



Investigação sobre a frequência de transição em câmaras reverberantes em baixas frequências

Investigation of the transition frequency in reverberant chambers at low frequencies

Atilio Rampin da Silva (orientado)*, Marcio Henrique de Avelar Gomes (orientador)†,

RESUMO

Um dos equipamentos essenciais para a caracterização de materiais em relação às suas propriedades acústicas é a câmara reverberante. No entanto, nos últimos anos, constatou-se uma variabilidade muito grande em resultados de coeficiente de absorção obtidos num teste comparativo realizado em laboratórios credenciados na Europa. Supõe-se que este tipo de problema tem como fonte a condição conhecida como “campo difuso”, que eventualmente não é atingida. Uma questão associada a esta condição é a distribuição de pressão sonora em baixas frequências, associada à distribuição das frequências naturais da sala (autovalores do problema matemático). Algumas formas para avaliar tal distribuição foram apresentadas recentemente, com duas métricas específicas que a associam a uma frequência de transição, e estudos complementares devem ser feitos. Dessa forma, a proposta deste projeto é realizar simulação numérica através dos métodos dos elementos finitos, num primeiro momento, para que a sensibilidade das métricas devido às variações da geometria da sala seja investigada posteriormente. Este artigo apresenta a simulação da resposta acústica de uma sala com geometria “retangular”, realizada através de um código comercial.

Palavras-chave: Acústica; Modos Acústicos; Campo Difuso; Frequência de Transição; Frequência de Schroeder.

ABSTRACT

One of the essential pieces of equipment for the characterization of materials in relation to their acoustic properties is the reverberation chamber. However, in recent years, it has been found a very large variability in absorption coefficient results obtained in a comparative test performed in accredited laboratories in Europe. It is assumed that this type of problem has as its source the condition known as “diffuse field”, which is eventually not achieved. An issue associated with this condition is the sound pressure distribution at low frequencies, associated with the distribution of the natural frequencies of the room (eigenvalues of the mathematical problem). Some ways to evaluate such distribution were recently presented, with two specific metrics that associate it with a transition frequency, and further studies should be done. Thus, the proposal of this project is to perform numerical simulation through the finite element methods at first, so that the sensitivity of the metrics due to variations in the room geometry can be investigated later. This paper presents the simulation of the acoustic response of a room with “rectangular” geometry, performed using a commercial code.

Keywords: Acoustics; Acoustic Modes; Diffuse Field; Transition Frequency; Schroeder Frequency.

* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; atilio@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba (nome da cidade); marciogomes@utfpr.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Em estudos recentes, constatou-se que a variabilidade de coeficientes de absorção sonora em câmaras reverberantes europeias excede valores aceitáveis para a jurisdição (VERCAMMEN, 2010). Supõe-se que a variabilidade seja alta também na medição da isolamento sonora em laboratório, pois uma das maiores fontes de incerteza é a condição de homogeneidade e da isotropia dos campos acústicos. Tais condições estão associadas a um conceito de acústica de salas, conhecido como “campo difuso”. É definido como aquele na qual a probabilidade de fluxo de energia é igual para qualquer direção, quando em um ambiente fechado. Alguns livros dizem que um campo sonoro é difuso quando a variação da pressão sonora, é muito pequena, sendo associado à homogeneidade. Para a de isotropia, há a possibilidade de medir o fluxo de energia através de sondas de intensidade sonora, conforme JACOBSEN e MOLARES, 2010. Outra abordagem analisa estatísticas de respostas de uma câmara a uma excitação de impulso, em diferentes localizações da sala (PRISLAN et Al., 2014 e JEONG, 2016).

Segundo pesquisadores, para se obter um campo sonoro difuso, de qualquer perspectiva, a frequência de análise deve ser maior do que uma determinada frequência de transição (JOT, CERVEAU e WARUSFEL, 1997), conhecida como “frequência de Schroeder”. Há duas formas para avaliar a frequência de transição: 1. observar o desvio padrão de características medidas, tais como o nível de pressão sonora ou o tempo de reverberação ou; 2. a partir de medições de tempo de reverberação (T) e conhecendo-se o volume da sala (V), utilizar uma equação proposta por SCHROEDER, 1987.

