

Validação Experimental de uma Ferramenta Computacional para Avaliação da Propagação Sonora em Ambientes Fechados

Experimental Validation of a Computational Tool for Assessing Sound Propagation in Closed Environments

Pedro Pio Rosa Nishida¹, Ricardo Humberto de Oliveira Filho², Marcus Antonio Viana Duarte³

RESUMO

É comum, na análise de problemas que envolvem a propagação sonora em salas, a utilização de programas de simulação, a fim de se obter previsões dos resultados obtidos com as soluções propostas. Porém, as metodologias existentes podem apresentar elevado custo computacional ou resultados imprecisos para ambientes de pequenas dimensões. Desta forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de realizar simulações de propagação do som em salas fechadas com resultados equivalentes aos observados na realidade e com um menor custo computacional. A metodologia escolhida para a ferramenta foi a Malha de Guias de Ondas Digitais. A formulação deste método foi apresentada, além de implementação das seguintes técnicas: interpolação de malhas – a fim de reduzir os erros de dispersão e custo computacional, e formulações mais precisas das condições de contorno anecoicas ou com propriedades dependentes da frequência. Simulações e experimentos foram desenvolvidos utilizando uma sala em diferentes configurações para a validação dos resultados fornecidos pela ferramenta desenvolvida. Após a implementação do código com as soluções para redução do custo computacional e modelagem acústica mais precisa, os resultados foram considerados validados experimentalmente, permitindo caracterizar a ferramenta como precisa, além de apresentar tempos de cálculo mais curtos e não requerer alocação de maiores quantidades de memória para armazenar as matrizes.

Palavras-chave: Acústica de Salas. Guias de Ondas Digitais. Interpolação de Malha.

ABSTRACT

It is common, in the analysis of problems involving sound propagation in rooms, to use simulation programs in order to obtain predictions of the results obtained with the proposed solutions. However, existing methodologies may present high computational cost or inaccurate results for small environments. In this way, it was proposed in this work the development of a computational tool capable of carrying out simulations of sound propagation in closed rooms with results equivalent to those observed in reality and with a lower computational cost. The methodology chosen for the tool was the Digital Waveguide Mesh. The formulation of this method was presented, in addition to the implementation of the following techniques: mesh interpolation – in order to reduce dispersion errors and computational cost, and more precise formulations of anechoic boundary conditions or those with frequency-dependent properties. Simulations and experiments were developed using a room in different configurations to validate the results provided by the developed tool. After implementing the code with the solutions for reducing the computational cost and more accurate acoustic modeling, the results were considered experimentally validated, allowing the tool to be characterized as accurate, in addition to presenting shorter calculation times and not requiring the allocation of larger amounts of memory to store the matrices.

Keywords: Room Acoustics. Digital Waveguides. Mesh Interpolation.

¹ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

<https://orcid.org/0000-0002-1640-5980>

E-mail: pedronishida@ufu.br

² Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

<https://orcid.org/0000-0002-6077-9410>

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

<https://orcid.org/0000-0002-8166-5666>

1. INTRODUÇÃO

A acústica de ambientes fechados apresenta, tanto na engenharia, quanto na arquitetura, problemas muito frequentes envolvendo o isolamento ou a qualidade acústica de salas. Considerando este fator, é comum que seja necessário adequar ou projetar ambientes a determinadas exigências ou padrões estabelecidos. Vale ressaltar que o comportamento acústico exigido de uma sala é diferente para as mais variadas aplicações.

Sendo assim, projetos acústicos que abordam a qualidade acústica são bastante solicitados. De uma forma geral, as previsões dos resultados destes projetos obtidos por técnicas analíticas ou empíricas não são precisas, em alguns casos acarretando efeitos contrários aos desejados. Isto ocorre devido à grande quantidade de variáveis que podem afetar o comportamento ou a propagação da onda acústica. A modelagem analítica de problemas acústicos exige grandes simplificações, o que restringe as possibilidades de análise acústica de forma completa (GERGES, 2000). Para contornar este obstáculo, é comum se utilizar métodos computacionais.

