em salas de aula	14
3.2	Parâmetros acústicos	16
3.2.1	O som residual e Curvas de avaliação de ruído Noise Criteria (NC)	16
3.2.2	Tempo de reverberação.....	18
4	METODOLOGIA.....	24
4.1	Local do Estudo	24
4.2	Levantamento físico.....	24
4.3	Parâmetros acústicos analisados.....	25
4.4	Equipamentos e softwares utilizados	25
4.5	Descrição do procedimento	26
5	ANÁLISES E RESULTADOS.....	28
5.1.1	Som residual.....	28
5.1.2	Noise Criteria	29
5.2	Tempo de reverberação.....	31
5.3	Coloração da reverberação.....	34
5.4	Proposta de adequação acústica.....	36
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
6.1	Conclusão.....	36
6.2	Sugestões para pesquisas futuras	37
	REFERÊNCIAS	38
	APÊNDICE A-Medições.....	40

1 INTRODUÇÃO

O desempenho musical, dos teatros e das palestras estão interligados às condições acústicas dos ambientes. Nota-se que todas as culturas foram influenciadas pelo conhecimento da acústica da época, logo, sendo melhores conhecedores dessas propriedades físicas, cabe aos profissionais atuais compreenderem em quais aspectos essa matéria está influenciando a sociedade presente. Chamamos Acústica ao comportamento de um espaço em relação ao som produzido em seu interior (VALLE, 2009).

As propriedades da dissipação das ondas sonoras em um ambiente acústico determinam a taxa de palavras que podem ser compreendidas pela plateia, juntamente com o domínio que esta possui sobre a língua falada.

No caso de salas de aulas, quanto menor a idade do educando, menor a sua tolerância ao som residual no processo de aprendizagem, uma vez que este precisa compreender um número maior de palavras ditas para tomar sentido da mensagem que está sendo transmitida, tornando necessário que a sala de aula tenha critérios acústicos mais rigorosos à medida que os alunos são mais novos.

Além de prejudicar a concentração e o aprendizado dos alunos, condições acústicas inapropriadas podem causar danos à saúde, sendo causa de estresse, fadiga, alterações no sistema nervoso central, disfunções na voz. Diante do exposto, esse estudo tem como objetivo analisar as condições de conforto acústico de um auditório de uso múltiplo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo geral avaliar as condições de conforto acústico do auditório de uso múltiplo do Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), campus II, de Taguatinga.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar as medições do som residual, por meio do parâmetro *Leq* e gerar as curvas do *Noise Critéria (NC)*, conforme NBR 10.152 (ABNT, 2017).
- Comparar os valores obtidos dos parâmetros *Leq* e *NC* com os recomendados pela NBR 10.152.
- Avaliar o tempo de reverberação, através de medição *in situ*.
- Propor adequações, caso necessário, em relação ao tratamento acústico, visando a melhor das condições de conforto acústico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A acústica arquitetônica ajudou a moldar as culturas, a transmissão da mensagem entre o emissor e receptor é dependente das propriedades de propagação das ondas sonoras num meio e do sistema auditivo humano, que possui particularidades específicas quanto à compreensão de sons. A análise e a adequação arquitetônica de um ambiente são, então, importantes artifícios na comunicação entre pessoas em ambientes fechados.

3.1 Introdução

Desde a antiguidade, com os teatros ao ar livres dos gregos e romanos, notou-se a adaptação das performances com os limites permitidos pela acústica. Os gregos ensinaram sobre a distribuição semicircular da plateia e o aproveitamento da topografia, objetivando maior captação sonora do espectador (SOUZA et. al., 2012).

Na Grécia, Aristóteles (384 - 322 AC) reconheceu a necessidade de um meio de propagação, afirmando que a quantidade de propagação depende das propriedades do material. Um desconhecido dentre seus estudantes escreveu: “corpos que são capazes de vibrar produzem som... cordas são exemplos desses corpos.” (LONG, 2014).

O teatro romano, destinado ao divertimento do público, nasceu, possivelmente, da união de dois teatros semicirculares. Este se alterou do teatro grego, apenas por suas dimensões e do não aproveitamento da topografia, ao invés disto implementavam estruturas independentes (SOUZA et. al., 2012). É possível notar que *Vitruvius Pollio*, autor de *De Architectura* (57 AC), foi um dos principais ou o principal responsável por grande parte dos trabalhos sobre acústica durante o império romano (LONG, 2014).

Com a expansão do Cristianismo, as igrejas se tornaram a referência em acústica, houve a inclusão de arcos, diminuição as colunas, implementação de grandes vãos e utilização de materiais reflexivos. A acústica então passa cada vez mais a influenciar o desenvolvimento da música, que precisava ser agradável àquelas condições acústicas (SOUZA et. al., 2012).

No início do século XX, o físico e professor da Universidade de Harvard, Wallace Clement Sabine, fez uma série de experimentos em três auditórios de Harvard visando descobrir as razões por trás da dificuldade em entender o que era dito nestes auditórios e acabou elaborando a primeira teoria de absorção do som pelos materiais, sua relação com o decaimento do som em salas e a fórmula do tempo de decaimento (reverberação) do som (LONG, 2014).

Até o trabalho pioneiro de Sabine, no início de 1895, o critério para boas condições de audição em salas era de grande forma não existente (EGAN, 2007).

3.1.1 A importância da acústica em salas de aulas

Para ambientes educacionais, como salas de aulas, a acústica se torna crítica para aprender e ensinar. A comunicação é feita oralmente, portanto se as condições de propagação do som não estiverem propícias ao entendimento do aluno e à fala do docente, é impossível que haja aprendizado, causando uma série de fatores negativos quanto ao estudo e saúde dos presentes.

Estudos têm mostrado que condições acústicas não ótimas em salas de aula resultam no comprometimento da comunicação verbal entre professores e estudantes, debilitando o desenvolvimento dos alunos e a voz dos professores. (BERANECK, 2006)

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.

Peutz e Klein recomendaram que a fonte deve estar 25dB acima do nível de ruído de fundo para inteligibilidade adequada. Bradley 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. (LONG, 2014).

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 (FISHER *et. al.*, 2005)

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 quão 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.

No Brasil 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, porém a baixa fiscalização e a falta de conhecimento por parte dos profissionais envolvidos em projetos escolares, acaba deixando a rede de

ensino ineficiente. Uma solução seria a conscientização dentro das universidades e escolas, para que as próximas gerações não sofram deste mal.

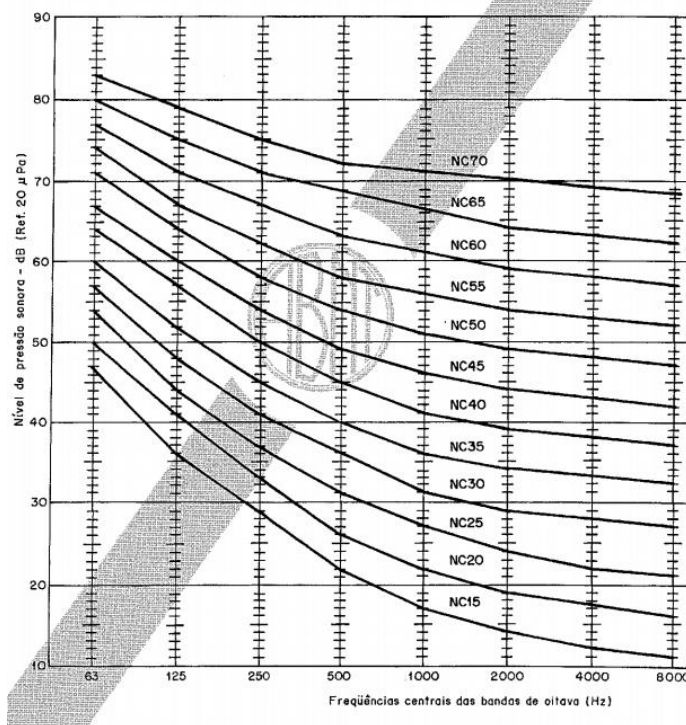
3.2 Parâmetros acústicos

“Parâmetros acústicos são propriedades acústicas que interferem nos ambientes, determinando assim, sua qualidade para a execução ou reprodução de música ou fala” (VALLE, 2009, p.89).

