



**XV ENCAC** Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

**XI ELACAC** Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

2019

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

## QUALIFICAÇÃO DE CÂMARA REVERBERANTE DE ABSORÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO COMPUTACIONAL

**Tamires Lenhart (1); Bianca Walter (2); Rafael Ferreira Heissler (3); Maria Fernanda de Oliveira (4)**

- (1) Acadêmica de Arquitetura e Urbanismo, Bolsista IC tlenhart@edu.unisinos.br , itt Performance,
- (2) Acadêmica de Arquitetura e Urbanismo, Estagiária, biancagw@edu.unisinos.br , itt Performance,
- (3) M.Sc., Analista de projetos, rheissler@unisinos.br, itt Performance,
- (4) Dr<sup>a</sup>., Coordenadora MPArqUrb, mariaon@unisinos.br, itt Performance, itt Performance UNISINOS, São Leopoldo, RS 93022-750, Rio grande do Sul

### RESUMO

A qualidade acústica de ambientes influi diretamente nas atividades de um local e a especificação adequada dos materiais de acabamento e revestimentos internos pode solucionar diversos problemas relacionados a falta de inteligibilidade em ambientes internos. A indústria de materiais da construção civil tem mostrado uma preocupação maior com a qualidade de seus produtos para que esses atendam ao mínimo apontado nas normas, levando mais conforto para a população no geral. Nesse sentido, pode-se indicar que a falta de qualidade acústica das edificações, vem sendo estudada mais a fundo, como pesquisa e nicho de mercado, pois comprovadamente o condicionamento precário dos ambientes, bem como a especificação e uso indevido de materiais, pode afetar a saúde física e psicológica do usuário. Para a resolução desses problemas, ensaios acústicos de laboratório são essenciais para a adequada caracterização dos materiais, com a redução dos níveis sonoros e o consequente aumento da satisfação dos usuários desses lugares. Além dos ensaios de laboratório, ainda existem softwares que oferecem um meio mais ágil para verificação do condicionamento acústico dos espaços. Dessa forma, os laboratórios de acústica precisam que suas câmaras estejam qualificadas para a determinação dos coeficientes de absorção dos materiais a serem utilizados em ambientes internos. Este trabalho apresenta o registro do processo de qualificação da câmara reverberante do itt Performance da Unisinos para ensaios de determinação do coeficiente de absorção de materiais. Este ensaio acontece conforme prescrito na norma, que preconiza os passos a serem seguidos, o método de ensaio é de ruído interrompido. A qualificação consiste na instalação gradual de difusores com o acompanhamento da estabilidade do tempo de reverberação na câmara reverberante. O estudo envolveu ensaios de medição do tempo de reverberação na câmara e a simulação computacional com o software Catt Acoustic, v09. Foram realizadas comparações a partir dos resultados dos ensaios experimentais em laboratório, conforme a norma ISO 354, e os modelos de simulações computacionais para a validação do modelo digital, a partir da comparação de tempo de reverberação e do coeficiente de absorção sonora e dissipação do som pela câmara com amostra padrão e sem amostra padrão. Além disso, foram realizados estudos da dispersão do som para diferentes comprimentos de onda, em bandas de terço oitava entre 100 Hz e 5 kHz, através de repetitivos ensaios, designando a área total necessária de difusores de 15 m<sup>2</sup>. Conclui-se com a pesquisa que a comparação foi satisfatória sendo que a diferença máxima de variação apresentada em todos os casos comparados do tempo de reverberação foi de 9,02%.

Palavras-chave: Acústica arquitetônica, Ensaios em laboratório, Simulação computacional.

### ABSTRACT

The acoustic quality of environments directly influences the activities developments in the place and the proper specification of the materials of finishing and internal coatings can solve several problems related to lack of intelligibility in internal environments. The construction materials industry has shown a greater concern with the quality of its products so for this purpose they meet the minimum stated in the norms, bringing more comfort to the people in general. In this sense, it can be pointed out that the lack of acoustic quality of the buildings has been studied more deeply, such as academics research and market opportunity, since the precarious conditioning of the environments, as well as the specification and misuse of materials, can affect the physical and psychological health of the user. To solve these problems, acoustic laboratory

tests are essential for the adequate characterization of the materials, with the reduction of sound levels and the consequent increase of the user satisfaction in these places. In addition to the laboratory tests, there are still software's that offer a faster way to verify the space acoustic conditioning. This way, acoustic laboratories need their rooms to be qualified for determining the absorption coefficients of the materials to be used indoors. This work presents the recording of the qualification process of the Unisinos, Itt Performance reverberant room for tests to determine the material absorption coefficient. This test proceeds through the standard's description, which dictates the steps to be followed, the test is conduct by the method interrupted noise. The qualification consists of the gradual installation of diffusers with the accompaniment of the stability of the reverberation time in the reverberant room. The study involved measurements of reverberation time in the chamber and computer simulation with Catt Acoustic software, v09. Comparisons were made from the results of the experimental tests in the laboratory, according to ISO 354, and the computer simulations models for the validation of the digital model, from the comparison of reverberation time and sound absorption coefficient and sound dissipation by the room with standard sample and no standard sample. In addition, sound dispersion studies were performed for different wavelengths, in third-octave bands between 100 Hz and 5 kHz, through repetitive tests, designating the total area required for diffusers that was an area of 15 square meters. It was concluded with the research that that the comparison was satisfactory and that without the sample or with sample the maximum difference of variation in reverberation time was reached in 9.02%.

