

Determinação de coeficientes de isolamento acústico: medições *in situ* e simulação computacional

Determination of acoustical insulation coefficients: on site measurement and computational simulation

José Augusto Coelho Ferreira
Paulo Henrique Trombetta Zannin

Resumo

José Augusto Coelho Ferreira
Laboratório de Acústica Ambiental,
Industrial e Conforto
Centro Politécnico
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná
Jardim das Américas
Curitiba - PR - Brasil
CEP 82940-270
Tel.: (41) 361-3433
E-mail: jacf@globo.com

Paulo Henrique Trombetta
Zannin
Laboratório de Acústica Ambiental,
Industrial e Conforto
Centro Politécnico
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná
Jardim das Américas
Caixa-Postal: 19011
Curitiba - PR - Brasil
CEP 82940-270
Tel.: (51) 586-8936
E-mail:
paulo.zannin@pesquisador.cnpq.br

Recebido em 11/04/06
Aceito em 12/04/07

No presente trabalho foi medido *in situ* o isolamento acústico em 11 residências. Os índices de isolamento acústico medidos entre cômodos e de fachada de todas as residências avaliadas apresentaram valores abaixo dos recomendáveis para conforto acústico pela norma alemã DIN 4109. Os índices de isolamento acústico foram também obtidos, via simulação computacional. Os dados medidos e simulados foram submetidos à análise estatística de T-Hotelling (pequenas amostras), pela qual se indicou que os resultados obtidos *in situ* e simulados são similares ou iguais.

Palavras-chave: Acústica do ambiente construído. Isolamento acústico. Conforto acústico. Tempo de reverberação. Simulação acústica.

Abstract

This paper presents the in situ assessment of the acoustical insulation of 11 dwellings. The acoustical insulation indicators measured between rooms and for the facade, for all dwellings, were below the acoustical comfort values recommended by the German Standard DIN 4109. The acoustical insulation indicators were also obtained through computational simulation. Measured and simulated values were compared using the T-Hotelling statistical procedure (for small samples), indicating that the results from those two different sources were identical or very similar.

Keywords: Acoustical comfort. Acoustical insulation. Reverberation time. Acoustical simulation

Introdução

A poluição sonora é hoje, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o tipo de poluição que atinge o maior número de pessoas no mundo, depois da poluição do ar, proveniente de emissões gasosas, e da poluição da água (WHO, 2003).

O crescimento das cidades e o aumento do número de automóveis e de aeronaves que trafegam no perímetro urbano das metrópoles vêm contribuindo para elevar ainda mais a emissão do ruído no meio urbano. Vários pesquisadores têm buscado caracterizar esse ruído e identificar os malefícios que eles acarretam aos seres humanos (KAGEYAMA, 1997; MASCHKE, 1999; ZANNIN *et al.*, 2003; PAZ *et al.*, 2005). Esses trabalhos mostraram um número crescente de reclamações da população urbana, em todos os continentes, devido ao incômodo causado pelo ruído, tais como irritabilidade, aumento da pressão arterial, dor de cabeça, insônia, estresse e liberação de hormônios como cortisol e adrenalina. Em outros trabalhos foram estudadas as reações psicofisiológicas ao ruído, como em Belojevic e Jakovlevic (1997) e em Maschke (1999), em que é apontado que a exposição para uma população urbana a níveis sonoros acima de $L_{eq} = 65$ dB(A) pode levar os indivíduos afetados a disfunções de comportamento. Outra constatação apresentada por esses trabalhos é que o ruído de tráfego é considerado pela população como o principal causador de incômodo. Por exemplo, no trabalho realizado por Zannin *et al.* (2002), em que foram realizadas entrevistas junto à população de Curitiba, 73% dos respondentes apontaram o ruído de tráfego como a principal fonte de incômodo, seguido pelo ruído gerado pelos vizinhos, com 38%.

Considerando-se que tanto o ruído de tráfego como o ruído da vizinhança causam incômodo às pessoas no interior de suas residências, é possível pressupor que estas não apresentam um bom desempenho quanto ao isolamento acústico e, portanto, não estão cumprindo uma de suas finalidades, que é a de proporcionar conforto acústico a seus ocupantes. Esse fato é ainda mais crítico em países como o Brasil, que, ao contrário de países como a França, a Alemanha, os Estados Unidos e a Espanha, não possui normas que especifiquem os valores mínimos de isolamento acústico que as moradias devem possuir.

