

# Avaliação acústica de uma sala de aula do curso de Engenharia de Produção na FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz.

## **Cleyton Warlen Nieiro Cruz**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ.

## **Raylson Serafim Teixeira**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ.

## **Harerton Oliveira Dourado**

Professor do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ.

## **RESUMO**

O presente trabalho analisou as propriedades acústicas de uma sala do curso de Engenharia de Produção da FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz. A sala escolhida é caracterizada por possuir paredes em gesso acartonado e revestimento do teto com forros de lã de vidro. As propriedades acústicas foram calculadas a partir da resposta impulsiva da sala, obtida através do método de varredura logarítmicas de frequência. Adicionalmente, o tempo de reverberação também foi calculado através da equação de Sabine. Os resultados mostraram que a acústica da sala analisada está adequada à utilização como sala de aula, uma provável contribuição dos materiais utilizados em seu revestimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** acústica, sala de aula, tempo de reverberação.

## **1 – INTRODUÇÃO**

A acústica de uma sala de aula influencia diretamente no aprendizado dos alunos. Sodsri (2013) afirma que a acústica de salas não deve ser desprezada, uma vez que ela influencia a habilidade dos alunos em ouvir e entender o que é falado durante as aulas. A acústica de ambientes pode ser caracterizadas por uma série de propriedades, das quais a mais comum é o tempo de reverberação ( $RT_{60}$ ), que pode ser medido ou calculado. Entretanto, Svensson e Nilsson (2008), afirmam que somente o tempo de reverberação não é suficiente para atestar a qualidade da acústica de um ambiente, sendo assim, outros parâmetros como a clareza de fala ( $C_{50}$ ) a definição de fala ( $D_{50}$ ), os tempos de reverberação baseados em diferentes partes da curva de decaimento sonoro ( $EDT$ ,  $T_{20}$  e  $T_{30}$ ) podem fornecer maiores detalhes do desempenho acústico de um ambiente.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é analisar as propriedades acústicas de uma sala do curso de Engenharia de Produção da FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz. A sala escolhida é caracterizada por possuir paredes em gesso acartonado e revestimento do teto com forros de lã de vidro.

## **2 –REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO**

O tempo de reverberação ( $RT_{60}$ ) é definido como sendo o intervalo de tempo (em segundos) que a densidade de energia leva para decair 1 milionésimo da densidade de energia de estado estacionário, ou 60dB. Wallace Clement Sabine (1868-1919) formulou a mais utilizada equação para o cálculo de  $RT_{60}$ , com base nas dimensões de um ambiente e na capacidade de absorção do material utilizado no revestimento das paredes (Equação 1):

$$RT_{60} = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

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

A = Absorção total do ambiente (sabines).

A absorção total (A) de som de um ambiente é a soma de todas as absorções parciais dos diferentes materiais utilizados no revestimento das paredes do ambiente, sendo obtido pelo produto da área revestida pelo coeficiente de absorção do material (Equação 2):

$$A = \sum_{1}^{n} s_n a_n \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$s_n$  = superfície revestida pelo n-ésimo material;

$a_n$  = coeficiente de absorção do n-ésimo material.

O coeficiente de absorção é obtido experimentalmente, e amplamente disponível na literatura, para diversos materiais, como por exemplo em Valle (2007) e Everest e Pohlmann (2014).

O tempo de reverberação também pode ser determinado medindo-se o tempo em que o nível sonoro decai em 60 dB a partir de cessada a sua emissão. Este procedimento, entretanto, não é prático, uma vez que os níveis sonoros mais baixos podem ser mascarados pelo ruído de fundo do ambiente, de maneira que um procedimento usual é obter uma estimativa do tempo de reverberação com base na extrapolação do decaimento sonoro nos primeiros 20 ou 30 dB (EVEREST; POHLMANN, 2014). Quando assim determinado, o tempo de reverberação é denominado  $T_{20}$  e  $T_{30}$ , respectivamente.

Como a percepção do tempo de reverberação está bastante associado ao comportamento do decaimento sonoro em seus instantes iniciais (BRANDAO, 2016), também é utilizada a estimativa de  $RT_{60}$  com base no decaimento sonoro nos primeiros 10 dB, sendo o resultado obtido da extrapolação para 60 dB chamado de tempo de decaimento inicial, ou *early decay time* (EDT).

