

CADERNOS DO IME – Série Estatística

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rio de Janeiro - RJ - Brasil
ISSN 1413-9022 / v. 26, p. 01 - 13, 2009

METODOLOGIA PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO

Daiana Paula de Freitas Ferreira
INMETRO
dpferreira@inmetro.gov.br

Ranny L. X. N. Michalski
INMETRO
rlnascimento@inmetro.gov.br

Antonio Orestes de Salvo Castro
UERJ/ PETROBRAS
orestes@petrobras.com.br

Resumo

Recentemente, a ABNT publicou um conjunto de normas nacionais a serem utilizadas na avaliação do desempenho de edificações de até cinco pavimentos ABNT NBR 15755. Dentre os vários critérios de avaliação, está o desempenho acústico das edificações, que deve atender a requisitos mínimos, considerando uma série de tópicos, entre eles: isolamento de ruídos aéreo. A partir do momento que essas normas entrarem em vigor, profissionais deverão estar capacitados para realizar medições nas edificações e surgirá uma nova discussão: Como os consumidores, potenciais proprietários de um imóvel, poderão comparar os resultados do desempenho de diferentes edificações fornecidos por diferentes profissionais? Quais são as incertezas destas medições? Esse artigo tem como objetivo estabelecer critérios para calcular, avaliar e comparar os valores de incerteza do resultado de medição do parâmetro de isolamento sonoro aéreo, Diferença padronizada de nível (DnT), obtidos através das metodologias propostas no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (ISO/IEC GUIDE 98). Precedendo a estimativa da incerteza de medição, foi estabelecida uma metodologia de validação do conjunto de medições, a fim de evidenciar sua confiabilidade metrológica. Esta metodologia de medição é composta por testes estatísticos, objetivando avaliar a homogeneidade entre médias e entre desvios padrão dos conjuntos de repetições das medições que originaram o resultado da medição.

Palavras-chave: *Isolamento Sonoro, Acústica de Edificações, Incerteza de Medição.*

1. Introdução

Nas grandes cidades e áreas urbanas, a qualidade acústica é um fator crucial para o bem estar e conforto da população. Ruído devido a tráfego, vizinhos, máquinas, indústrias e outras fontes incomoda e prejudica a qualidade de vida.

Na legislação brasileira, há duas normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que abordam o tema ruído visando o conforto acústico da população: a NBR 10151 (ABNT, 2000), que fixa condições para medição de ruído em áreas habitadas e estabelece critérios para avaliação do comprometimento do conforto da comunidade de acordo com o tipo de área habitada e atividade realizada na mesma, e a NBR 10152 (ABNT, 1987), com limites aceitáveis de ruído para conforto acústico em vários ambientes.

Recentemente, a ABNT publicou um conjunto de normas nacionais a serem utilizadas na avaliação do desempenho de edificações de até cinco pavimentos ABNT NBR 15755 (ABNT, 2008). Dentre os vários critérios de avaliação, como desempenho estrutural e desempenho térmico, está o desempenho acústico das edificações, que deve atender a requisitos mínimos, considerando uma série de tópicos, entre eles: isolamento de ruídos aéreo e estrutural, isolamento sonoro entre ambientes, de coberturas e de fachadas.

O isolamento sonoro entre ambientes ocorre quando não há passagem de som de um ambiente para outro e pode ser aumentado através do uso de diversos materiais que consigam amortecer ou dissipar a energia sonora (como paredes de tijolo maciço, vidro, mantas de borracha, etc.).

As normas de desempenho foram publicadas em maio de 2008 e entrarão em vigor em maio de 2010. A partir deste momento, profissionais deverão estar capacitados para realizar medições nas edificações e surgirá uma nova discussão: Como os consumidores, potenciais proprietários de um imóvel, poderão comparar os resultados do desempenho de diferentes edificações fornecidos por diferentes profissionais? Quais são as incertezas destas medições? Portanto, estas dúvidas devem ser esclarecidas.

