

Adequação acústica do projeto arquitetônico do auditório da UFTM

Acoustic adaptation of the architectural design of UFTM auditorium

Larissa Picchi Angeli ¹

Ricardo Humberto de Oliveira Filho ²

¹ Engenheira de Produto (Cummins Inc.). Bacharel em Engenharia Mecânica (UFTM).
Email: lah_picchi@hotmail.com.

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

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo adequar acusticamente o projeto do auditório da Universidade Federal do Triângulo Mineiro visando a qualidade e o conforto. O tempo de reverberação do recinto foi estimado via métodos matemáticos desenvolvidos por Sabine e por Eyring-Norris. Para tanto, as propriedades acústicas das superfícies e obstáculos foram definidas, sendo estas os coeficientes de absorção e reflexão e a perda de transmissão sonora. Foram realizadas medições dos níveis de ruído ambiental no entorno da região onde será construído o auditório para avaliar o impacto em seu interior após a construção. Para a adequação acústica do auditório foram propostas as instalações de painéis reflexivos nas laterais, no teto do palco e nas partes frontal e central do auditório; instalação de carpete na forração em todo o piso e de painéis absorventes no teto e paredes localizadas ao fundo do auditório. A definição dos ângulos de posicionamento dos painéis refletores foi feita através do método das fontes virtuais. Foram realizadas simulações via método dos raios acústicos para avaliar o comportamento do campo sonoro no interior do auditório para a voz. O controle das reflexões sonoras resultou em maiores níveis sonoros nas poltronas mais afastadas do palco, induzindo uma melhor audibilidade. Os materiais absorventes instalados nas paredes e no teto na parte do fundo do auditório evitam que possíveis reflexões ocorram, prevenindo assim a geração de eco. Através dos métodos de Sabine e Eyring-Norris foi constatado que o tratamento proposto resultará em um tempo de reverberação próximo ao recomendado pela literatura.

Palavras-chave: Acústica de Auditórios; Adequação Acústica; Métodos das Fontes Virtuais; Simulação de Campo Sonoro; Tempo de Reverberação.

ABSTRACT: *This paper aims to acoustically adapt the project of the auditorium of the Federal University of the Triangulo Mineiro aiming at quality and comfort. The reverberation time of the auditorium was estimated using mathematical methods developed by Sabine and Eyring-Norris. In order to do so, the acoustic properties of the surfaces and obstacles were defined, these being the absorption and reflection coefficients and the sound transmission loss. Measurements of ambient noise levels were carried out around the region where the auditorium will be built to evaluate the impact on the interior after construction. For the acoustic adaptation of the auditorium, the installation of reflective panels on the sides, on the stage roof and on the front and central parts of the auditorium were proposed; carpet installation on the floor throughout the floor and absorbent panels on the roof and walls located at the back of the auditorium for the voice. The definition of the positioning angles of the reflector panels was done using the virtual sources method. Simulations were performed using the acoustic ray method to evaluate the behavior of the sound field inside the auditorium. The control of the sound reflections resulted in higher sound levels in the seats farthest from the stage, inducing a better audibility. Absorbent materials installed in the walls and roof at the back of the auditorium prevent reflections from occurring, thus preventing echo generation. Through the methods of Sabine and Eyring-Norris it was verified that the proposed treatment will result in a reverberation time closer to which recommended by the literature.*

Keywords: *Auditorium Acoustics; Acoustic Adaptation; Virtual Sound Source Method; Noise Field Simulation; Reverberation Time.*

DOI: 10.18554/rbcti.v4i3.3280

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o interesse da sociedade tem aumentado em relação à acústica em habitações, escritórios, unidades industriais e espaços públicos. Sabe-se que com a redução dos níveis sonoros no cotidiano das pessoas é possível melhorar a qualidade de vida e a saúde (BASTOS, 2010). Dentre as áreas da Acústica que tratam da propagação sonora em ambientes fechados, destaca-se a Acústica Arquitetônica.

Segundo De Marco (1982), a acústica arquitetônica pode ser dividida em duas áreas. A primeira é responsável pela defesa contra o ruído, como por exemplo, a eliminação de sons indesejáveis externos ou produzidos no próprio local. Já a segunda é responsável pelo controle de sons no recinto a fim de se obter uma distribuição homogênea do som, preservando a qualidade e a inteligibilidade da comunicação, evitando efeitos acústicos indesejáveis, como ecos, ressonâncias e reverberação excessiva.

Este trabalho tem como objetivo adequar acusticamente o projeto do auditório da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), visando o conforto acústico. Será avaliado o comportamento do campo sonoro no interior do recinto para a voz, estimado o tempo de reverberação, e então propostas as adequações necessárias para se obter um ambiente acusticamente ideal.

REVISÃO DE LITERATURA

Acústica Geométrica

De acordo com Kuttruff (2000), ao se estudar a acústica de salas usando técnicas geométricas, o conceito de ondas sonoras é substituído pelo conceito de raios sonoros, que seguem as regras da ótica geométrica. Essa metodologia é uma grande simplificação do fenômeno acústico, que só é possível no caso limite em que o comprimento de onda é relativamente pequeno, o que ocorre para altas frequências.

Em acústica geométrica, o raio sonoro tem origem em um certo ponto, sendo este apenas uma pequena porção de uma frente de onda esférica. Ele possui uma direção bem definida e sua propagação é regida pelas mesmas leis de propagação de um raio de luz, porém com a velocidade do som no meio em questão, sendo esta responsável por efeitos importantes como reverberação, ecos etc. (KUTTRUFF, 2000).

Ao contrário da ótica geométrica, em acústica de salas não é considerada a mudança de meio nem a refração decorrente de tal mudança. Segundo Kuttruff (2000), o fenômeno da difração é negligenciado, pois os raios sonoros se propagam em linhas retas. A interferência também não é diretamente considerada, isto é, se os componentes de vários campos sonoros são sobrepostos, suas relações de fase não são modeladas explicitamente, ao invés disso, somente suas densidades de energia e intensidades são adicionadas.

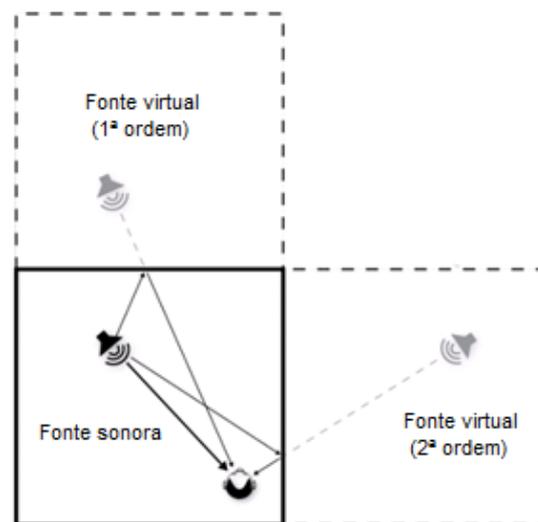
Os dois principais métodos de simulação acústica derivados da teoria da acústica geométrica de salas são as fontes virtuais (*image source*) e o traçado de raios (*ray-tracing*).