Quando se deseja realizar simulações da propagação da onda acústica em salas, alguns métodos não são adequados. Ora se limitam a simular pequenas áreas ou regiões – como o Método dos Elementos Finitos (MEF), ora produz resultados precisos apenas para grandes volumes ou grandes áreas de propagação ao ar livre – como o Método dos Raios Acústicos (MRA). É fato, porém, que as técnicas baseadas em formulações de diferenças finitas apresentam baixo custo computacional para a implementação de modelos de dimensões intermediárias.

O método das guias de ondas digitais é amplamente aplicado para a solução de problemas que envolvem a propagação de uma onda, principalmente na área da acústica. O modelo foi proposto inicialmente para a modelagem da reverberação de salas (SMITH, 1985), apresentando flexibilidade para a aplicação na simulação de problemas mais complexos, como a obtenção da Resposta Impulsiva da Sala (*Room Impulse Response* – RIR). Além disso, encontram-se vários desenvolvimentos do método no que diz respeito à uma formulação mais precisa do contorno e técnicas para a redução do erro de dispersão, de forma a tornar o seu processamento mais eficiente e tornar as simulações mais próximas da realidade. Mais detalhes a respeito destes trabalhos serão apresentados na revisão bibliográfica sobre o Método das Guias de Ondas Digitais.

Um problema comumente observado é que, para a validação do método, torna-se interessante a implementação de uma técnica para importar uma geometria qualquer para

a simulação de um ambiente com superfícies de formas complexas, além da consideração da presença de mobílias ou pessoas no recinto.

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um programa computacional capaz de simular a RIR de um ambiente fechado, possibilitando obter virtualmente seus parâmetros de qualidade acústica. Para isto, serão utilizados métodos computacionais consolidados para tais simulações baseadas nas Guias de Ondas Digitais, implementando a importação de geometrias complexas para simulação, métodos para redução do erro de dispersão e custo computacional e utilizando coeficientes de absorção sonora medidos *in situ*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, serão apresentados e destacados trabalhos que utilizam o Método da Malha de Guias de Ondas Digitais (*Digital Waveguide Mesh – DWM*) a fim de se basear a sua escolha para implementação na ferramenta proposta.

O DWM se baseia na solução da equação diferencial da onda. A principal vantagem do método é que esta solução é dada apenas para o caso unidimensional, ou seja, considera-se que as ondas se propagam apenas no interior de uma guia de onda ou um tubo de pequeno comprimento e pequena seção transversal. Estas guias são conectadas de forma a modelar ambientes de uma, duas ou três dimensões. Essencialmente, a viagem da onda de um ponto a outro, em um meio sem perdas, pode ser simulada apenas por uma linha de atraso digital, o que reduz expressivamente o custo computacional (SMITH, 1992).

O primeiro a utilizar esta técnica foi (SMITH, 1985) para a simulação da reverberação de salas. Posteriormente, o autor também avaliou o método para a sintetização do som e aplicações na música (SMITH, 1987). Além disso, a malha bidimensional do método DWM foi utilizada para a modelagem de membranas de tambores, pratos, gongos, dentre outros (VAN DUYNE & SMITH, 1993).

Um dos principais problemas encontrados nas simulações da propagação do som via DWM é o erro de dispersão. Isso se deve à discretização necessária para a modelagem do problema com uma malha de Guias de Ondas. Uma das formas de contornar este problema é refinar a malha, porém isto pode acarretar custos computacionais elevados. Foram propostas soluções para esta questão, que envolve a interpolação da malha ou a utilização de técnicas de deformação de frequência (SAVIOJA & VALIMAKI, 1997). Segundo os autores a precisão obtida de ambas as técnicas foi satisfatória.

Encontram-se, também, desenvolvimentos na modelagem de contornos anecóicos. Observa-se que, originalmente, a aproximação de primeira ordem pode não ser suficiente para estes casos. Para um contorno totalmente absorvente é mais adequada a sua modelagem com aproximações de ordens mais altas (MURPHY & MULLEN, 2002).

Outro estudo (MULLEN, HOWARD & MURPHY, 2003) mostra a possibilidade da aplicação do DWM na avaliação da produção de vogais pelo trato vocal humano. O modelo criado aproxima as diferentes posições do trato vocal para cada vogal e insere um fluxo glotal, produzindo sons semelhantes ao da fala anteriormente gravada.