Segundo as normas brasileiras, a série de normas internacionais ISO 140 (1997) deve ser utilizada para as medições de isolamento sonoro. Na avaliação da incerteza de medição o Guia para Expressão da Incerteza de Medição ISO/IEC GUIDE 98 (1995), conhecido como GUM, é o documento utilizado.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio Acústicos do Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) como parte de um projeto de pesquisa. O objetivo é estabelecer um critério de determinação da incerteza de medição para ser usado por profissionais que venham a ser qualificados para a medição do isolamento sonoro visando à avaliação do desempenho acústico de edificações.

2. Medição de isolamento sonoro aéreo entre salas

Nos métodos de medição de isolamento sonoro, a diferença de nível entre duas salas equação (1), é medida considerando uma das salas a sala emissora, na qual o som é gerado, e a outra sala sendo a sala receptora. Se as salas são de volumes diferentes, a maior deve ser a sala emissora quando a diferença de nível padronizada (D_{nT}) for avaliada. A medição é realizada gerando-se um sinal de excitação na sala emissora e medindo-se o nível de pressão sonora médio em ambas as salas ao mesmo tempo.

$$D = L_E - L_R \quad (1)$$

Onde:

$L_E \rightarrow$ nível de pressão sonora médio (no espaço e no tempo) na sala emissora, em dB.

$L_R \rightarrow$ nível de pressão sonora médio (no espaço e no tempo) na sala receptora, em dB.

O método para medição em campo de propriedades de isolamento sonoro aéreo de paredes, pisos e portas internas entre dois cômodos é descrito na parte 4 da norma internacional ISO 140 (1997). Os resultados obtidos podem ser usados para comparar o isolamento sonoro entre diferentes salas e, no caso das normas brasileiras, para comparar o isolamento sonoro real de determinada edificação com os valores estabelecidos.

A norma ISO 140-4 (1998) descreve todo o procedimento de medição que deve ser realizado considerando a geração de campo sonoro na sala emissora; especificando distâncias de separação mínimas entre microfones, alto-falantes e superfícies da sala; quantidades de posições mínimas de microfones e alto-falantes necessárias para a

realização dos testes; ruído de fundo mínimo necessário no ambiente de teste, etc. As medições utilizadas neste trabalho seguiram esta norma.

3. Confiabilidade Metrológica

3.1 Avaliação da Incerteza Padrão de acordo com o ISO/IEC GUIDE 98.

O Guia para Expressão da Incerteza de Medição (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), ISO/IEC GUIDE 98 (1995), estabelece uma metodologia universal para a estimativa da incerteza de medição dos resultados .

A metodologia descrita no ISO/IEC GUIDE 98 é a Lei de Propagação de Incertezas. O resultado de uma medição é uma estimativa do mensurando y calculado com uma função das estimativas (x_1, x_2, \dots, x_N) das grandezas de entrada (X_1, X_2, \dots, X_N) . O primeiro passo é especificar o mensurando equação (2) Y e sua relação com as grandezas de entrada X_i . A figura 1 ilustra o diagrama causa-efeito, relacionando o mensurando com suas grandezas de entrada e fontes de incerteza.

$$D_{nT} = L_E - L_R + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (2)$$

Onde:

$T \rightarrow$ média espacial do tempo de reverberação da sala receptora, em segundos.

$T_0 \rightarrow$ tempo de reverberação de referência; para residências: $T_0 = 0,5$ s.

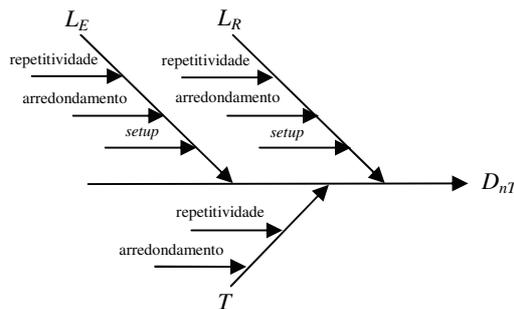


Fig. 1. Diagrama causa-efeito para D_{nT} .

