

CONFORTO ACÚSTICO DE SALAS DE AULA – MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO.

Rafael Giovane Morini, João Antonio Pereira, Bruno Ferreira Pussoli. – Vibro-Acústica - Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira.

A identificação e controle da presença de ecos ou reflexões nocivas às condições de ressonância e a determinação do tempo de reverberação (TR), visando uma melhoria da inteligibilidade da palavra, a musicalidade e a percepção dos sons são aspectos importantes a serem considerados no projeto de ambientes acústicos. Nos últimos anos, principalmente devido às restrições e necessidade de um maior controle das condições de conforto acústico, tem-se verificado o quão importante é o projeto acústico de ambientes fechados para a correção ou controle da entrada ou saída de ruído.

Os ambientes internos devem satisfazer condições acústicas de acordo com os seus objetivos de uso específicos. Por exemplo, salas de aula, auditórios, igrejas devem atender os requisitos de inteligibilidade enquanto fábricas e oficinas devem ter níveis de pressão sonora abaixo de níveis que podem ser prejudiciais à saúde. Esses níveis são pré-estabelecidos e definidos por Normas e Leis específicas para cada caso. O projeto acústico prevê o isolamento e absorção acústica. O isolamento acústico refere-se à capacidade de certos materiais formarem uma barreira, impedindo que a onda sonora (ou ruído) passe de um recinto para outro. Neste caso, deseja-se impedir que o ruído alcance o homem. A absorção acústica trata do fenômeno que minimiza a reflexão das ondas sonoras num mesmo ambiente, diminuindo o nível de reverberação. Nesse caso, deseja-se, além de diminuir os níveis de pressão sonora, melhorar o nível de inteligibilidade. A aplicação de um material acústico, fornecido ou utilizado sem critérios rígidos de projeto, não significa a solução do problema. Portanto, o primeiro passo no projeto acústico é definir o destino do recinto a ser avaliado. Cada recinto, conforme sua utilização, requer critérios bem definidos de níveis de pressão sonora e de reverberação para permitir o conforto acústico e/ou eliminar as condições nocivas à saúde. Níveis de pressão sonora muito baixos podem tornar o recinto monótono e cansativo, induzindo as pessoas às condições de inatividade e sonolência.

Definido a finalidade de uso do ambiente, deve-se, previamente, fixar o seu nível médio de ruído admissível, tomando-se todas as precauções para que os ecos e ressonâncias impróprias sejam eliminados e o tempo de reverberação resultante seja adequado ou aquele chamado ótimo, (Gerges, 1992; Silva, 2002). O nível médio interno de ruído admissível pelas leis brasileiras é fixado pela Norma ABNT-NB-10.152/87. O TR, está diretamente associado às características de rigidez, polimento e geometria das paredes e é definido como sendo o tempo necessário para que a densidade média de energia contida num dado ambiente, caia 60 dB a partir do instante em que a fonte de excitação é extinta. Em termos de energia seria equivalente a uma redução de 10^{-16} watt/cm². O ruído de fundo (RF) em sala de aula também é um fator importante a ser considerado e geralmente se deve a ruídos provenientes de outros setores, tal como das salas vizinhas, corredores, do ambiente externo, do ruído de trânsito que pode chegar desde as ruas mais próximas, e outros. Do ponto de vista da boa acústica, uma sala fechada deveria apresentar um TR da ordem de 0,5 s, a medida que TR supera este valor, nota-se uma falta de inteligibilidade da mensagem oral, fator fundamental que afeta a comunicação nas salas e que é definido como a porcentagem de palavras corretamente interpretadas pelo ouvinte, obtidas em testes de articulação (Silva, 2002), sendo ideal um índice de inteligibilidade superior a 80% (Méndez et al., 1999). Essa perda de inteligibilidade traz em consequência uma má interpretação dos conceitos que o locutor explica na sala de aula por exemplo. É evidente que, quando o ruído de fundo supera um certo valor (45 a 50 dB), normalmente a compreensão de uma mensagem se torna difícil, já que as palavras do professor podem ser interferidas pelos ruídos que chegam do exterior. Então, o RF, junto com o TR, são os principais fatores que determinam a qualidade acústica das salas que são avaliadas nas problemáticas do ensino e aprendizado (Méndez et al., 1999).