Keywords: Architectural Acoustics, Laboratory Tests, Computer Simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

Para se obter a qualidade acústica de salas é necessário que tenha a compreensão sobre a geração e transmissão do som (VORLÄNDER, 2010). Para se garantir a adequada inteligibilidade são necessários, muitas vezes, estudos em laboratório, em campo e o uso de ferramentas computacionais afim de se proporcionar condições sonoras adequadas aos usuários, para o desenvolvimento de análises dos parâmetros de qualidade acústica com base no comportamento de materiais para diferentes bandas de frequências (CULLING, 2016).

Os ensaios para determinação dos coeficientes de absorção sonora são essenciais para a obtenção de informações a serem utilizadas nos projetos de condicionamento acústico de salas, que tem como principal parâmetro o tempo de reverberação. A absorção sonora é uma característica de materiais para o controle da reverberação através da redução da reflexão do som incidente na superfície desses materiais. Afim de se obter resultados para os materiais a serem utilizados nas soluções de condicionamento acústico, os coeficientes de absorção sonora são definidos em ensaios em câmaras reverberantes, com amostras instaladas no interior da câmara, que podem ser compostas por diferentes tipos de objetos, como mantas, cadeiras, tapetes, cortinas, forros, entre outros sistemas e dispositivos.

As simulações computacionais, atualmente, apresentam grande importância nos processos de projeto de acústica de salas, com possibilidades de maior agilidade e diversidade nos testes a serem realizados, a partir do desenvolvimento de modelos que expressem determinada realidade sonora de um espaço. Além disso, os estudos realizados a partir de simulações podem ter como vantagem o aprofundamento de conhecimento sem a complexidade que pode existir nas questões operacionais e de custos do transporte de amostras, e no tempo dispendido para se testar condições específicas, que podem até mesmo inviabilizar a abordagem experimental de uma pesquisa (BIES; HANSEN, 2017). Segundo Wang (2013), o termo “modelo” pode adquirir significados diferentes dentro da literatura de simulações computacionais, sendo que, conforme destaca o próprio autor, a representação através de um modelo pode significar uma simples representação por meio de imagem fixa de um objeto real. Nesse caso, as designações de “modelo tridimensional”, “modelo de sala”, “modelo poligonal”, “modelo CAD” são utilizadas para identificar os objetos de estudo. No entanto, a representação isoladamente não é capaz de gerar novas informações, pois para que se possa utilizar a denominação de “modelo” são necessários: as definições das formas de interação entre a representação gráfica; e os atributos de cada elemento do modelo. Dessa forma, a validação dos modelos computacionais são uma importante etapa desse tipo e pesquisa, para que a expressão de uma determinada realidade seja devidamente aceita.

A validação de um modelo consiste na comparação de resultados obtidos em uma situação real e obtidos na simulação, sendo que, nos estudos de acústica de salas, usualmente, são comparados resultados de tempo de reverberação de ambientes internos (VORLÄNDER, 2010; BIES; HANSEN, 2017). As etapas podem ser resumidas em: estimação, calibração, validação e aplicação. A estimação ocorre com o uso de parâmetros ou coeficientes do modelo mensurados anteriormente, como, por exemplo, os coeficientes de absorção de materiais. A calibração consiste no ajuste desses parâmetros do modelo, com a finalidade de reproduzir um conjunto de dados de referência. A etapa de validação é a comparação propriamente dita, que

deve expressar uma condição adequada de semelhança entre os sistemas a partir de informações de referências. A validação sendo bem-sucedida, pode-se utilizar o modelo em análises e avaliações de sistemas ainda não observados. Dessa forma, pode-se afirmar que a etapa de validação é um processo iterativo não linear, pois envolve diversas etapas e procedimentos de ajustes (WANG, 2013; VORLÄNDER, 2008).

Nessas simulações, a técnica mais conhecida para essas estimativas da propagação do som, também considerada confiável e eficaz, é o método de rastreamento de raios *Ray tracing* (ONDET, 1989; SEQUEIRA; CORTINEZ, 2012).

Os ensaios realizados para a obtenção dos coeficientes de absorção sonora são realizados em câmara reverberante, a qual deve atender à requisitos da norma ISO 354:2003, sendo necessárias verificações periódicas da capacidade de se obter resultados válidos nesses ensaios. Dessa forma, a qualificação das câmaras é um dos principais processos de validação dos ensaios experimentais, com a necessidade de controle do campo sonoro a partir da instalação de difusores em seu interior. Esse processo de qualificação da câmara se faz importante para que haja mais precisão na determinação dos coeficientes de absorção em diferentes materiais utilizados no condicionamento acústico de salas. Complementarmente, as simulações computacionais são uma importante ferramenta para tornar esse processo mais ágil, pois a instalação desses difusores pode ser previamente testada, antes da sua instalação definitiva.