O próximo passo é listar as estimativas x_i das grandezas de entrada e as possíveis fontes de incerteza, quantificando seus componentes de incerteza associados $u(x_i)$. Finalmente, a incerteza total do resultado de medição, chamada incerteza-padrão combinada, $u_c(y)$, pode ser calculada pela lei de propagação da incerteza, combinando todos os componentes de incerteza. A equação 3 é a incerteza-padrão combinada para

grandezas de entrada não-correlacionadas, onde c_i são os coeficientes de sensibilidade e $u(x_i)$ as incertezas associadas à x_i . Os coeficientes de sensibilidade são as derivadas parciais de y com relação à x_i , ($c_i = \partial y / \partial x_i$).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i]^2 u^2(x_i)} \quad (3)$$

Ao fazer o produto entre a incerteza padrão combinada e o fator de abrangência, a incerteza expandida U é obtida e os resultados apresentados pelo instrumento de medição estarão dentro dos limites da incerteza que foi informada, com o intervalo de confiança escolhido.

O resultado de uma medição é expresso como $Y = y \pm U$, isto é, a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando Y é y , e que $y - U \leq Y \leq y + U$ é um intervalo no qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem razoavelmente ser atribuídos a Y .

3.2 Validação

A incerteza de medição não valida um resultado de medição, mesmo que este seja obtido através de um método normalizado. Para validar o resultado de uma medição, deve ser implementada uma metodologia estatística objetivando avaliar a homogeneidade entre médias e entre desvios padrão dos conjuntos de repetições das medições que originaram o resultado da medição.

O ponto inicial que estabelece a metodologia é um conjunto de repetições de medições realizadas em uma amostra. A partir dos dados amostrais se realiza a inferência sobre os parâmetros da população: a sua média (\bar{x}) e seu desvio padrão (s).

A metodologia proposta neste trabalho consiste nas seguintes etapas de cálculo:

3.2.1 Estudo da homogeneidade entre as variâncias de cada conjunto de repetição

O teste utilizado foi o Teste de hipóteses para a igualdade de duas variâncias.

Hipótese nula: $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$

A estatística de teste é definida pela equação 4.

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (4)$$

Neste trabalho utilizamos como hipótese alternativa $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ e seu critério de rejeição $f_0 < f_{1-\sigma/2, n_1-1, n_2-1}$.

O valor de $F_{crítico}$ é determinado através da tabela F de Fisher.

Se as variâncias de dois conjuntos são homogêneas e conhecidas, o desvio padrão combinado das amostras s_p é definido pela seguinte equação:

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i s_i^2}{\sum_{i=1}^n v_i}} \quad (5)$$

Onde:

s_p → desvio padrão combinado das amostras;

n → número de repetições;

s_i^2 → variância (desvio padrão ao quadrado) do i -ésimo conjunto de medições;

v_i → número de graus de liberdade do desvio padrão de cada amostra.

3.2.2 Estudo da distribuição dos conjuntos das repetições de medições

Posteriormente à realização do estudo da homogeneidade entre variâncias das amostras, deve-se analisar o tipo de distribuição dos seus dados, objetivando a possibilidade da aplicação de métodos paramétricos de inferência estatísticos. Para a aplicação destes métodos paramétricos, uma das condições é que os dados amostrais provenham de uma população distribuída normalmente.

Neste trabalho foi aplicado o terceiro teste.

A estatística do teste de Shapiro-Wilks, W , é calculada pela equação abaixo.

$$W_{calculado} = \frac{b^2}{S^2} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_{n-i+1} \cdot (x_{n-i+1} - x_i) \right)^2}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Onde:

$i = 1, 2, \dots, n$, é o tamanho da amostra;

$x_i \rightarrow$ valor da medição da amostra em análise, ordenado do menor para o maior valor;

$\bar{x} \rightarrow$ valor médio da medição;

$a_{n-i+1} \rightarrow$ coeficiente calculado por Shapiro e Wilks.

A condição para que o conjunto de dados da amostra se distribua conforme uma distribuição normal é que $W_{calculado} \geq W_{crítico}$. Atenção deve ser dada, pois não se pode esquecer de ordenar os valores em ordem crescente.

3.2.3 Aplicação de critérios de rejeição

Antes de interpretar uma série de resultados obtidos a partir de uma ou mais amostras, é necessário verificar a existência de valores que, eventualmente, possam ser considerados como dispersos, isto é, valores que provavelmente não pertençam ao mesmo conjunto de resultados.

Quando um ou mais dados são rejeitados em uma amostra, pode significar que o método de análise não está sob controle e que ações corretivas devam ser tomadas.