Também foi apresentado um método no qual o coeficiente de reflexão das superfícies do contorno de uma malha tridimensional pode ser definido em uma dependência com a frequência. A malha utilizada e as considerações do coeficiente de reflexão resultaram em simulações mais leves e mais realísticas (KELLONIEMI, 2006).

A partir de agora, serão apresentados a formulação e o algoritmo do DWM, as considerações a respeito do contorno e dos obstáculos que podem estar presentes no modelo, além de técnicas para minimizar o erro de dispersão das simulações. Para a análise proposta neste trabalho, será necessária a utilização da formulação tridimensional do DWM com topologia cúbica. Neste tipo de malha, as guias de ondas conectadas em uma junta qualquer são perpendiculares entre si. Haverá 6 guias direcionadas ao norte, sul, leste, oeste, acima e abaixo da junta analisada – Figura 1.

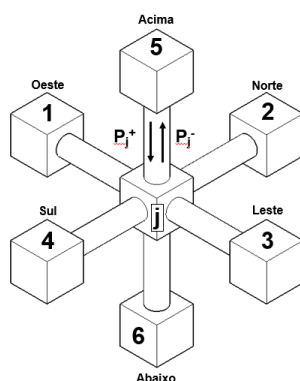


Figura 1. Representação da junta genérica da Malha Cúbica.

Fonte: Próprio Autor.

Para o cálculo da pressão sonora de uma junta j da malha cúbica, utiliza-se a Equação (1), para a atualização temporal da pressão sonora em todas as juntas da malha baseado nos estados de instantes anteriores.

$$P_j(n) = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^6 P_i(n-1) \right] - P_j(n-2) \quad (1)$$

A frequência de amostragem para este tipo de malha deve ser corrigida levando em consideração a propagação do som na direção da diagonal do cubo. Desta forma, a velocidade do som corrigida é dada por $c_{corr} = c \sqrt{3}$ e a taxa de amostragem é calculada de acordo com a Equação (2).

$$f_s = \frac{c\sqrt{3}}{dx} \quad (2)$$

Condições de contorno convencionais

Uma junta localizada sobre uma superfície de contorno apresenta uma análise diferente do restante das juntas da malha. A principal consideração é que ela interage apenas com um nó do interior do plano ou volume simulado. Na acústica, porém, quando a onda atinge uma determinada superfície, uma parcela de sua energia será absorvida e uma outra parcela refletida, fenômenos estes que dependem do material presente no contorno e da frequência do som incidente. O esquema necessário para a consideração destas propriedades na formulação é ilustrado pela Figura 2. Uma junta imaginária (junta 2) além da junta adjacente ao contorno (junta J) se torna necessária. A guia de onda que conecta estas duas juntas possuirá um valor de impedância (R_2) distinto daquelas que compõem o restante da malha (R_1).

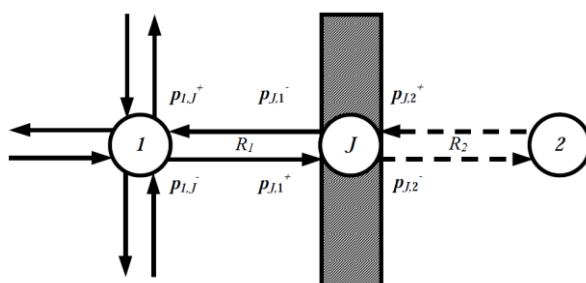


Figura 2. Terminação de uma Malha de Guia de Ondas Digitais devido a um contorno resultando em reflexão.

Fonte: Adaptado de MURPHY & MULLES, 2002.

Nesta situação, a equação para atualização temporal da pressão sonora na junta é dada pela Equação (3), onde r é o coeficiente de reflexão da superfície em questão.

$$P_j = (1 + r) P_1(n - 1) - r P_j(n - 2) \quad (3)$$

Esta formulação é bastante utilizada para o contorno das DWM, porém não é precisa para superfícies onde existe a absorção total da energia sonora – superfícies anecoicas – ou daqueles cujo coeficiente de reflexão é dependente da frequência.