Este trabalho buscou validar os modelos computacionais de uma câmara reverberante para ensaios de determinação de coeficientes de absorção, para a execução de processos mais ágeis de qualificação da câmara e consequente controle metrológico nesses ensaios, a partir de análises comparativas do tempo de reverberação dos ensaios de laboratório e nas simulações no software.

## 2. MÉTODO

O estudo foi realizado na câmara reverberante para determinação de coeficientes de absorção do itt Performance da Unisinos. Para o levantamento das informações necessárias e dados da geometria da câmara foram utilizados equipamentos de medições, como trena e estação total. Os dados foram registrados por meio eletrônico com o uso dos softwares Autocad e SketchUp, sendo posteriormente exportados para o software Catt Acoustic V09.01 para a elaboração do modelo computacional.

Na implementação do modelo foram consideradas as fontes sonoras pertinentes, os receptores e a geometria da sala. As superfícies planas desse modelo foram caracterizadas por sua capacidade de absorver e dispersar a energia sonora incidente, tendo como dados características os coeficientes de absorção e de espalhamento. A temperatura mínima no interior da câmara deve ser de 15 °C, e a umidade relativa do ar deve estar na faixa entre 30 e 90%. Além disso, a norma ISO 354 indica algumas caracterizações relativas a geometria da câmara reverberante, conforme Tabela 1:

Tabela 1 - Características de geometria pela norma

Características	Quantidades
Área do piso (m <sup>2</sup> )	59,8
Volume total (m <sup>3</sup> )	200,3
Área superficial (m <sup>2</sup> )	218,00
Área total de difusores após a qualificação (m <sup>2</sup> )	15,35
Quantidade de difusores após a qualificação (unid)	17

### 2.1. Medição em laboratório

No procedimento de ensaio, primeiramente são medidas temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa no interior da câmara, pois, estes fatores podem alterar significativamente os resultados. Nesse ensaio, as medições resultaram na temperatura média de 26,8 °C, a umidade relativa do ar de 63,6 % e a pressão atmosférica igual a 100,4 kPa.

O ensaio é realizado conforme procedimentos da norma ISO 354:2003, para cada posição da fonte são utilizadas 4 posições de microfone, totalizando 12 pontos de microfone/fonte. Para a repetibilidade correta e adequada a amostra é posicionada de forma não paralela em relação às paredes, conforme ilustrado na Figura 1, em que podem ser observadas também as posições de microfone e fonte emissora nos pontos demarcados. O tempo de excitação sonora, em que a fonte permanece em funcionamento, é a metade do tempo de reverberação da sala, sendo de aproximadamente 8 segundos.