O teste utilizado neste trabalho foi o Teste de Dixon. Este teste tem por objetivo identificar valores afastados da amostra e possui a vantagem de não ser necessário o conhecimento da estimativa do desvio padrão. Para operacionalizar a realização do teste devem-se seguir os passos abaixo:

- i) ordenar de maneira crescente os dados da amostra; isto é:

$$x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_{n-1} < x_n$$

- ii) observar o tamanho da amostra, ou seja, o número de medições, e, de acordo com a tabela 1, obter os fatores r_{ij} ;
- iii) calcular r_{ij} para valores suspeitos mínimo (x_1) e máximo (x_n) conforme a tabela 2;
- iv) identificar o valor de $r_{ij(critico)}$ tabelado. A condição para que cada valor medido não seja rejeitado é que $r_{ij(calculado)} \leq r_{ij(critico)}$ para uma determinada probabilidade.

Tabela 1 – Identificação do $r_{ij(calculado)}$

Quantidade de repetições	r_{ij}
$3 \leq n \leq 7$	r_{10}
$8 \leq n \leq 10$	r_{11}
$11 \leq n \leq 13$	r_{21}
$14 \leq n \leq 25$	r_{22}

Tabela 2 – Equação do $r_{ij(\text{calculado})}$

r_{ij}	x_n suspeito	x_l suspeito
r_{10}	$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1)$	$(x_2 - x_1) / (x_n - x_1)$
r_{11}	$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2)$	$(x_2 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$
r_{21}	$(x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_2)$	$(x_3 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$
r_{22}	$(x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_3)$	$(x_3 - x_1) / (x_{n-2} - x_1)$

3.2.4 Estudo da homogeneidade entre as médias de cada conjunto de repetições

Neste trabalho foi utilizado o Teste de Hipóteses para a Diferença nas Médias de Dados Independentes com Variâncias Desconhecidas.

De acordo com Montgomery e Runger (2003) este teste pode ser resumido da seguinte forma

Hipótese nula: $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$

Estatística teste:
$$t_0 = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{n_x + n_y}{n_x \cdot n_y} \cdot s_p}} \quad (7)$$

Hipótese Alternativa

$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0$

Critério de Rejeição

$t_0 > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2}$

Onde:

\bar{x} e \bar{y} → médias das duas amostras;

s_p → desvio padrão combinado;

n_x e n_y → tamanho das amostras.

$\Delta_0 \rightarrow 0$

O valor de $t_{\text{crítico}}$ é fornecido na tabela t de *Student*, em função dos graus de liberdade (ν) e da probabilidade de abrangência (p).

4. Resultados

4.1 Dados referente a medição

As medições foram realizadas entre dois cômodos de uma construção simples de um pavimento situada no campus de laboratórios de metrologia do Inmetro, em Xerém. O método de medição utilizado foi o método clássico descrito na ISO 140-4 (1998), na faixa de frequência de 100 a 3150 Hz, em terças de oitava. O volume da sala emissora é de aproximadamente 65,8 m³ e o da sala receptora 51,4 m³.

O número e posições de fonte e microfones estão de acordo com o estabelecido na parte 4 da ISO 140 (1998). Para obter a média espacial, foram usadas cinco posições diferentes de microfones em cada sala e duas posições diferentes de fonte na sala emissora. As medições foram realizadas com um microfone em cada sala, movidos simultânea e sucessivamente, com as seguintes combinações de posições: M11-M12, M21-M22, M31-M32, M41-M42 e M51-M52, para ambas as posições da fonte. O tempo de reverberação da sala receptora foi medido de acordo com a ISO 354 (2003).

4.2 Incertezas

Os resultados obtidos de D_{nT} e de sua incerteza padrão combinada, em função da frequência f , estão na tabela 3. A figura 2 é o gráfico de D_{nT} em função da frequência.

Tabela 3 - Incerteza padrão combinada de D_{nT} .

