

# MEDIÇÃO DO ÍNDICE RÁPIDO DE INTELIGIBILIDADE DE SALAS

ELVIRA B. VIVEIROS DA SILVA-LAB. VIBRAÇÕES E ACÚSTICA  
DEPTO ENG. MECÂNICA / UFSC - C.P. 476 - 88049 - FLORIANÓPOLIS - SC

## RESUMO

Implementou-se digitalmente um método rápido de avaliação da inteligibilidade acústica de salas. Neste trabalho apresentam-se as respostas a simulação de alterações das condições acústicas dos ambientes e os resultados obtidos em medições experimentais em sala de aula.

## INTRODUÇÃO :

A exata compreensão das palavras proferidas em um ambiente pode ser perturbada por infinidade de fatores. A qualidade da inteligibilidade podera ser avaliada objetivamente, através de parâmetros de projeto, ou por meio de aplicação de testes subjetivos, quando todas as condicionantes são consideradas simultaneamente.

A metodologia empregada neste trabalho [1,2] procura aliar as vantagens de ambas abordagens, associando a rapidez de execução da primeira, pela utilização do processamento digital, com a confiabilidade da segunda, pelas características dos ensaios experimentais.

O método consiste em excitar-se o ambiente com sinais de espectro acústico específicos, gerados em analisador digital, que simulam a fala humana em dois aspectos fundamentais: as modulações presentes nesta e a faixa de frequência em que ela situa-se. O processamento dos sinais de resposta, que são captados em diversos pontos do auditório, conduz a detecção do grau de deterioração introduzida pela reverberação e pelo ruído de fundo. A quantificação desta degeneração, é expressa no fator redução de modulação, parâmetro que traduz o quanto foi perdida da modulação inicialmente existente na excitação [1, 2, 3].

## MODELO TEÓRICO

A expressão matemática que rege a intensidade acústica de cada um dos quatro sinais de teste  $I_0$ , das bandas de oitavas com frequências centrais de 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz e 2KHz, é formulada genericamente por [3]:

$$I_0(t) = I_b(t) \left[ 1 + m_0 \sum_{i=1}^4 \text{sen}(2\pi f_i t) \right] \quad (1)$$

onde  $I_b$  é a intensidade acústica instantânea do ruído branco filtrado em banda de oitava,  $m$  é o índice de modulação inicial e  $f_i$  é a  $i$ -ésima frequência de modulação, que toma valores entre 1,0 Hz e 12,5 Hz.

Efetuada uma normalização relativa a intensidade média de sinal de teste, o sinal de resposta  $I_f$  é definido por :

$$I_f(t) = I_r(t) \left( 1 + \sum_{i=1}^4 m_{fi} \text{sen}[2\pi f_i (t-\tau)] \right) \quad (2)$$

onde  $I_p(t)$  é a intensidade acústica instantânea do ruído branco na resposta,  $m_i$  é índice de modulação final e  $T$  o tempo de atraso.

Sendo a característica em fase desprezada, o comportamento do ambiente será descrito pela fidelidade na transmissão da modulação do sinal, segundo a relação :

$$m(f) = \frac{m_{fi}}{m_0} \quad (3)$$

onde  $m$  é o fator de modulação.

O valor de  $m(f)$  pode ser obtido através de medições experimentais, ou ainda quando considerados somente dados de projeto, já que obedece a seguinte equação [2]:

$$m = [1 + (2\pi f T / 13,8)^2]^{-0,5} [1 + 10^{-(S/R)/10}]^{-1} \quad (4)$$

onde  $f$  é frequência de modulação,  $T$  é tempo de reverberação e  $(S/R)$  razão sinal/ruído.

Obtido os valores de  $m(f)$ , calcula-se a razão sinal/ruído aparente,  $(S/R)_{ap}$ , que é interpretada como sendo a razão  $(S/R)$  que resultaria neste mesmo valor de  $m(f)$  se somente o ruído fosse a causa da degeneração do sinal. Esta conversão é definida matematicamente por :

$$(S/R)_{ap} = 10 \log \frac{m}{1-m} \quad (5)$$

Esta expressão é o inverso da segunda parcela da equação(4), que é a componente da deterioração introduzida pelo ruído. Os valores obtidos de (5) são truncados quando excederem mais ou menos 15 dB. Com os valores de  $(S/R)_{ap}$  determina-se a razão sinal/ruído aparente média,  $(S/R)_{ap}$ , da qual obtém-se o Índice Rápido de Inteligibilidade de Salas / IRIS, de acordo com :

$$IRIS = [(\overline{S/R})_{ap} + 15 / 30] \quad (6)$$

## SIMULAÇÕES

Para qualificar a metodologia empregada executaram-se testes simulados de condições acústicas controladas. Como o índice final varia entre zero e um, ensaiaram-se condições que o conduziram aos valores extremos da escala, como também a situação intermediária, quando IRIS = 0.50.