Para a obtenção de uma superfície anecoica, em (MURPHY & MULLEN, 2002) é proposta a utilização da expansão em séries de Taylor para a junta do contorno. Partindo desta análise, é possível chegar à Equação (4), que mostra como fica a fórmula a ser implementada no código para a expansão de Taylor até o segundo grau em contornos com características anecóicas.

$$P_B(n + 1)_1 = 2 P_1(n) - P_2(n - 1) \quad (4)$$

Vale ressaltar que, quanto maior o grau da expansão, mais preciso será o resultado para um contorno anecoico. Isto, porém, exigirá mais da memória do computador durante o processamento, já que será necessário armazenar o estado de pressão na malha até quatro instantes anteriores, para o caso da expansão de terceira ordem.

Contornos com propriedades dependentes da frequência

Para se obter uma condição de contorno cujas propriedades de reflexão são dependentes da frequência, recomenda-se substituir a junta j que se encontra sobre o contorno – Figura 2 – por um filtro de resposta impulsiva infinita (IIR – *Infinite Impulse Response*). A função transferência deste filtro deve representar a propriedade de reflexão da superfície em função da frequência (MURPHY & MULLEN, 2002). A modelagem destas propriedades através de um filtro IIR pode ser encontrado em Murphy, Kelloniemi, Mullen e Shelley (2007).

Interpolação de malha

Na simulação da propagação sonora utilizando as malhas quadrada ou cúbica de Guias de Ondas Digitais é possível observar erros na velocidade de propagação, que dependem tanto da frequência quanto da direção (VAN DUYNÉ & SMITH, 1995). Uma das formas de se reduzir o efeito deste erro é a utilização de diferentes topologias de malha, como as malhas tetraédricas.

A interpolação das malhas cúbicas se apresenta como uma alternativa à utilização de diferentes topologias. Com esta técnica, é possível reduzir o erro de dispersão sem um aumento significativo do custo computacional e sem a necessidade de refinar ainda mais a malha (SAVIOJA & VALIMAKI, 1997).

Aplicando a técnica de Interpolação de Malhas Cúbicas, a pressão sonora na junta central com a influência dos nós interpolados é dada pela Equação (5).

$$P_j(n) = \sum_{r=1}^3 \sum_{s=1}^3 \sum_{t=1}^3 h_{r,s,t} P_{r,s,t}(n-1) - P_j(n-2) \quad (5)$$

Neste caso, os valores dos coeficientes de ponderação podem ser considerados como mostrado nas expressões da Equação (6).

$$h_{2D} = h_{1,1,2} = h_{2,1,1} = h_{2,1,3} = h_{3,1,2} = h_{1,2,1} = h_{3,2,1} = h_{1,2,3} = h_{3,2,3} = \\ = h_{3,3,2} = h_{2,3,2} = h_{3,3,2} = h_{2,3,3} \quad (6 \text{ a})$$

$$h_{3D} = h_{1,1,1} = h_{1,1,3} = h_{3,1,1} = h_{3,1,3} = h_{1,3,1} = h_{1,3,3} = h_{3,3,1} = h_{3,3,3} \quad (6 \text{ b})$$

$$h_i = h_{2,1,2} = h_{1,2,2} = h_{2,2,1} = h_{2,2,3} = h_{3,2,2} = h_{2,3,2} \quad (6 \text{ c})$$

$$h_j = h_{2,2,2} \quad (6 \text{ d})$$

Os valores de h_{2D} , h_{3D} , h_i e h_j são obtidos a partir dos coeficientes de interpolação, de acordo com a geometria tridimensional das juntas interpoladas.

Após obtidos os resultados computacionais e experimentais, eles serão comparados e avaliados. O parâmetro acústico escolhido para a comparação foi o tempo de reverberação calculado nas bandas de oitava cujas frequências centrais são: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

A sala utilizada como objeto de estudo neste capítulo se encontra no mezanino do Bloco 5H do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia. A sala possui dimensões de 4,0 m de largura por 5,0 m de comprimento e um pé direito de 2,4 metros. Em uma de suas paredes se encontra uma porta de madeira e na parede oposta se encontram duas janelas de vidro. Em frente às janelas se encontra uma cortina de tecido estilo persiana. Uma representação esquemática desta sala está mostrada na Figura 3.

