

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AREA E DE PERCUSSÃO. ANÁLISE DAS FONTES DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO E DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO EXPANDIDA

PACS: 43.55.Rg

Antunes, Sónia
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. Brasil, 101
1700-066 Lisboa. Portugal
Tel: (+351) 218443834
Fax: (+351) 218443028
Email: santunes@lnec.pt

ABSTRAT

Reproducibility studies in order to achieve the uncertainty of measurement in acoustics are becoming more important nowadays. This article discuss the uncertainty sources and presents a methodology for the calculation of uncertainty in field measurements of the airborne sound insulation between rooms and field measurements of impact sound insulation of floors according to the ISO Guide of Expression of Uncertainty. Monte Carlo simulation techniques are used for the calculation of the uncertainties of airborne and impact sound insulation single values.

RESUMO

Em ensaios de Acústica existe cada vez mais a necessidade de realização de estudos que permitam avaliar valores de reprodutibilidade e posterior declaração do valor de incerteza de medição associada, de acordo com o guia ISO para a expressão da incerteza de medição (GUM). Neste artigo são analisadas as diferentes fontes de incerteza e apresentada uma metodologia para a determinação na incerteza de medição num ensaio de medição “in situ” do isolamento sonoro a sons aéreos de uma parede divisória e num ensaio de medição “in situ” do isolamento sonoro a sons de percussão de um pavimento. A determinação da incerteza de medição do índice de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão é realizada recorrendo ao método de simulação de Monte Carlo.

INTRODUÇÃO

Em Portugal, a legislação presentemente em vigor — Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (aprovado pelo Decreto –Lei nº 129/2002 de 11 de Maio) — estabelece um conjunto de critérios para o desempenho acústico dos edifícios de modo a potenciar condições de conforto acústico no seu interior. Para determinados tipos de edifícios, estes critérios são expressos em termos valores mínimos admissíveis para o índice de isolamento a sons de condução aérea, normalizado, $D_{n,w}$ e de valores máximos admissíveis para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado, $L'_{n,w}$. No caso das avaliações “in situ” destinadas a verificar o cumprimento deste regulamento deve ser tido em conta um factor de incerteza I (com $I = 3\text{dB}$) associado à determinação do índice de isolamento a sons aéreos

(neste caso o valor determinado experimentalmente acrescido do factor I deve satisfazer o limite regulamentar) e à determinação do índice de isolamento sonoro a sons de percussão (tendo-se que neste caso o valor determinado experimentalmente diminuído do factor I deve satisfazer o limite regulamentar). As medições “in situ” do isolamento sonoro normalizado (D_n) a sons de condução aérea (expressão 1) devem ser efectuadas segundo as metodologias descritas na norma EN ISO 140-4, devendo preferencialmente ser realizadas por banda de terço de oitava, enquanto que a determinação do respectivo índice de isolamento sonoro deve ser realizada segundo a metodologia descrita na norma EN ISO 717-1.

$$D_n = L_E - L_R - 10 \log_{10} \frac{A}{(A_0)} \quad (1)$$

em que : L_E representa o nível sonoro médio no compartimento emissor, determinado a partir da média energética (de acordo com a expressão 2) dos valores obtidos para cada posição do microfone fixo (o número mínimo de posições de medição é de $n=5$); L_R representa o nível sonoro médio no compartimento receptor; A , representa a área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor, sendo determinada experimentalmente com base em medições do tempo de reverberação e utilizando-se a expressão de Sabine (expressão 3, em que V representa o volume do compartimento receptor e T o tempo de reverberação); A_0 representa a área de absorção sonora de referência e é igual a 10 m^2 .

$$L_E = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{(L_{E_i})/10} \right] \quad (2)$$

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (3)$$

As medições “in situ” do nível de percussão normalizado, por banda de terço de oitava (L'_n), (expressão 4) devem ser efectuadas segundo as metodologias descritas na norma EN ISO 140-7, enquanto que a determinação do respectivo índice de isolamento sonoro deve ser realizada segundo a metodologia descrita na norma EN ISO 717-2.

