

Experimental study of the layout of sound absorption materials in a classroom

Estudo experimental do leiaute de disposição dos materiais de absorção sonora em uma sala de aula

Article Info:

Article history: Received 2022-10-30 / Accepted 2022-12-02 / Available online 2022-12-02

doi: 10.18540/jcecv18iss10pp14858-01e



Leandro Neves de Assis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5874-2021>

Universidade Federal de Goiás, Brazil

E-mail: leandroneves@discente.ufg.br

Leonardo Dornel de Mello

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8824-5843>

Universidade Federal de Goiás, Brazil

E-mail: dornel@discente.ufg.br

Marlipe Garcia Fagundes Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5061-0665>

Universidade Federal de Goiás, Brazil

E-mail: marlipe@ufg.br

Resumo

O seguinte trabalho tem como objetivo geral investigar a disposição dos materiais de absorção sonora em salas de aula, através dos parâmetros acústicos obtidos. As salas de aula têm como função a promoção da aprendizagem através da comunicação oral e da audição. Assim, uma das principais propriedades físicas que determinam o sucesso desta função é a qualidade acústica das salas de aula. A inteligibilidade da fala é um dos parâmetros mais relevantes e pode ser melhorado minimizando o ruído e reduzindo a reverberação. Uma tática para diminuir a reverberação de uma sala é o amortecimento das ondas sonoras, utilizando materiais absorventes como: cadeiras acolchoadas, cortinas, carpetes e painéis de absorção sonora (PAS). No entanto, a influência do posicionamento dos elementos, principalmente dos PAS, é pouca estudada. Para a realização os experimentos das posições com as PAS, utilizamos o Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC), localizado na UFG. Baseado na ISO 3382-2 foram selecionados 2 e 3 pontos distintos para a fonte sonora e receptor, respectivamente, 5 configurações de quantidade de PAS e 3 posicionamentos dos PAS, resultando em um experimento fatorial completo geral com 4 fatores. Os testes foram feitos variando de zero a quatro PAS, sempre em diferentes posições. Os dados obtidos foram analisados pela técnica da análise de variância (ANOVA), almejando identificar os fatores mais significativos para o desempenho acústico do ambiente. Devido ao efeito dos PAS no amortecimento do som, espera-se que quanto maior quantidade de painéis, melhores serão os parâmetros acústicos. Além disso, a comparação dos leiautes quanto à disposição dos painéis, possibilitará a elucidação de quais posições melhorarão o tratamento acústico em salas de aula. Ao final, através da ANOVA será possível concluir que o desempenho acústico de uma sala de aula pode ser melhorado considerando outros fatores além da quantidade de PAS.

Palavras-chave: Acústica de salas. Leiaute. Tempo de reverberação. Planejamento experimental.

Abstract

The following work has the general objective of investigating the arrangement of sound absorption materials in classrooms, through the acoustic parameters obtained. Classrooms are designed to promote learning through oral communication and listening. Thus, one of the main physical properties that determine the success of this function is the acoustic quality of the classrooms. Speech intelligibility is one of the most relevant parameters and can be improved by minimizing noise and reducing reverberation. A tactic to reduce the reverberation of a room is to dampen sound waves, using absorbent materials such as: padded chairs, curtains, carpets and sound absorption panels (SAP). However, the influence of the positioning of the elements, mainly of the SAP, is little studied. To carry out the experiments on the positions with the SAP, we used the Laboratory of Applied Mechanics (LabMEC), located at UFG. Based on ISO 3382-2, 2 and 3 distinct points were selected for the sound source and receiver, respectively, 5 SAP amount settings and 3 SAP placements, resulting in an overall full factorial experiment with 4 factors. The tests were performed ranging from zero to four SAP, always in different positions. The data obtained were analyzed by the technique of analysis of variance (ANOVA), aiming to identify the most significant factors for the acoustic performance of the environment. Due to the effect of SAP on sound dampening, it is expected that the greater the number of plates, the better the acoustic parameters. In addition, the comparison of the layouts regarding the arrangement of the plates, will make it possible to elucidate which positions will improve the acoustic treatment in classrooms. In the end, through ANOVA it will be possible to conclude that the acoustic performance of a classroom can be improved considering other factors besides the number of SAP.

Keywords: Room acoustics. Layout. Reverberation time. Design of Experiments.

1. Introdução

Por se tratar de um elemento invisível, o som muitas vezes é negligenciado no desenvolvimento de projetos de engenharia e arquitetura. Desta forma, problemas acústicos são comuns em ambientes fechados. A acústica de salas é o estudo do som no interior do ambiente, não se preocupando com a transmissão do som para os ambientes adjacentes.

As salas de aula têm como função a promoção da aprendizagem, a qual é principalmente conseguida através da comunicação oral e da audição. Assim, uma das principais propriedades físicas que determinam o sucesso desta função é a acústica das salas de aula. Em situações de ensino, a inteligibilidade da fala é o parâmetro mais relevante. Este parâmetro é melhorado eliminando o ruído e reduzindo a reverberação.

Uma tática para diminuir a reverberação de uma sala é fazer o amortecimento utilizando materiais absorventes, como cadeiras acolchoadas, cortinas, carpete ou painéis dedicados para absorção de som. Além disso, a presença de pessoas em uma sala reduz a reverberação e, portanto, produz um valor de tempo de reverberação menor em comparação com a sala desocupada.

Existem estudos sobre a influência da quantidade e da localização do material de absorção sonora em acústica de salas. Mir e Abdou (2005) avaliaram os parâmetros acústicos provenientes do ruído de fundo ambiental e índices de inteligibilidade da fala, com a finalidade encontrar de um modelo ideal para as salas de aula inteligentes (uma nova geração de salas de aula de tecnologia elevada). Os pesquisadores realizaram testes de simulação de absorção das superfícies (auxiliados pelo programa ODEON 5.0®). A simulação de materiais acústicos para pisos, paredes e teto foi realizada para encontrar um tempo de reverberação entre 0,4 e 0,6s, conforme as recomendações da Sociedade Americana de Acústica (ASA - Acoustical Society of America) em Seep et al (2000), e, posteriormente pela norma ANSI S12.60 (2002). Os resultados apontaram que, uma melhoria na acústica da sala pode ser obtida transferindo parte da absorção do forro para as paredes, mantendo a região central do teto sem qualquer revestimento a fim de favorecer a reflexão da voz do professor na direção do fundo da sala (pois o teto, que absorve e reflete parcialmente, pode ser facilmente construído com uma grade de sustentação padrão). Assim, colocam-se os painéis acústicos ao redor

do perímetro do teto e as placas de gesso no centro da grade. Colocando-se materiais absorventes nas paredes reduz-se simultaneamente o tempo de reverberação e os ecos. Bistafa e Bradley (2000) Estudaram diferentes tratamentos acústicos variando a quantidade de material de absorção sonora e a eficiência de materiais de absorção de som, testando a mesma quantidade de material em configurações diferentes. Eles também compararam os resultados com expressões analíticas, entre elas Sabine, Eyring, Fritzy e Arau-Puchades. No entanto, destaca-se Fritzy (1959) apud Brandão (2016) que propôs um equacionamento que também pondera a distribuição dos dispositivos de absorção sonora.