3.2.1 O som residual e Curvas de avaliação de ruído Noise Criteria

As curvas de avaliação de ruído (NC) são baseadas na pressão sonora em bandas de oitava, e são comumente utilizadas em construções para estabelecer padrões para as funcionalidades do local (LONG, 2014). O método foi desenvolvido para avaliar as condições do som residual em espaços existentes é também parâmetro no controle de ruído em espaços a serem construídos. É expresso em curvas, indicadas por NC-30, NC-35 assim por diante, plotadas em plano cartesiano, no qual o eixo das abscissas apresenta as bandas de frequência, e no eixo das ordenadas, os níveis de ruído.

Figura 1 – Curvas de nível de pressão sonora



Fonte: NBR 10.152 (1987)

A curva representa o limite de ruído para uma determinada atividade, de acordo com os níveis de conforto acústico necessários à saúde humana. O objetivo é que o som residual não interfira os propósitos do cômodo e as curvas de ruído proporcionem uma medida padrão especificadas nas normas regulatórias.

No Brasil a NBR 10152 (ABNT,2017) determina valores de referência diversos para ambientes internos de edificações em diferentes finalidades de uso (COSTA, 2003), definindo níveis sonoros para conforto e os níveis sonoros aceitáveis. A Tabela 1 apresenta o valor de NC para auditórios pequenos (<600m³).

Tabela 1 – Valores dB(A) e NC.

Finalidade de uso	RLAeq (dB)	RLAeqmax (dB)	RLnc
Auditórios Pequenos (<600 m ³)	35	40	30

Fonte: NBR 10.152 2017)

Os valores acima são obtidos através da medição do nível de pressão sonora em cada banda de oitava equivalente ponderados em A, LAeq. O nível NC é determinado pela menor curva NC que não tiver nenhum ponto do espectro da medição de bandas de oitava plotado acima de si. Como as curvas NC são definidas em intervalos de 5dB, os valores do nível de NC devem ser plotados entre eles.

NC = Nível NC, dB

LA = Nível de pressão sonora, dBA

Segundo a NBR 10152 para auditórios de volume inferior a 600 m³ o valor é de 30dB(A), nível de pressão sonora equivalente de 35 dB(A) e nível máximo de 40 dB(A) para condições acústicas satisfatórias. (ABNT, 2017)

A Tabela 2 apresenta os valores dos níveis de pressão sonora para as frequências, em bandas de oitavas, para a construção das curvas do NC (NBR 10.152).

Tabela 2 – Curva de avaliação de ruído (NC).

Curvas NC	Níveis de pressão sonora equivalentes, em dB, por bandas de 1/1 de oitava									
	16 Hz	31,5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
70	90	90	84	79	75	72	71	70	68	68
65	90	88	80	75	71	68	65	64	63	62
60	90	85	77	71	66	63	60	59	58	57
55	89	82	74	67	62	58	56	54	53	52
50	87	79	71	64	58	54	51	49	48	47
45	85	76	67	60	54	49	46	44	43	42
40	84	74	64	56	50	44	41	39	38	37
35	82	71	60	52	45	40	36	34	33	32
30	81	68	57	48	41	35	32	29	28	27
25	80	65	54	44	37	31	27	24	22	22
20	79	63	50	40	33	26	22	20	17	16
15	78	61	47	36	28	22	18	14	12	11

NOTA 1 Os valores apresentados nesta tabela correspondem aos valores da Tabela 1 da ANSI/ASA S12.2-2008.

NOTA 2 Os níveis apresentados para as bandas de 16 Hz e 31,5 Hz e para as curvas NC-15, NC-55, NC-60, NC-65 e NC-70 são apenas de caráter informativo, portanto não são normativos aos limites fixados por esta norma.

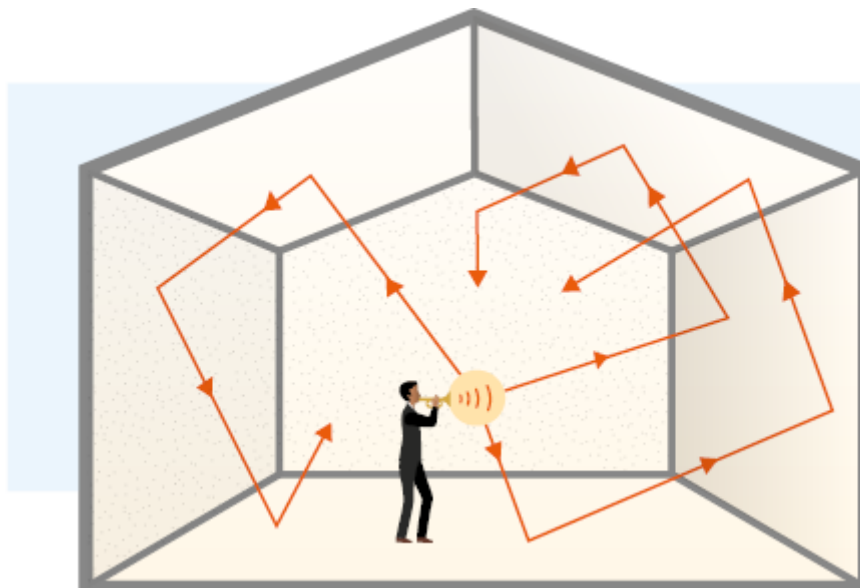
Fonte: NBR 10.152 (2017)

3.2.2 Tempo de reverberação

O tempo de reverberação (RT60), é o tempo que a reverberação leva para desaparecer. (VALLE, 2003). Uma vez que as ondas se propagam em todas as direções, o ouvinte recebe tanto ondas vindas diretamente da fonte como oriundas de reflexões vindas de todas as direções. Como se pode imaginar, este efeito depende da capacidade de absorção e reflexão dos materiais presentes bem como da frequência de onda emitida. Exemplos de ambientes que apresentam longo tempo de reverberação são as antigas catedrais, que, devido ao grande volume, seu formato arquitetônico e compostos reflexivos, o som é refletido diversas vezes por paredes mais próximas e mais distantes, tornando o ambiente “vibrante”. A figura 2 exemplifica como o som, ao ser emitido da fonte, é refletido nas diversas

superfícies presentes no ambiente gerando ondas que chegam ao ouvinte em tempos diferentes.