$$L'_n = L_R + 10 \log_{10} \frac{A}{(A_0)} \quad (4)$$

em que L_R representa o nível sonoro médio no compartimento receptor. Neste trabalho foram realizadas medições do isolamento sonoro a sons de condução aérea de uma parede divisória (com uma área de aproximadamente $9,6 \text{ m}^2$) entre dois quartos adjacentes do centro de convívio do LNEC (sendo o compartimento receptor designado por suite do piso 1 e ao qual corresponde um volume aproximadamente igual a 56 m^3) e na realização de medições do nível médio de percussão normalizado de um pavimento localizado no piso sobrejacente à suite do piso 1 (que constituía o compartimento receptor para os dois diferentes tipos de medições). As medições foram realizadas segundo as metodologias descritas nas normas EN ISO 140-4 e EN ISO 140-7. Nas medições do tempo de reverberação (obtendo-se este valor a partir de um decaimento dos níveis de pressão sonora de 30 dB) utilizou-se o método da fonte interrompida, validando-se os resultados obtidos segundo os critérios descritos no anexo B do projecto de norma ISO/CD 3382-2 (grau de não linearidade e grau de curvatura do decaimento). Com o objectivo de obtenção de valores de reprodutibilidade para estes ensaios de isolamento sonoro foram realizadas medições com outros equipamentos de medição e fontes sonoras e por técnicos diferentes. Também foram realizadas medições do tempo de reverberação do compartimento receptor utilizando-se o método impulsivo (com recurso a uma pistola).

AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

De acordo com a metodologia descrita no GUM [1], a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ de um resultado de uma medição representa uma estimativa do desvio padrão associado a esse resultado e exprime-se pela raiz quadrada positiva da estimativa da variância $u_c^2(y)$, obtida a partir da combinação das incertezas padrão individuais $u(x_i)$ das estimativas das grandezas de entrada x_i e covariância ($u(x_i, x_j)$) associada a x_i e x_j , segundo a expressão (5). Esta expressão corresponde ao desenvolvimento em série de Taylor de 1ª ordem da função

$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, expressão conhecida como a lei de propagação de incertezas. As derivadas parciais, $\partial f/\partial x_i$ (também designadas de coeficientes de sensibilidade) são iguais às derivadas parciais $\partial f/\partial X_i$ avaliadas no ponto $X_i=x_i$.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (5)$$

em que

$$u(x_i, x_j) = \text{cov}(x_i, x_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_{ik} - \bar{X}_i) \cdot (X_{jk} - \bar{X}_j) \quad (6)$$

ou em termos de coeficiente de correlação, a expressão (5) escreve-se como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot r(x_i, x_j) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \quad (7)$$

No caso de grandezas de entrada não correlacionadas entre si, a expressão (5) simplifica-se:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (8)$$

em que $u_i(y)$ ($i=1, 2, \dots, N$) corresponde à contribuição para a incerteza padrão combinada associada à incerteza padrão referente à estimativa da grandeza de entrada x_i . A incerteza de medição expandida U , é obtida mediante a multiplicação da incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída por um factor de expansão k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (9)$$

É possível agrupar as componentes de incerteza em duas categorias, designadas por "Tipo A" e "Tipo B". Numa avaliação de tipo A da incerteza padrão a melhor estimativa de uma grandeza (X_i) é dada pela média de n observações estatisticamente independentes e em condições de repetibilidade, enquanto que, a incerteza padrão associada $u_A(x_i)$ é dada pelo desvio-padrão experimental da média (expressão 10).

$$u_A(x_i) = s(\bar{X}_i) = \frac{s(X_{i,K})}{\sqrt{n}} = \left[\frac{1}{n} \left(\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{i,K} - \bar{X}_i)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