As simulações que são feitas durante o desenvolvimento de um estudo, além de possuírem um custo considerável, muitas vezes não condizem com a resposta real, pois apesar de possuírem bons modelos os dados de entrada geralmente não são tão confiáveis. As previsões do tempo de reverberação e das métricas de inteligibilidade de discurso por programas de simulação, como Odeon, nem sempre são mais precisas quando comparada aos cálculos analíticos, segundo Bistafa e Bradley (2001).

Apesar de diversos países já possuírem normas e diretrizes acústicas para projetos acústicos de espaços educacionais, o Brasil não possui regulamentação ou normas indicando requisitos acústicos que devam ser atendidos em salas de aula ou outros espaços educacionais. A única norma que contém um parâmetro objetivo é a norma brasileira ABNT NBR 10152: 2017 que estabelece valores de referência de níveis de pressão sonora para salas de aula, entretanto não trata de outros importantes parâmetros acústicos, como Tempo de Reverberação, Tempo de Decaimento, Índice de Transmissão da Fala, entre outros.

Neste cenário o Brasil está atrasado em relação a outros países quando se trata de projetar espaços educacionais acusticamente confortáveis e adequados. Isso pode estar associado à falta de uma norma/diretriz acústica a ser seguida, de acordo com Raeder e Nakazato (2018).

Sabendo disso, levantamos a hipótese do quanto à disposição dos materiais de absorção sonora influenciam nas características acústicas de um leiaute de uma sala de aula.

Este trabalho tem como objetivo geral investigar experimentalmente a influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula.

2. Materiais e Métodos

O estudo experimental deste trabalho consiste no método para medição dos parâmetros acústicos de um ambiente fechado e deve ser norteado pela NBR 3382-2, que versa sobre a medição de parâmetros de acústica de salas. Ela descreve número de medições, número de posições de microfone e fonte sonora, bem como incertezas relacionadas ao método de medição. Ainda são apresentadas duas formas de excitação da sala, método da resposta impulsiva e método do ruído interrompido.

Por sua vez, o experimento para avaliar a disposição dos materiais de absorção sonora deve ser conduzido pelo planejamento fatorial completo geral, por Montgomery (2018), comparando os resultados com as aferições feitas em um medidor de pressão sonora.

Por fim, a análise dos resultados deve ser baseada na técnica de análise de variância cuja, estatisticamente, permite inferir se dois ou mais tipos de leiautes realmente apresentam diferença significativas.

Diante do exposto, para realizar os experimentos dos diferentes leiautes a serem estudados, é necessário um ambiente que permita realizar alterações, cujo encontra-se no prédio de Engenharia Mecânica, campus II da UFG, especificamente no Laboratório de Mecânica Aplicada – LabMEC. É importante frisar que na sala não haviam outros materiais de absorção sonora, como por exemplo cadeiras, carpete, lousa, mesas ou janelas, desta forma ela se tornaria um ambiente muito menos sensível a variações por características externas. A Figura 1 apresenta as dimensões do ambiente.



Figura 1 - Dimensões da sala presente no LabMEC - EMC/UFG.

Para a realizar os experimentos foram utilizados um altifalante omnidirecional dodecaedro OmniPower 4292-L, um sonômetro tipo 2250, que foi recém calibrado, ambos da marca Bruel & Kjaer e espumas acústicas tipo caixa de ovo, adquiridas da JC Decor (MG) com densidade D28 em Poliuretano, como expostos na Figura 2.

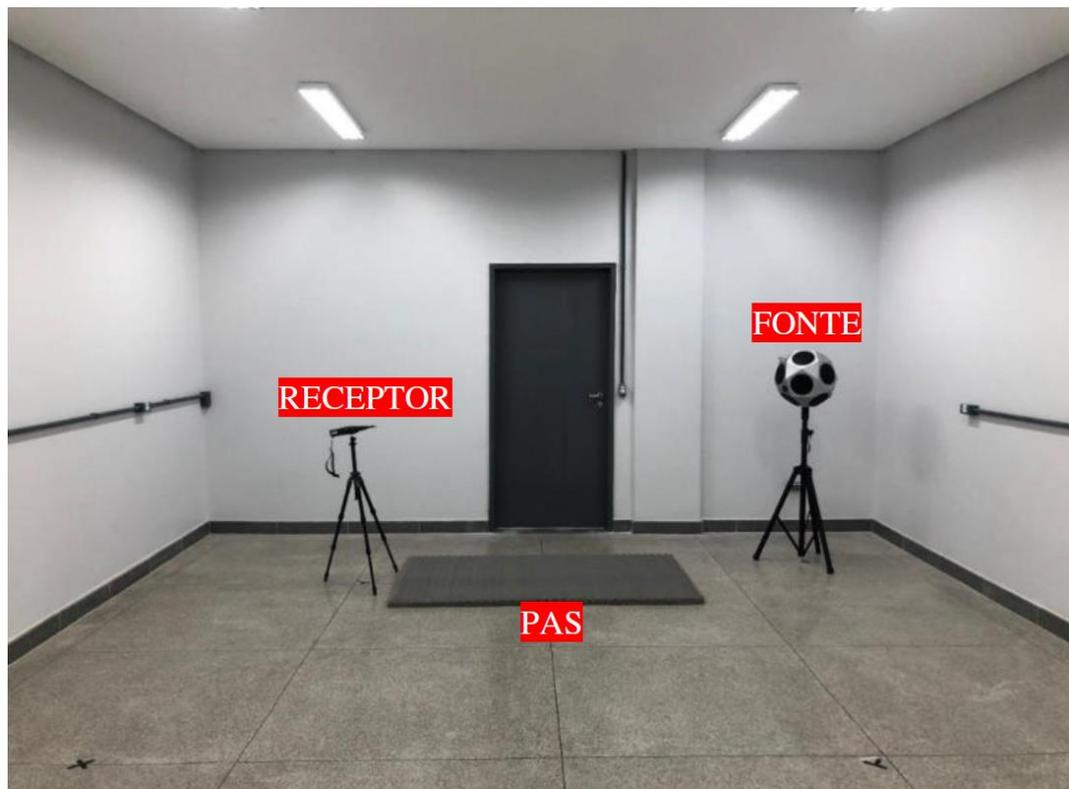


Figura 2 - Materiais utilizados.