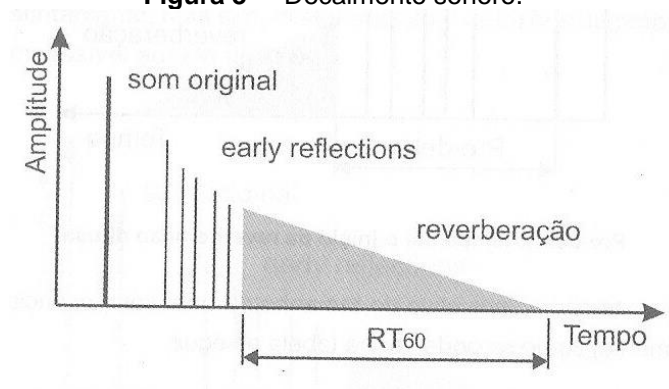
Figura 2 – Caminho das ondas sonoras



Fonte – (Manual Proacústica, Associação Brasileira para a Qualidade Acústica, p. 14)

Ao analisar os efeitos por trás da má acústica em auditórios de Harvard, Sabine descobriu que o tempo de decaimento de som nestas salas era demasiadamente longo, cerca de 5 segundos. Sabine então mediu o tempo suficiente para que o nível sonoro decaísse 60 dB, para diferentes quantidades de materiais absorventes. (LONG, 2014). A figura 3 demonstra como o som original decai 60dB ao longo do tempo, bem como as early reflections, que são as reflexões de intervalo mais próximo entre o cessar da fonte.

Figura 3 – Decaimento sonoro.



Fonte – (VALLE, 2009, pg. 94)

Ao testar diferentes condições em salas de aula, Sabine relacionou o tempo de reverberação à presença de materiais absorventes de som. Ele notou que se ouvia melhor com maior número de alunos ou com almofadas sobre cadeiras e janelas abertas. (CARVALHO, 2006)

Valle explica que o tempo de reverberação depende dos materiais de revestimento bem como da ocupação da sala. A absorção acústica dos materiais varia de acordo com a frequência, juntamente com o RT60, criando o que se chama de coloração (VALLE, 2009)

O tempo de reverberação deve satisfazer o uso o qual a sala é destinada. Um TR muito longo torna a fala menos inteligível e produz altos níveis do som residual. Já um TR curto enfraquece o som residual, entretanto, amortece a fala (BRUEL; KJAER, 2003).

Portanto, nota-se que o tempo de reverberação deve estar calibrado às funções de uso do ambiente, não sendo demasiadamente longo, impedindo a inteligibilidade das palavras devido ao som residual, nem tão curto, perdendo a ampliação natural do som, diminuindo, portanto, a inteligibilidade em locais mais afastados da fonte.

Sabine expressou o tempo de reverberação em função do volume, área e coeficiente de absorção através da fórmula:

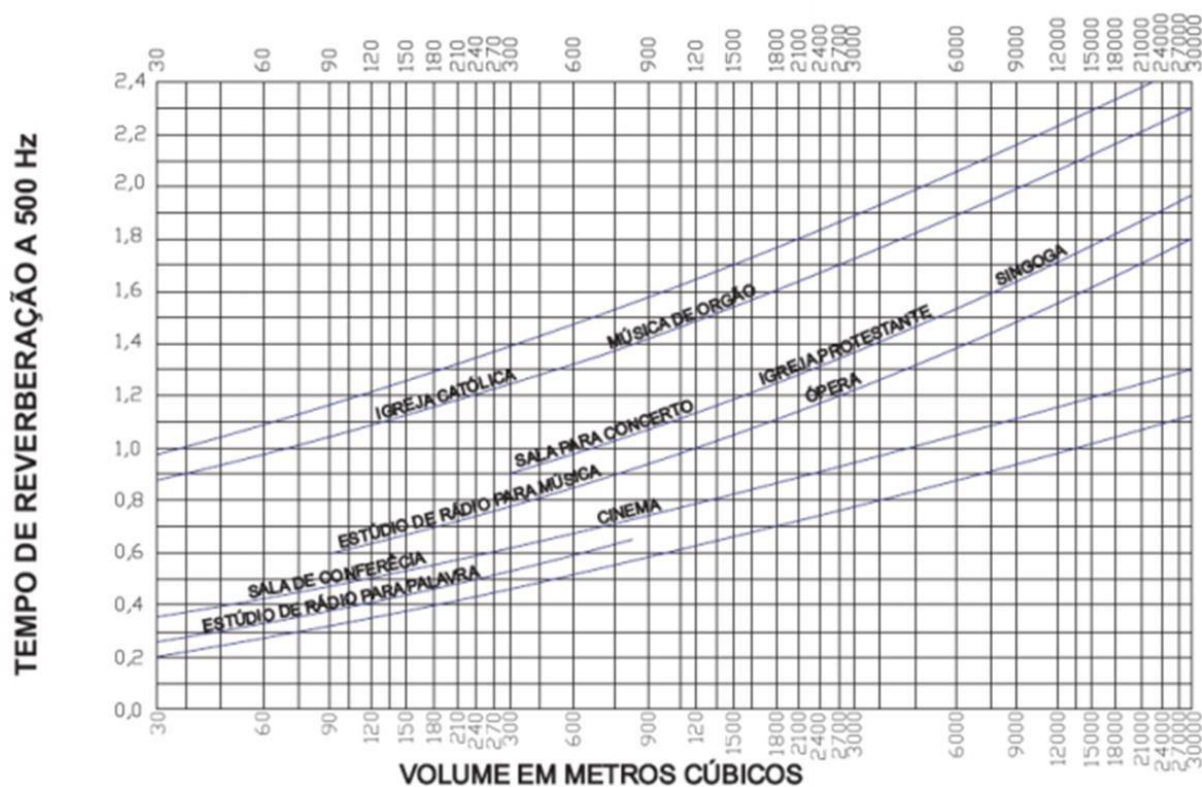
$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n} \quad (1)$$

Esta relação é utilizada para campos sonoros com numerosas reflexões ou difusos, na qual não há uma ampla absorção sonora, α próximo a zero.

Onde T_R é o tempo de reverberação em segundos, V o volume de sala em m^3 e S_1, S_2, \dots, S_n as áreas das superfícies presentes no recinto em m^2 que são multiplicadas pelos respectivos coeficientes, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, de absorção sonora dos materiais em que essas superfícies são constituídas. O ajuste do tempo de reverberação de uma sala dentro do intervalo de valores, para cada frequência, é condição indispensável para se conseguir uma boa acústica da mesma.

Nas salas de aulas uma deficiência comum é o TR elevado, o ideal é as salas tenham TR60 entre 0,4 - 0,6 segundos, porém é comum que salas apresentem tempos consideravelmente superiores.

Figura 4 –Tempo de reverberação ótimo.