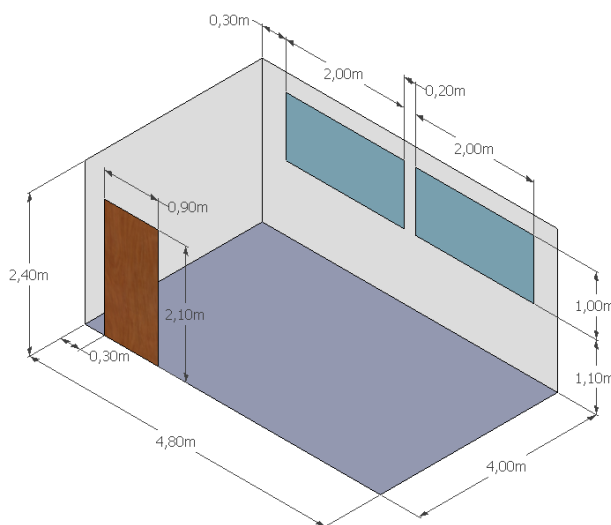


Figura 3. Representação esquemática da sala utilizada como objeto de estudo para validação da ferramenta computacional desenvolvida.

Fonte: Próprio Autor.

Este item foi organizado para apresentar a metodologia de medição do tempo de reverberação experimental, o cálculo do tempo de reverberação segundo Sabine, a modelagem geométrica e acústica da sala, finalizada pela avaliação dos resultados obtidos.

Para a medição do tempo de reverberação da sala, foi utilizado a metodologia proposta pela norma ISO 3382-2. A fonte sonora foi uma caixa de som KRK ROKIT RP8 G4. Segundo o fabricante, este equipamento é capaz de reproduzir o som com amplitude constante em todas as frequências entre 44 Hz e 20 kHz.

O sensor utilizado foi um microfone pré amplificado de $\frac{1}{2}$ polegada da PCB Piezotronics® 426E01. O sinal captado pelo microfone foi adquirido e transferido a um computador com o auxílio da placa de aquisição da National Instruments® modelo NI-USB9162. Antes de iniciar a aquisição, a caixa de som foi ligada emitindo um ruído branco de faixa de frequência de 20 Hz a 4000 Hz. O tempo de aquisição estabelecido para todos os procedimentos foi de 20 segundos a uma frequência de aquisição de 8192 Hz. Durante

os primeiros 10 segundos de medição, a fonte sonora era desligada, tornando possível avaliar completamente o decaimento do nível de pressão sonora local.

O procedimento citado foi realizado 15 vezes para cada configuração da sala, e a posição da fonte e do microfone eram alterados aleatoriamente a cada 5 medições. O tempo de reverberação de cada configuração foi obtida pela média do tempo de reverberação resultante de cada uma das 15 medições. As configurações utilizadas incluíam abrir ou fechar as janelas e as cortinas e a presença ou ausência de mantas de Lã de Vidro. A Tabela 1 apresenta todas as configurações utilizadas para este procedimento experimental.

Tabela 1. Configurações da sala para cada medição do tempo de reverberação.

Configuração	Lã de vidro	Cortina	Janela
1	Ausente	Aberta	Fechada
2	Ausente	Aberta	Aberta
3	Ausente	Fechada	Fechada
4	Presente	Aberta	Fechada

Fonte: Próprio Autor.

As mobílias inseridas no ambiente foram 3 mesas de madeira de 1,5 metros de comprimento, 1,0 metro de largura e 0,70 metros de altura e um armário de aço de 1,6 metros de largura, 0,6 metros de profundidade e 2,1 metros de altura. A manta de lã de vidro possuía 1,00 metro de comprimento por 1,5 metros de largura, além de uma espessura de 20 mm. Os itens citados foram posicionados na sala conforme mostra a Figura 4.