O método das fontes virtuais atualmente é baseado no princípio de que uma reflexão especular pode ser construída geometricamente ao espelhar a fonte sonora no plano da superfície de reflexão (RINDEL, 2000). Ao se obter esta imagem refletida da fonte sonora, o raio original, que sofreria uma reflexão, é substituído por um raio direto

que parte dessa imagem refletida da fonte para o receptor (SAVIOJA, 1999). Assim, o princípio básico do modelo das fontes virtuais é que o caminho seguido por um raio em suas várias reflexões, pode ser substituído por uma linha reta que liga o receptor a uma fonte virtual.

Às primeiras imagens refletidas dá-se o nome de fontes virtuais de primeira ordem. Já às imagens obtidas pela reflexão de fontes virtuais de primeira ordem dá-se o nome de fontes virtuais de segunda ordem e assim sucessivamente. A **Figura 1** ilustra a representação de duas fontes virtuais de primeira ordem.

Figura 1. Fontes virtuais de primeira ordem em uma sala cuboide.



Fonte: Tôrres, 2008

Segundo Vorländer (2000), provém da teoria de acústica geométrica de salas. Investigações sobre a trajetória de raios sonoros viajando pelas salas são a base para a teoria de reverberação estatística e das equações de Sabine e Eyring (BERANEK, 2006).

Com o traçado de raios é possível observar as primeiras reflexões dos raios sonoros e, a partir delas, obter parâmetros da acústica do ambiente, tais como tempo de decaimento inicial (*early decay time*) e clareza (*clarity*) (SHIELD; YANG, 2000). Para desenvolver tal técnica é preciso, inicialmente, definir o modelo da sala a ser simulada.

Estimativa do tempo de reverberação do auditório

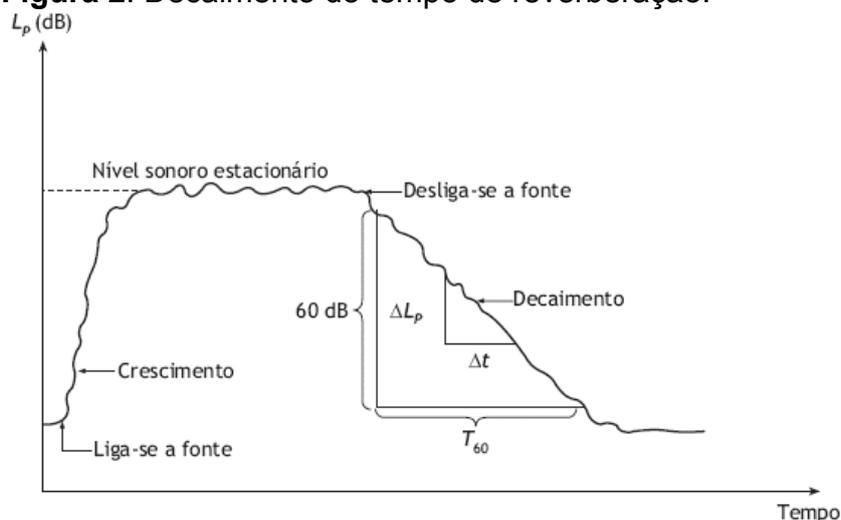
Após cessada a emissão de uma fonte sonora, o decaimento da intensidade do som no ambiente ocorre de maneira gradual, dependente da absorção dos materiais que compõem a superfície desse ambiente e dos objetos presentes em seu interior. Este fenômeno é chamado de reverberação do som e atua de forma a produzir um prolongamento na duração dos sons percebidos.

Segundo Valle (2009), a reverberação consiste em muitas reflexões em todas as áreas de um ambiente fechado ou semifechado (como um estádio, por exemplo). Essas reflexões acontecem em todas as direções, em intervalos de tempo muito curtos (milissegundos) e quase aleatórios, formando a difusão sonora. Essa difusão acontece, portanto, no tempo e no espaço.

A capacidade de absorção total do som em um ambiente é a soma de todas as absorções parciais providas por áreas superficiais de diferentes materiais. Cada material possui um coeficiente de absorção sonora que varia com a frequência. Os valores do coeficiente de absorção sonora para vários materiais podem ser obtidos em bibliografia especializada ou dos catálogos dos fabricantes desses materiais (VALLE, 2009).

O tempo de reverberação é o mais importante parâmetro acústico na determinação da qualidade acústica de salas (BISTAFA, 2011). É, por definição, o tempo gasto para o nível de intensidade de um som reduzir 60 decibels depois da fonte sonora ser interrompida. A **Figura 2** ilustra o decaimento do nível sonoro com o tempo, possibilitando estimar o tempo de reverberação.

Figura 2. Decaimento do tempo de reverberação.



Fonte: Bistafa, 2011

MATERIAIS E MÉTODOS

Diretrizes consideradas

Segundo De Marco (1982), quando se trata da acústica de ambientes, deve-se levar em consideração algumas condições:

- As paredes laterais devem ter uma leve inclinação, evitando o paralelismo, para diminuir as reflexões nocivas com os ecos sucessivos;
- Evitar as vedações em vidros simples, já que o coeficiente de reflexão do vidro simples é alto, podendo gerar desconforto sonoro;
- O teto deve ser refletor nas proximidades do palco e absorvente no fundo do auditório;
- As cadeiras deverão ser do tipo poltronas e estofadas para aumentar a superfície de absorção. O recomendado é que o coeficiente de absorção sonora seja equivalente ao de uma pessoa de porte médio sentada;
- Os materiais fonoabsorventes devem ser distribuídos de forma homogênea, e não se concentrar somente no piso ou paredes;
- Os materiais de absorção sonora são inversamente proporcionais ao tempo de reverberação para cálculos matemáticos.

Considerações de projeto

No projeto arquitetônico inicial disponibilizado, o auditório tem capacidade para 534 pessoas, pé direito de 8,84m, comprimento de 26,95m, largura de 22,10m, as paredes laterais não possuem janelas, com treliças verticais que suportam o telhado e abaixo das treliças há um forro em gesso. As **Figura 3** e **Figura 4** apresentam o projeto inicial do auditório.