Baseado na ISO 3382-2 foram selecionados 2 pontos distintos para a fonte e 3 pontos para o receptor, o posicionamento é determinado aleatoriamente. Na Figura 3 está o mapa desses pontos, sendo, S1 e S2 o posicionamento da fonte, e R1, R2 e R3 o posicionamento do receptor. Portanto, para cada leiaute foram realizadas 6 medições. Destaca-se que apesar da escolha aleatória da posição da fonte e do receptor, foi feita uma marcação no piso para auxiliar nas réplicas do ensaio.



Figura 3 - Posicionamento da fonte e do receptor.

A fonte de ruído omnidirecional foi programada para gerar ruído rosa a 100 dB de pressão sonora a 1 metro. O sonômetro possui um módulo de “Tempo de Reverberação” que permitiu obter os parâmetros T20, T30 e EDT. Os descritores T20 e T30 são geralmente chamados de “tempos de reverberação tardia”, pois medem na parte posterior da curva.

Para o posicionamento do PAS, segmenta-se o piso da sala em quadrantes, sendo que cada um representa aproximadamente 1/3 da área total. A fim de facilitar o manuseio dos painéis, eles foram posicionados sobre o piso. A Figura 4 ilustra como foi essa divisão.

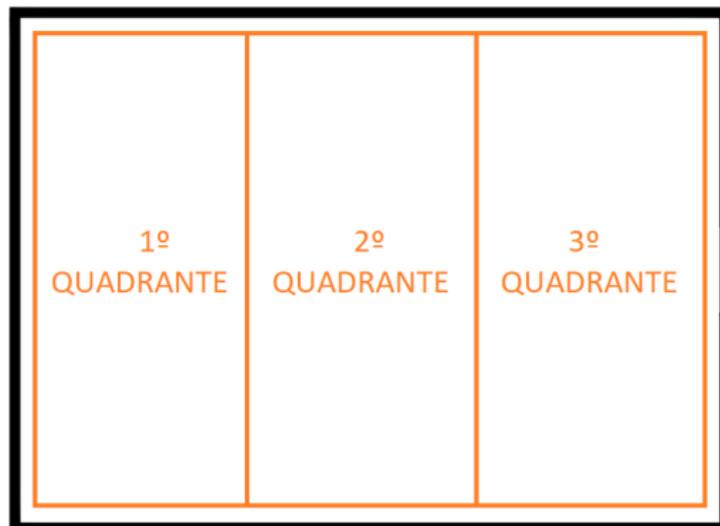


Figura 4 - Representação dos quadrantes.

A disposição do PAS foi padronizada considerando sua dimensão. Os painéis utilizados possuem 1,85 m de comprimento por 1,25 m de largura. Para os experimentos com 0 painéis, não foi utilizado nenhum painel. Para os experimentos que exigiram a utilização de 1 painel optou-se o posicionamento centralizado no quadrante com a orientação do painel no sentido horizontal em relação a largura da sala. Já para os experimentos com 2 painéis optou-se pelo posicionamento distribuído e a mesma orientação utilizada anteriormente, conforme exposto na Figura 5.

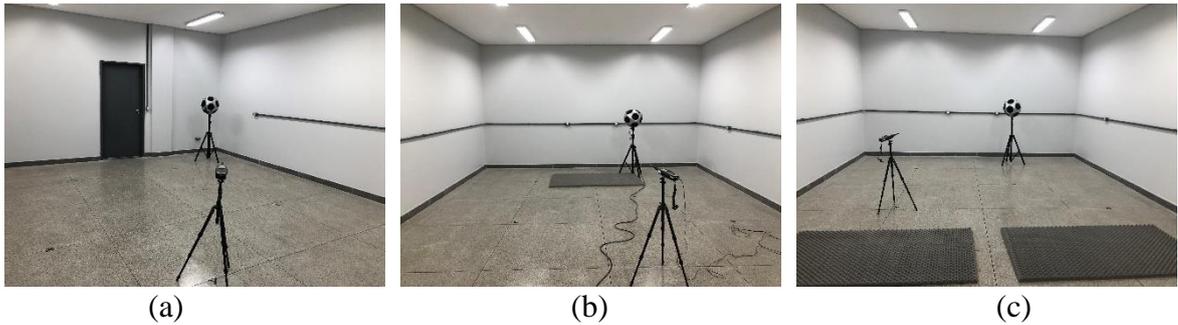


Figura 5 - Disposição dos painéis na sala: 0 painel (a), 1 painel (b) e 2 painéis (c).

Devido a geometria da sala e dos painéis, a partir do experimento com 3 painéis, apenas uma orientação do painel foi possível. Para os experimentos com 3 painéis, posicionou-se a panel de forma que elas ficassem mais isométricas possíveis em relação ao quadrante. Similarmente, foi utilizado esse princípio para o experimento com 4 painéis, como ilustrado na Figura 6.

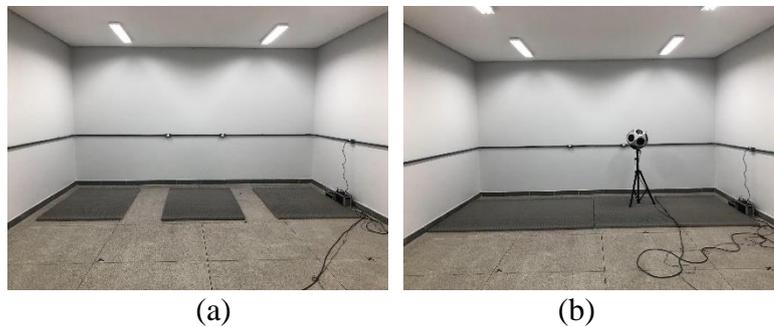


Figura 6 - Disposição dos painéis na sala: 3 painéis (a) e 4 painéis (b).

Para cada posicionamento foram realizadas duas réplicas, aleatorizando os ensaios com ponderação em relação a montagem do leiaute a fim de equilibrar o efeito de condições estranhas ou incontroláveis que podem afetar os resultados de um experimento sem desprender muito tempo.