A fórmula é:

$$f_{sch} = 2000 \left(\frac{T}{V} \right)^{0,5} \quad (1)$$

No entanto, o cálculo da frequência de transição através da fórmula proposta por Schroeder, por exemplo, não depende da geometria da sala, que pode ser relevante em algumas situações. Através da análise de sinais mais moderna, no entanto, é possível analisar de forma mais aprofundada o campo acústico de uma sala. Aqui, a análise é feita a partir de funções de transferência entre uma fonte sonora e um microfone em uma sala. Elas são obtidas através de uma razão entre a transformada de Fourier da pressão sonora capturada por um microfone (em Pascal) e a transformada de Fourier do sinal reproduzido pela fonte sonora, dado em termos de velocidade volumétrica (em metros cúbicos por segundo). Como a função de transferência assume valores complexos, espera-se que, a partir da frequência de transição, tanto a parte real, quanto a parte imaginária assumam valores de acordo com uma gaussiana, quando analisados em um intervalo de frequências (SCHROEDER e KUTTRUFF, 1962). Observa-se que, realizando essa análise em termos de módulo e fase, é possível mostrar que o primeiro seguirá uma distribuição de Rayleigh e a fase seguirá uma distribuição uniforme.

AVELAR et Al., 2020, propõe uma análise da parte real e imaginária através do fator de Curtose. Caso a distribuição seja normal, o fator de Curtose tem o valor de 3. Também propõe uma métrica baseada na análise do sinal de fase. Ela tende a um valor mínimo aproximadamente constante, caso os valores de fase em um determinado intervalo de frequência sigam uma distribuição uniforme. O artigo apresenta resultados obtidos a partir de medições feitas na câmara reverberante localizada no DACOC/UTFPR e na câmara construída em escala reduzida no DAMEC/UTFPR. E também apresenta a análise da resposta analítica de salas em forma “caixa de sapato”, com paredes paralelas. A influência da absorção sobre os resultados também é apresentada, de forma preliminar. Finalmente, a pesquisa tem como objetivos: analisar como se comporta o fator de Curtose ao longo da frequência, das partes real e imaginária de funções de transferência de salas, mediante a variação de geometria da sala, e como se comporta a distribuição dos valores de fase, considerando, ao longo da frequência, de funções de transferência de salas, também mediante a variação de geometria.



2 MÉTODOS DA PESQUISA

Há duas formas para realizar simulações acústicas de salas com auxílio do computador: a mais comum, consistindo em usar códigos computacionais baseados em princípios geométricos. Nesse caso, assume-se que o som se propaga em linhas retas, em analogia com os raios de luz idealizados na ótica. Entretanto, tal abordagem só é válida quando as dimensões da sala são muito maiores do que as da onda sonora, em ambientes acusticamente grandes. O limite para que o princípio de propagação geométrica possa ser usado é justamente a frequência de transição que se pretende estudar. A abordagem feita a partir da ondulatória é a mais adequada. Aqui, procura-se solução para o problema formulado a partir da equação diferencial de onda. Como tal solução só é conhecida analiticamente para salas retangulares (ou “caixa de sapato”), uma possibilidade é a utilização do método dos elementos finitos, já consagrado para resolver problemas de várias naturezas. É possível, no entanto, realizar estudos através desta abordagem para salas pequenas ou mesmo para salas maiores até frequências maiores do que a de transição.

O problema consiste em se obter funções de transferência de salas através do método dos elementos finitos. Para isso, salas com geometria de complexidade crescente serão modeladas, de forma que, inicialmente, três salas retangulares de mesmo volume descritas em AVELAR et AL., 2020 serão modeladas e simuladas. Devido as suas diferentes relações dimensionais, espera-se, conforme mostrado na publicação, que a frequência de transição seja diferente em cada caso, mesmo que o volume seja o mesmo. Funções de transferência avaliadas entre duas posições de fonte sonora e 10 posições de receptor deverão ser obtidas. Em um segundo momento, a sala que tem a frequência de transição mais baixa, e que tem o menor grau de simetria, terá sua geometria variada, mantendo-se o mesmo volume. Cada par de paredes paralelas terá essa condição variada por vez, e, caso seja possível, por conta do período de iniciação científica, salas com um número maior de planos serão modeladas e suas respostas analisadas.

O código comercial Ansys, existente no DAMEC/UTFPR será utilizado.

3 RESULTADOS

Utilizando como base no desenvolvimento do projeto o livro “Acoustics Analyses Using MATLAB and ANSYS” escrito por Carl Q. Howard e Benjamin S. Cazzolato, pode-se fazer a modelagem de uma sala reverberante com as seguintes especificações:

Tabela 1 - Parâmetros

Description	Parameter	Value	Units
Room depth	L_x	5.0	m
Room width	L_y	7.0	m
Room height	L_z	6.0	m
Surface area of sound-absorbing material	S_a	9.0	m ²
Surface area of room*	S	214	m ²
Volume of room*	V	210	m ³
Absorption coefficient	$\bar{\alpha}$	1	—
Speed of sound	c_0	344	m/s
Density of the air	ρ_0	1.21	kg/m ³
Sample rate for the transient analysis	f_s	500	Hz
Octave band center frequency	f_c	125	Hz
Octave band lower frequency for harmonic analysis*	f_{lower}	89	Hz
Octave band upper frequency for harmonic analysis*	f_{upper}	176	Hz
Corresponding wavelength at center frequency*	λ	2.75	m
Harmonic acoustic source. ANSYS	Mass Source	$0 + j$	kg/s
Harmonic acoustic source. ANSYS	FLOW Source	$1 + 0j$	kg/s ²