Figura 3. Vista em planta do mezanino e térreo do auditório.

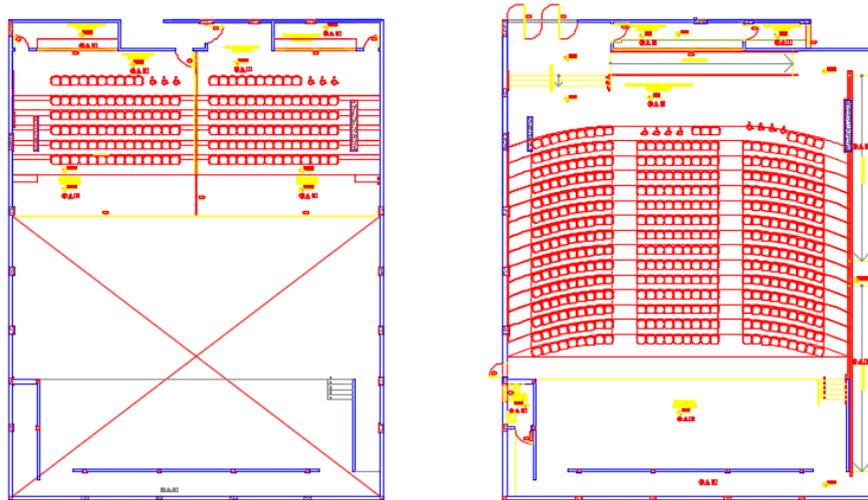
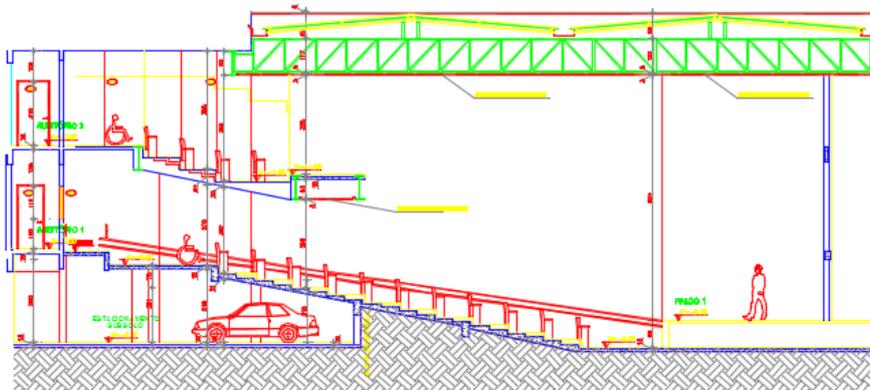


Figura 4. Vista em corte do auditório.



O ruído no entorno

A vizinhança do auditório é predominantemente residencial, mas com alguns pontos de comércio. As ruas que o circundam são Rua Getúlio Guaritá, Rua Vigário Carlos, Rua Conde de Prados e Rua da Constituição, com tráfego significativo de veículos. Desta forma, fez-se necessária a avaliação do ruído de fundo local utilizando um medidor de pressão sonora classe 1 com um sistema de análise em frequência (modelo 2250), um microfone pré polarizado (modelo 4189) e um calibrador de microfone classe 1, todos da marca *Brüel & Kjaer*[®].

Acústica geométrica

O método das fontes virtuais foi adotado para determinar o posicionamento dos painéis reflexivos do auditório visando homogeneizar o campo sonoro.

Uma das grandes vantagens do método das fontes virtuais é a possibilidade de garantir que todas as imagens virtuais que possam contribuir com alguma energia para o receptor sonoro são encontradas (BORISH, 1984). Tal característica permite construir auralizações fidedignas da sala simulada, pois todas as reflexões iniciais são encontradas e computadas.

Se a sala simulada não tiver uma geometria simples, a quantidade de fontes virtuais pode ser elevada, tornando a simulação acústica de alto custo computacional. Numa sala com n paredes, poderão existir n fontes virtuais de primeira ordem e cada uma delas poderá dar origem a $n-1$ fontes virtuais de segunda ordem, o que leva à **Equação 1**.

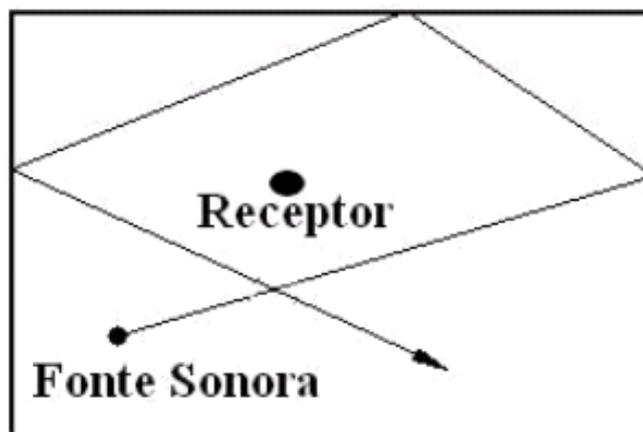
$$N_{fontes} = \sum_{j=1}^i n(n-1)^{j-1} = \frac{n}{(n-2)} [(n-1)^i - 1] \approx (n-1)^i \quad (1)$$

onde: N_{fontes} é o número de possíveis fontes e i é a ordem de reflexão de uma fonte.

A partir da **Equação 1** percebe-se que o número de fontes virtuais cresce exponencialmente com a ordem das fontes, podendo tornar a solução intratável, para um i grande (RINDEL, 2000).

O método do traçado de raios foi utilizado no projeto com objetivo de avaliar o comportamento do campo sonoro no interior do auditório. Esse método segue a teoria matemática da acústica geométrica de salas onde os raios podem ser refletidos especularmente ou difusamente. A nova direção de um raio refletido especularmente é dada pelas leis da reflexão geométrica, isto é, o raio é refletido com um ângulo igual ao ângulo de incidência, esses ângulos são em relação à normal do plano de incidência (KUTTRUFF, 2000) como mostra a **Figura 5**.

Figura 5. Visão esquemática de um raio refletido.



Fonte: Tôrres,2008.

Segundo Kuttruff (2000), sempre que ocorre uma reflexão do raio, além de calcular a nova direção a ser seguida por ele, é preciso considerar o aspecto da energia do raio refletido, pois a cada reflexão o raio perde uma certa quantidade de energia para o obstáculo causador da reflexão, devido à absorção de energia sonora. Tal perda de energia é calculada a partir do coeficiente de absorção sonora do obstáculo. É preciso considerar ainda a quantidade de energia que o raio perde para o ar. Essa informação sobre a energia é fundamental para modelar a Resposta Impulsiva da sala e, assim, conhecer seu comportamento acústico.