O planejamento do experimento foi realizado utilizando o programa computacional estatístico Minitab®, bem como a análise do experimento. A Figura 7 expõe as informações dos fatores.

Fator	Níveis Valores
FONTE	2 S1; S2
RECEPTOR	3 R1; R2; R3
QUADRANTE	3 1; 2; 3
Nº PAS	5 0; 1; 2; 3; 4

Figura 7 - Informações dos fatores.

3. Resultados e Discussões

O gráfico de valores individuais apresentado (Fig. 8) sumariza os TR obtidos para T20, T30 e EDT em 500 Hz.

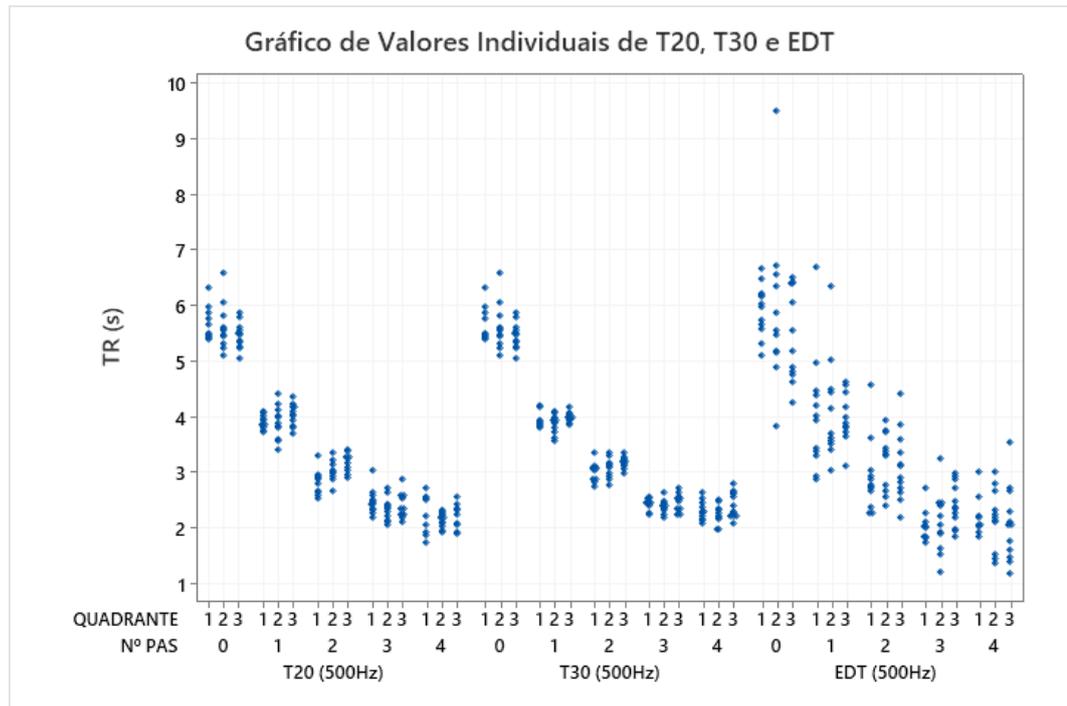


Figura 8 - Gráfico de valores individuais do experimento completo.

De início, de acordo com os equacionamentos previsionais, quanto maior a área de absorção sonora menor será o tempo de reverberação, resultando em melhores valores dos parâmetros. De forma geral, nota-se que o experimento segue esse princípio, sendo possível observar a diminuição do tempo em todos os parâmetros do TR com o aumento da quantidade de PAS. Além disso, destaca-se a similaridade das respostas para T20 e T30 e a diferença das respostas desses parâmetros ao comparar com a resposta para EDT. Apesar de serem conceitos similares, enquanto o T20 e T30 está mais ligado às propriedades físicas do espaço, o EDT está mais ligado à reverberação percebida pelo ouvinte. Outra observação importante é que o TR nos leiautes com 3 PAS e 4 PAS são bem próximos. Esta afirmação torna-se coerente a partir da análise do Boxplot exposto na Figura 9.

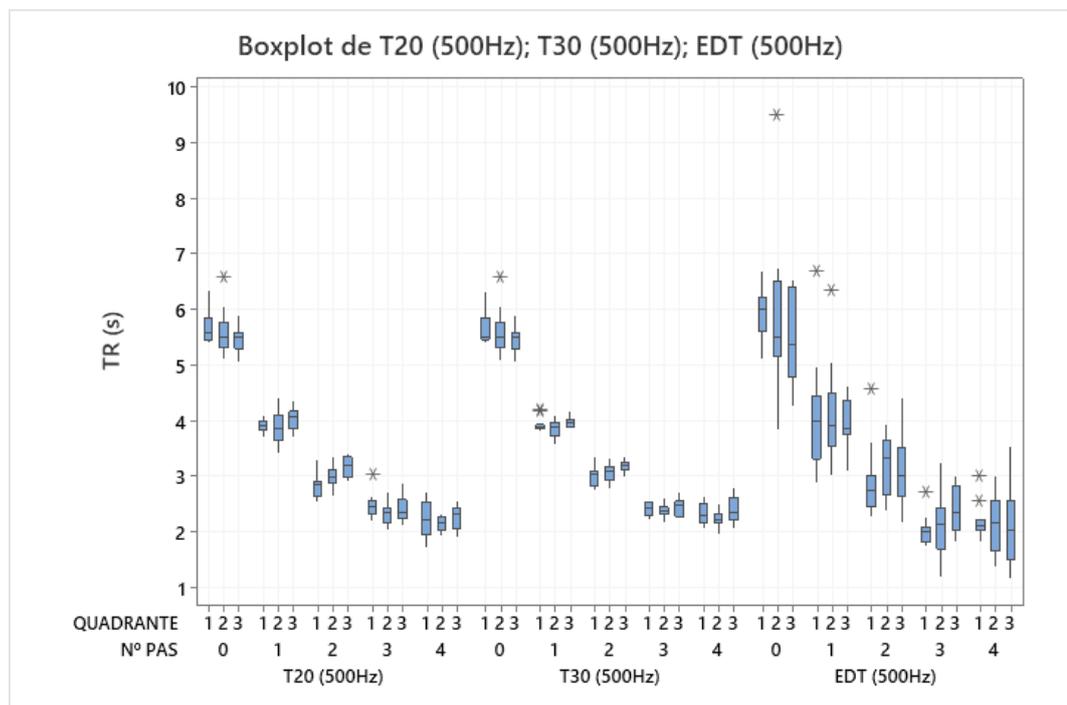


Figura 9 - Boxplot do experimento completo.