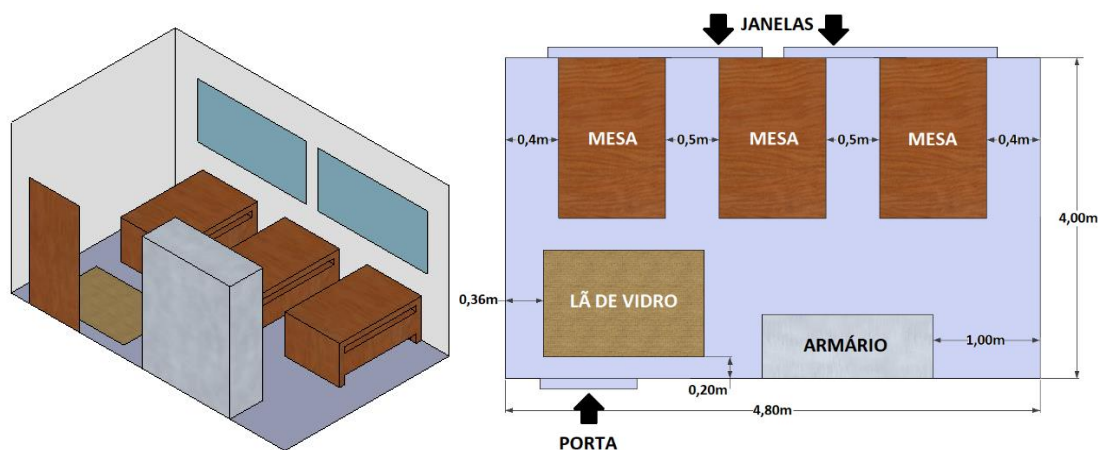


Figura 4. Posição da mobília nas configurações de experimento de 1 a 4.

Fonte: Próprio Autor.

Após as medições, os valores medidos foram tratados via MatLab[®]. Nestas situações, o sinal sonoro se apresenta em um determinado patamar elevado e, após o desligamento da fonte sonora, se observa uma redução a um patamar menor, determinado pelo ruído ambiente. Se visualizado um gráfico onde a amplitude do sinal sonoro está apresentada em escala logarítmica, o decaimento se aproxima de um comportamento linear.

De posse deste gráfico, é realizada uma regressão linear dos pontos da curva na região onde ocorre o decaimento. A partir desta reta, estima-se o tempo necessário para que o ruído seja reduzido em 60 dB. Como na maioria das medições as maiores reduções não atingiram 60 dB, foi necessário realizar uma extrapolação do tempo de reverberação a partir da reta de regressão obtida. Este procedimento foi repetido em todos os sinais para cada banda de oitava de frequências centrais entre 125 Hz e 4000 Hz.

Os resultados experimentais obtidos foram utilizados para posterior comparação com os valores simulados no programa computacional desenvolvido.

Para a simulação acústica utilizando a ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, é necessária a construção da malha de guias de ondas digitais. Esta malha deverá conter a posição de cada barreira e dos contornos presentes no ambiente simulado. Além disto, também é interessante que, no arquivo de caracterização da malha, sejam identificados os materiais que compõem todos os obstáculos e contornos, de forma que, na simulação acústica, as suas propriedades de reflexão e absorção sejam corretamente informadas.

A obtenção desta malha será realizada nas seguintes etapas: modelagem geométrica utilizando o programa SolidWorks[®], obtenção de uma malha de método de elementos finitos através do programa HyperMesh[®] e conversão desta malha em uma malha adequada para simulação das Malhas de Guias de Ondas Digitais.

A malha de elementos finitos será carregada no MatLab[®] e um programa desenvolvido para a ferramenta deste trabalho que irá obter todas as informações contidas e convertê-lo em uma Malha de Guia de Ondas Digitais.

A excitação escolhida para a fonte sonora presente no recinto foi do tipo impulsiva. Porém, para estas simulações, o tempo de duração da fonte deverá ser menor, já que será necessário excitar uma faixa de frequências mais ampla.

Deseja-se obter os resultados de tempo de reverberação para as bandas de oitava até 2000 Hz. Esta banda de oitava abrange uma faixa de frequência cujo limite superior é de, aproximadamente, 2829 Hz. Sendo assim, a excitação inserida se refere a metade do

ciclo de um seno de frequência 2000 Hz. Este sinal terá uma duração de $2,50 \times 10^{-4}$ segundos, o que provocará excitações nas frequências de 0 a 4000 Hz.