Freq. [Hz]	D_{nT} [dB]	$u_c(D_{nT})$ [dB]	Freq. [Hz]	D_{nT} [dB]	$u_c(D_{nT})$ [dB]
100	25,1	1,7	630	36,4	0,8
125	24,2	1,2	800	38,0	0,6
160	24,5	0,8	1000	41,9	0,6
200	26,8	1,3	1250	43,4	0,7
250	29,5	0,7	1600	45,9	0,7
315	33,2	0,8	2000	47,6	0,6
400	34,8	1,0	2500	46,6	0,5
500	35,3	0,8	3150	45,9	0,4

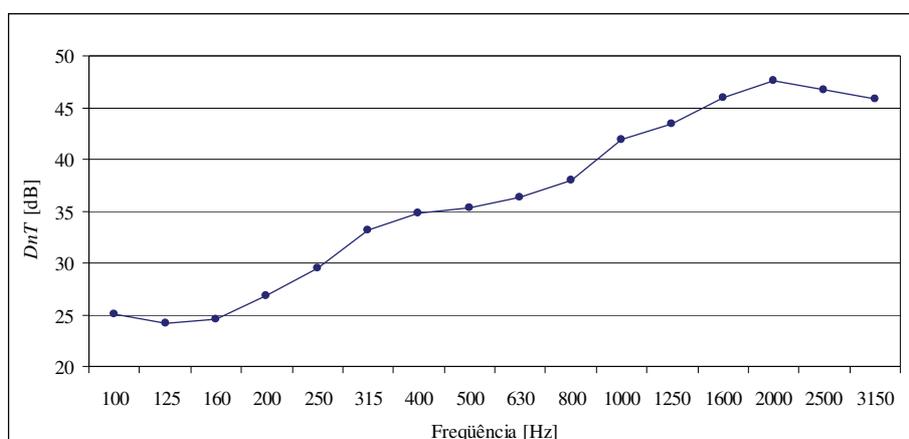


Figura 3 - D_{nT} em função da frequência.

4.3 Validação

4.3.1 Estudo da homogeneidade entre as variâncias das amostras

Esta análise evidenciou que as variâncias são homogêneas entre si, para uma probabilidade de abrangência de 95%. Os valores obtidos para o desvio padrão combinado estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4 – Valores obtidos para s_p .

Freq[Hz]	$s_p(L_E)$	$s_p(L_R)$	$s_p(T)$	Freq[Hz]	$s_p(L_E)$	$s_p(L_R)$	$s_p(T)$
100	3,36	2,39	0,18	630	1,16	1,07	0,17
125	1,83	1,90	0,32	800	0,80	0,95	0,19
160	1,40	1,12	0,33	1000	1,19	0,79	0,19
200	2,33	1,98	0,19	1250	1,07	0,74	0,27
250	1,28	1,51	0,15	1600	0,80	0,63	0,12
315	1,53	0,96	0,14	2000	0,74	0,62	0,10
400	1,70	1,21	0,17	2500	0,57	0,44	0,08
500	1,29	1,06	0,14	3150	0,45	0,37	0,08

4.3.2 Estudo da distribuição dos conjuntos das repetições de medições

De acordo com a metodologia descrita no item 3.2.2, a tabela 5 apresenta os valores calculados da estatística W do teste de Shapiro – Wilks.

Tabela 5 - Valores calculados e críticos da estatística do teste de Shapiro – Wilks (W e W_c), respectivamente.

Freq. [Hz]	$W_{(calculado)}$	$W_{(crítico)}$	Freq. [Hz]	$W_{(calculado)}$	$W_{(crítico)}$
100	0,980	0,978	630	0,979	0,978
125	0,979	0,978	800	0,979	0,978
160	0,981	0,978	1000	0,982	0,978
200	0,980	0,978	1250	0,983	0,978
250	0,983	0,978	1600	0,984	0,978
315	0,981	0,978	2000	0,983	0,978
400	0,983	0,978	2500	0,987	0,978
500	0,981	0,978	3150	0,990	0,978

Pode-se observar que todos os valores calculados de W são maiores do que os valores críticos W_c , indicando que todas as medições seguem a distribuição normal.

4.3.3 Aplicação de critérios de rejeição de valores individuais de cada conjunto visando à otimização de seus respectivos desvios-padrão

Como os dados de todas as medições seguem a distribuição normal, foi aplicado o teste de Dixon de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.3. A seguir estão os valores utilizados de r_{ij} e suas equações.