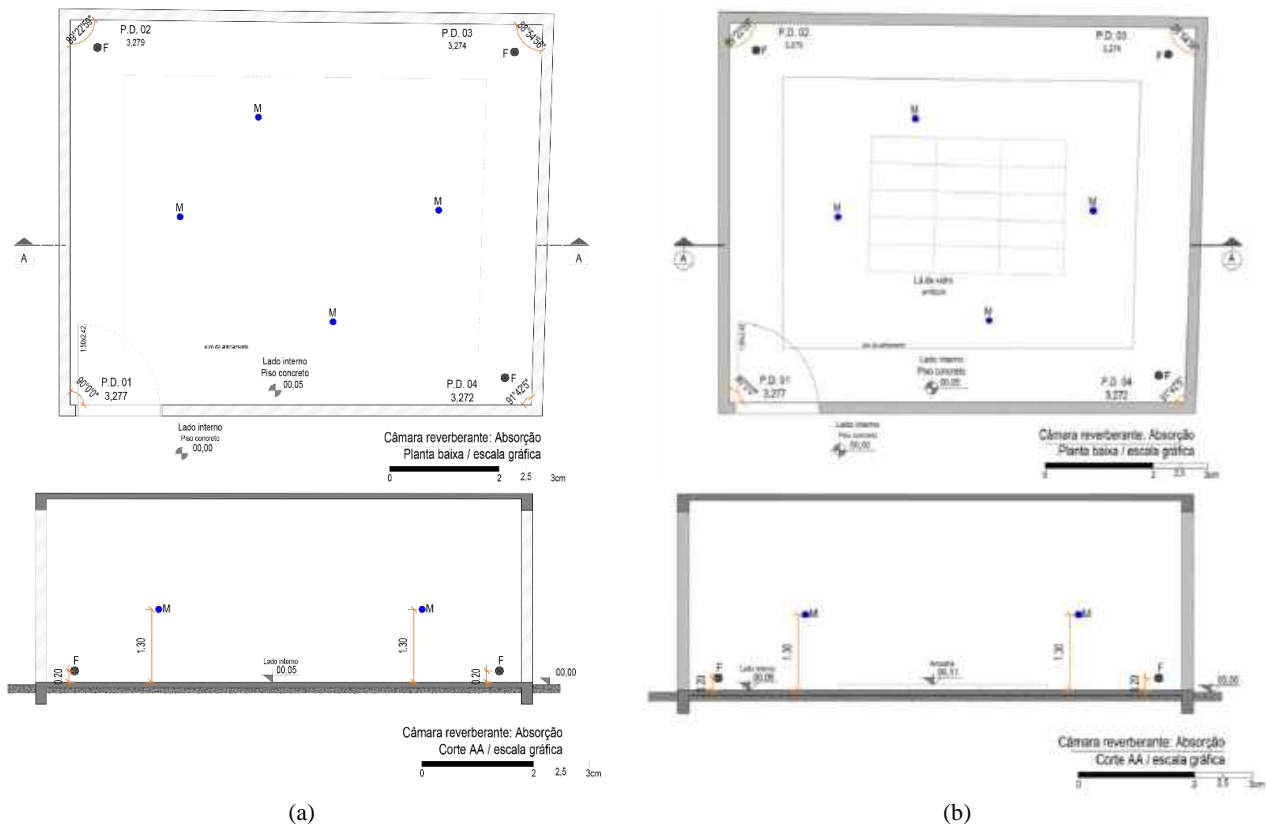


Figura 1 – Geometria da câmara (a) planta baixa e corte sem amostra (b) planta baixa e corte com amostra

O ensaio para qualificação foi conduzido primeiramente com a câmara vazia, pelo método descrito anteriormente. No segundo ensaio, foi colocado um grupo de difusores, totalizando uma área equivalente a 5m<sup>2</sup>. O ensaio foi novamente realizado, do mesmo método anterior e como a difusão do som não foi estabilizada, o método foi repetido por mais quatro vezes, da mesma forma e a cada ensaio o número de difusores aumentava por grupos de difusores aleatoriamente colocados pela câmara, sempre com cuidado para que os grupos fossem mantidos com área máxima até 5m<sup>2</sup>. Segundo o que a norma orienta, os difusores devem ser constituídos de material com baixa absorção sonora, a massa por unidade de difusor não deve passar de 5 kg/m<sup>2</sup>, sendo assim, foram usados difusores de acrílico. Os difusores devem ter tamanhos diferentes, as áreas devem variar de 0,8 m<sup>2</sup> a 3,0 m<sup>2</sup>, assim como podem ser moldados com superfícies curvas, podendo estar espalhados aleatoriamente pela sala.

A amostra padrão, para teste verificação da difusão do som, deve ter espessura de 5 cm a 10 cm, ser um material absorvente, poroso e homogêneo, e deve também ter um coeficiente de absorção sonora maior que 0,9. No caso dessas amostras que são materiais independentes de dimensões 0, 50 x 1,20 m devem ser unidas, para que alcancem a dimensão demonstrada em norma (conforme Figura 2), com área total entre 10 m<sup>2</sup> e 12 m<sup>2</sup>, segundo a ISO 354:2003.



Figura 2 – Câmara reverberante de absorção com amostra considerada padrão de lã de vidro, com as medidas de 2,50x3,60m

## 2.2. Modelagem computacional

Na simulação computacional, primeiramente a geometria da câmara foi criada através de coordenadas, assim

como a fonte emissora e o microfone receptor. As bandas de frequências consideradas no software a serem utilizadas serão em terços de oitava, nas bandas de frequências centrais de 125 Hz a 4000 Hz. Na câmara reverberante, a fonte emissora, nesses ensaios, está assumindo três posições diferentes, enquanto os microfones permanecem na mesma posição. A altura da fonte está diretamente no chão a 0,20 m de altura até seu eixo, já para o microfone receptor usa-se um tripé e do chão até seu eixo tem-se 1,30 m.

Os procedimentos de simulação via software consistem no uso de vários arquivos de base, para as configurações corretas das coordenadas para cada elemento que compõe a geometria da câmara reverberante. O arquivo base para definições gerais do objeto de estudo é denominado de *PROJECT.File*, sendo as coordenadas dos vértices que formam o modelo geométrico inseridas no arquivo de *GEO.File*. Já as coordenadas referentes as posições da fonte sonora são indicadas em arquivo denominado *SCR.File*, nele também são definidas as configurações de ruído rosa e de níveis de pressão sonora para essas fontes. As configurações do microfone são definidas no arquivo de *REC.File*, sendo informadas todas as 4 posições do microfone e as suas respectivas coordenadas. Para as configurações da câmara, como pressão atmosférica, temperatura e umidade, no momento do ensaio foram definidas na ferramenta *Acoustic Enviroment*. Depois das coordenadas ajustadas em todos estes arquivos, formato *TXT*, foram inseridas as informações das qualificações, como referência para as análises comparativas das simulações. As análises da dissipação sonora no interior da câmara reverberante foram realizadas com o uso da ferramenta *Time Trace*, sendo configurados o *Time Step* em 2 ms e o *Max Order* em 3, ou seja, a representação visual do som direto com duas reflexões. O número de raios simulados foi de 5000 raios, para melhor visualização da dispersão do som.

Depois de ter ajustado todas as configurações, o modelo da câmara foi gerado, primeiramente com a câmara de absorção vazia, conforme ensaio sem amostra e sem difusores (Figura 3). Na simulação as posições assumidas para fonte (A0, A1 e A2) e microfone (01, 02, 03 e 04) foram consideradas de forma simultânea, com comparações entre as médias de todos os ensaios.