Em relação às superfícies, a modelagem acústica se trata da determinação dos coeficientes de absorção sonora os materiais presentes. A proposta deste trabalho, para que fosse possível obter os resultados mais próximos o possível da realidade foi utilizar as curvas do coeficiente de absorção sonora obtidas a partir de medições in situ. O método utilizado para estas medições foi o do Ruído Ambiente Anônimo [26]. Estas curvas foram utilizadas para modelagem de um filtro de resposta impulsiva infinita e implementadas nos nós identificados como adjacentes aos obstáculos e contornos do modelo geométrico.

As diferentes superfícies cujas propriedades de absorção foram avaliadas estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Superfícies e materiais considerados no modelo acústico simulado utilizando a DWM.

Superfície	Material
Porta	Madeira Envernizada
Paredes	Alvenaria Pintada
Janelas	Vidro
Mesas	Madeira Laminada
Armário	Aço
Manta	Lã de Vidro

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que a madeira da porta foi tratada de forma diferente da madeira presente nas mesas, já que as características de suas superfícies eram diferentes.

3. RESULTADOS

Para a análise dos tempos de reverberação resultantes das simulações, o procedimento foi semelhante ao utilizado nas avaliações experimentais. Porém, os sinais de decaimento, ao invés de serem obtidos através de medições, provêm virtualmente das simulações realizadas. Estes sinais são tratados e filtrados e a curva de decaimento é utilizada para determinação do tempo de reverberação em cada banda de oitava de frequências centrais entre 125 Hz e 2000 Hz.

A Tabela 3 mostra uma comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos pela simulação via DWM para as configurações 1, 2, 3 e 4. Nesta tabela, foram inseridos entre parênteses as principais características de cada configuração estudada.

Tabela 3. Comparação dos resultados das simulações via DWM com os resultados experimentais para as configurações da sala com mobília.

Frequências [Hz]		125	250	500	1000	2000
Configuração 1 (Mobiliada e sem alterações adicionais)						
TR [s]	Experimental	1,029	1,182	1,201	1,088	1,146
	DWM	1,172	1,249	1,263	1,155	1,211
Erro [%]		13,9	5,7	5,2	6,2	5,7
Configuração 2 (Janela Aberta)						
TR [s]	Experimental	1,236	1,155	1,172	1,088	1,075
	DWM	1,087	1,187	1,199	1,103	1,153
Erro [%]		12,1	2,8	2,3	1,4	7,3
Configuração 3 (Cortina Fechada)						
TR [s]	Experimental	1,020	1,058	1,136	1,066	1,021
	DWM	1,146	1,155	1,201	1,132	1,142
Erro [%]		12,4	9,2	5,7	6,2	11,9
Configuração 4 (Presença da manta de Lã de Vidro)						
TR [s]	Experimental	0,903	1,005	1,054	1,044	1,074
	DWM	1,101	1,067	1,118	1,108	1,159
Erro [%]		21,9	6,2	6,1	6,1	7,9

Fonte: Próprio Autor.

4. DISCUSSÃO

Avaliando os resultados experimentais para as diferentes configurações, é possível constatar uma redução nos tempos de reverberação quando se insere a manta de Lã de Vidro, abre a Janela ou se fecha a cortina. A única frequência em que o comportamento é anômalo é a de 125 Hz, cujas avaliações experimentais são mais difíceis.

Da comparação dos valores dos tempos de reverberação experimentais e simulados, os maiores erros são referentes a banda de oitava de 125 Hz. Nas situações mobiliadas também é possível afirmar que os resultados simulados apresentam um comportamento mais coerente com o esperado, apesar disto não é possível avaliar sua precisão.

Para as demais frequências, em uma avaliação generalizada, os valores dos erros se apresentam mais elevados quando comparados com os resultados das configurações 2, 3 e 4. Para estas configurações, a modelagem geométrica para as simulações computacionais das mobílias sofreu simplificações como: redução na complexidade geométrica das mesas, omissão das partes metálicas das mesas, omissão das irregularidades geométricas do armário e aproximações dimensionais. Além disso, uma maior variedade de materiais e, conseqüentemente, mais propriedades acústicas medidas

experimentalmente, induzem no modelo maior probabilidade de erros na modelagem acústica. Apesar disto, os erros continuaram em valores pequenos e a sensibilidade dos valores dos tempos de reverberação em relação às alterações realizadas na sala ainda foram traduzidos nas simulações.