No Brasil, a norma NBR 12179 – Tratamento Acústico em Recintos Fechados (ABNT, 1992), especifica o tempo ideal de reverberação, em função do volume dos ambientes e as atividades neles desenvolvidas, porém não apresenta informações para salas de aulas. SEEP et al., (2000) indica que apesar de recomendações para que o tempo de reverberação em salas de aula esteja na faixa de 0,4 a 0,6 segundos, o tempo máximo de reverberação para se atingir a inteligibilidade verbal numa sala de aula típica é de 0,5 segundos.

## 2.2 – CLAREZA E DEFINIÇÃO

Outros parâmetros utilizados para a caracterização da acústica de ambientes são a clareza e a definição. A clareza é definida como uma razão entre a energia do trecho inicial do som e a energia do som reverberante, razão expressa em dB e está relacionado à inteligibilidade das articulações dos sons (BRUM, 2012). É denominado  $C_{50}$  quando o trecho inicial do som compõe os primeiros 50 ms, ou  $C_{80}$ , quando se refere aos primeiros 80 ms – em geral,  $C_{50}$  é aplicado para o estudo da inteligibilidade da palavra falada e  $C_{80}$ , para inteligibilidade da música. O cálculo da clareza se dá pela Equação 3:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_{t=0}^{50} p^{-2}(t) dt}{\int_{t=50}^{\infty} p^{-2}(t) dt} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$p$  = Pressão sonora média.

Valores superiores a 0 dB indicam uma ótima inteligibilidade de fala. Em sala muitos reverberantes, valores superiores a -5 dB já são aceitáveis para boa inteligibilidade.

A Definição (D50) baseia-se na característica da audição na qual reflexões atingem o ouvinte um intervalo de tempo de até 50 ms após a chegada do som direto, são consideradas “reflexões úteis”, no sentido de que se somam ao som direto, contribuindo para a audibilidade do som sem efeitos colaterais negativos (BALLOU, 2013). Por outro lado, reflexões mais tardias são percebidas subjetivamente como efeitos prejudiciais introduzidos pela sala, que se manifestam como reverberação e, no caso de reflexões isoladas, como ecos.

A Definição é calculada pela Equação 4:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{3000} p^2(t) dt} \times 100\% \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$p$  = Pressão sonora média

### 3 – METODOLOGIA DO TRABALHO OU DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 – SALA ESTUDADA

Foi analisada uma sala da FAACZ (Faculdades Integradas de Aracruz) com as características expressas no Quadro 1.

#### **Quadro 1:** características da sala de aula estudada

Dimensões (comprimento x largura x altura) (m)	8,6 x 6,8 x 3
Volume (m <sup>3</sup> )	175,44
Porta (altura x largura) (m)	2,1 x 0,9
Janela (largura x altura x distância do chão) (m)	5,9 x 1,3 x 0,9
Quantidade de cadeiras	40

A sala analisada foi escolhida por possuir revestimento com painéis de lã de vidro no teto e paredes de gesso acartonado, materiais que, possivelmente contribuirão para o controle do tempo de reverberação da sala.

#### 3.2 – CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (RT<sub>60</sub>)

O tempo de reverberação (RT<sub>60</sub>) foi calculado com base na Equação 1, com base nas propriedades acústicas dos materiais utilizados nas paredes da sala, mostradas na Tabela 1. Tanto o tempo de reverberação quanto os coeficientes de absorção dos materiais utilizados como revestimento são expressos para diferentes frequências em intervalos de oitava (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz e 4 000 Hz). Os valores do coeficiente de absorção para os diferentes materiais foram obtidos de Valle (2007).

#### 3.3 – MEDIÇÕES ACÚSTICAS

Os parâmetros acústicos (RT<sub>60</sub>, T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub>, EDT, C<sub>50</sub> e D<sub>50</sub>) foram calculados pelo programa Aurora, módulo instalado no programa Audacity, com base na resposta impulsiva do sistema. A resposta impulsiva do sistema foi calculada pelo programa RoomEqWizard, com base na medição da varredura de frequência. Todos os programas utilizados são gratuitos e disponíveis na internet.

Para captura da varredura do sistema foi utilizado um microfone Behringer ECM8000, conectado à uma interface de áudio Focusrite Scarlett que, por sua vez estava conectada à um computador portátil. Uma

caixa de som amplificada foi utilizada para a reprodução do sinal de varredura de frequência. Foram realizadas medições em três pontos distintos da sala. Os valores dos parâmetros acústicos correspondem à média dos resultados obtidos em cada ponto de medição.

Tabela 1: área e características de absorção dos materiais de revestimento das paredes da sala avaliada.