A avaliação de tipo B da incerteza padrão assenta numa apreciação científica baseada em toda a informação disponível. Para a avaliação da incerteza de medição do tipo A consideraram-se as contribuições associadas ao cálculo da média espacial dos níveis médios de pressão sonora obtidas nos compartimentos emissor e receptor (no caso dos sons de percussão só se considerou a contribuição do compartimento receptor), entrando em conta com a contribuição devida à correlação dos resultados obtidos nos diferentes pontos. Os coeficientes de sensibilidade referentes à média espacial dos níveis de pressão sonora são dados pela expressão (no caso do recinto receptor a expressão é análoga):

$$\frac{\partial Dn}{\partial (L_E)_{P_i}} = \frac{10^{0,1(L_E)P_i}}{\sum_{n=1}^5 10^{0,1(L_E)P_i}} \quad (11)$$

No que respeita às medições do tempo de reverberação e de volume os respectivos coeficientes de sensibilidade são dados pelas seguintes expressões:

$$\frac{\partial Dn}{\partial T_i} = \frac{4,34}{T_{\text{médio}}}; \quad \frac{\partial Dn}{\partial V_i} = \frac{4,34}{V_{\text{médio}}} \quad (12)$$

Para a determinação do desvio padrão espacial $(Des.P)_T$ em função da frequência, associado as medições do tempo de reverberação, foi considerada a seguinte expressão (de acordo com a norma ISO/TR 140-13):

$$(Des.P)_T = \sqrt{\left(1,31 + \frac{1,94}{N}\right) \cdot \frac{T}{f}} \quad (13)$$

em que: N representa o número de decaimentos para cada posição, T o tempo de reverberação em segundos, e f a frequência central da banda de terço de oitava, em Hz. Utilizando a metodologia descrita obtiveram-se as seguintes contribuições relativas à média espacial (Quadro 1) nos compartimentos emissor (Med. Esp. A, Emissão) e receptor (Med. Esp. A, Recepção) para a medição do isolamento sonoro a sons aéreos e a sons de percussão (Med. Esp. B), Recepção e para a medição do Tempo de reverberação (Méd. Esp. TR).

Quadro 1 – Contribuições para a incerteza de medição padrão relativas à média espacial

Freq. (Hz)	Méd. Esp. A Emissão (dB)	Méd. Esp. A Recepção (dB)	Méd.Esp. TR (dB)	Méd. Esp. P Recepção (dB)
100	0,39	1,79	0,58	2,66
125	0,53	1,41	0,50	2,14
160	1,24	2,24	0,45	0,87
200	0,38	0,97	0,46	1,25
250	1,29	0,73	0,40	1,01
315	0,63	0,66	0,37	0,40
400	0,73	0,78	0,34	0,41
500	0,48	0,64	0,31	1,55
630	0,62	0,26	0,28	1,55
800	0,27	0,37	0,24	1,99
1000	0,19	0,24	0,22	1,71
1250	0,28	0,38	0,21	1,85
1600	0,24	0,17	0,19	1,93
2000	0,32	0,11	0,16	1,57
2500	0,27	0,15	0,14	1,61
3150	0,35	0,16	0,13	1,66

Para a avaliação da incerteza de medição do tipo B foram consideradas as contribuições devidas ao padrão (calibrador acústico) utilizado no ajuste da sensibilidade global do sonómetro em função da frequência (incerteza de calibração, coeficientes de temperatura e de pressão atmosférica), a contribuição devida à diferença entre a resposta em campo livre e campo de pressão do sonómetro (0,0001 dB), a contribuição devida da resolução do equipamento de medição (0,03 dB) e devida ao arredondamento do resultado final (0,003 dB). Para a estimativa das contribuições devidas ao equipamento de medição recorreu-se a informação constante de um relatório publicado pelo *National Physical Laboratory* [6], onde é realizado um estudo sobre as incertezas de medição associadas com a utilização de sonómetros, e que resulta da experiência ao longo dos anos deste laboratório na verificação deste tipo de equipamentos. Assim consideraram-se as contribuições devidas à linearidade do sonómetro fora da gama de referência (0,09 dB), ao detector RMS (0,1 dB), à utilização da resposta de ponderação de tempo Fast (0,14 dB), a utilização de filtros de terço de oitava (entre 0,06 e 0,03 em função da frequência), à influência do corpo do sonómetro no campo sonoro (entre 0,01 e 0,04 em função da frequência), à influência da presença do operador (0,12 dB) e à influência das condições ambientais (temperatura e pressão atmosférica) no nível de sensibilidade do microfone (respectivamente iguais a 0,05 e 0,03 dB). Uma vez que foram realizados vários ensaios de isolamento sonoro com diferentes equipamentos e técnicos, foi possível avaliar a contribuição associada aos desvios de reprodutibilidade obtidos. A metodologia para a determinação dos índices de isolamento sonoro a sons aéreos (segundo a EN ISO 717-1) e a sons de percussão (segundo a EN ISO 717-2) a partir dos resultados de uma medição (arredondados a uma décima de decibel) por bandas de frequências com a