Estimativa do tempo de reverberação do auditório

Multiplicando-se o coeficiente de absorção de um material pela sua respectiva área, obtém-se a absorção parcial desse material, mostrada na **Equação 2**.

$$A_n = S_n \cdot \alpha_n \quad (2)$$

onde S é a área superficial do material em m^2 e α_n é o coeficiente de absorção sonora da superfície.

A absorção total de um ambiente, medida em m^2 Sabine, é a soma de todas as suas absorções parciais, conforme a **Equação 3**.

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots + S_n\alpha_n \quad (3)$$

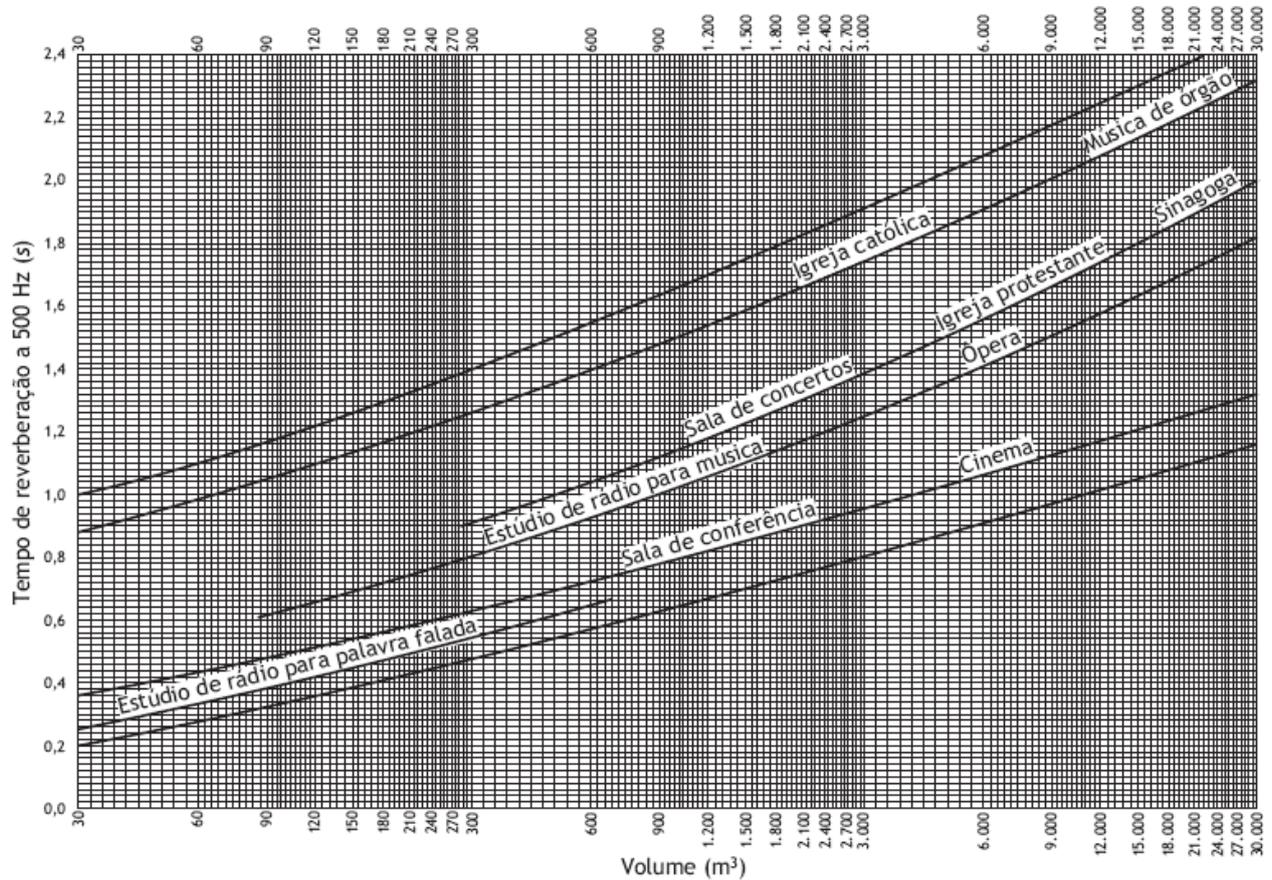
O coeficiente médio de absorção é a média ponderada de todas as absorções parciais, como visto na **Equação 4**.

$$\alpha = \frac{A}{S} = \frac{(S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots + S_n\alpha_n)}{(S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n)} \quad (4)$$

O tempo de reverberação T_{60} de um ambiente varia conforme a frequência do som produzido. Isso se deve ao fato da absorção acústica dos materiais empregados para a construção desse ambiente variar com a frequência.

A NBR 12179 apresenta algumas sugestões de tempos de reverberação para a frequência de 500Hz (frequência comumente utilizada para medições do tempo de reverberação) em função do volume do ambiente e da sua respectiva aplicação, mostrado na **Figura 6**.

Figura 6. Tempo de reverberação recomendado em 500Hz para recintos destinados a diversos usos.

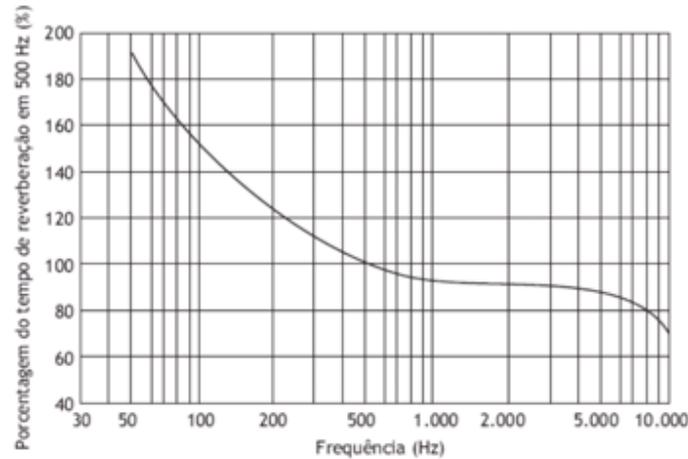


Fonte: Bistafa, 2011

Para as frequências diferentes de 500 Hz, é necessário estimar o tempo de reverberação recomendado através da **Figura 7** que relaciona o T_{60} das outras frequências com a porcentagem para 500 Hz.