Em função do acima exposto, foi objeto deste trabalho a realização de medições dos coeficientes de isolamento de ruído aéreo *in situ*. Para esse fim, foram utilizadas as normas internacionais ISO 140-5 (ISO, 1998c), para fachadas, e ISO 140-4 (ISO, 1998b), para isolamento entre os cômodos das

edificações. Os resultados são apresentados em forma de números únicos de isolamento, conforme método gráfico descrito na norma ISO 717-1 (ISO, 1996) e utilizado neste trabalho via o *software* Qualifier 7830 (BRÜEL; KJAER, 2005).

O objetivo da realização dessas medições foi avaliar o desempenho acústico quanto ao isolamento de fachadas e de partições internas de residências, compostas de elementos construtivos amplamente utilizados na construção civil brasileira. Foi tomado como campo de estudos o universo construtivo da cidade de Curitiba.

A importância dessas medições *in situ* reside no fato de que, em geral, os dados sobre propriedades físicas de materiais acústicos encontrados em livros clássicos como Beranek e Vér (1992), Cremer e Müller (1978), Cremer e Hubert (1990), Fasold e Veres (2003), Heckl e Müller (1994), Harris (1998) e Kuttruff (2006), entre outros, referem-se a dados acústicos obtidos em laboratório. Estes, em geral, como, por exemplo, os índices de isolamento acústico, são maiores que os obtidos *in situ*, pelo fato de que em laboratório (ver ISO 140-3) é garantido que a energia sonora só é transmitida através do material que está sendo testado, enquanto nas medições *in situ* existe o efeito da transmissão da energia sonora através dos flancos.

O presente trabalho apresenta também a simulação do isolamento acústico via *software* (Bastian, 2002). O *software* Bastian trabalha baseado no procedimento de cálculo das normas europeias EN 12354-1 (EN, 2000a) e EN 12354-3 (EN, 2000b), as quais consideram também os efeitos de transmissão sonora através dos flancos.

Os índices de isolamento acústico, medidos e simulados, foram confrontados estatisticamente por meio da análise de T-Hotelling (BAJPAI.; MUSTOER.; WALKER, 2000) para pequenas amostras, ou seja, $n =$ número de amostras menor do que 30.

O uso da ferramenta computacional se mostra importante, pois as medições *in situ*, apesar de apresentarem o desempenho real dos materiais avaliados (no caso presente, índices de isolamento acústico), requerem para a sua realização um conjunto de equipamentos caríssimos. Outro fato que deve aqui ser apontado é que as medições *in situ* são trabalhosas e demoradas, e requerem uma equipe competente e muito bem treinada para a sua realização.

Metodologia

Os resultados deste trabalho foram obtidos por meio de medições *in situ* dos coeficientes de isolamento acústico entre cômodos e através de fachadas. Foram também realizadas simulações desses coeficientes com o uso do *software* Bastian 2.2, que utiliza o método de cálculo das normas européias EN 12354-1 (EN, 2000a), que prescreve um método de predição do nível de isolamento acústico entre cômodos de residências, e EN 12354-3 (EN, 2000b), que indica um método para a simulação do isolamento acústico de fachadas.

Definiram-se os coeficientes a serem medidos para se alcançarem os objetivos do trabalho, os quais foram: (a) para o ruído entre os cômodos das edificações, o número único R'_w Índice de Redução Sonora Aparente Ponderada, determinado em campo; e (b) para o ruído nas fachadas das residências, o número único $R'_{tr,s,w}$ Índice de Redução Sonora Aparente Ponderada, obtido pelo uso do ruído de tráfego como fonte sonora, o que é retratado pelo índice tr = tráfego (ISO, 1996).

Na escolha das casas e apartamentos que foram avaliados, procurou-se selecionar residências de diversos padrões socioeconômicos edificadas com diferentes materiais, porém se enfatizou a alvenaria, que é o tipo de material mais utilizado.

Foram avaliadas 11 residências, sendo cinco de alto padrão e seis de padrão popular. Essa classificação foi obtida com a ajuda de pessoal técnico especializado de cinco grandes construtoras de Curitiba. Apesar do número aparentemente baixo de unidades avaliadas, deve-se observar que 30 amostras de medições do índice de isolamento entre cômodos e 17 amostras de medições de isolamento acústico de fachada foram realizadas, conforme pode ser observado nas Tabelas 1 e 3, ou seja, mais de uma medição foi realizada na mesma moradia.

A Figura 1 apresenta o mapa com a localização das residências avaliadas. O traçado em negrito marca as vias estruturais de grande tráfego de veículos, inclusive ônibus. Optou-se por locais com alto ruído de tráfego para que este pudesse ser utilizado como fonte externa na determinação dos coeficientes de isolamento acústico das fachadas, conforme descrito na ISO 140-5.