largura de um terço de oitava, preconiza um ajuste da curva de referência correspondente, por patamares de 1dB, relativamente à curva dos valores medidos, de modo a que a soma dos desvios desfavoráveis seja a maior possível mas não superior a 32,0 dB. O índice de isolamento sonoro corresponde ao valor em dB, da ordenada da curva de referência correspondente à banda de frequências de 500 Hz, após o ajuste realizado de acordo com o procedimento atrás descrito. Neste caso, o modelo que permite estabelecer a relação entre as grandezas de entrada (isolamento sonoro por banda de frequência) e a mensuranda (índice de isolamento sonoro) não é linear nem linearizável, pelo que uma avaliação da incerteza da mensuranda não pode ser obtida a partir da lei da propagação de incertezas. Neste trabalho foi utilizado um método numérico, baseado na simulação de Monte Carlo para a determinação da incerteza de medição associada aos índices de isolamento sonoro. A simulação de Monte Carlo utilizada consistiu em admitir que cada variável de entrada (neste caso 16, correspondendo cada uma ao isolamento sonoro da frequência central da banda de terço de oitava respectiva) é representada por uma função de distribuição de probabilidade (fdp) Normal, com valor médio igual ao isolamento sonoro e desvio padrão igual à incerteza padrão da banda de frequência correspondente. Foram gerados aleatoriamente 5000 valores para cada fdp das variáveis de entrada e que foram utilizados para a determinação do índice de isolamento sonoro de acordo com a metodologia descrita nas normas EN ISO 717-1 e 717-2. Deste modo foram obtidas cerca de 5000 aproximações para a fdp da mensuranda. Estes valores foram ordenados por ordem crescente num bloco, obtendo-se uma distribuição da frequência dos possíveis valores do índice de isolamento sonoro (histograma). A melhor estimativa da mensuranda é determinada pelo valor médio destes possíveis valores e a incerteza de medição associada é determinada pela raiz quadrada da variância dos valores obtidos. Esta metodologia pressupõe que a distribuição de densidade de probabilidade da mensuranda segue também uma distribuição aproximadamente Normal, o que nem sempre pode ocorrer. Para testar a hipótese descrita anteriormente representou-se graficamente o ajustamento à distribuição Normal (Papel de Probabilidades) da fdp da grandeza de saída, obtendo-se o respectivo coeficiente de correlação.

RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES

No quadro 2 apresentam-se os resultados obtidos para a determinação da incerteza de medição expandida, com um intervalo de confiança de 95%, para as medições efectuadas do isolamento sonoro a sons aéreos e a sons de percussão, em função da frequência. Enquanto que, as figuras 1 e 2 representam os histogramas das distribuições de frequência para o índice de isolamento sonoro a sons aéreos (ao qual corresponde um valor médio de 43 dB e o desvio padrão de 0,92 dB) e para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão (ao qual corresponde um valor médio de 68 dB e o desvio padrão de 1,7 dB), obtidos utilizando a técnica de simulação de Monte Carlo. Os valores assim obtidos correspondem a uma incerteza para a determinação do índice de isolamento a sons aéreos de 1,8 dB e sons de percussão de 3,4 dB, tendo como base as medições realizadas “in situ”. Os resultados obtidos mostram que a incertezas associadas às medições de isolamento sonoro a sons aéreos em função da frequência, são regra geral superiores as da medição do isolamento sonoro a sons de percussão, facto este que também foi comprovado pelos valores de reprodutibilidade publicados na norma EN ISO 140-2. No que respeita à utilização da técnica de simulação de Monte Carlo para a determinação do índice de isolamento sonoro, os valores obtidos estão dentro das expectativas para os valores esperados.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se aos técnicos dos Laboratórios de Acústica da Direcção Regional do Ministério da Economia do Norte, de Lisboa e Vale do Tejo e do Algarve e aos técnicos do Laboratório de Acústica do Arsenal do Alfeite e do LNEC que contribuíram para a realização da campanha de medições. Finalmente agradece-se às firmas Bruel & Kajer Portugal, Amberg e MRA Instrumentação pela cedência de equipamentos que foram utilizados nas medições.