O T_{60} pode ser obtido através de equações matemáticas e de medições com instrumentação adequada. De acordo com Zannim (2005), um método de cálculo é através da equação de Sabine, **Equação 5**, que leva em consideração o volume da sala e os materiais de revestimento das paredes com seus respectivos coeficientes de absorção sonora.

Figura 7. Gráfico para obtenção dos tempos de reverberação recomendados para outras frequências, como porcentagem do tempo de reverberação em 500Hz.



Fonte: Bistafa, 2012

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A_{recinto}} \quad (5)$$

onde V é o volume da sala e $A_{recinto}$ é a área de absorção sonora equivalente devido aos elementos construtivos da sala.

O valor do coeficiente de absorção sonora (α) está diretamente relacionado às propriedades físicas do material e varia com a frequência, assumindo valores entre 0 (para material totalmente refletivo) e 1 (para material com absorção sonora total).

Modificações feitas na equação de Sabine consideram a contribuição dos elementos relativos à funcionalidade do ambiente (pessoas, móveis etc.) no cômputo do coeficiente de absorção sonora destes e também a influência da absorção sonora devida ao ar. Dessa forma a área de absorção sonora equivalente dos elementos relativos à funcionalidade do ambiente fica como mostrado na **Equação 6**.

$$A = A_{parede,piso,teto} + A_{diversos} + A_{ar} \quad (6)$$

A formulação de Eyring-Norris leva em consideração uma falha na fórmula de Sabine, que consiste no fato de que, quando o $\alpha_{médio} = 1$, ou seja, a absorção do ambiente é total, o T_{60} não é nulo, propondo a **Equação 7** para o tempo de reverberação.

$$T_{60} = 0,163 \cdot \frac{V}{A_{ar} - S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad (7)$$

onde: S é a área total das paredes do ambiente e α_m é obtido pela **Equação 8**.

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S} \quad (8)$$

A equação de Sabine deve ser usada quando: o coeficiente médio de absorção for baixo (menor que 0,2), os materiais absorventes estejam distribuídos uniformemente, os coeficientes de absorção não são precisos e não se exige grande precisão nos cálculos.

A fórmula de Eyring-Norris deve ser usada quando: os materiais absorventes estejam distribuídos uniformemente, os coeficientes de absorção são conhecidos com exatidão e exige-se cálculo preciso do tempo de reverberação.

Estimou-se o tempo de reverberação do auditório pelos dois métodos citados, a fim de se comparar os resultados, e avaliar perante as indicações de tempos de reverberação ótimos para auditórios.

Para estimar esses parâmetros foi necessário o cálculo das áreas de parede, teto, assoalho, portas, entre algumas outras superfícies de cada material que compunha o projeto inicial do auditório e após a proposta de adequação acústica. Os dados foram coletados através da planta do auditório em modelo CAD. Foi necessário calcular também o volume total do auditório e levantar o número de poltronas.

Foi necessário encontrar os respectivos coeficientes de absorção sonora dos materiais que compõem as superfícies internas do auditório. Para tanto, utilizou-se de catálogos fornecidos por fabricantes e também referências bibliográficas específicas. Os dados utilizados são mostrados com detalhes na **Tabela 1**.

Tabela 1. Coeficiente de absorção sonora dos materiais.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Painel Nexacoustic 8	0,26	1,06	1,10	1,02	0,87	0,79
Painel Nexacoustic liso (MDF)	0,25	0,34	0,18	0,10	0,10	0,05
Placa cimentícia	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Forro mineral Opus	0,37	0,53	0,59	0,70	0,66	0,66
Concreto	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Carpete	0,09	0,18	0,21	0,26	0,27	0,47
Assoalho de madeira	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Vidro insulado	0,23	0,11	0,09	0,01	0,01	0,03
Portas	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Poltronas estofadas vazias	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Poltronas estofadas ocupadas	0,39	0,38	0,38	0,38	0,42	0,42
Gesso acartonado	0,01	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03

O equacionamento foi implementado então em MATLAB[®], e estimou-se o tempo de reverberação de Sabine e Eyring-Norris para dois casos distintos:

- 1 - Projeto inicial (sem tratamento acústico) e com o auditório vazio;
- 2 - Projeto inicial (sem tratamento acústico) e com metade do auditório ocupado.

A partir destas duas situações analisadas, o auditório foi considerado acusticamente inapropriado. Sendo necessária a modificação de sua geometria e revestimentos internos.

Para se determinar a disposição de montagem dos painéis de revestimento das paredes e do teto do auditório, foi utilizado o método das fontes virtuais.

O forro do teto que inicialmente seria de placas de gesso abaixo das treliças, deve ser substituído por 2 materiais distintos. A partir do palco, serão instaladas placas cimentícias (com alta capacidade de reflexão), divididas em 2 partes com angulações diferentes, e na parte final será utilizado material absorvente.

Nas paredes laterais devem ser instaladas placas de ISOSOFT FELT IR50 justapostas às paredes de alvenaria e sobre elas, placas de revestimento NEXOACUSTIC do tipo liso, sem furação, divididas em faixas com angulação de 2 graus em relação à parede de alvenaria e com um espaço de ar de 50 mm a partir das placas de ISOSOFT. Essas placas de NEXOACUSTIC têm a função de quebrar o paralelismo das paredes e direcionar as reflexões para as poltronas. Nas paredes ao fundo do auditório deve ser utilizada uma camada de ISOSOFT FELT IR50, com um espaço de ar de 50 mm da parede de alvenaria e placas de NEXOACUSTIC 8 justaposta às placas de ISOSOFT. O intuito desta modificação é evitar o eco e diminuir o volume de ar do ambiente, buscando um tempo de reverberação ótimo.

Nas paredes laterais do palco deverão ser utilizadas placas de revestimento NEXOACUSTIC do tipo liso, sem furação, justapostas à alvenaria. Nas paredes ao fundo do palco deve ser utilizada uma camada de ISOSOFT FELT IR50, justapostas às paredes de alvenaria e a uma distância de 50 mm devem ser instaladas placas cimentícias.

Mais algumas informações necessárias são:

- Com relação à sala de áudio, o vidro indicado é do tipo insulado com a seguinte construção: vidro laminado composto por 2 camadas de vidro de 3 mm de espessura cada e uma camada intermediária de Polivinil Butiral (PVB) de 0,76 mm de espessura, espaço (câmara) de 6 mm, vidro de 4 mm de espessura, garantindo uma atenuação sonora de pelo menos 25 dB Rw;
- Todas as portas serão acusticamente projetadas e hermeticamente instaladas. Recomenda-se o modelo de porta acústica de estúdio com atenuação sonora de pelo menos 30 dB Rw;
- O piso será coberto de carpete de nylon;
- O revestimento do palco será madeira encerada;
- As poltronas serão estofadas, equipadas com pranchetas e sistema de recolhimento antipânico.