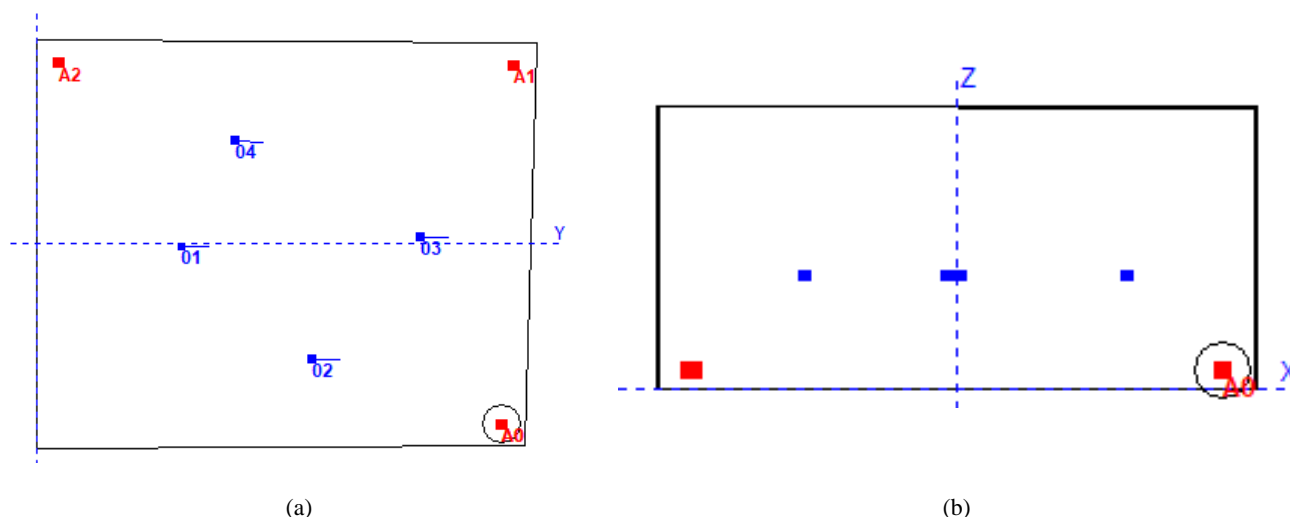


Figura 3 – Geometria da câmara vazia retirada do software (a) vista superior (b) vista lateral esquerda

Após a modelagem da câmara vazia, a etapa posterior consistiu na inserção do elemento correspondente à amostra, ainda sem difusores na câmara. Pode-se perceber o posicionamento da amostra na câmara, representado pelo retângulo interno, conforme modelo adotado neste estudo (Figura 4).

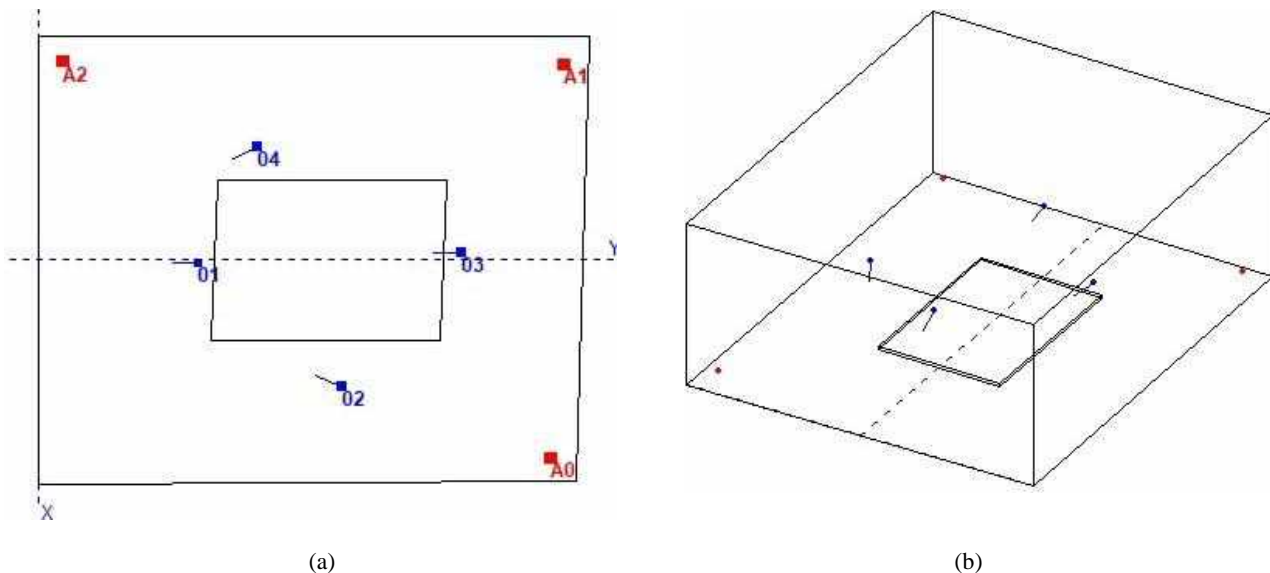


Figura 4 – Amostra padrão dentro da câmara; (a) Vista superior e (b) Perspectiva

Posteriormente a amostra ter sido posicionada, foram colocados os grupos de difusores, em grupos que correspondiam a área de 5m<sup>2</sup>, com a difusão sonora já definida no ensaio experimental em laboratório. Dessa forma, no modelo computacional, os difusores foram inseridos conforme a quantidade definida em laboratório. Os difusores têm tamanhos diferentes, sendo sua fixação feita em tirantes com posicionamento aleatório. Foram utilizadas peças retangulares de acrílico, moldadas em formato côncavo, antes da instalação. Para a simulação no software, a modelagem dos difusores seguiu o padrão de composição de triângulos, conforme indicado por Vorländer (2008), seguindo as medidas utilizadas no laboratório.