Desta maneira, apesar de seguirem as expressões analíticas propostas por estudiosos no passado, como dito anteriormente, existe um ponto onde a qualidade acústica da sala seria melhorada não pelo aumento da quantidade de PAS, e sim por seu posicionamento no leiaute.

Ao fazer a Análise de Variância das respostas dos experimentos, observa-se que o fator mais estatisticamente significativo em todos os parâmetros é o número de PAS, pois apresenta o Valor-p $\leq \alpha$ (ao nível de significância de $\alpha = 0,05$), seguido pela interação de Nº PAS*QUADRANTE e RECEPTOR para T20, por RECEPTOR e a interação Nº PAS*RECEPTOR para T30 e FONTE*RECEPTOR, Nº PAS*QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR e QUADRANTE*FONTE para EDT. A Tabela 1 apresenta a ANOVA dos três parâmetros estudados.

Tabela 1 - ANOVA do experimento completo (em vermelho tem-se destacado o Valor-p < 0,05).

ANOVA - EXPERIMENTO COMPLETO													
Fonte	GL	T20				T30				EDT			
		SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	90	279,583	3,107	59,840	0,000	262,896	2,921	80,940	0,000	380,351	4,226	10,870	0,000
Blocos	1	0,026	0,026	0,500	0,482	0,035	0,035	0,960	0,329	0,015	0,015	0,040	0,844
Linear	9	274,325	30,481	587,130	0,000	259,455	28,828	798,820	0,000	333,394	37,044	95,250	0,000
Nº PAS	4	273,592	68,398	1317,510	0,000	258,821	64,705	1792,960	0,000	330,807	82,702	212,650	0,000
QUADRANTE	2	0,170	0,085	1,630	0,201	0,161	0,081	2,240	0,113	0,306	0,153	0,390	0,676
FONTE	1	0,138	0,138	2,650	0,107	0,001	0,001	0,030	0,869	0,616	0,616	1,580	0,211
RECEPTOR	2	0,426	0,213	4,100	0,020	0,472	0,236	6,540	0,002	1,665	0,832	2,140	0,124
Interações de 2 fatores	28	2,507	0,090	1,720	0,029	1,710	0,061	1,690	0,033	17,264	0,617	1,590	0,054
Nº PAS*QUADRANTE	8	1,170	0,146	2,820	0,008	0,610	0,076	2,110	0,042	2,916	0,365	0,940	0,490
Nº PAS*FONTE	4	0,161	0,040	0,780	0,544	0,048	0,012	0,340	0,854	1,135	0,284	0,730	0,574
Nº PAS*RECEPTOR	8	0,652	0,082	1,570	0,145	0,683	0,085	2,360	0,023	4,467	0,558	1,440	0,193
QUADRANTE*FONTE	2	0,201	0,101	1,940	0,150	0,128	0,064	1,770	0,176	2,662	1,331	3,420	0,037
QUADRANTE*RECEPTOR	4	0,107	0,027	0,510	0,726	0,171	0,043	1,180	0,325	0,471	0,118	0,300	0,875
FONTE*RECEPTOR	2	0,217	0,108	2,090	0,130	0,070	0,035	0,970	0,383	5,613	2,807	7,220	0,001
Interações de 3 fatores	36	2,046	0,057	1,090	0,358	1,205	0,034	0,930	0,590	15,087	0,419	1,080	0,379
Nº PAS*QUADRANTE*FONTE	8	0,587	0,073	1,410	0,202	0,500	0,063	1,730	0,102	5,083	0,635	1,630	0,126
Nº PAS*QUADRANTE*RECEPTOR	16	0,869	0,054	1,050	0,418	0,361	0,023	0,620	0,856	3,610	0,226	0,580	0,891
Nº PAS*FONTE*RECEPTOR	8	0,485	0,061	1,170	0,327	0,266	0,033	0,920	0,503	4,452	0,557	1,430	0,195
QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR	4	0,105	0,026	0,500	0,733	0,078	0,019	0,540	0,709	1,942	0,486	1,250	0,296
Interações de 4 fatores	16	0,679	0,042	0,820	0,663	0,491	0,031	0,850	0,626	14,590	0,912	2,340	0,006
Nº PAS*QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR	16	0,679	0,042	0,820	0,663	0,491	0,031	0,850	0,626	14,590	0,912	2,340	0,006
Erro	89	4,620	0,052			3,212	0,036			34,613	0,389		
Total	179	284,204				266,108				414,964			

Sabendo da significância dos fatores e da hipótese da melhora da qualidade acústica através do posicionamento do PAS, aprofunda-se na análise para estudar como o posicionamento dos painéis irá influenciar no TR. Então o próximo passo foi definir um experimento fatorial personalizado, fazendo a análise para nenhum, um, dois, três e quatro painéis, separadamente.

Para a análise com nenhum painel (Tab. 2) não existem fatores estatisticamente significativos para T20 e T30, entretanto nota-se que para EDT há interações que são significativas.

Tabela 2 - ANOVA do experimento com 0 PAS (em vermelho tem-se destacado o Valor-p < 0,05).

ANOVA - 0 PAS													
Fonte	GL	T20				T30				EDT			
		SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	1,609	0,089	0,770	0,702	1,594	0,089	0,760	0,715	21,908	1,217	1,910	0,095
Blocos	1	0,079	0,079	0,690	0,419	0,099	0,099	0,850	0,369	0,327	0,327	0,510	0,484
Linear	5	0,942	0,188	1,630	0,205	0,956	0,191	1,640	0,202	3,288	0,658	1,030	0,431
QUADRANTE	2	0,269	0,135	1,170	0,335	0,232	0,116	1,000	0,390	1,305	0,653	1,020	0,380
FONTE	1	0,002	0,002	0,020	0,904	0,006	0,006	0,050	0,829	0,008	0,008	0,010	0,913
RECEPTOR	2	0,671	0,335	2,910	0,082	0,719	0,359	3,090	0,072	1,975	0,988	1,550	0,241
Interações de 2 fatores	8	0,412	0,052	0,450	0,876	0,387	0,048	0,420	0,896	9,237	1,155	1,810	0,144
QUADRANTE*FONTE	2	0,011	0,005	0,050	0,954	0,015	0,008	0,070	0,936	3,015	1,507	2,360	0,124
QUADRANTE*RECEPTOR	4	0,173	0,043	0,380	0,823	0,170	0,042	0,360	0,831	0,595	0,149	0,230	0,916
FONTE*RECEPTOR	2	0,228	0,114	0,990	0,393	0,202	0,101	0,870	0,437	5,627	2,814	4,410	0,029
Interações de 3 fatores	4	0,175	0,044	0,380	0,820	0,151	0,038	0,330	0,857	9,057	2,264	3,550	0,028
QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR	4	0,175	0,044	0,380	0,820	0,151	0,038	0,330	0,857	9,057	2,264	3,550	0,028
Erro	17	1,962	0,115			1,978	0,116			10,838	0,638		
Total	35	3,570				3,572				32,746			

A significância em EDT também era esperada, pois, novamente, o EDT está mais ligado a posição do receptor, enquanto T20 e T30 está mais ligada as propriedades físicas da sala.