Quadro 2 – Incertezas de medição do isolamento sonoro em bandas de terço oitava

Freq. (Hz)	Sons Aéreos U95% (dB)	Sons Percussão U95% (dB)
100	5,3	6,9
125	3,9	5,6
160	6,2	2,4
200	2,7	3,1
250	3,6	2,6
315	2,3	1,3
400	2,6	1,3
500	2,0	4,0
630	1,8	4,0
800	1,3	5,4
1000	1,0	4,6
1250	1,2	5,0
1600	0,9	5,2
2000	1,0	4,2
2500	1,0	4,4
3150	1,1	4,3

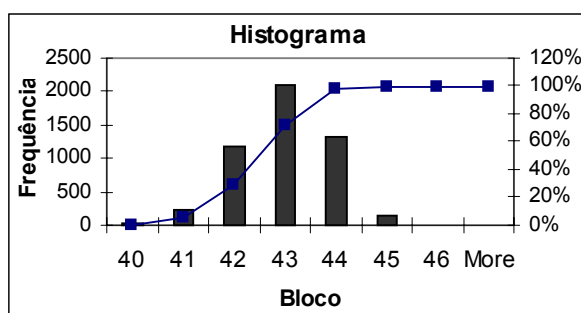


Fig 1- Histograma relativo à distribuição de frequências para o índice de isolamento sonoro a sons aéreos

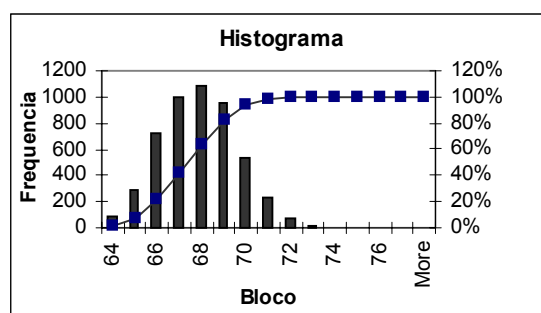


Fig 2- Histograma relativo à distribuição de frequências para o índice de isolamento sonoro a de percussão

REFERÊNCIAS

- [1] – Bureau International des Poids et Mesures et al–*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* - International Organization for Standardization, First Edition, Switzerland, 1995, ISBN 92-67-10188-9.
- [2] – Série de normas EN ISO 140. Acoustics - *Measurement of sound insulation in buildings and of building elements*.
- [3] EN ISO 717-1:1996. Acoustics - *Rating of sound insulation in buildings and of building elements* - Part 1: Airborne sound insulation.
- [4] EN ISO 717-2: 1996. Acoustics - *Rating of sound insulation in buildings and of building elements* - Part 2: Impact sound insulation
- [5] ISO/TR 140-13: 1997. Acoustics - *Measurement of sound insulation in buildings and of building elements* - Part 13: Guidelines
- [6] NPL REPORT DQL-AC 002 – *Uncertainties associated with the use of sound level meter*. National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2004.
- [7] ISO/CD 3382-2: 2003. Acoustics. - *Measurement of reverberation time. Part 2 : Ordinary rooms*.

[8] Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios. Decreto –Lei nº 129/2002 de 11 de Maio de 2002.