O tempo de reverberação pode ser determinado pela fórmula empírica de SABINE, equação 1.

$$TR = \frac{0,161V}{\sum_{i=1,2,\dots} \alpha_i S_i} \quad (1)$$

V é o volume (m^3);

$\alpha_1, \alpha_2, \dots$ são os coeficientes de absorção dos diferentes materiais com áreas S_1, S_2, \dots no interior da sala.

A aplicação dessas fórmulas, contudo, depende do coeficiente médio de absorção α_m , uma vez que o recinto pode ser tanto pouco quanto altamente absorvente. Para o caso de ambientes altamente absorventes utiliza-se a fórmula de EYRING (Gerges, 1992), que reduz o erro que a fórmula de SABINE nos induz para tais ambientes. Para recintos pouco absorventes, como acontece para a grande maioria dos casos, aplica-se SABINE.

Esse trabalho discute a avaliação da acústica de salas, mais especificamente a acústica de uma sala de aula (laboratório). Inicialmente, numa primeira etapa foram realizados cálculos teóricos do TR para uma sala de aula utilizada como modelo de estudo, os resultados obtidos foram comparados com valores encontrados na literatura. Já numa segunda etapa foram realizadas medidas experimentais do tempo de reverberação, sendo os valores obtidos comparados com dados calculados e dados encontrados na literatura.

Na primeira etapa foi avaliado o TR de uma sala de aula, ilustrada pela figura 1, para diferentes condições e materiais, incluindo a presença ou ausência de cortinas de veludo.



Figura 1: Sala de Aula adotada para o cálculo do TR.

Na Tabela 1 são especificadas as áreas da sala utilizada como laboratório de vibrações, mostrada na figura 1, que apresenta um volume total de $190 m^3$. A sala está vazia, representando a situação mais crítica. Nesta situação considerou-se os vitrais e as paredes de Eucatex, sem a presença de cortinas de veludo, e os coeficientes de absorção utilizados para as frequências de 128, 512 e 2048 Hz são os definidos em Silva (2002).

Tabela 1: Coeficientes de absorção e cálculo do TR

Nº	Superfícies		Coef. Absorção			Absorção SABINE		
	Descrição e especificação	Área (m ²)	128 Hz	512 Hz	2048 Hz	128 Hz	512 Hz	2048 Hz
1	Teto laje reb/caiada	66,3	0,015	0,02	0,025	0,99	1,32	1,65
2	Piso cimento/polido	52,44	0,03	0,03	0,03	1,57	1,57	1,57
3	Paredes reboque/caiada	40,00	0,028	0,025	0,03	1,12	1,00	1,20
4	Portas mad. comp.	4,85	0,04	0,03	0,03	0,19	0,14	0,145
5	Janelas vidro simples	22,82	0,03	0,27	0,025	0,68	6,16	0,57
6	Paredes Isolantes Eucatex	42,65	0,48	0,62	0,76	20,47	26,44	32,40
7	Cadeiras estofadas	4	0,18	0,28	0,28	0,72	1,12	1,12
Somatórios e tempos de reverberação								
Somatório 1/ T.r. 1			25,75			1,18		
Somatório 2/ T.r. 2				37,76			0,80	
Somatório 3/ T.r. 3					38,68			0,70

O TR obtido de 0,8 s, para uma frequência de 512 Hz, mostra-se ligeiramente acima do tempo ótimo para uma sala similar, algo próximo a 0,7 s definidos em Silva (2002).

Ainda na primeira etapa, numa segunda avaliação foram feitas comparações considerando a presença ou ausência de alguns materiais acústicos no interior da sala de aula, mantendo todos os demais parâmetros. Observou-se que alguns materiais pouco influenciaram no cálculo do TR, por exemplo, portas de madeira e quadro negro e que outros proporcionaram decrementos significativos, como foi o caso da Cortina – Boca de Cena, Veludo 50 % dobrada. Os resultados levando em conta a cortina de veludo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Redefinição dos Coeficientes de absorção e cálculo do TR