Tabela 6 - Fator $r_{ij(\text{calculado})}$ utilizado.

Quantidade de repetições	r_{ij}
$8 \leq n \leq 10$	r_{11}
$11 \leq n \leq 13$	r_{21}

Tabela 7 – Equação de $r_{ij(\text{calculado})}$ utilizada

r_{ij}	x_n suspeito	x_1 suspeito
r_{11}	$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2)$	$(x_2 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$
r_{21}	$(x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_2)$	$(x_3 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$

4.3.4 Estudo da homogeneidade entre as médias de cada conjunto de repetições

Através da metodologia descrita no item 3.2.4, pode-se constatar a homogeneidade entre as médias das medições de D_{nT} .

5. Conclusão

O trabalho apresenta uma avaliação da incerteza-padrão dos resultados para um conjunto de medições independentes de isolamento sonoro aéreo entre dois cômodos. A estimativa da incerteza não é um procedimento fácil, pois é difícil identificar todas as fontes de incerteza relativas ao mensurando e uma metodologia para evidenciar sua confiança metrológica também deve ser aplicada.

As incertezas do conjunto de medições foram estimadas através do procedimento da Lei de Propagação de Incertezas (ISO/IEC GUIDE 98).

Foram realizadas seis medições de isolamento sonoro e os valores obtidos foram estatisticamente tratados, a fim de estabelecer a confiabilidade do processo.

Se mais fontes de incerteza forem consideradas, a incerteza-padrão combinada final dos resultados será maior que os valores obtidos. Outro ponto importante é que

estes resultados são para uma situação específica de campo em uma construção específica; portanto, mais investigações poderão ser realizadas em condições diferentes.

Pode-se concluir que muita atenção deve ser dada ao se avaliar a incerteza de medição e mais estudos detalhados são necessários para se estabelecer melhor a estimativa das incertezas em acústica, especialmente com novos métodos de medição.

Referências

ABNT NBR 10151, Acústica - **Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade** – Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas, junho de 2000.

ABNT NBR 10152, Acústica - **Níveis de ruído para conforto acústico**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, dezembro de 1987.

ABNT NBR 15755, **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos** – Desempenho, Associação Brasileira de Normas Técnicas, maio de 2008.

ISO 140, Acoustics - **Measurement of sound insulation in buildings and of building elements**, International Organization for Standardization - todas as partes, 1997.

ISO/IEC Guide 98, **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)**, International Organization for Standardization, 1995.

ISO 140-4, Acoustics – **Measurement of sound insulation in buildings and of building elements** – Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms, International Organization for Standardization, 1998.

ISO 354, Acoustics – **Measurements of sound absorption in a reverberation room**, International Organization for Standardization, 2003.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**, Segunda Edição, LTC Editora, 2003.

METHODOLOGY FOR EXPRESSION OF THE MEASUREMENT UNCERTAINTY OF SONORUS ISOLATION

Abstract

Recently, the ABNT published a set of national standards to be used in the evaluation of the performance of buildings up to five floors ABNT NBR 15755. Amongst some evaluation rules, there is the acoustic performance of the buildings, that must comply minimum requirements, considering a series of topics, between them: air sound isolation of noises. The standards will enter be valid in 2010 May. From this moment, professionals will have to be able to realize measurements in the buildings and it will appear a new discussion: How will the consumers, potential owners of a landed property, be able to compare the results of the performance of different buildings supplied by different professionals? Which are the uncertainties of these measurements? Therefore, these doubts must be clarified. This work establishes rules to calculate, to evaluate and to compare the values of uncertainty of the result of measurement of the parameter of air sound sound isolation, Standardized Difference level (DnT), acquired through the methodologies offered in the Guide to the Expression the Measurement Uncertainty (ISO/IEC GUIDE 98) in and Supplement (Monte Carlo Method). Preceding the estimation of the measurement uncertainty, a methodology validate the set of measurements was established, in order to evidence its metrologic trustworthiness. This methodology of measurement is composed by statistical tests, objectifying to evaluate the homogeneity between averages and standard deviations from the sets of repetitions of the measurements that originated the result of the measurement.

Key words: *Sound isolation, Acoustics of buildings, Measurement uncertainty.*