Utilizando os métodos matemáticos de Sabine e Eyring-Norris foram estimados os tempos de reverberação para dois novos casos:

3 - Com tratamento acústico e com o auditório vazio;

4 - Com tratamento acústico e com metade do auditório ocupado;

Para a avaliação do campo sonoro, foram realizadas simulações via método do traçado dos raios acústicos, sendo necessário para tanto criar um modelo acústico tridimensional utilizando um programa CAD. Em um modelo acústico, todos os materiais que compõem o ambiente devem ser representados com suas propriedades acústicas (coeficientes de absorção e de reflexão sonora e a perda de transmissão sonora), bem como as fontes sonoras locais com informações de potência sonora e diretividade.

Foram realizadas duas simulações, sendo a primeira na condição inicial do auditório e a segunda com o modelo adequado acusticamente. Para reduzir o custo computacional, os planos receptores avaliados contemplaram somente as regiões onde se encontram as poltronas.

A potência sonora em bandas de frequência de 1/1 oitava e a diretividade da fonte sonora utilizada são mostradas nas **Tabela 2** e **Tabela 3**, respectivamente. O valor de potência sonora foi estimado a partir das curvas que delimitam o espectro sonoro da fala e a diretividade a partir da posição da boca na cabeça do ser humano.

Tabela 2. Valores utilizados para a potência sonora em bandas de 1/1 oitava.

Frequência [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NWS [dB(A)]	60	70	75	80	75	70	60	55

Tabela 3. Diretividade da fonte sonora.

Diretividade	0° - 30°	30° - 150°	150° - 300°
Atenuação [dB(A)]	-11	0	-11

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os níveis de ruído de fundo medidos em dB(A) nas ruas que circundam o auditório estão mostrados na **Tabela 4**.

Tabela 4. Valores de ruído de fundo no auditório e na vizinhança.

Local da medição	Níveis de Ruído medidos dB(A)
Rua Getúlio Guaritá	60,0
Rua da Constituição	66,2
Rua Conde de Prados	66,3
Rua Vigário Carlos	56,2
Local do auditório	48,3

De acordo com a norma NBR 10152:2017, os níveis de ruído indicados para salões de convenções são de 40 dB(A) e o nível máximo é de 45,0 dB(A). Como no momento das medições o auditório ainda se encontrava em fase de construção, sem o teto instalado, pode-se garantir que os níveis de ruído provenientes das ruas que o circundam não irão gerar transtorno.

Foi estimado o tempo de reverberação ideal para o caso de sala de conferência utilizando as **Figuras 6** e **7**, cujos resultados são mostrados na **Tabela 5**.

Tabela 5. Tempo de reverberação recomendados por banda de frequência de 1/1 oitava.

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T ₆₀ ideal [s]	1,421	1,127	0,98	0,902	0,921	0,862

Foram utilizados os métodos matemáticos de Sabine e Eyring-Norris para calcular o tempo de reverberação para os casos 1 e 2 (**Tabela 6** e **Tabela 7**).

Tabela 6. Tempos de reverberação de Sabine [segundos].

Caso	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1	4,89	3,95	3,49	2,94	2,62	2,02
2	2,94	2,86	2,80	2,46	2,17	1,74

Tabela 7. Tempos de reverberação de Eyring-Norris [segundos].

Caso	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1	4,68	3,72	3,26	2,75	2,47	1,94
2	2,70	2,62	2,56	2,26	1,99	1,64

Analisando as **Tabela 6** e **Tabela 7**, pode-se notar que os maiores tempos de reverberação aparecem no caso 1, no qual o auditório não possui tratamento acústico. Já no caso 2, para o auditório com pessoas presentes, o tempo de reverberação diminui consideravelmente já que as pessoas também absorvem o som.

Comparando os resultados das **Tabela 6** e **Tabela 7** com a **Tabela 5**, concluiu-se que o auditório não está corretamente projetado. Desta forma os tratamentos acústicos descritos na metodologia foram aplicados no modelo.

As **Figuras 8** e **9** ilustram as posições das fontes sonoras virtuais e respectivos raios acústicos provenientes das reflexões nas extremidades dos painéis de revestimento das paredes e do teto. Na **Figura 9** pode-se observar a disposição final de construção do teto, incluindo o mezanino.

Figura 8. Método das fontes virtuais aplicado para se determinar a posição dos painéis de revestimentos das paredes.