Estrutura	Área (m <sup>2</sup> )	Índice total de absorção para cada frequência					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
Piso de concreto	55,04	0,5504	0,5504	0,8256	1,1008	1,1008	1,1008
Parede lisa pintada	17,31	2,4234	1,731	1,0386	0,8655	0,6924	0,5193
Paredes laterais	51,60	7,224	5,16	3,096	2,58	2,064	1,548
Parede lisa pintada	11,53	1,6142	1,153	0,6918	0,5765	0,4612	0,3459
Teto de lã de vidro 50mm	55,04	8,256	38,528	52,288	55,04	55,04	55,04
Porta	1,89	0,2835	0,2079	0,189	0,1323	0,1134	0,1323
Vidro	7,67	2,6845	1,9175	1,3806	0,9204	0,5369	0,3068
Pessoas	3	0,84	1,11	1,26	1,38	1,53	1,5
Ar						0,002137	0,006689
<b>Total</b>		<b>23,876</b>	<b>50,358</b>	<b>60,770</b>	<b>62,596</b>	<b>61,541</b>	<b>60,500</b>

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

### 4.1 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação calculado pela equação de Sabine (Equação 1), para a faixa de frequência de 500 Hz foi de 0,46 s, portanto, dentro da faixa recomendada para sala de conferências conforme a NBR 12179 (ABNT, 1992). Esse resultado é influenciado pelos materiais utilizados nos revestimentos das superfícies das paredes, com destaque para o forro de lã de vidro – material com alta absorção acústica. Os valores para as demais faixas de frequência são mostrados na Tabela 2. Destaca-se o valor predito para a faixa de 125 Hz (1,18 s). Apesar de que a voz humana não possui muita energia nesta faixa, equipamentos que emitam som nesta faixa (ex.: aparelhos de ar condicionado), poderão causar incômodo devido ao maior tempo de decaimento.

Tabela 2: tempo de reverberação calculado pela equação de Sabine.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>RT<sub>60</sub> (s)</b>	1,18	0,56	0,46	0,45	0,46	0,46

### 4.2 – PARÂMETROS ACÚSTICOS

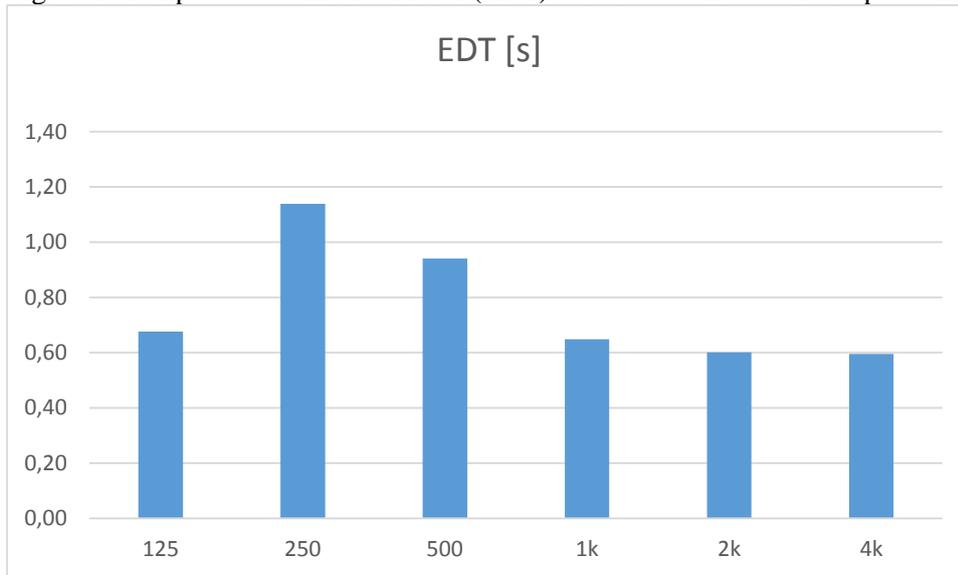
Os valores para os parâmetros acústicos calculados com base na resposta impulsiva da sala são mostrados nas figuras XX a XX. Os resultados são apresentados para intervalos de oitava para as seguintes faixas de frequência: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz.

#### 4.2.1 – Tempo de reverberação

A Figura 1 apresenta os dados para o tempo reverberação estimado com base no decaimento inicial (EDT). Observando os resultados destaca-se que os valores observados são superiores ao previsto pela equação de Sabine. A faixa de frequência com maior EDT foi 250 Hz, seguida de 500 Hz, com valores em torno de 1 segundo. Esta faixa de frequência abrange as frequências fundamentais da voz humana, de maneira que os resultados obtidos podem corresponder a uma sensação de maior “volume” no som da voz, porém o valor

mais elevado para o decaimento pode prejudicar a inteligibilidade das frequências mais agudas, especialmente aquelas onde estão as consoantes.