* Dependent parameters

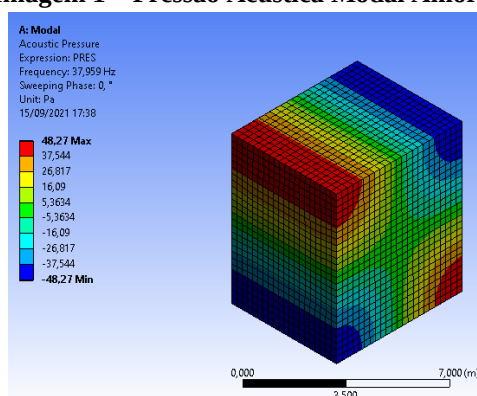
Fonte: Acoustics Analyses Using MATLAB and ANSYS (2015)



A partir destes dados de entrada, o workbench do ANSYS foi dividido em três análises separadamente: modal, harmônica e estrutural transiente. O trabalho se inicia na primeira subdivisão, onde é criada a geometria da sala seguindo os limites de contorno apresentados na Tabela 1, e, após a criação da geometria e a adição do material absorvente em uma das faces, é necessário a criação de uma malha para dividir o corpo de estudo em partes menores, com a criação da malha, que será utilizada ao longo de todo o estudo.

Com a malha finalizada, pode-se passar para o desenvolvimento da análise modal da sala, que se utilizando dos conceitos de acústica presente no software, descreve que o corpo de estudo é um corpo acústico e também que a região de absorção é uma superfície acústica de absorção. Assim, o programa gera o seguinte espectro para a pressão acústica modal amortecida:

Imagem 1 – Pressão Acústica Modal Amortecida



Fonte: Autoria Própria (2021)

Com a conclusão da primeira parte do estudo, pode-se passar para a análise harmônica que auxiliará no cálculo do estado estacionário da pressão sonora. As respostas obtidas com a análise harmônica estão ao longo de toda a banda oitava de 125 hertz (Hz) (89 Hz até 176 Hz) em incrementos de 1 Hz e depois todos os resultados são calculados como médias para possibilitar o cálculo do tempo de reverberação.

Para início da análise harmônica não é necessário refazer a geometria utilizada na análise Modal, uma vez que o software conecta todas as etapas levando adiante a geometria e a malha gerada. Desta forma, são posicionados 6 microfones na sala para serem os receptores dos sinais, cuja posição é dada pela tabela abaixo.

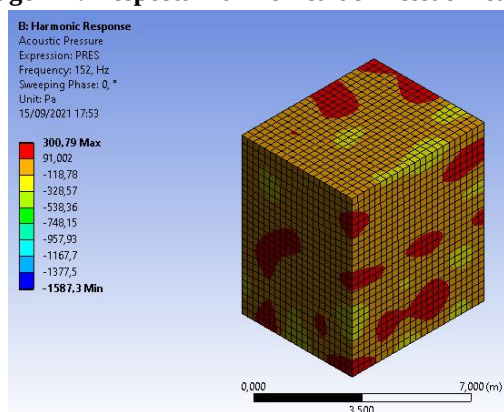
Tabela 2 – Posicionamento Microfones

Description	Location
Source	[1.750, -2.750, 5.250]
Microphone 1	[1.250, 2.250, 4.750]
Microphone 2	[0.750, 1.750, 4.250]
Microphone 3	[-0.250, 0.750, 3.250]
Microphone 4	[-1.250, -0.250, 2.250]
Microphone 5	[0.250, 0.250, 3.250]
Microphone 6	[0.250, 0.250, 4.750]
Corners of room	[-2.500, -3.500, 0.000] to [2.500, 3.500, 5.000]
Span of absorbent	[-1.500, -1.500, 0.000] to [1.500, 1.500, 0.000]

Fonte: Acoustics Analyses Using MATLAB and ANSYS (2015)

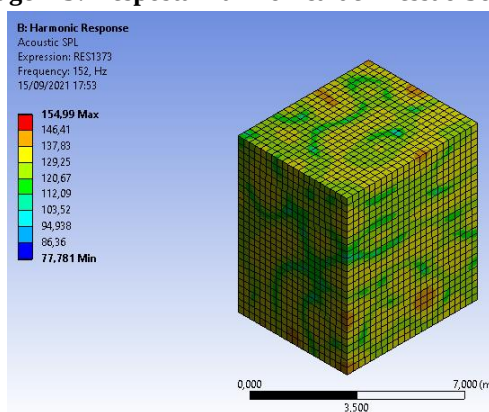
Como o posicionamento dos microfones, o software gera os dois espectros seguintes:

Imagem 2: Resposta Harmônica de Pressão Acústica



Fonte: Autoria Própria (2021)

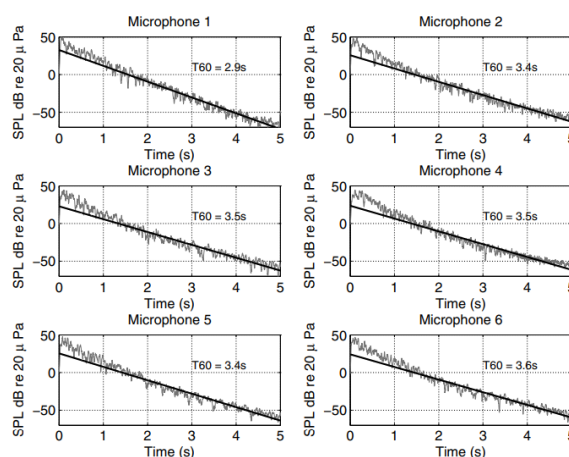
Imagem 3: Resposta Harmônica de Pressão Sonora



Fonte: Autoria Própria (2021)

Além dos dois espectros de resposta harmônica para a pressão acústica e nível de pressão sonora, é possível plotar os gráficos das medições de níveis de pressão sonora feitos por cada um dos microfones. Com o término da análise harmônica, é possível avançar para a ultima etapa da modelagem da sala, a análise estrutural transiente. Nesta etapa, os resultados de interesse são a pressão sonora e o nível de pressão sonora instantâneas, ou seja, com está análise podemos escolher um determinado instante e avaliar o que está acontecendo no interior da sala. Após mostrar para o software mais uma vez onde estão localizados os microfones para captura dos sinais, é possível gerar o espectro da pressão acústica de todos os nós da geometria em um determinado instante, mas o que interessa é a possibilidade da geração dos gráficos para cada microfone, que indicam o tempo de reverberação em cada uma das regiões em que eles estão posicionados.

Imagem 4 – Tempo de Reverberação em cada Microfone



Fonte: Acoustics Analyses Using MATLAB and ANSYS (2015)

4 CONCLUSÃO

Os objetivos do trabalho foram parcialmente concluídos até o momento. No entanto, o processo da parte principal da simulação foi dominado e compreendido. Salienta-se que há pouco material sobre os passos específicos para este tipo de simulação com o programa utilizado (Ansys) e o exemplo mostrado em HOWARD e CAZZOLATO, 2015, utiliza uma versão mais antiga, o que gerou algumas dificuldades.



Dessa forma, em breve, novas simulações de diferentes geometrias serão realizadas para que os indicadores mencionados na introdução sejam utilizados e analisados. O trabalho a ser apresentado contará com uma atualização das análises.

REFERÊNCIAS

AVELAR M., BONIFÁCIO P., SANT'ANA, L., BRANDÃO, E., BERTOTI, E., CATAI, R., **Evaluation of the crossover frequency based on the analysis of room transfer functions through statistical estimators**, Applied Acoustics 164, 2020.

JACOBSEN, F., MOLARES, A.R., **Statistical properties of kinetic and total energy densities in reverberant spaces**, Journal of the Acoustical Society of America, V.127 (4), 2010.

JEONG, C.H., **Kurtosis of room impulse responses as a diffuseness measure for reverberation chambers**, Journal of the Acoustical Society of America, V.139(5), 2016.

JOT, J.M., CERVEAU, WARUSFEL, O., **Analysis and synthesis of room reverberation based on a statistical time-frequency model**, in Audio Engineering Society 103rd Convention, September 1997.

PRISLAN, R., BRUNSKOG, J., JACOBSEN, F., JEONG, C.H., **An objective measure for the sensitivity of the room impulse response**, Journal of the Acoustical Society of America, V.136(4), 2014.

SCHROEDER, M., **Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms**, Journal of the Audio Engineering Society, V.35(5), 1987.

SCHROEDER, M., KUTTRUFF, H., **On Frequency Response Curves in Rooms. Comparison of Experimental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima**, Journal of the Acoustical Society of America, V.34(1), 1962.

VERCAMMEN, M.L.S., **Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354**, Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010, 29-31 August 2010, Melbourne, Australia, 2010.

HOWARD, Carl C., CAZZOLATO, Benjamin S., **Acoustics Analyses Using MATLAB and ANSYS**, 2015.