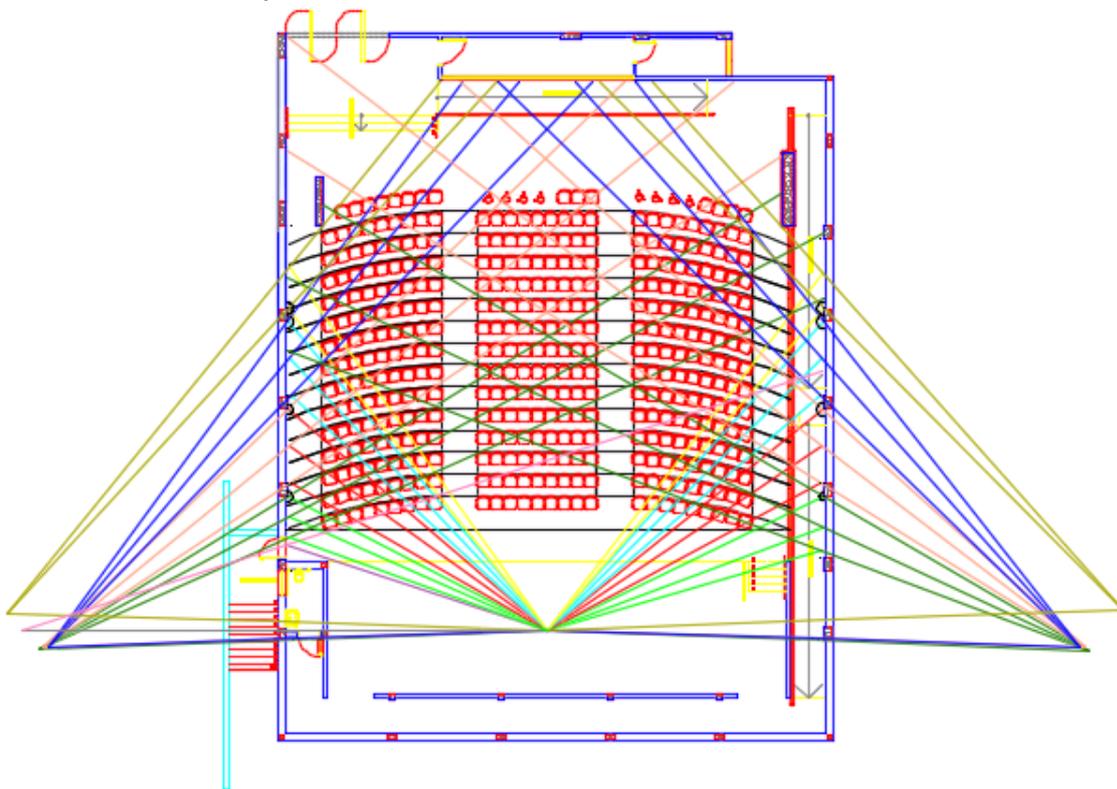
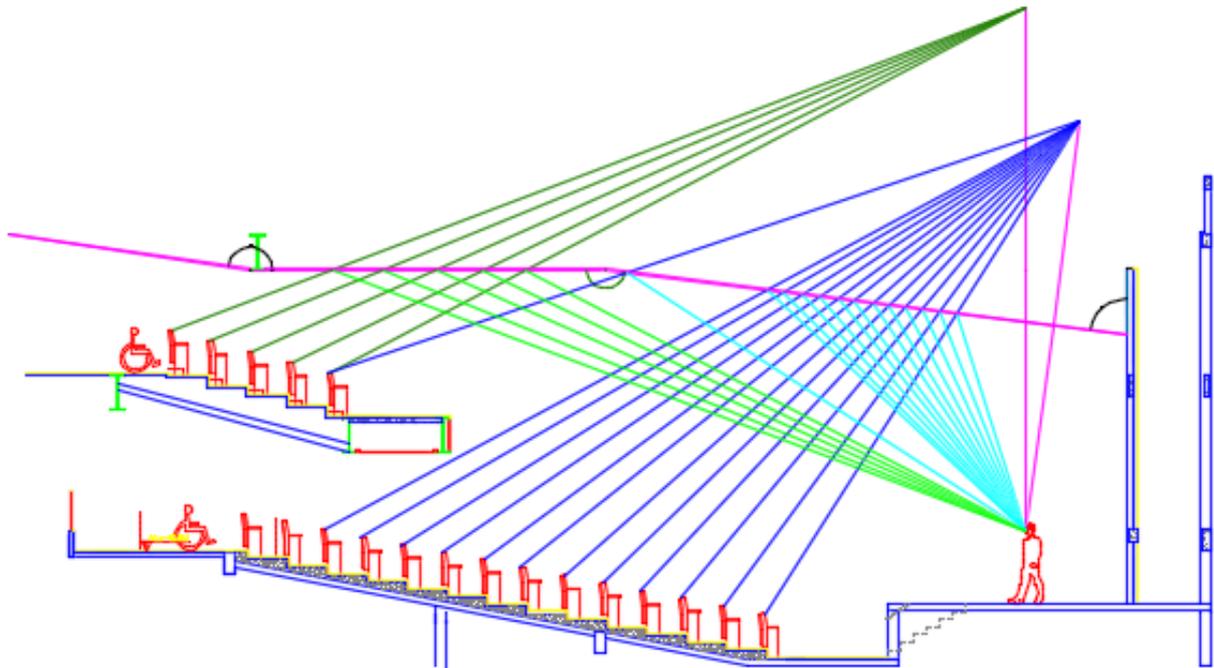


Figura 9. Método das fontes virtuais aplicado para se determinar a disposição dos painéis de revestimento do teto.



Os resultados das simulações de campo acústico para o mezanino e o térreo do auditório nas duas situações avaliadas (sem tratamento acústico e com tratamento acústico) são mostrados nas **Figuras 10 e 11**.

Figura 10. Campo sonoro no mezanino do auditório: a) sem tratamento acústico, b) com tratamento acústico.

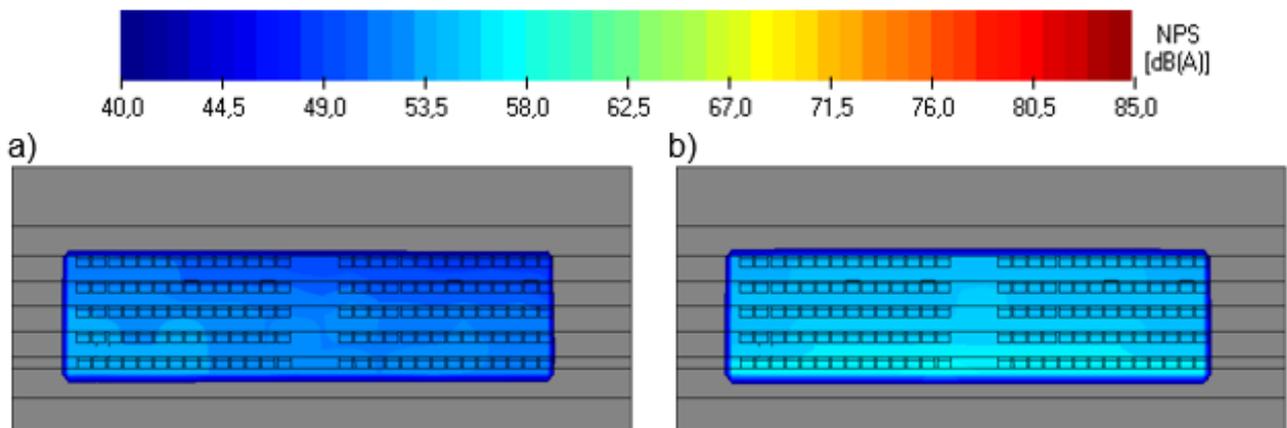
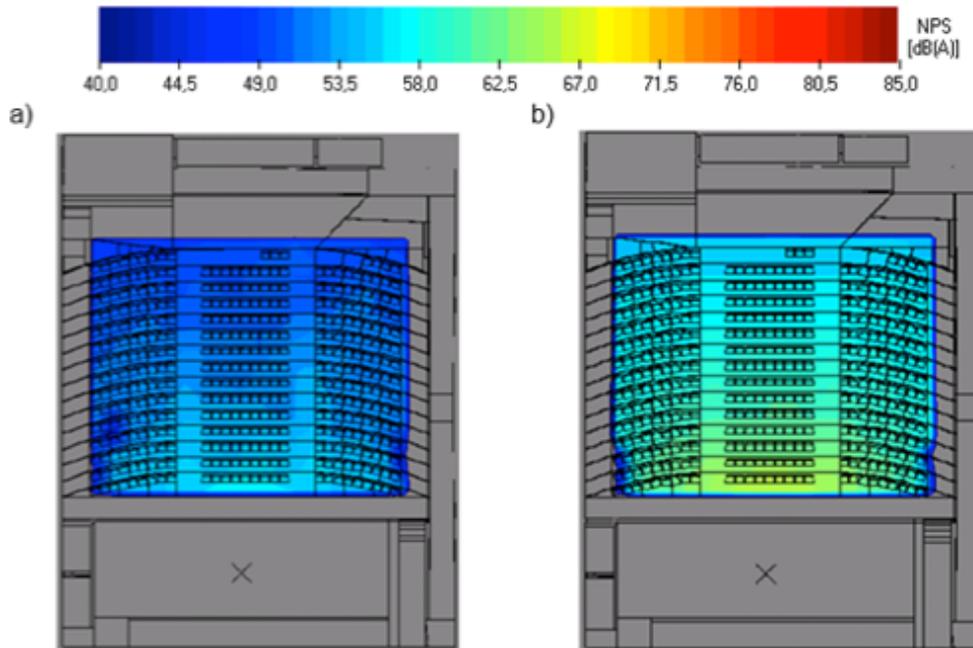