Figura 1: Tempo de decaimento inicial (EDT) calculado com base na resposta impulsiva da sala



Os valores calculados para o tempo de reverberação considerando o intervalo inicial de 20 ms e 30 ms do decaimento da resposta impulsiva ( $T_{20}$  e  $T_{30}$ ) mostrados na figura 2 e na figura 3 apresentam comportamento semelhante para a distribuição de frequências, com os maiores valores observados nas frequências mais graves. Entretanto destaca-se os valores para a faixa de 125 Hz: o valor predito foi maior do que o observado a partir da resposta impulsiva da sala. Uma possível explicação para este fato pode ser que os pontos de medição da resposta impulsiva coincidisse com pontos de menor intensidade para esta faixa de frequências. Esta hipótese poderia ser comprovada com uma análise da distribuição das frequências modais da sala, o que não foi objeto do presente trabalho. Todavia, a análise dos resultados para o tempo de reverberação indica a necessidade de condicionamento acústico para as faixas de frequências inferiores à 500 Hz.

Figura 2: tempo de reverberação com base no decaimento dos primeiros 20 ms da resposta impulsiva da sala.

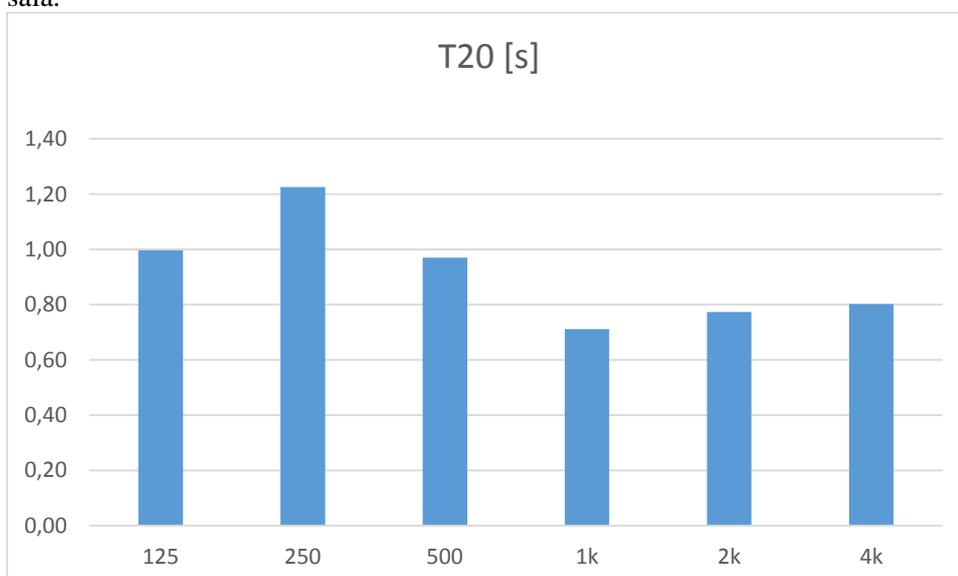
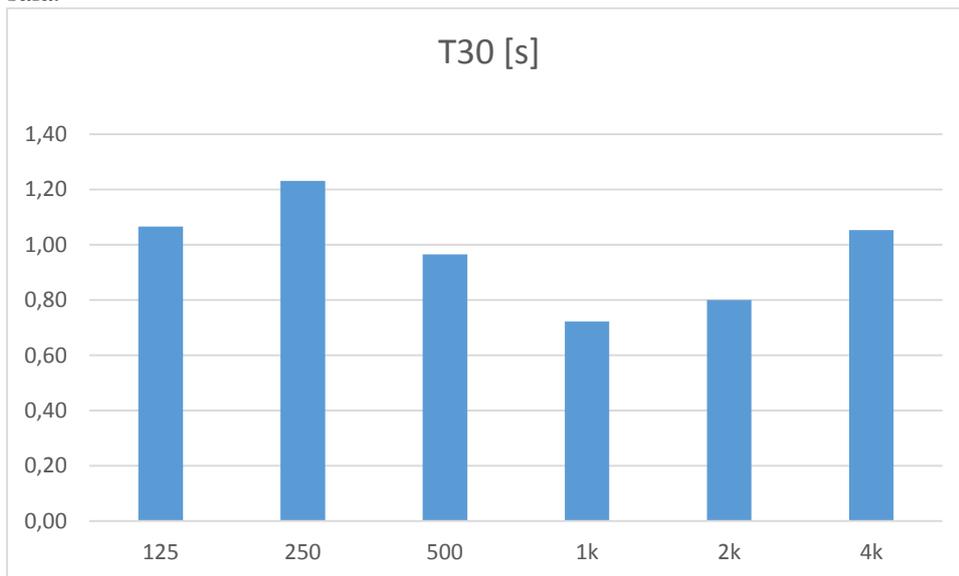