**Campo Aproximadamente Livre -->** O resultado do índice igual a 1,00 somente será adquirido em campo perfeitamente livre, sem presença de qualquer fator de degeneração para o sinal de teste. Simulando esta condição, processaram-se os sinais de teste como se estes fossem a resposta, obtendo-se IRIS = 1,00.

A execução do ensaio em câmara anecóica também cumpre as condições de ausência de reverberação e de ruído de fundo. Na impossibilidade de efetuar-se o referido ensaio, testou-se numa situação mais próxima destas características, em espaço aberto próximo ao laboratório da UFSC, na presença de algum ruído de fundo. O resultado encontrado foi IRIS=0,96.

**Ruído de Fundo -->** Para simulação da presença de somente ruído de fundo, efetuou-se a adição de sinal de ruído branco ao sinal de teste, através de processamento digital no analisador, ambos na mesma banda de frequência.

Nos três testes distintos alteram-se as intensidades médias do ruído simulado.

Quando a intensidade acústica média do ruído branco empregado foi 100 vezes inferior ao sinal de teste, obteve-se IRIS = 0,98. Através da equação (4), com os dados de ensaio chegaria-se ao valor teórico de  $m(f) = 0,99$ , que conduziria IRIS a 1,00.

Com a intensidade acústica média do ruído de fundo 100 vezes superior a do sinal de teste, o que implica, teoricamente, em  $m(f) = 0,0099$  e IRIS = 0,00, o valor experimental do índice foi de 0,16.

Por último, com as intensidades acústicas médias iguais, chegou-se, experimentalmente, a IRIS = 0,52, valor a ser comparado com IRIS obtido por modelo teórico de 0,50.

Estes resultados satisfazem a expectativa, porém, foi detectada uma possível fonte de erros. Em complementação aos ensaios, processaram-se os sinais de ruído de fundo utilizado, como se estes fossem o sinal de resposta. Foram encontradas supostas modulações, que erroneamente poderiam conduzir IRIS a, até, 0,34. Como o ruído branco, é, por definição, um sinal com frequências e amplitudes aleatórias, o resultado a ser obtido deveria ser zero.

**Reverberação -->** Quando o tempo de reverberação tende ao infinito,  $m(f)$ , e por

consequência IRIS, tende a zero (ver expressão (4)). Esta condição pode ser representada matematicamente, através de uma série infinita.

Considere-se, como primeiro elemento desta série, uma amostra do sinal de teste, que representa a chegada do som direto como parcela da resposta. Os demais elementos da série são compostos por mesmas amostras do sinal de teste, porém, com tempos de atraso crescente em relação ao primeiro elemento (considerado o tempo de reverberação infinito não haverá decréscimo nas amplitudes dos componentes do sinal de resposta).

Fica claro que o sinal resultante deste somatório, representativo de um campo reverberante ideal, será a obtenção de uma função constante de valor igual a média da pressão sonora da excitação. Com intensidade proporcional ao quadrado da pressão sonora, a função constante obtida para a intensidade não apresentará, obviamente, nenhuma modulação, resultando, em consequência, no valor de IRIS a zero.

Para avaliação, então, de diferentes condições de reverberação como agente de deterioração do sinal de resposta, realizaram-se ensaios em câmara acústica (atualmente utilizada como reverberante) de 401,3 m<sup>3</sup> de volume, do Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC.

Dentre os ensaios realizados, destacam-se três, nos quais avaliaram-se as alterações das condições de absorção e ruído de fundo da câmara.

A modificação do tempo de reverberação foi obtida com a retirada de cinco painéis de madeira existentes em seu interior, que atuam como absorvedores de baixa frequência. Alteraram-se os níveis de ruído de fundo com introdução de fonte sonora, geradora de ruído branco na mesma banda de oitava e com mesmo nível de pressão sonora do sinal de teste. A tabela 1 apresenta, de forma esquemática, as condições de teste, e o resultado de IRIS para cada uma delas. A condição dita sem ruído de fundo refere-se a ensaio realizado com a razão sinal/ruído de, pelo menos, 30 dB. Os espaços em branco referem-se a não existência do elemento descrito.

TABELA 1 - Condição de ensaio e resultados em câmara reverberante.

COND	PAINEL	RUIDO FUNDO	TR [s]	IRIS
A	com		4,30	0,38
B			5,57	0,37
C		com		0,32

Comparando-se as condições A e B e B e C, pode-se analisar as influências da reverberação e do ruído de fundo, respectivamente.