Figura 11. Campo sonoro no piso térreo do auditório: a) sem tratamento acústico, b) com tratamento acústico.



Pelas **Figura 10** e **Figura 11** constata-se que a instalação dos painéis reflexivos nas paredes e no teto amplificaram significativamente o som em cerca de 10 dB (A), melhorando a audibilidade nas poltronas mais afastadas do palco.

Para a segunda análise, estimou-se os tempos de reverberação para o auditório utilizando-se as equações de Sabine e de Eyring-Norris. Os cálculos foram realizados utilizando-se o programa MATLAB[®]. A **Tabela 8** apresenta as áreas utilizadas para os cálculos do tempo de reverberação após a consideração da aplicação do tratamento acústico.

Os resultados para os tempos de reverberação de Sabine e Eyring-Norris são mostrados nas **Tabela 9** e **10**, respectivamente.

Tabela 8. Áreas para cada material utilizado (m²).

Área com NEXACOUSTIC 8	196,00
Área com NEXACOUSTIC liso (MDF)	382,46
Área com carpete	727,68
Área do palco (assoalho de madeira)	97,17
Área das colunas de concreto	69,44
Área com placa cimentícia (teto do auditório)	447,38
Área com forro Opus (teto do auditório)	121,28
Área com forro Opus (teto abaixo do mezanino)	167,63
Área do vidro duplo	8,63
Área total de portas	9,96

Tabela 9. Tempos de reverberação de Sabine [segundos].

Caso	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
3	1,94	1,16	0,97	0,78	0,70	0,62
4	1,54	1,04	0,90	0,74	0,66	0,59

Tabela 10. Tempos de reverberação de Eyring-Norris [segundos].

Caso	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
3	1,68	0,87	0,67	0,49	0,41	0,36
4	1,27	0,75	0,61	0,45	0,36	0,32

Analisando as **Tabela 9** e **Tabela 10**, no terceiro caso, para o auditório com tratamento acústico e vazio, o tempo de reverberação diminui mais de 50% em relação ao primeiro caso. Já para o quarto caso, nota-se uma diminuição no tempo de reverberação em relação ao terceiro caso em decorrência da presença de pessoas.

De acordo com a **Figura 6**, o tempo de reverberação ideal para o auditório com o volume de 3795,38 m³ e para a frequência de 500 Hz seria de aproximadamente 0,9 segundos.

Pelas **Tabela 9** e **Tabela 10** observa-se que o tempo de reverberação estimado pelo método de Sabine foi o que mais se aproximou do valor ótimo para o auditório.

CONCLUSÕES

Com o presente trabalho foi possível visualizar o impacto que o tratamento acústico tem sobre a qualidade sonora de um auditório.

A simulação realizada através do método do traçado de raios, evidenciou a necessidade das adequações acústicas. Após a simulação, constatou-se que a instalação de painéis reflexivos nas paredes e no teto amplificou significativamente o som, melhorando a audibilidade nas fileiras de poltronas mais afastadas do palco.

A utilização de painéis reflexivos nas laterais e teto garante que as reflexões no auditório sejam controladas, voltando o som para a plateia. Já os materiais absorventes instalados nas paredes e no teto na parte do fundo do auditório evitam que possíveis reflexões ocorram naqueles locais, o que geraria eco.

Com a aplicação do método das fontes virtuais foi possível obter o posicionamento e a angulação correta dos painéis reflexivos do auditório.

Por fim, com os cálculos dos tempos de reverberação pelos métodos de Sabine e Eyring-Norris, foi possível estimar o tempo de reverberação do auditório antes e após a adequação acústica, sendo o tempo de reverberação médio calculado pelo método de Sabine para a frequência de 500 Hz de aproximadamente 0,9 segundos, atendendo ao recomendado na literatura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152:2017** - Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179:1992** - Tratamento acústico em recintos fechados - Procedimento.

BASTOS, L.J.R. **Qualidade Acústica de Auditórios**. Universidade de Aveiro. Coimbra, 2010.

BERANEK, L. L. *Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 120(3):1399–1410, 2006.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

BORISH, J. *Extension of the image model to arbitrary polyhedra*. **Journal of the Acoustical Society of America**, 75(6):1827–1836, June 1984.

DE MARCO, C.S. **Elementos de acústica arquitetônica**. São Paulo: Nobel, 1982.

KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. Spon Press (UK), 2000.

RINDEL, J. H. *The use of computer modelling in room acoustics*. **Journal of Vibroengineering**, 3(4):41–72, 2000.

SAVIOJA, L. *Modeling Techniques for Virtual Acoustics*. PhD thesis, **Helsinki University of Technology**, 1999.

SHIELD, B. M.; YANG, L. N. *Development of a ray tracing computer model for the prediction of the sound field in long enclosures*. **Journal of Sound and Vibration**, 229(1):133–146, Jan. 2000.

TÔRRES, M. H. C. **Simulação acústica de ambientes**, AcMus, 2008.

VALLE, S. **Manual Prático de Acústica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2009. 355 p.

VORLÄNDER, M. *Room acoustical simulation algorithm based on the free path distribution*. **Journal of Sound and Vibration**, 232(1):129–137, Apr. 2000.

ZANNIM, P. H. T. et al. **Comparação entre tempos de reverberação calculados e medidos**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 75-85, out./dez. 2005.

Recebido em: 20/09/2018

Aprovado em: 16/10/2018