Figura 3: tempo de reverberação com base no decaimento dos primeiros 30 ms da resposta impulsiva da sala.

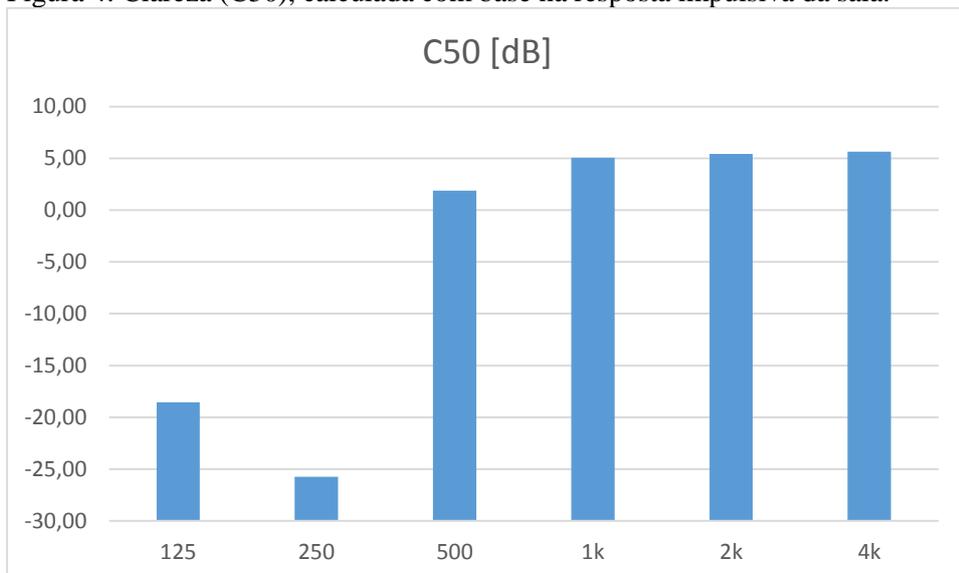


#### 4.2.2 – Clareza e definição de voz

As figuras 4 e 5 apresentam os resultados para a clareza e a definição (C50 e D50). Esses parâmetros são importantes, uma vez que estão ligados ao entendimento da palavra falada no ambiente avaliado.

Os resultados para C50 (Figura 4) mostram valores acima de 0 dB para as faixas acima de 500 Hz, com valores muito baixos para as faixas e 125 Hz e 250 Hz. Ballou (2013) afirma que valores de C50 acima de 0 dB indicam boa inteligibilidade de fala. Entretanto, os resultados para as faixas mais graves podem indicar a necessidade da realização de alguma medida de condicionamento acústico.

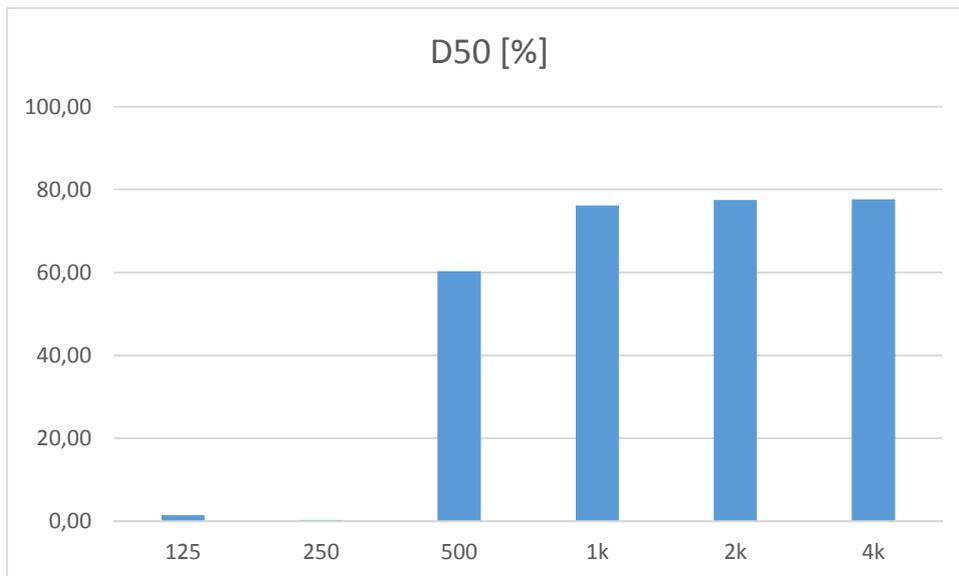
Figura 4: Clareza (C50), calculada com base na resposta impulsiva da sala.