Nº	Superfícies		Coef. Absorção			Absorção SABINE		
	Descrição e especificação	Área (m ²)	128 Hz	512 Hz	2048 Hz	128 Hz	512 Hz	2048 Hz
1	Teto laje reb/caiada	66,30	0,015	0,02	0,025	0,99	1,32	1,65
2	Piso cimento/polido	52,44	0,03	0,03	0,03	1,57	1,57	1,57
3	Paredes reboque/caiada	40,00	0,028	0,025	0,03	1,12	1,00	1,20
4	Portas mad. comp.	4,85	0,04	0,03	0,03	0,194	0,14	0,14
5	Janelas vidro simples	10,82	0,03	0,27	0,025	0,32	2,92	0,27
6	Paredes Isolantes Eucatex	42,65	0,48	0,62	0,76	20,47	26,44	32,41
7	Cortina - Boca de Cena	12,72	0,14	0,5	0,7	1,78	6,36	8,90
8	Cadeiras estofadas	4	0,18	0,28	0,28	0,72	1,12	1,12
Somatórios e tempos de reverberação								
Somatório 1/ T.r. 1			27,17			1,12		
Somatório 2/ T.r. 2				40,88			0,74	
Somatório 3/ T.r. 3					47,28			0,64

O novo TR obtido de 0,74 s, para uma frequência de 512 Hz mostra o quão influente pode ser um dado material num recinto fechado. Neste caso, a utilização da cortina ajuda a aproximar o TR do considerado ótimo. Se este tempo for comparado com o TR ótimo, definido em Silva (2002), verifica-se que esta sala de aula apresenta o TR um pouco acima do ótimo. Porém, com os resultados apresentados na segunda avaliação, fica evidente, que esta sala de aula pode ter seu TR ajustado para níveis adequados com a inclusão de novos materiais.

Numa segunda etapa, após ter sido finalizada a fase de simulações, alguns testes foram realizados para a tomada do TR. O experimento foi realizado utilizando um decibelímetro digital com saída analógica conectado a uma placa de aquisição DBK17. A fonte sonora apresentava frequência acima de 512 Hz, não necessitando, assim, correção conforme discutido em Silva (2002).

O TR foi estimando em 0,25s. Entretanto, devido ao efeito da resposta mecânica da fonte (alto falante) existe uma oscilação na saída mesmo após a extinção da fonte. A figura 2 mostra o resultado do tempo de decremento do sinal em termos de voltagem.

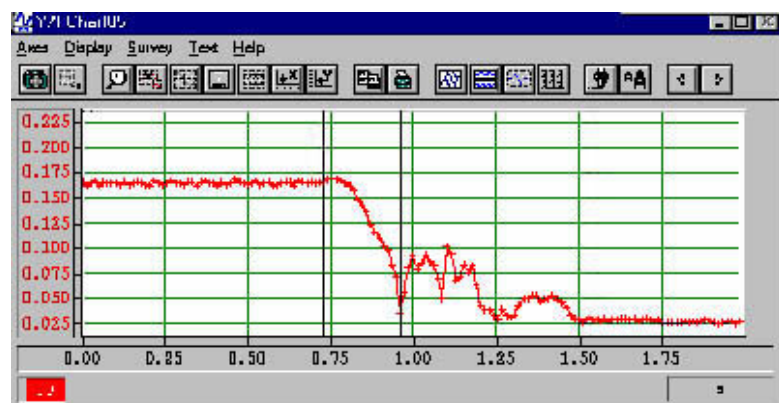


Figura – 02: Medida do TR de uma sala de 190 m³

O TR ótimo (Silva, 2002) para uma sala de conferência com essa dimensão seria em torno de 0,7 s. Entretanto, a sala analisada não apresenta exatamente as características de uma sala de conferência e o baixo TR encontrado, possivelmente, se deve ao fato da sala não ser perfeitamente fechada, uma vez que esta apresenta muitas aberturas, leia-se frestas de portas e janelas.

O trabalho apresenta estimativas e medidas do TR realizadas para a sala em questão. Os resultados mostraram-se adequadas dentro das questões relativas a um recinto fechado, ou seja, pode-se analisar o comportamento dos materiais absorventes presentes no recinto e avaliar a influência de frestas de portas e janelas (dissipação de energia sonora). Assim, a parte experimental serviu para fechar o estudo da sala de aula, tratada como um recinto fechado.

Referências Bibliográficas

MÉNDEZ, A. et al; “Caracterización Sonora de Aulas, un Estudio de los Principales Parámetros Acústicos en Aulas Argentinas”, RecniAcustica, 1999.

GERGES, N. Y. S, Ruído: Fundamento e Controle. Imprensa Universitária, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.

SILVA P., “Acústica Arquitetônica & Condicionamento de Ar”, Edital, Belo Horizonte, 2002.

Bolsa: CNPq/PIBIC