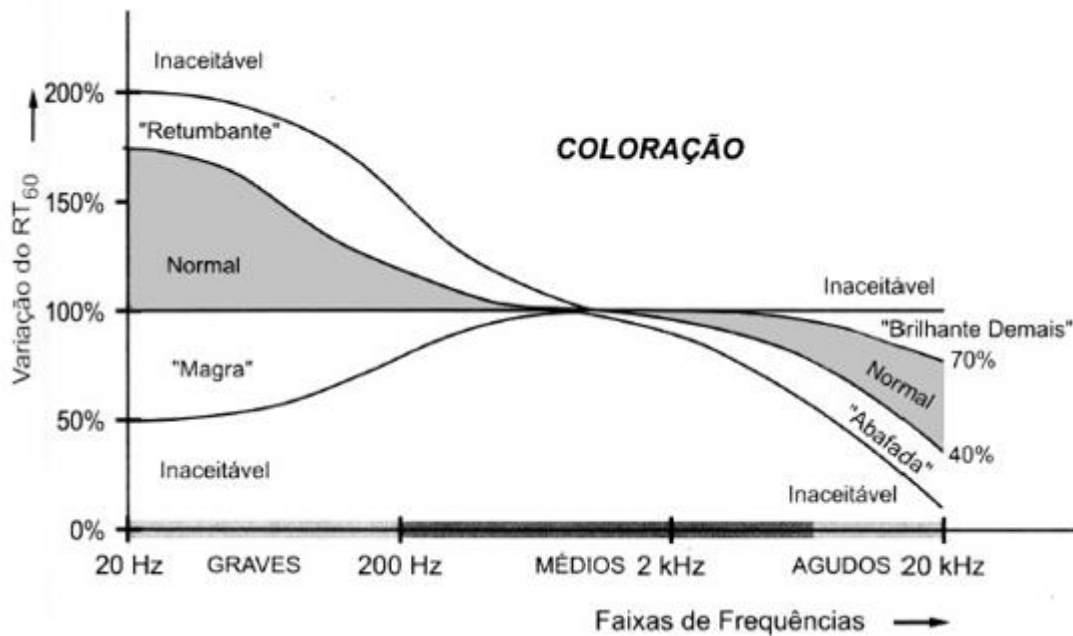


FONTE: BOLK BERANEK AND NEWMAN
ATUAL NBR-101/1988

Um conceito importante é a coloração do tempo de reverberação. Por padrão, a frequência de 500Hz é utilizada como referência na medição do TR60 (VALLE, 2009), porém o valor deste varia em diferentes frequências, o que resulta em condições acústicas diversas de acordo com o comportamento de cada banda de frequência na sala de aula. Portanto, no tratamento acústico leva-se em consideração a interação dos materiais presentes com as bandas de oitavas. A figura 5 apresenta os níveis ótimos de coloração.

Como os coeficientes de absorção dos materiais variam conforme a frequência, é natural que o tempo de reverberação também varie com a frequência, e se cria uma coloração para o ambiente (VALLE, 2009). Uma sala cujo RT60 suba muito mais que 50% nos graves será "retumbante". Se o tempo não subir suficientemente nos graves, ela soará "magra". Por outro lado, se não houver queda suficiente do RT60 nos agudos, a sala ficará "brilhante" demais ou "áspera", e se a queda nas altas frequências for excessiva, teremos uma sala "abafada" ou "escura".

Figura 5 – Coloração da reverberação



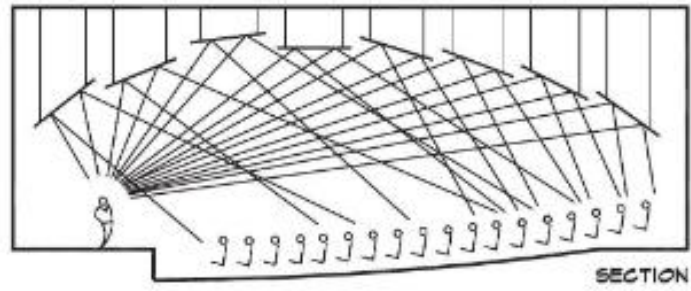
Fonte - (VALLE, 2009, p.98)

Para que seja atingido o equilíbrio perfeito, é preciso que os índices médios de absorção na sala sejam escolhidos com vista que o tempo de reverberação para as várias bandas de frequência estejam próximos dos valores ideais, de modo a atingir o RT60 ideal nos médios e a coloração correta.

Como os coeficientes de absorção dos materiais variam conforme a frequência, é natural que o tempo de reverberação também varie com a frequência, e se cria uma coloração para o ambiente (VALLE, 2009). Uma sala cujo TR60 suba muito mais que 50% nos graves será "retumbante" ou "cavernosa". Se o tempo não subir nos graves, a sala soará "magra". Por outro lado, se não houver queda suficiente do RT60 nos agudos, a sala ficará "brilhante" demais ou "áspera", e se a queda nas altas frequências for excessiva, teremos uma sala "abafada" ou "escura".

Para que seja atingido o equilíbrio perfeito, é preciso que os índices médios de absorção na sala sejam escolhidos de modo que os tempos de reverberação para as várias frequências tenham os valores ideais, de modo a atingir o RT60 ideal nos médios e a coloração correta.

Figura 6 – Ondas sonoras refletidas por teto segmentado



Fonte - (LONG, 2014, p.643)

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho faz análise do desempenho acústico do auditório 190 do Centro Universitário de Brasília. Neste capítulo será descrito o volume, formato, localização geometria e os materiais presentes no auditório analisado bem como se especificará os procedimentos aplicados nas medições, os materiais utilizados na coleta de dados, os métodos utilizados durante a execução das medições e descrição das equações adotadas.

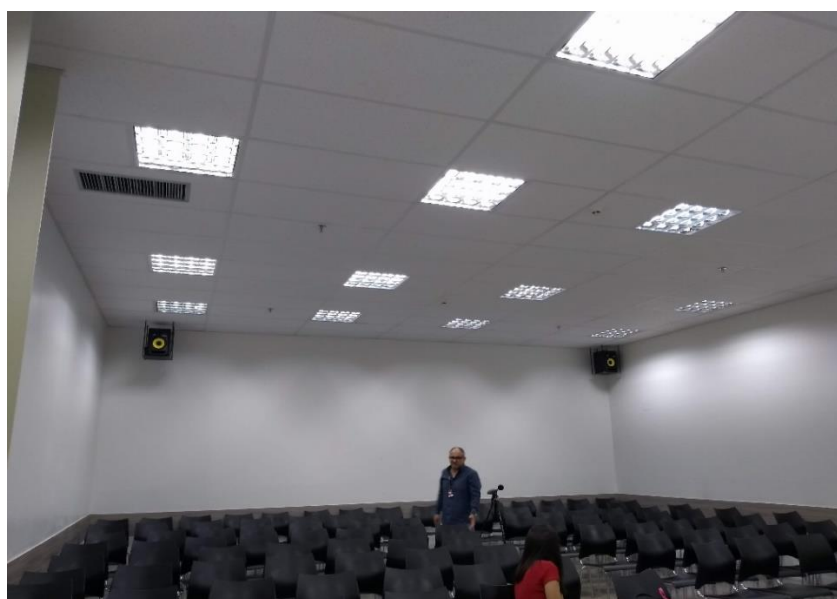
4.1 Local do Estudo

Auditório de uso múltiplo, no campus de Taguatinga, da Universidade Centro Universitário UniCEUB.

4.2 Levantamento físico

Primeiramente foram levantadas as medidas geométricas da sala: 10,40 metros de comprimento, 7,80 metros de largura e 3,50 de altura; contabilizados os objetos como: cadeiras, mesas, equipamentos, painéis, forros, quadro. Além disso foram contabilizados os materiais de piso, paredes e teto. A figura 7 apresenta o interior do auditório.

Figura 7 – Interior auditório



Fonte: Autor.

4.3 Parâmetros acústicos analisados

Som residual:

- Nível de pressão sonora interna
- Noise criteria (NC)

Tempo de reverberação:

- Tempo de reverberação TR60, médio por banda de frequência
- Análise da coloração da reverberação das frequências.
- Análise do tempo de reverberação observado, com o tempo de reverberação especificado na NBR 12.179(ABNT, 1992).