Os valores obtidos para D50 (Figura 5) apresentam concordância com os resultados para C50, indicando valores acima de 50% para as faixas de 500, 1 000, 2 000 e 4 000 Hz. Ballou (2013) indica que valores

acima de 50% são adequados. Mais uma vez chama a atenção os resultados para as faixas de 125 e 250 Hz, indicando a possível necessidade de condicionamento acústico.

Figura 5: Definição (D50), calculada com base na resposta impulsiva da sala.



## 5 –CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou as propriedades acústicas de uma sala do curso de Engenharia de Produção da FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz. As propriedades acústicas foram calculadas a partir da resposta impulsiva da sala, obtida através do método de varredura logarítmicas de frequência. Adicionalmente, o tempo de reverberação também foi calculado através da equação de Sabine.

Os resultados para o tempo de reverberação calculado pela Equação de Sabine apresentaram concordância com os resultados para o tempo de reverberação obtido a partir da resposta impulsiva da sala, com exceção do resultado previsto para a faixa de 125 Hz, onde a equação de Sabine estimou um tempo maior, possivelmente devido ao posicionamento do microfone quando da captura de dados para o cálculo a resposta impulsiva da sala.

Os resultados para clareza e definição mostram que o ambiente estudado é adequado à utilização como sala de aula, apresentando valores adequados para C50 e D50 para as faixas de 500 Hz e acima. Entretanto, os resultados obtidos para as faixas de 125 e 250 Hz indicam baixa inteligibilidade nessas faixas.

Os resultados obtidos indicam que a utilização de materiais de revestimentos com alto valor de absorção colabora com a adequação do ambiente para a utilização como sala de aula, entretanto, atenção deve ser dada às faixas de frequências inferiores à 500 Hz, especialmente pelo fato da utilização de um aparelho de ar condicionado, cujo ruído é composto por frequências mais graves.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização da análise das frequências modais do ambiente, bem como a realização de simulações numéricas para possibilitar a visualização dos padrões de propagação das diversas frequências no ambiente. Além disso, propõe-se também a comparação com os resultados da avaliação acústica de uma sala onde não tenham sido utilizados materiais com alto coeficiente de absorção acústica.

## 6 – REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Tratamento acústico em recintos fechados: NBR 12179**. [s.l.] ABNT, 1992.

BALLOU, G. **Handbook for Sound Engineers**. [s.l.] Focal Press, 2013.

BRANDAO, E. **Acústica de Salas: Projeto e Modelagem**. [s.l.] EDGARD BLUCHER, 2016.

BRUM, C. M. **Simulação acústica de salas de aula em escolas de educação básica: uma proposta tipológica para prática musical**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. **Master Handbook of Acoustics, Sixth Edition**. [s.l.] McGraw-Hill Education TAB, 2014.

SEEP, B. et al. **Classroom Acoustics: A Resource for Creating Environments with Desirable Listening Conditions**. Acoustical Society of America, Suite 1N01, 2 Huntington Quadrangle, Melville, NY 11747; Tel: 516-576-2360; Fax: 516-576-2377; e-mail: asa@aip.org; Web site: <http://asa.aip.org>, , 2000.

SODSRI, C. A Study of Classroom Acoustics and Its Effects of Listeners' Locations on Speech Intelligibility. **ECTI TRANSACTIONS ON COMPUTER AND INFORMATION TECHNOLOGY**, v. 7, n. 1, 2013.

SVENSSON, C.; NILSSON, E. Optimum Room Acoustic Comfort [TM] (RAC [TM]) can be achieved by using a selection of appropriate acoustic descriptors. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 123, n. 5, p. 3498–3498, maio 2008.

VALLE, S. DO. **Manual Prático de Acústica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2007.