Os melhores resultados foram obtidos para a configuração em que a janela se encontrava aberta – configuração 2 – e, os maiores erros observados naquela em que a cortina estava fechada – configuração 3. Nesta configuração, verifica-se que o impacto dos erros inerentes à medição do coeficiente de absorção da cortina é maior. É possível afirmar que isto se deve à posição das mesas na sala, já que irão direcionar uma maior quantidade de reflexões em direção à cortina, tornando-a mais influente na resposta acústica da sala.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das configurações escolhidas para comparação de resultados, foi possível avaliar a efetividade e robustez conferidas pelas novas técnicas propostas neste e introduzidas no código computacional a ser utilizado.

A análise e comparação dos resultados experimentais com os obtidos via simulação computacional mostraram que a ferramenta é capaz de retornar valores coerentes com o esperado em cada configuração estudada. Também é capaz de traduzir, de forma semelhante aos resultados experimentais, a sensibilidade dos valores do tempo de reverberação quando realizadas as diferentes modificações na sala.

Ressalta-se que os resultados apontam que as situações em que a janela se encontrava aberta, e que foram utilizadas a formulação do contorno anecoico, tornou os cálculos da ferramenta mais precisos e mais condizentes com os resultados experimentais.

A partir destas avaliações, conclui-se que o desenvolvimento do código com as técnicas e metodologias apresentadas neste, além da utilização dos coeficientes de absorção medidos in situ, promove uma maior precisão dos resultados quando comparados com o experimental. Também se verificou uma redução no custo computacional, já que, para o ajuste do modelo, a interpolação de malha possibilitou trabalhar com guias de comprimento maiores do que seriam necessárias sem a implementação desta técnica.

REFERÊNCIAS

GERGES, S. N. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis: NR Editora, 2000.

KELLONIEMI, A. Frequency-dependent boundary condition for the 3-D digital waveguide mesh. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL AUDIO EFFECTS (DAFX'06)**, 2006. Proceedings [...]. 2006. p. 161-164.

MULLEN, J.; HOWARD, D. M.; MURPHY, D. T. Digital waveguide mesh modeling of the vocal tract acoustics. In: **IEEE WORKSHOP ON APPLICATIONS OF SIGNAL PROCESSING TO AUDIO AND ACOUSTICS**, 2003. Proceedings [...]. New York: IEEE, 2003. p. 119-122.

MURPHY, D. T.; MULLEN, J. Digital waveguide mesh modelling of room acoustics: Improved anechoic boundaries. In: **DIGITAL AUDIO EFFECTS (DAFX)**, 2002. Proceedings [...]. 2002. p. 163-168. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.323264>

MURPHY, D.; KELLONIEMI, A.; MULLEN, J.; SHELLEY, S. Acoustic modeling using the digital waveguide mesh. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 24, n. 2, p. 55-66, 2007.

SAVIOJA, L.; VALIMAKI, V. Improved discrete-time modeling of multi-dimensional wave propagation using the interpolated digital waveguide mesh. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING (ICASSP-97)**, 1997. Proceedings [...]. New York: IEEE, 1997. p. 459-462.

SMITH, J. O. A new approach to digital reverberation using closed waveguide networks. In: **INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC CONFERENCE**, Vancouver, Canada, 1985. Proceedings [...]. 1985. p. 47-53.

SMITH, J. O. Music applications of digital waveguides. Stanford, CA: CCRMA, Stanford University, 1987. (Technical Report STAN-M-39).

SMITH, J. O. Physical modeling using digital waveguides. **Computer Music Journal**, v. 16, n. 4, p. 74-91, 1992. <https://doi.org/10.2307/3680470>

VAN DUYNE, S.; SMITH, J. O. The 2-D digital waveguide mesh. In: **IEEE WORKSHOP ON APPLICATIONS OF SIGNAL PROCESSING TO AUDIO AND ACOUSTICS**, 1993. Final program and paper summaries [...]. New York: IEEE, 1993. p. 177-180.

VAN DUYNE, S. A.; SMITH, J. O. The tetrahedral digital waveguide mesh. In: **IEEE ASSP WORKSHOP ON APPLICATIONS OF SIGNAL PROCESSING TO AUDIO AND ACOUSTICS**, 1995. Proceedings [...]. New York: IEEE, 1995. p. 234-237.