Em ambos os casos, o comportamento observado foi correto, com o índice decrescendo com o aumento da participação do agente de deterioração. Em termos absolutos, Os resultados também mostram-se de acordo com as condições acústicas do ambiente.

#### ENSAIOS EM SALA DE AULA

Qualificado o método, sua utilização em caso prático foi avaliada em uma sala de aula do Centro Tecnológico da UFSC, com capacidade para 50 alunos.

A sala, apresentada na figura 1, possui dimensões de 7,80 m X 10,60 m X 3,30 m, paredes revestidas de tijolo aparente, piso de concreto pintado, teto e vigas em concreto aparente, portas em madeira pintada esquadrias em alumínio e vidro. A fonte sonora, geradora do sinal de teste, foi colocada sobre um tablado de madeira existente para o professor, no local a ser ocupado por este. Estão também representadas a posição da fonte sonora geradora do ruído de fundo, a projeção do painel de absorção e o local de colocação do material de absorção, conforme utilização descrita nas condições de ensaio.

TABELA 2. Condições de teste em sala de aula.

COND	JAN	PAIN	M.ABS	R.FUNDO	TR[s]
A	ab			fala	1,44
B	fec				1,64
C	fec		com		1,29
D	fec	com			1,27
E	fec			r.branco	1,64
F	fec		com		0,82

Na CONDIÇÃO A, as portas foram mantidas fechadas, como em todos os outros ensaios, porém as janelas permaneceram abertas. Com a movimentação comum ao funcionamento do prédio, inclusive alunos conversando nas circulações, este é o ensaio da sala em sua condição normal de uso.

Na CONDIÇÃO B o teste foi realizado durante a noite, quando cessa a ministração de aulas na edificação e o ruído do tráfego urbano diminuiu sensivelmente.

Para a CONDIÇÃO C foram introduzidas na sala 6,88 m<sup>2</sup> de material de absorção. O material, constituído de manta de fibra de vidro, e que foi colocado junto a parede de fundo de sala, possui um coeficiente de absorção que varia de 0,85 a 1,00 nas bandas de 1/1 oitava, com frequências centrais de 250 Hz a 2KHz.

Para a CONDIÇÃO D, retirou-se o material de absorção, e foram colocados painéis de madeira na aresta formada pela parede de fundo e pelo teto, para que atuassem como mecanismos de absorção sonora.

Na chamada CONDIÇÃO E, a sala voltou a sua condição normal de uso, retiradas as absorções adicionais anteriormente colocadas, e o teste foi realizado na presença de ruído branco, filtrado na mesma banda de oitava do sinal de teste, como ruído de fundo. As fontes geradoras do ruído e do sinal de teste foram colocadas lado a lado, com o mesmo nível de pressão sonora (calibrado a um metro das fontes).

No último teste, chamado de CONDIÇÃO F, reduziu-se o tempo de reverberação da sala ao valor considerado ideal para atividade escolar [4]. Foram distribuídos, por toda a sala 10,80 m<sup>2</sup> de placas de fibra de vidro, que possui coeficiente de absorção máxima para as 4 bandas de frequência do sinal de teste.

Resultados. A tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios, que são os valores médios sobre os pontos de medição.

A tabela 3. Resultados de IRIS para sala de aula

COND	A	B	C	D	E	F
IRIS	0,53	0,49	0,55	0,50	0,39	0,55

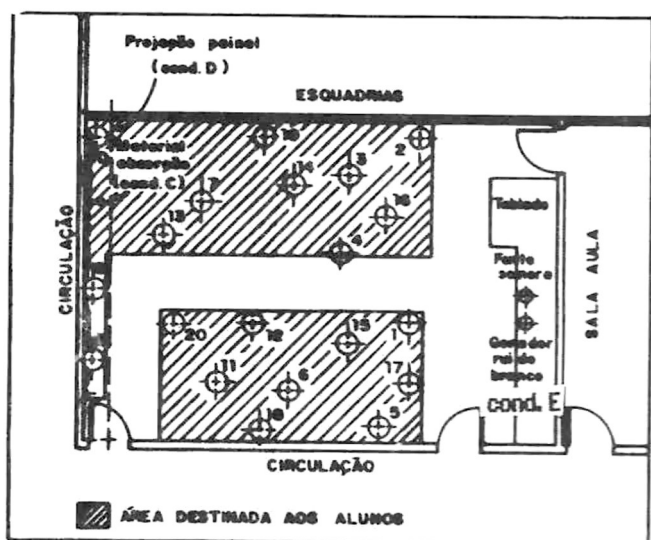


Figura 1. Planta baixa da sala de aula ensaiada

Condição de ensaio ----> Foram realizadas seis condições de teste, apresentados esquematicamente, na tabela 2. Estão ali descritas a posição, abertas (ab) ou fechadas (fec), que permaneceram, as janelas (jan), a existência ou não de painéis (pain), materiais de absorção (m.abs), a presença e o tipo de ruído de fundo (r.fundo) e o tempo de reverberação médio (tr) da sala em cada uma das situações. Mediram-se 10 pontos da região destinadas aos alunos, os de número 1 a 10 assinalados na figura 1. Somente para a condição D foram medidos todos os 20 pontos apresentados.