Para a análise com uma placa, observamos que nenhum fator é significativo em todos os parâmetros. Fato observado através da análise da Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - ANOVA do experimento com 1 PAS (em vermelho tem-se destacado o Valor-p < 0,05).

ANOVA - 1 PAS		T20				T30				EDT			
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	1,020	0,057	1,620	0,164	0,424	0,024	1,640	0,158	11,911	0,662	0,980	0,518
Blocos	1	0,018	0,018	0,520	0,481	0,011	0,011	0,740	0,401	2,811	2,811	4,160	0,057
Linear	5	0,404	0,081	2,310	0,090	0,129	0,026	1,800	0,167	1,208	0,242	0,360	0,870
QUADRANTE	2	0,153	0,077	2,190	0,143	0,093	0,047	3,250	0,064	0,193	0,096	0,140	0,868
FONTE	1	0,065	0,065	1,850	0,191	0,020	0,020	1,360	0,259	0,069	0,069	0,100	0,752
RECEPTOR	2	0,186	0,093	2,650	0,099	0,016	0,008	0,570	0,575	0,946	0,473	0,700	0,510
Interações de 2 fatores	8	0,287	0,036	1,020	0,455	0,161	0,020	1,400	0,264	2,913	0,364	0,540	0,811
QUADRANTE*FONTE	2	0,018	0,009	0,260	0,774	0,039	0,019	1,350	0,285	0,478	0,239	0,350	0,707
QUADRANTE*RECEPTOR	4	0,069	0,017	0,490	0,741	0,121	0,030	2,100	0,126	1,151	0,288	0,430	0,788
FONTE*RECEPTOR	2	0,200	0,100	2,850	0,086	0,002	0,001	0,070	0,931	1,285	0,642	0,950	0,406
Interações de 3 fatores	4	0,310	0,077	2,210	0,111	0,122	0,030	2,120	0,123	4,979	1,245	1,840	0,167
QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR	4	0,310	0,077	2,210	0,111	0,122	0,030	2,120	0,123	4,979	1,245	1,840	0,167
Erro	17	0,596	0,035			0,244	0,014			11,476	0,675		
Total	35	1,616				0,668				23,387			

A análise com dois painéis, apontam que o Quadrante é o fator mais significativo para T20 e T30 e sua interação com a fonte também é um dos fatores significantes para o EDT, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - ANOVA do experimento com 2 PAS (em vermelho tem-se destacado o Valor-p < 0,05).

ANOVA - 2 PAS		T20				T30				EDT			
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	1,304	0,072	2,080	0,069	0,750	0,042	3,670	0,005	9,771	0,543	3,800	0,004
Blocos	1	0,009	0,009	0,270	0,611	0,007	0,007	0,590	0,454	0,987	0,987	6,900	0,018
Linear	5	0,808	0,162	4,640	0,007	0,324	0,065	5,710	0,003	3,324	0,665	4,650	0,007
QUADRANTE	2	0,728	0,364	10,460	0,001	0,214	0,107	9,410	0,002	0,609	0,304	2,130	0,150
FONTE	1	0,003	0,003	0,080	0,778	0,019	0,019	1,690	0,211	0,015	0,015	0,110	0,748
RECEPTOR	2	0,077	0,039	1,110	0,352	0,091	0,046	4,020	0,037	2,700	1,350	9,450	0,002
Interações de 2 fatores	8	0,437	0,055	1,570	0,207	0,278	0,035	3,060	0,025	4,835	0,604	4,230	0,006
QUADRANTE*FONTE	2	0,063	0,032	0,910	0,423	0,072	0,036	3,160	0,068	1,477	0,738	5,170	0,018
QUADRANTE*RECEPTOR	4	0,303	0,076	2,180	0,115	0,135	0,034	2,970	0,050	1,378	0,345	2,410	0,089
FONTE*RECEPTOR	2	0,070	0,035	1,010	0,385	0,071	0,036	3,130	0,069	1,980	0,990	6,930	0,006
Interações de 3 fatores	4	0,050	0,012	0,360	0,835	0,142	0,035	3,120	0,043	0,626	0,156	1,090	0,391
QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR	4	0,050	0,012	0,360	0,835	0,142	0,035	3,120	0,043	0,626	0,156	1,090	0,391
Erro	17	0,592	0,035			0,193	0,011			2,430	0,143		
Total	35	1,896				0,943				12,201			

Para a análise com três painéis, nota-se que a interação QUADRANTE*FONTE é um fator significativo para T20 e T30, entretanto para EDT não existe fator significativo para esse nível de significância, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - ANOVA do experimento com 3 PAS (em vermelho tem-se destacado o Valor-p < 0,05).

ANOVA - 3 PAS		T20				T30				EDT			
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	0,915	0,051	1,260	0,316	0,407	0,023	1,830	0,109	4,074	0,226	1,450	0,225
Blocos	1	0,009	0,009	0,230	0,636	0,025	0,025	2,030	0,172	0,048	0,048	0,310	0,585
Linear	5	0,288	0,058	1,430	0,263	0,084	0,017	1,360	0,289	1,103	0,221	1,410	0,270
QUADRANTE	2	0,100	0,050	1,240	0,313	0,029	0,015	1,180	0,333	1,015	0,508	3,250	0,064
FONTE	1	0,147	0,147	3,650	0,073	0,003	0,003	0,220	0,648	0,071	0,071	0,460	0,509
RECEPTOR	2	0,041	0,020	0,510	0,612	0,052	0,026	2,110	0,152	0,017	0,008	0,050	0,949
Interações de 2 fatores	8	0,476	0,059	1,480	0,236	0,231	0,029	2,340	0,067	1,437	0,180	1,150	0,382
QUADRANTE*FONTE	2	0,325	0,163	4,040	0,037	0,166	0,083	6,730	0,007	0,309	0,154	0,990	0,393
QUADRANTE*RECEPTOR	4	0,071	0,018	0,440	0,777	0,022	0,005	0,440	0,775	0,631	0,158	1,010	0,429
FONTE*RECEPTOR	2	0,080	0,040	0,990	0,391	0,043	0,021	1,730	0,207	0,497	0,248	1,590	0,233
Interações de 3 fatores	4	0,142	0,036	0,880	0,495	0,067	0,017	1,370	0,287	1,486	0,372	2,380	0,093
QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR	4	0,142	0,036	0,880	0,495	0,067	0,017	1,370	0,287	1,486	0,372	2,380	0,093
Erro	17	0,684	0,040			0,210	0,012			2,655	0,156		
Total	35	1,599				0,617				6,729			

Por fim, a análise de 4 PAS (Tab. 6) provou que o quadrante é um fator significativo, além do receptor e fonte aparecerem significativamente.