4.4 Equipamentos e softwares utilizados

Estão apresentados nas figuras 8, 9 e 10 os equipamentos utilizados para a análise dos parâmetros descritos. Utilizou-se o medidor de nível de pressão sonora, do fabricante 01dB, modelo solo, dotado de um filtro de banda 1/1 de oitava apoiado sobre tripé com altura de 1,2m de distância do piso e a um afastamento mínimo de 1,5m das paredes.

Posteriormente o equipamento foi conectado ao computador e o software dBBat foi utilizado na realização do processamento dos parâmetros acústicos medidos. A fonte de ruído impulsivo empregada foram balões de látex de 18 polegadas.

Figura 8 – Aparelho Medidor



Fonte: Autor.

Figura 9 – Tripé

Fonte: Autor.

Figura 10 – Balões 18"

Fonte: Autor.

4.5 Descrição do procedimento

Na medida do TR, foi utilizado o método do ruído impulsivo ISO 3382 (ISO, 1997), gerado pelo estouro de balões. A medição do Tempo de Reverberação foi realizada com a sala desocupada, em três pontos distintos, sendo que em cada ponto foram realizadas cinco medidas.

O medidor foi posicionado em cada um desses pontos alinhados ao longo da diagonal da sala, sendo um na frente, outro no meio e o terceiro no fundo da sala. Os balões foram estourados na posição do professor. Por fim, o tempo de reverberação de 500 Hz foi considerado como parâmetro de comparação com os níveis indicados na literatura. O tempo de reverberação de 500 Hz foi considerado como parâmetro de

comparação com os níveis indicados na literatura e, por fim, a coloração da reverberação foi avaliada.

Em seguida, com o auditório fora do horário de funcionamento, realizou-se a medição do nível de pressão sonora interno. A medição foi realizada com o equipamento posicionado no centro do auditório, durante 5 minutos.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

O presente tópico trata da descrição dos dados e discussão dos resultados obtidos a partir da análise do comportamento acústico do auditório estudado.

5.1.1 Som residual

Analisou-se o som residual do auditório estando o ambiente vazio, ou seja, fora do horário de aulas. A análise demonstra resultados próximos ao limite estabelecido em norma.

O som residual medido dentro do auditório é de 40,5 dB. Segundo a NBR 10.152 (ABNT, 2017) o valor recomendado para auditórios, salas de conferência e de uso múltiplo, está fixado em 35 dB(A) e 40 dB (A) o nível máximo. A tabela 3 apresenta o ruído residual em bandas de 1/3 oitavas.

Tabela 3 – Som residual (NC).

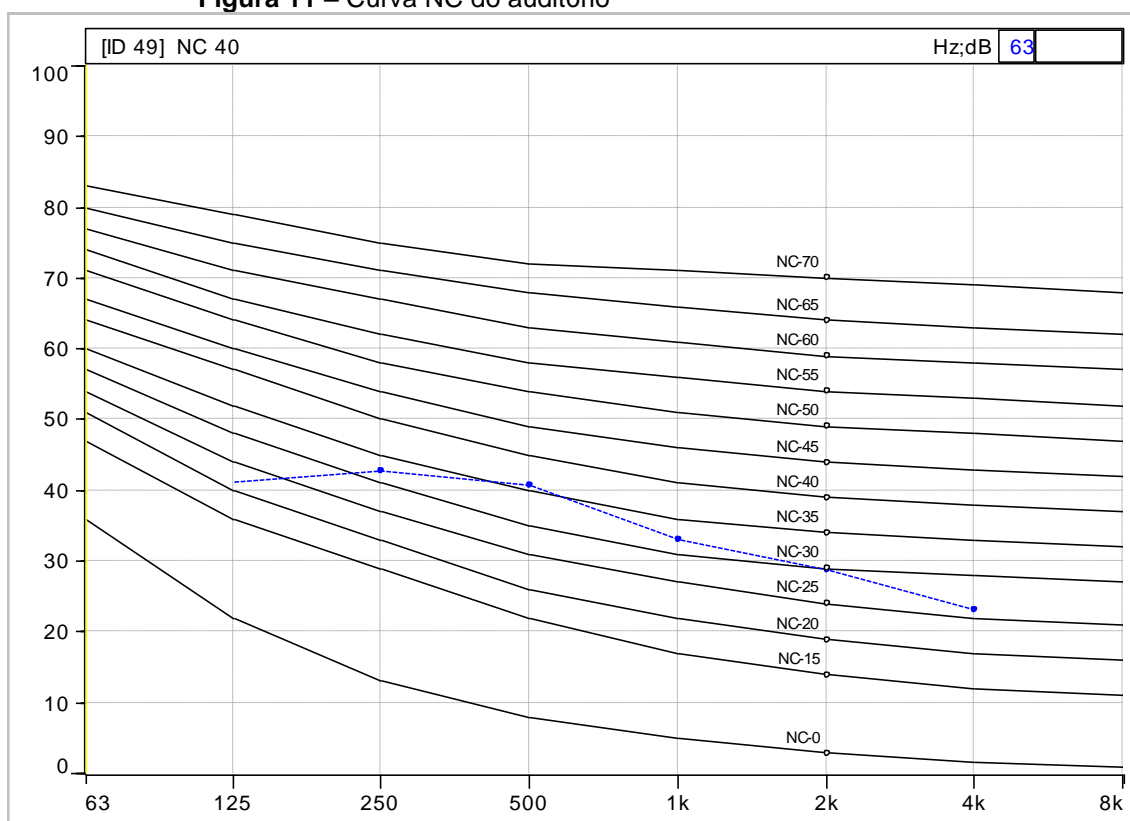
HZ	dB
100	36,4
125	35,7
160	37,0
200	37,0
250	38,5
315	38,5
400	38,7
500	34,6
630	31,9
800	30,2
1000	27,3
1250	25,7
1600	23,8
2000	25,0
2500	22,4
3150	19,5
4000	17,8
5000	16,8
6300	14,6
8000	11,8
Global *	40,5

Fonte: Autor, 2019

5.1.2 Noise Criteria

O índice NC medido no auditório está apresentado na figura 11, a curva correspondente ao NC - 40. Segundo a NBR 10.152 (ABNT, 2017) o valor recomendado do NC para auditórios pequenos (volume $\leq 600 \text{ m}^3$), o NC é de 30 dB(A). Os níveis superiores aos estabelecidos pela norma são considerados causadores de desconforto, sem necessariamente implicar em risco de danos à saúde. Este valor de NC encontrado na medição (NC-40) demonstra que o auditório não se encontra com conforto ótimo.

Figura 11 – Curva NC do auditório



Fonte: Autor, 2019

5.2 Tempo de reverberação

Os resultados das medidas do TR estão apresentados na tabela 4, o experimento foi realizado com a sala desocupada, de modo que foram executadas 5 medições em cada um dos 3 pontos distintos. O tempo de reverberação médio para a frequência de 500 Hz observado foi de 0,85 segundos com desvio padrão médio de 0,08. De acordo com a NBR 12.179 (ABNT,1992), esse valor está levemente abaixo do especificado (1s) a 500Hz.