Esta modelagem dos difusores seguiu o sistema *meshing*, em que os elementos do modelo são todos compostos por uma malha, que funciona como um sistema de pontos e coordenadas nas suas superfícies, formando planos e nós (Figura 5). Essa simplificação geométrica, com os adequados atributos do modelo, traz maior agilidade ao processo de validação de um modelo computacional (HOPKINS, 2007; VORLÄNDER, 2008). A calibração do modelo computacional foi realizada a partir de comparações entre os valores de tempo de reverberação dos ensaios em laboratório e dos valores obtidos na simulação computacional. Para essa etapa os coeficientes de absorção da amostra (Tabela 2) e a geometria da câmara não sofreram alterações. A etapa posterior de validação do modelo teve como principal critério a expressão da condição de semelhança entre os valores de tempo de reverberação da câmara reverberante do laboratório e do modelo computacional.

Tabela 2 – Coeficientes de absorção da amostra admitidos na modelagem computacional

Banda de frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Coefficiente de absorção	0,16	0,52	0,82	0,92	0,94	0,96

### 3. RESULTADOS

A verificação dos coeficientes de absorção durante o ensaio ocorreu a partir da instalação dos difusores, em grupos de 5 m<sup>2</sup> conforme a ISO 354:2003. No entanto, para um estudo mais aprofundado, a qualificação foi realizada com grupos com área de 2,5 m<sup>2</sup>. No gráfico da Figura 5 são mostrados os resultados dos ensaios de qualificação da câmara a partir de ensaios experimentais em laboratório. A partir do aumento gradual na área de difusores, foi considerado o resultado, para fins de quantificação dos difusores, o coeficiente de absorção médio de 0,93, o que corresponde a área de 15,35 m<sup>2</sup> de difusores.

A partir desses resultados, foram realizadas as análises da dispersão do som no interior da câmara reverberante para diferentes bandas de frequências, com o uso da ferramenta *Time Trace*, conforme a configuração adotada neste estudo para representar a reverberação do som.

Para os resultados de dissipação do som, para cada frequência, demonstram a diferença e efeito do desempenho do material absorvente, neste caso a lã de vidro, que já tem um coeficiente de absorção conhecido. A dissipação do som apresenta resultados diferentes, pelo tempo calculado de reverberação e de formas diferentes, conforme os posicionamentos da fonte sonora e dos microfones. As fontes foram analisadas separadamente e, para ilustrar os resultados, foi considerada a fonte A0 (Figura 6). Para a representação da dispersão do som são utilizadas cores para que o mapeamento da influência da reverberação possa ser realizado de forma visual.

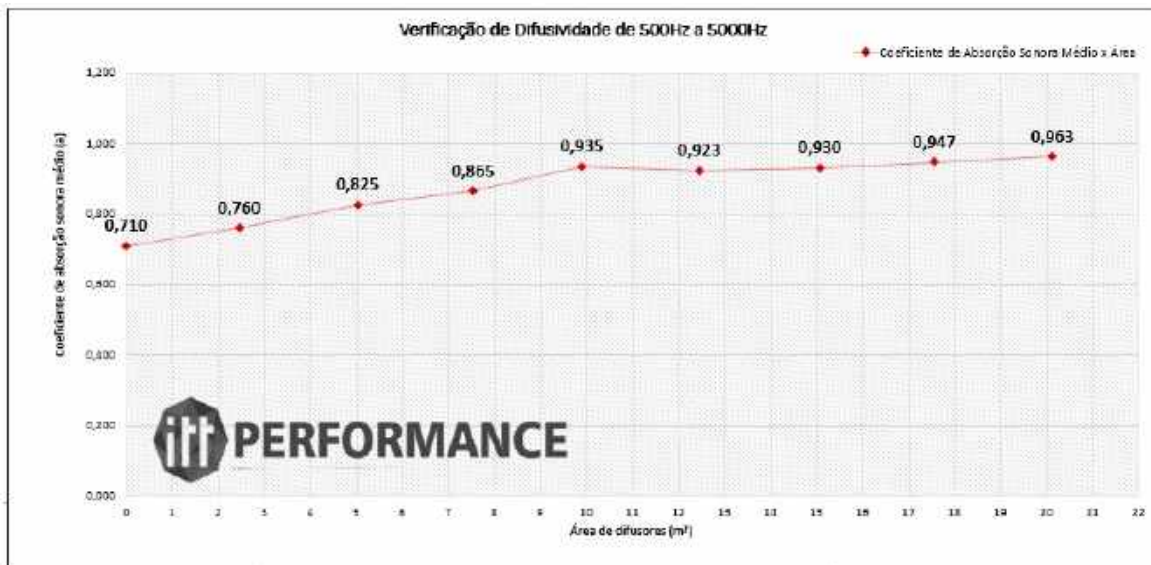


Figura 5 – Gráfico do coeficiente de absorção médio nos ensaios em laboratório.