Tabela 6 - ANOVA do experimento com 4 PAS (em vermelho tem-se destacado o Valor-p < 0,05).

ANOVA - 4 PAS		T20				T30				EDT			
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	1,238	0,069	1,690	0,144	1,013	0,056	2,020	0,077	6,040	0,336	1,870	0,102
Blocos	1	0,003	0,003	0,080	0,782	0,006	0,006	0,200	0,659	0,003	0,003	0,020	0,895
Linear	5	0,274	0,055	1,340	0,294	0,483	0,097	3,460	0,024	2,183	0,437	2,430	0,078
QUADRANTE	2	0,089	0,044	1,090	0,360	0,204	0,102	3,660	0,048	0,101	0,051	0,280	0,758
FONTE	1	0,082	0,082	2,010	0,174	0,002	0,002	0,080	0,776	1,588	1,588	8,840	0,009
RECEPTOR	2	0,103	0,051	1,260	0,309	0,276	0,138	4,950	0,020	0,494	0,247	1,380	0,279
Interações de 2 fatores	8	0,854	0,107	2,620	0,045	0,438	0,055	1,960	0,115	3,469	0,434	2,410	0,060
QUADRANTE*FONTE	2	0,371	0,185	4,550	0,026	0,336	0,168	6,020	0,011	2,467	1,233	6,870	0,007
QUADRANTE*RECEPTOR	4	0,359	0,090	2,200	0,112	0,085	0,021	0,760	0,567	0,326	0,081	0,450	0,769
FONTE*RECEPTOR	2	0,124	0,062	1,520	0,247	0,018	0,009	0,320	0,731	0,677	0,338	1,880	0,182
Interações de 3 fatores	4	0,107	0,027	0,650	0,633	0,086	0,022	0,770	0,557	0,385	0,096	0,540	0,712
QUADRANTE*FONTE*RECEPTOR	4	0,107	0,027	0,650	0,633	0,086	0,022	0,770	0,557	0,385	0,096	0,540	0,712
Erro	17	0,693	0,041			0,474	0,028			3,053	0,180		
Total	35	1,931				1,487				9,093			

Em suma, ao definir um experimento fatorial personalizando, considerando apenas o experimento com 3 e 4 PAS, a fim de obter uma comparação entre o desempenho acústico desses leiautes, foi feita a análise dos efeitos principais (Fig. 10) e da interação dos fatores (Fig. 11) para as respostas estudadas.

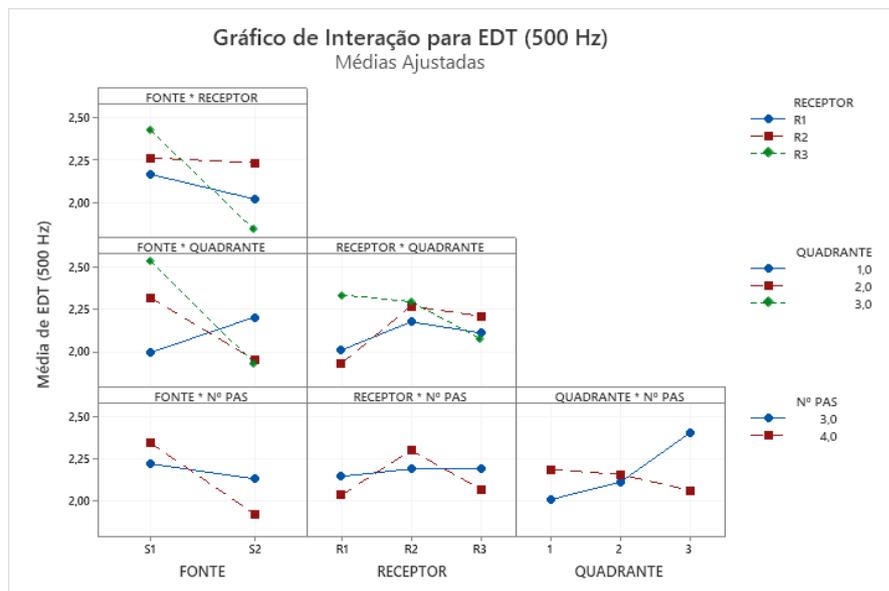
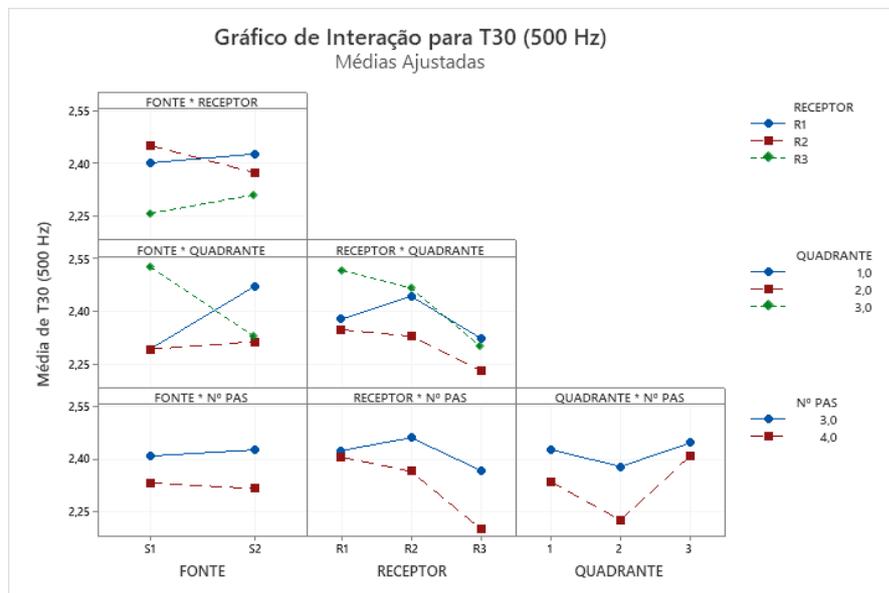
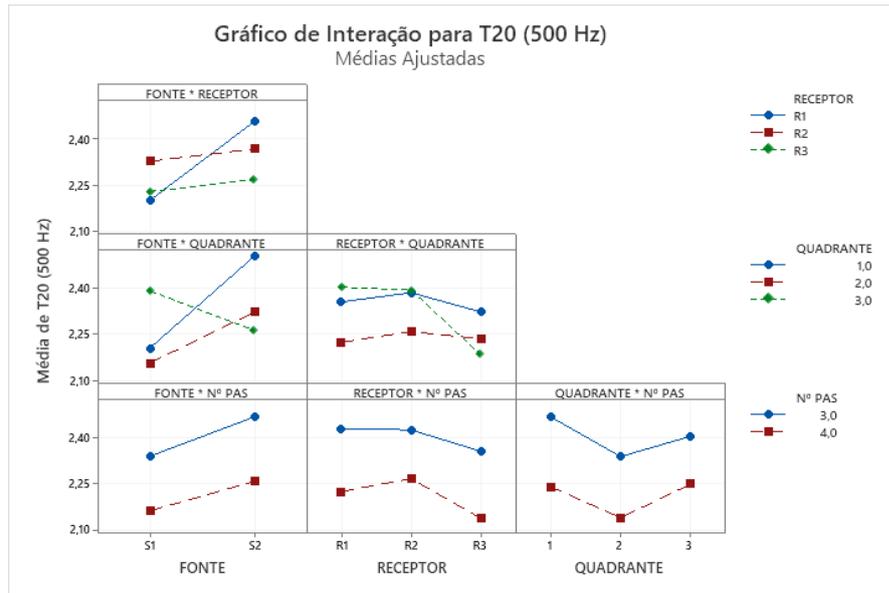