Tabela 4 – Tempo de reverberação medidos

(HZ)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Média	DPM
125	1,03	1,77	1,11	0,99	1,09	0,25	0,91	1,06	1,05	1,12	1	0,83	1,01	0,95	0,98	1,01	0,29
160	1,18	1,74	1	1,21	1,09	1,27	1,16	1,21	1,21	1,01	1,04	1,18	1,1	1,62	1,23	1,22	0,20
200	1,5	1,57	1,55	1,77	1,05	1,55	1,38	1,22	1,67	1,63	1,45	0,97	1,82	1,45	1,21	1,45	0,24
250	1,65	1,47	1,5	1,56	1,04	1,46	1,55	1,37	1,47	1,71	1,6	1,48	1,62	1,35	1,5	1,49	0,15
315	1,36	1,11	1,42	1,17	1,02	1,24	1,31	1,28	1,09	1,4	1,13	0,88	1,29	1,23	1,17	1,21	0,14
400	1,13	0,97	1,2	1,01	1,09	1,06	0,96	1,12	1,11	1,03	1,12	0,94	0,98	0,97	0,96	1,04	0,08
500	0,84	0,81	1,02	0,8	0,9	0,85	0,9	0,83	0,75	0,98	0,88	0,9	0,84	0,75	0,77	0,85	0,08
630	0,71	0,81	0,89	0,82	0,77	0,79	0,79	0,83	0,72	0,83	0,87	0,78	0,83	0,71	0,74	0,79	0,05
800	0,64	0,7	0,75	0,82	0,71	0,66	0,59	0,81	0,75	0,66	0,74	0,66	0,73	0,66	0,78	0,71	0,06
1 k	0,52	0,78	0,75	0,65	0,74	0,9	0,52	0,85	0,68	0,71	0,87	0,8	0,99	0,84	0,84	0,76	0,13
1.25 k	0,82	1,1	0,95	0,96	0,77	0,8	1,13	0,88	0,88	0,69	0,98	0,73	1,04	0,89	0,89	0,90	0,12
1.6 k	0,8	1,06	1,02	1,04	0,87	1,0	1,0	1,1	0,93	1,12	1,19	0,99	1,16	1,2	1,33	1,05	0,13
2 k	0,99	1,12	1,33	1,15	1,02	1,22	1,05	1,17	1,19	1,02	1,23	1,11	1,23	1,39	1,23	1,16	0,11
2.5 k	1,09	1,16	1,3	1,33	1,32	1,25	1,02	1,22	0,94	1,27	1,37	1,32	1,34	1,29	1,25	1,23	0,12
3.15 k	1,31	1,37	1,37	1,48	1,36	1,21	1,33	1,18	1,24	1,34	1,52	1,31	1,5	1,41	1,41	1,36	0,10
4 k	1,33	1,51	1,44	1,59	1,32	1,3	1,29	1,43	1,35	1,59	1,66	1,66	1,73	1,56	1,57	1,49	0,14
5 k	1,26	1,36	1,44	1,38	1,48	1,42	1,45	1,14	1,56	1,43	1,68	1,58	1,78	1,75	1,7	1,49	0,18
6.3 k	1,08	1,2	1,24	1,31	1,15	1,16	1,17	1,26	1,09	1,22	1,43	1,32	1,43	1,43	1,4	1,26	0,12
8 k	0,82	0,96	1,05	0,99	1,05	0,87	0,89	0,97	0,8	1,05	1,13	1,11	1,08	1,15	1,16	1,01	0,11
10 k	0,55	0,77	0,77	0,77	0,64	0,66	0,63	0,75	0,73	0,73	0,89	0,81	0,93	0,75	0,74	0,74	0,09
12.5 k	0,49	0,58	0,63	0,55	0,55	0,55	0,51	0,52	0,55	0,52	0,66	0,6	0,57	0,61	0,61	0,57	0,05
16 k	0,43	0,64	0,78	0,53	0,54	0,72	0,88	0,34	0,58	0,41	0,92	0,77	0,34	0,37	0,73	0,60	0,19
20 k	0,16	0,2	0,19	0,23	0,34	0,12	0,23	0,17	0,1	0,14	0,11	0,06	0,14	0,33	0,16	0,18	0,08

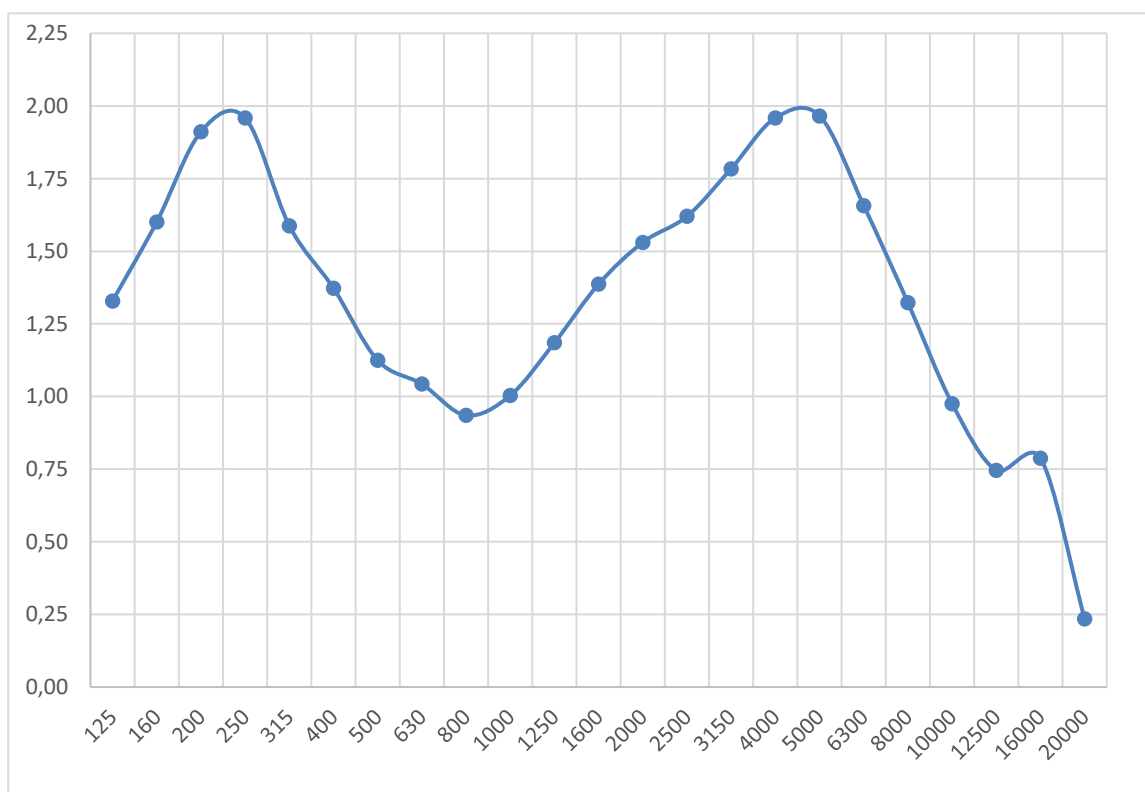
Fonte: Autor, 2019

As frequências abaixo de 125Hz foram desprezadas pelo excessivo desvio padrão, tornando o teste inconclusivo nessas frequências.

5.3 Coloração da reverberação

A Figura 12 apresenta a coloração da reverberação do auditório, com as faixas de frequência em função da variação do tempo do RT(60).

Figura 12 – Gráfico da coloração do auditório



Fonte: Autor, 2019

Perante o analisado, verifica-se que inteligibilidade da fala no auditório está sendo afetada. Em uma coloração normal, a frequência de 250Hz estaria se aproximando a 110%, porém encontra-se em 165%, condição inaceitável.