Na condição A normal de uso da sala, observa-se que ao serem mantidas as janelas abertas, permitindo que o ruído externo atinja mais facilmente seu interior, obtém-se simultaneamente um aumento nas características de absorção do ambiente. Às condições de ensaio da sala somaram-se, então, fatores positivos e negativos que, quando combinados, trouxeram como resultado um desempenho razoável em comparação as outras situações testadas.

Para análise da influência da absorção sonora média da sala na inteligibilidade, foram comparados os resultados dos ensaios das condições B, C, D e F.

Pelos resultados obtidos, tem-se que as condições de melhor desempenho foram os ensaios com material de absorção, C e F.

Deduz-se, no entanto, observando a condição F, que mesmo a relação sinal/ruído estando satisfatória e o tempo de reverberação muito próximo do ideal, não está assegurado um acréscimo significativo ao índice final. Credita-se a geometria da sala, parâmetro relevante na inteligibilidade, a responsabilidade deste resultado. Em estudo realizado por REYNA [5], com salas que possuem paredes paralelas, como o caso ora estudado, não foram obtidos valores superiores a 0,60, coerente, portanto, com os resultados obtidos neste trabalho.

Para análise da influência da razão sinal/ruído no ambiente ensaiado, compararam-se as condições B e E de teste, onde foram mantidas constantes as características de absorção da sala. O comportamento obtido com a introdução de ruído de fundo, quando o índice apresentou um caimento de 0,10, satisfaz a relação esperada entre os dois ensaios. Em termos absolutos, o resultado final da condição E é reconhecido como satisfatório. Considerando que a razão sinal/ruído igual a zero, isoladamente, conduziria ao valor final de 0,50, parece coerente a obtenção de IRIS = 0,39 quando outros fatores de deterioração estão presentes.

## CONCLUSÕES

Nas medições realizadas em salas de aula típica, todos os resultados estiveram coerentes com os esperados. Também na simulação do ruído de fundo em condição de meio de escala ( IRIS = 0,50 ), o resultado obtido afastou-se menos de 0,5% do esperado.

Na simulação da condição próxima da ideal (IRIS = 1,00), o resultado afastou-se somente 4% do máximo possível, valor a ser obtido somente em campo livre sem ruído de fundo.

Outro aspceto altamente positivo é a evidência que, além dos dois únicos parâmetros presentes na formulação matemática, outras condicionantes influenciam o resultado final. Em sala de aula, com o tempo

de reverberação e o nível de ruído de fundo altamente propício para obtenção de altos índices, a geometria espacial da sala, desfavorável ao bom desempenho da inteligibilidade, impediu a falsa obtenção de resultados elevados.

Apenas na simulação de condições mais desfavoráveis de integilibilidade ( IRIS = 0 ), os resultados não foram totalmente homogêneos. Demonstrou-se que a reverberação infinita levará o índice a zero, como esperado. Já com ruído de fundo, podem ser obtidos valores de até, talvez, 0,35.

## REFERÊNCIAS

- [1] Silva, E.B.V., Avaliação de inteligibilidade acústica baseada no índice de transmissão de fala (STI). IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 1987. Anais do COBEM 87, pp. 833-36 (1987).
- [2] Silva, E.B.V., Inteligibilidade acústica de salas avaliada por um índice rápido de transmissão de fala. Dissertação de mestrado, UFSC, Depto Eng. Mecânica (1989).
- [3] Steeneken, H.J.M. e Houtgast, T., A physical method for measuring speech-transmission quality. Journal of Acoustical Society of America, 67(1): 318-26, January (1980).
- [4] Moore, J.E., Desinging for good acoustics and noise contrcl. The MacMillan Press Ltd, London (1978).
- [5] Reyna, J.E., e Sancho, J., Technical note: The influence of room shape on speech intelligibility in rooms with varying ambient noise levels. Noise Control Engineering Journal, 31 (3) : 173-77, November - December, 1988.

## ABSTRACT

A fast digital method was implemented for acoustical evaluation of intelligibility in rooms. This paper presents the results of tests under a variety of acoustical simulated conditions and also experimental results in a typical classroom.