Na Figura 6 são apresentados alguns dos resultados da modelagem da dispersão do som na banda de 500 Hz na câmara reverberante, com destaque para o início das reflexões de 2ª e 3ª ordem nos primeiros 5 ms de excitação sonora (Figura 6a); o aumento da influência das reflexões de 3ª ordem no tempo de 15 ms (Figura 6b); e o momento em que da última incidência direta da onda aos 25 ms (Figura 6c).

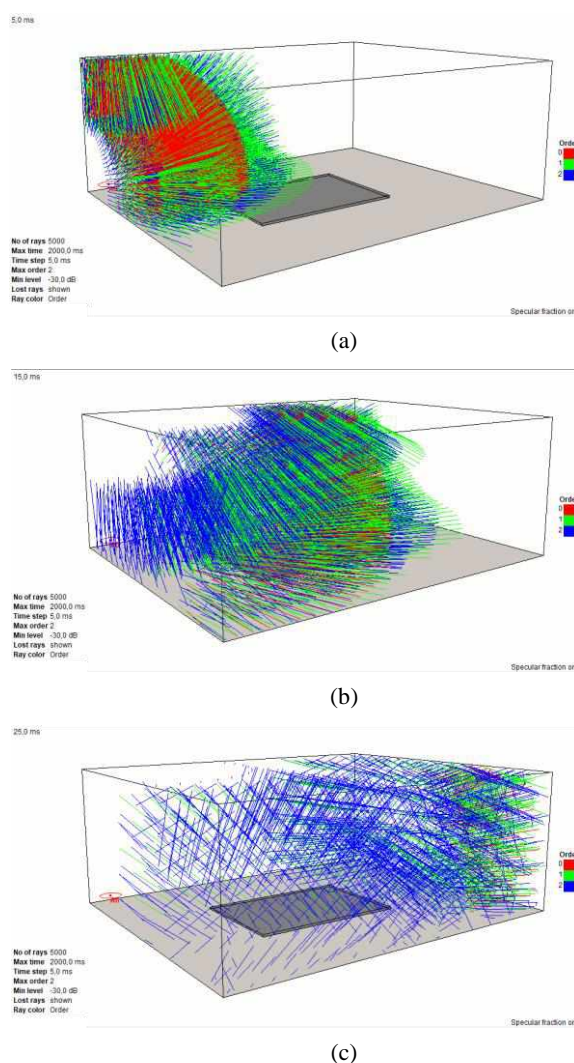


Figura 6 – Modelagem da dispersão do som na câmara reverberante na banda de 500 Hz no tempo de (a) 5 ms, (b) 15 ms e (c) 25 ms

Com a verificação da dispersão sonora em todas as bandas de frequências analisadas foi possível verificar o funcionamento do modelo, com expressão do ambiente reverberante interno da câmara. A inserção dos difusores no modelo computacional seguiu os procedimentos da modelagem geométrica triangular, com o posicionamento aleatório adotado na câmara reverberante do laboratório. Na Figura 7 pode-se visualizar o modelo da câmara reverberante com difusores de acrílico modelados com o posicionamento aleatório também na altura.

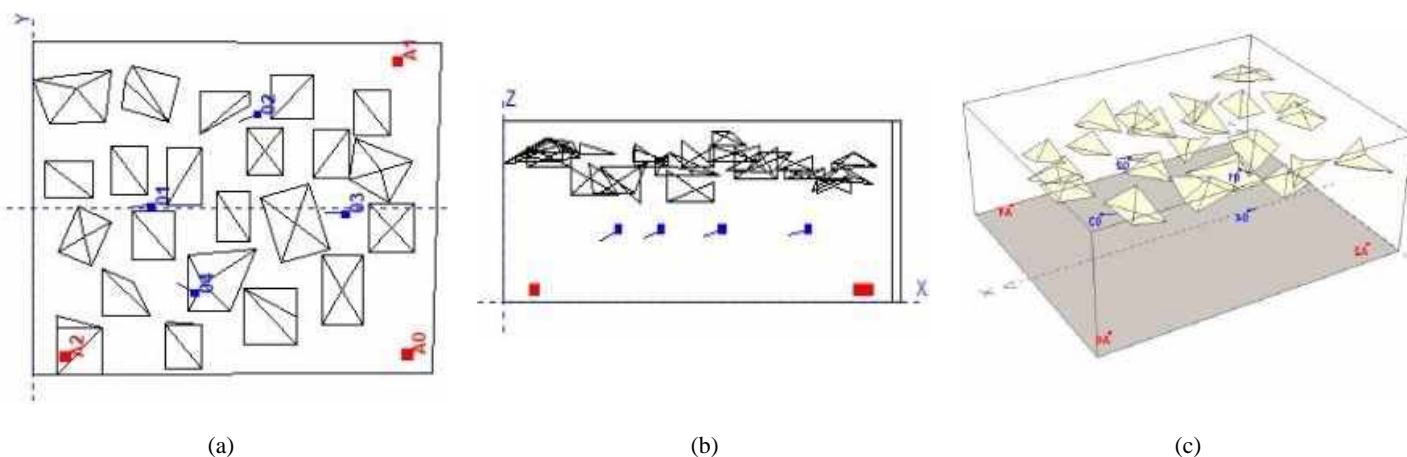


Figura 7 – Modelo da câmara com difusores de acrílico (a) vista superior (b) vista lateral esquerda e (c) perspectiva