Nas métricas de coloração os sons denominados agudos (entre 2000Hz e 20000 Hz), encontram-se normais abaixo de 100%, chegando à mínima de 40% em 20000Hz. Comparando a figura 12 acima com os parâmetros indicados de coloração apresentados na figura 5 percebe-se uma característica muito diferente do esperado. Após 1000Hz, o tempo de reverberação deveria passar a diminuir,

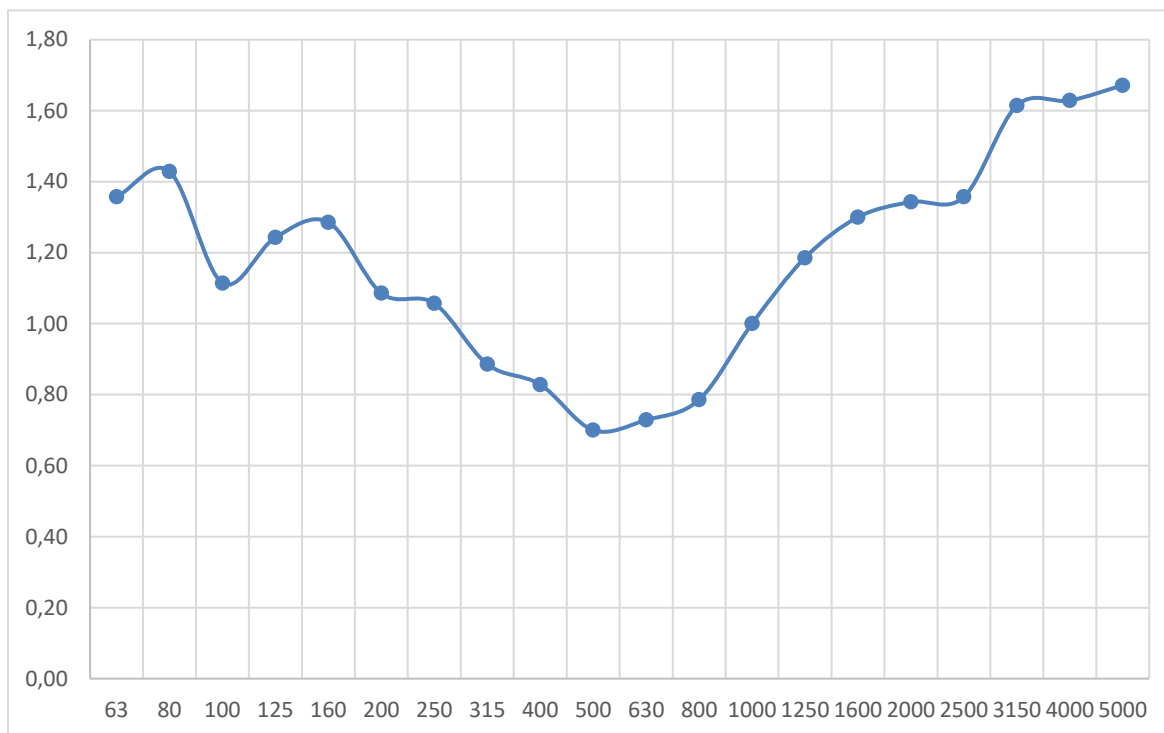
se localizando abaixo de 100%, porém percebe-se um comportamento oposto, após os 1000Hz o tempo de reverberação passa a subir.

Medições feitas em duas outras salas do campus foram utilizadas com intuito de identificar similaridades nas características da coloração da reverberação. A tabela 5 exibe os valores medidos na sala 131, representados na figura 13 e a tabela 6 expõe os valores medidos na sala 134, representados em gráfico na figura 14.

Tabela 5 – Medição sala 131.

Frequência (Hz)	RT60(s)	Porcentagem RT60
63	0,95	1,36
80	1,00	1,43
100	0,78	1,11
125	0,87	1,24
160	0,9	1,29
200	0,76	1,09
250	0,74	1,06
315	0,62	0,89
400	0,58	0,83
500	0,49	0,70
630	0,51	0,73
800	0,55	0,79
1000	0,70	1,00
1250	0,83	1,19
1600	0,91	1,30
2000	0,94	1,34
2500	0,95	1,36
3150	1,13	1,61
4000	1,14	1,63
5000	1,17	1,67

Fonte: Autor, 2019

Figura 13 – Gráfico da coloração da sala 131

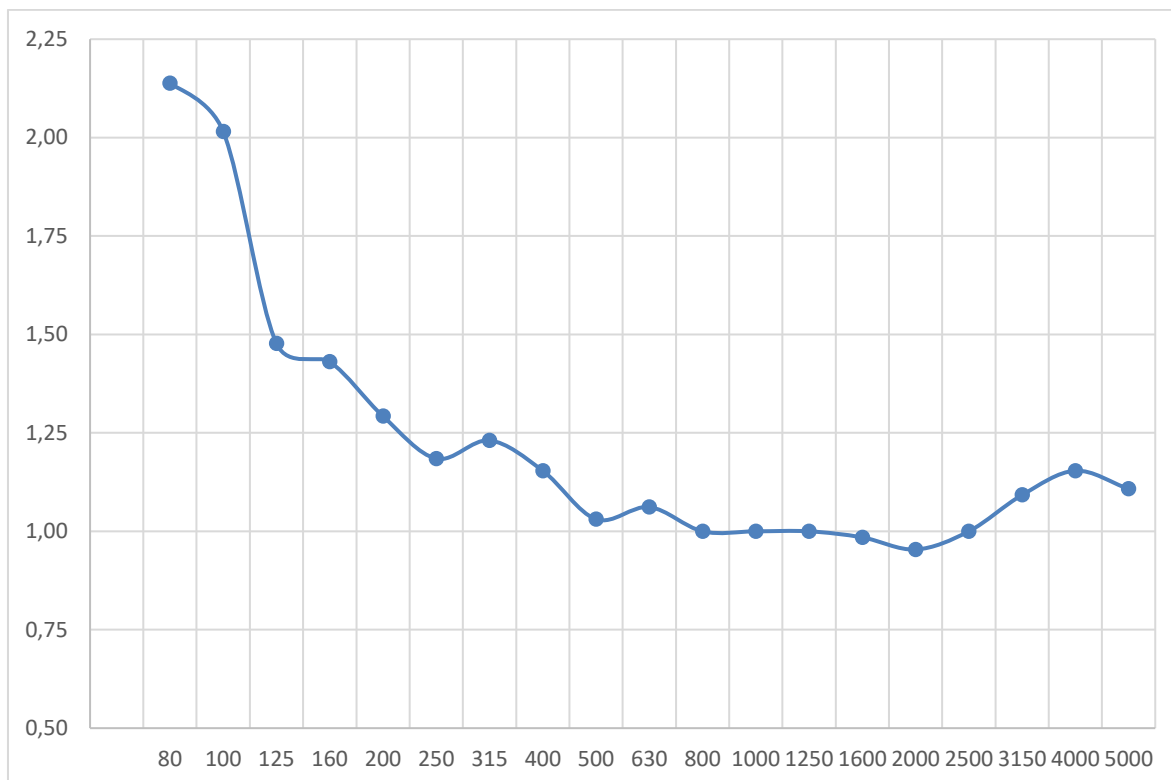
Fonte: Autor, 2019

Tabela 6 – Medição sala 134.