Figura 11 - Gráfico de Interação para T20, T30 e EDT.

Destaca-se a grande variação para a maioria dos fatores nos efeitos principais dos leiautes, reforçando que os parâmetros ao se interagirem, promovem alterações nas características acústicas do leiaute.

4. Conclusões

Para o estudo em questão, foi alcançado o objetivo de investigar experimentalmente a influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula. Vale destacar que os resultados dos experimentos convergiram para os padrões que eram esperados, como por exemplo uma maior quantidade de painéis está diretamente relacionada com melhor qualidade acústica da sala de aula.

Da ANOVA dos fatores, considerando um nível de confiança de 95% para todas as análises, tem-se que o experimento com nenhum painel concluiu-se que nenhum dos fatores é significativo, sendo assim, não há mudança. Por mais que não existam fatores significativos, destaca-se o receptor como o fator mais expressivo. O experimento com um painel ainda apresenta baixa área de absorção sonora, assim nota-se que o modelo continua sem mudança significativa e para esse experimento o receptor continua sendo o fator mais expressivo. Por fim, para o experimento que apresenta uma maior área de absorção sonora, no caso com dois painéis, o quadrante é o mais impactante, ou seja, o mais significativo no modelo. Especificamente no estudo de dois painéis, os parâmetros T20 e T30 tem quase exclusivamente o fator quadrante como o mais significativo e para o EDT tem-se também, ao nível de 95% de confiabilidade, outros fatores impactando, como fonte e receptor, esse último o mais impactante.

O estudo foi continuado para o experimento com 3 e 4 PAS. Nota-se a interação entre quadrante e fonte como o mais significativo para T20 e T30, e EDT não apresentando nenhum fator ou interação com significância ao nível de 95% de confiabilidade. Já para o experimento com 4 PAS, observou-se que a interação entre o quadrante e a fonte é o fator significativo para T20, para T30 tem-se novamente a interação entre quadrante e fonte como o fator mais significativo, seguido dos fatores receptor e quadrante, nessa ordem e por fim, para EDT, repete-se a interação entre quadrante e fonte como o fator mais significativo seguido pela significância do fator fonte.

Concluiu-se o desempenho acústico de uma sala de aula pode ser melhorado considerando outros fatores além da quantidade de PAS, uma vez que a média do tempo de reverberação para 3 e 4 PAS não foi tão impactante como foi a média do tempo de reverberação para 1 e 2 PAS ou 2 e 3 PAS.

Ficou evidenciado também que a posição do receptor e fonte são fatores que devem ser considerados, pois na maioria das análises eles se destacaram. Como sugestão de estudos futuros, levantamos a hipótese do quanto disposição dos painéis, no sentido horizontal ou vertical por exemplo, poderá influenciar na melhoria da característica acústica de uma sala. Outra sugestão é o posicionamento dos PAS em outras superfícies da sala, como por exemplo teto e paredes. Além disso, levanta-se a hipótese de como seria a interação de materiais comuns em uma sala de aula (como mesas, cadeiras, lousa, entre outros) com o posicionamento dos PAS em um leiaute.

5. Agradecimentos

Gostaria de agradecer à PRPG/UFG, ao PPGMEC/UFG e ao CNPQ 434921/2018-1 "Acústica de Salas: Influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula."

Referências

- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2017). ABNT NBR 3382: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro: ABNT.
- Bistafa, S. R., & Bradley, J. S. (2000). Predicting reverberation times in a simulated classroom. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(4), 1721–1731. <https://doi.org/10.1121/1.1310191>
- Bistafa, S. R., & Bradley, J. S. (2001). Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(4), 1474–1482. <https://doi.org/10.1121/1.1354199>
- Brandão, E. (2016). *Acústica de Salas projeto E Modelagem* (1st ed.). Blucher.
- Mir, S. H., & Abdou, A. A. (2005). Investigation of sound-absorbing material configuration of a smart classroom utilizing computer modeling. *Building Acoustics*, 12(3), 175–188. <https://doi.org/10.1260/135101005774353032>
- Montgomery, D. C. (2021). *Design and analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc.
- Raeder, A., & Nakazato, M (2018). Study case on the acoustic quality of classrooms in Brazil. INTER-NOISE 2018 - 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Impact of Noise Control Engineering.
- Seep, B., & Glosemeyer, R., & Hulce, E., & Linn, M., & Aytar, P (2002). Acústica de salas de aulas. *Revista de Acústica e Vibrações*, nº 29. Santa Catarina: Sociedade Brasileira de Acústica.