Para a calibração do modelo computacional foram comparados os valores de tempo de reverberação dos ensaios em laboratório e dos valores obtidos na simulação computacional. Na etapa de validação, ou seja, a comparação propriamente dita, foi verificado que os valores médios de tempo de reverberação atenderam aos critérios de semelhança de resultados. Na simulação foram analisados os resultados para a câmara com amostra e sem difusores e com o número de difusores apontado nos resultados da qualificação (Figura 8).

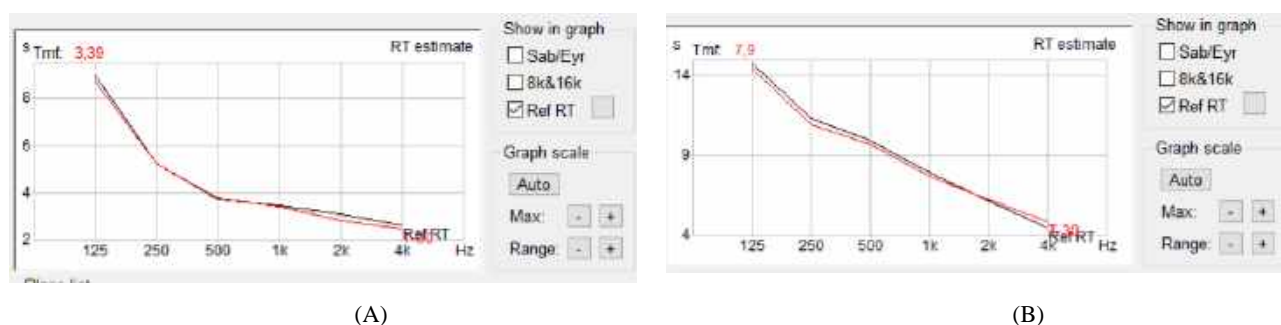


Figura 8 – Resultados para o tempo de reverberação condizente com os resultados de laboratório (A) com amostra (B) sem amostra

#### 4. CONCLUSÕES

As ferramentas computacionais podem ser utilizadas tanto para a etapa de projetos de ambientes, quanto no controle da qualidade metrológica de laboratórios que geram informações relevantes para esses projetos, pois os ensaios de laboratório são essenciais para a adequada caracterização dos materiais. Este trabalho apresentou um dos procedimentos utilizados na qualificação da câmara reverberante para determinação dos coeficientes de absorção sonora do itt Performance da Unisinos, a partir da validação de um modelo computacional. Através da comparação entre os resultados dos ensaios experimentais de qualificação da câmara reverberante, os modelos computacionais foram validados no Software Catt Acoustic, considerando-se a quantificação e posicionamento dos difusores na câmara, com a amostra de referência, como pode-se verificar nas diferentes bandas de frequência o máximo de variação sem amostra foi de -8,37 % frequência de 4kHz e com amostra a variação foi máxima foi maior chegando a 9,06% frequência de 2kHz, sendo satisfatório não tendo ultrapassado os 10% de diferença na comparação dos resultados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIES, D A; HANSEN, C H. Engineering Noise Control: Theory and Practice, Fourth Edition. 4. ed. New York: CRC Press, 2017. 748 p.
- CULLING, F. John, Speech intelligibility in virtual restaurants, The Journal of the Acoustical Society of America, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1121/1.4964401>



- HASSAN, Osama A. B, Building Acoustics and Vibration, Theory and Practice, World Scientific, 2009. cap 01, p.10/27.
- HOPKINS, C. Sound Insulation. Burlington: Elsevier Ltd., 2012. 648 p. .9781136365737.
- ISO 354, Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room, Anexo B, 2003.
- ONDET, AM, BARBRY, JL. Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. J Acoust Soc Am 1989.
- SEQUEIRA, E. Martín e CORTÍNEZ, H. Víctor, A simplified two-dimensional acoustic diffusion model for predicting sound levels
- VORLÄNDER, Michael e ARETZ, Marc, Combined wave and ray based room acoustic simulations of audio systems in car passenger compartments, Part I: Boundary and source data, 2013.
- VORLÄNDER, Michael. Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 335 p. .978-3-540-48829-3.
- WANG, D. Simulation Research. Architectural Research Methods. Architectural Research Methods. New York: John Wiley & Sons, 2013. p. 480. 9781118418512.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação – UAPPG – da Unisinos no apoio da Bolsa de Iniciação Científica UNIBIC.