Frequência (Hz)	RT60(s)	Porcentagem RT60
80	1,39	2,14
100	1,31	2,02
125	0,96	1,48
160	0,93	1,43
200	0,84	1,29
250	0,77	1,18
315	0,80	1,23
400	0,75	1,15
500	0,67	1,03
630	0,69	1,06
800	0,65	1,00
1000	0,65	1,00
1250	0,65	1,00
1600	0,64	0,98
2000	0,62	0,95
2500	0,65	1,00
3150	0,71	1,09
4000	0,75	1,15
5000	0,72	1,11

Fonte: Autor, 2019

Figura 14 – Gráfico da coloração da sala 134



Fonte: Autor, 2019

No gráfico da sala 131, as mesmas propriedades no tempo de reverberação nas frequências acima de 1000Hz são notadas. Indicando que a sala 131 também se encontra em condições de coloração de reverberação consideradas inaceitáveis. No gráfico apresentado (figura 14), apesar da coloração não subir agudamente nas frequências altas ele apresenta similaridade em suas características, uma vez que a coloração não decai após 1000Hz, se mantendo constante e aumentando em torno de 2500Hz, sendo que deveria estar diminuindo. Portanto nota-se falta de absorção necessária para que as colorações sejam normais nessas frequências nas três salas.

5.4 Proposta de adequação acústica

O presente tópico trata da discussão dos resultados obtidos a partir da análise do comportamento acústico do auditório estudado. Além do diagnóstico da situação atual fez-se necessário uma proposta de adequações para a melhoria da qualidade acústica do ambiente. Juntamente as especificações de materiais e alterações estruturais que realizem o tratamento acústico do auditório.

Para melhorar a condição de conforto acústico do auditório se propõe a adição de componentes acústicos absorventes em suas paredes. Como o tempo de reverberação em 500Hz já está baixo, prioriza-se materiais que possuam maiores coeficientes de absorção sonora em frequências acima desta.

A Placa acústica SONEX illtec, semi-rígida, de estrutura micro-celular é uma solução, pois sua capacidade de absorção sobe à medida que o som se torna agudo. A tabela 7 apresenta seus coeficientes de absorção.

Tabela 7 – Coeficientes de absorção sonora SONEX illtec

Espessura (mm)	Frequência (Hz)			
	250	500	1000	2000
25/35	0,11	0,34	0,61	0,75
35/125	0,17	0,52	0,74	0,87
50/125	0,23	0,66	0,84	0,97
75/125	0,46	0,92	0,98	1,02

Fonte: <http://www.owa.com.br/produtos/placas-acusticas-sonex-illtec/placa-acustica-sonex-illtec-forro-revestimento-acustico-plano.html>

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O NC avaliado do auditório, se encontra dentro dos limites toleráveis segundo a NBR 10.152 (ABNT, 2017). No caso de atividades ruidosas serem desenvolvidas em espaços adjacentes, o limite será excedido.

Foi constatado que o tempo de reverberação apresenta um valor satisfatório para a frequência de 500 Hz, apesar de inferior do nível ótimo estabelecido na NBR12.179 (ABNT, 1992).

Ao analisar a coloração da reverberação foi verificado grande discrepância em relação aos valores sugeridos por Sabine para frequências elevadas. Portanto, apesar do tempo de reverberação em 500 Hz estarem satisfatórios, possibilitando uma boa inteligibilidade, a medição provou a existência de materiais reflexivos em bandas elevadas, tornando excessiva essa propriedade que se encontra em níveis considerados inaceitáveis.

Nota-se então que, apesar do tempo de reverberação em 500 Hz estar de acordo com a norma NBR 10152(2017), não é garantido um pleno conforto acústico, verificou-se que decaimento sonoro em outras frequências pode apresentar características consideradas ruins, causando desconfortos ou má desempenho acústico do ambiente.

Nesse contexto foi proposto a adição de material acústico que amenizasse esses problemas, levando em consideração a facilidade do produto em ser encontrado no mercado, seu custo e facilidade de instalação.

Este trabalho pretende chamar atenção à problemática da acústica em instituições de ensino. No Brasil as normas não são específicas e suficientemente eficazes quanto à elaboração de projetos e métricas de qualidade em salas de aulas, gerando consequências ruins ao desenvolvimento socioeconômico do país.

A necessidade de adoção de métodos de elaboração de projeto de tratamento e condicionamento acústico de forma sincronizada com a elaboração do projeto é extremamente importante, dado que corrigir os problemas em

edificações concebidas é muito mais oneroso do que na etapa de projeto.

6.2 Sugestões para pesquisas futuras

Sugere-se para o desenvolvimento de futuros trabalhos:

- Analisar materiais comuns presentes nas salas de aula;
- Estudar os demais parâmetros não tratados desse trabalho (Definição, Clareza e STI) a fim de avaliar a inteligibilidade da fala;
- Verificar qual material é responsável pela reflexão das altas frequências;
- Propor solução para os problemas encontrados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.152: Níveis de ruído para conforto acústico**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.152: **Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.179: **Tratamento acústico em recintos fechado**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL. **Associação Brasileira do Drywall**. Disponível em: www.drywall.org.br/. Acesso em: 22 jun. 2019.

BERAMEK, Leo L. *et al.* **Vibration control engineering principles and applications**. Second edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto de modelagem**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2016.

BRUEL & KJAER. Measurements in Building Acoustics. Disponível em: <http://www.bk.dk> Acesso em: 17 jun. 2019.

CARVALHO, Régio Paniago. **Acústica arquitetônica**. 2. ed. Brasília: Thesaurus Editora de Brasília LTDA, 2010.

COSTA, Ennio Cruz da. **Acústica Técnica**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2003.

EGAN, M. David. **Architectural Acoustics**. New York: J. Ross, 2007.

FERREIRA, A. M. C. **Avaliação do conforto acústico em salas de aula: estudo de caso na Universidade Federal do Paraná**. 2006. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

GONÇALVES, Pedro Henrique. Avaliação da percepção acústica das salas de aulas em escolas públicas na cidade de Anápolis. **Revista Mirante**, Anápolis, v. 8, n. 3, p. 18, dez. 2015.

GARAVELLI, Sérgio Luiz. *et al.* Avaliação dos ruídos ambientais em escolas do Distrito Federal. Artigo. 2018. 10 p. Centro de Ensino Unificado de Brasília, Campus Taguatinga. XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Porto Alegre, 2018. **Anais** Porto Alegre, 2018.

JAROSZEWSKI, Graziela Cambruzzi. *et al.* Ruído escolar e sua implicação na atividade de ditado. **CEFAC**, São Paulo, v. 9, p. 90, jan-mar, 2007.

LONG, Marshall. **Architectural Acoustics**. 2. ed. LONDON: Elsevier Inc, 2014

MACIEL, M.A.; TRENTIN, A.R.; CAMARGO, T.H.C..Parâmetros para reabilitação

acústica bioclimática de projetos escolares. **Acústica e vibrações**, v.48, 2016.

MENEZES, Rafael Cardoso. **Análise acústica de um estúdio musical**. Estudo de caso. 2018 p.56 Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2018.

RABELO, Alessandra Terra Vasconcelos *et. al.* **Efeito das característica acústicas de salas de aula na inteligibilidade de fala dos estudantes**. 2014. Departamento de Fonoaudiologia e Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2014.

SOUZA, Léa Cristina Lucas de. *et al.* **Bê-á-bá da acústica arquitetônica**: ouvindo a Arquitetura. 4. ed. São Carlos: AduFSCar, 2012.

VALLE, Sólton do. **Manuel prático de acústica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Musica & Tecnologia, 2009.

APÊNDICE A - Medições