É importante salientar que não foram avaliados todos os cômodos e fachadas das residências estudadas, e sim apenas uma parcela deles. Isso foi feito porque o procedimento de medição é muito demorado e traz desconforto aos moradores e até mesmo à vizinhança dos locais. A equipe de medição foi composta de cinco pessoas.

A execução das medições foi uma tarefa que exigiu bastante esforço de logística e planejamento, devido ao transporte dos equipamentos, à distribuição destes no ambiente e ao ruído gerado durante o processo de medição. Os procedimentos para as medições em campo dos coeficientes de isolamento sonoro entre cômodos de edificações são especificados pela ISO 140-4 (ISO, 1998b) e para o isolamento oferecido pelas fachadas das residências pela ISO 140-5 (ISO, 1998c). As normas sugerem que cada organização determine os procedimentos para a realização dos testes, mas que obedecem aos seguintes critérios: a) em medições entre salas vazias de iguais dimensões devem ser utilizados difusores; b) a fonte sonora deve ser colocada de modo a gerar um campo o mais difuso possível, a uma distância do elemento a ser medido que faça com que a radiação direta sobre ele não seja dominante; c) devem ser medidos vários pontos no interior da sala ou utilizar-se um microfone rotativo, sempre respeitando a distância mínima de 0,5 m entre o microfone e a parede; d) a área de absorção pode ser estimada pela fórmula de Sabine, porém se recomenda a utilização do método especificado pela ISO 354 (ISO, 1985); e) para a realização da medição do coeficiente de isolamento da fachada ao ruído de tráfego, devem ser utilizados dois canais de leitura, ou seja, os níveis sonoros externo L1 e interno L2 devem ser medidos ao mesmo tempo.

Outra grandeza de campo importante que deve ser medida quando se estiver determinando o isolamento entre cômodos e o de fachada é o ruído de fundo na sala receptora, pois, se a diferença entre este nível e o nível L₂ for menor que 3 dB, a medição não será válida, porque o nível L₂ não pode ser obtido. Caso essa diferença esteja entre 3 dB e 10 dB, devem-se corrigir os valores pela tabela de correção das normas ISO 140-4 e ISO 140-5.

O número de pontos de medição avaliados em cada ambiente foi determinado em função das dimensões deles, e nunca foi inferior a 3. Foi observada também a distância mínima de 0,5 m entre a parede e o microfone. O procedimento de medição utilizado para a determinação dos coeficientes de isolamento entre cômodos consistiu em gerar um sinal do tipo ruído rosa, com o analisador acústico BK 2260, amplificá-lo utilizando o amplificador de potência BK 2716 e, então, distribuí-lo pelo ambiente através da fonte dodecaédrica BK4296. A captação do som foi feita por dois microfones, um instalado na sala de emissão (nível sonoro L1) e outro na sala de recepção (nível sonoro L2).

Foi também medido o tempo de reverberação para que fossem efetuadas as correções devido às áreas de absorção das salas de recepção, conforme estipulam a ISO 140-4 e a ISO 140-5. Para cada ponto de medição foram feitas três medições do tempo de reverberação e posteriormente calculada a média, conforme determinam as normas. Os dados foram processados pelo *software* acústico Qualifier BK 7830.

Os níveis sonoros externos L1 (ruído de tráfego) e internos L2 (ambiente de recepção) foram medidos ao mesmo tempo, ou seja, em tempo real, como exige a norma ISO 140-5, para o caso em que o ruído de tráfego é utilizado como fonte sonora. Para as medições dos níveis externos em alguns edifícios avaliados que não possuíam sacadas, foi utilizada uma vara de pescar para segurar o microfone na distância exigida pela norma ISO 140-5, que é de 2 m da fachada.

Um item importante do sistema de medição utilizado foi o cabo plano AR 0014 do fabricante Brüel & Kjaer, pois ele permite que o cabo que liga o microfone externo ao analisador acústico BK 2260 (localizado na sala de recepção) passe através da janela sem que esta tenha que ficar entreaberta.

Após realizadas as medições em campo, os dados armazenados na memória do analisador BK 2260 foram descarregados no *software* BK 7830, onde foram processados de acordo com as normas ISO 140-4, ISO 140-5 e ISO 717-1.

Como saída de dados, obtiveram-se os gráficos que apresentam os níveis de isolamento acústico dos cômodos e das fachadas avaliados em bandas de frequência de 1/3 de oitava, como no modelo da Figura 2, e o número único de isolamento acústico, que aparece no canto superior direito da figura, que foi calculado automaticamente pelo *software* BK 7830 seguindo os preceitos da norma ISO 717-1.

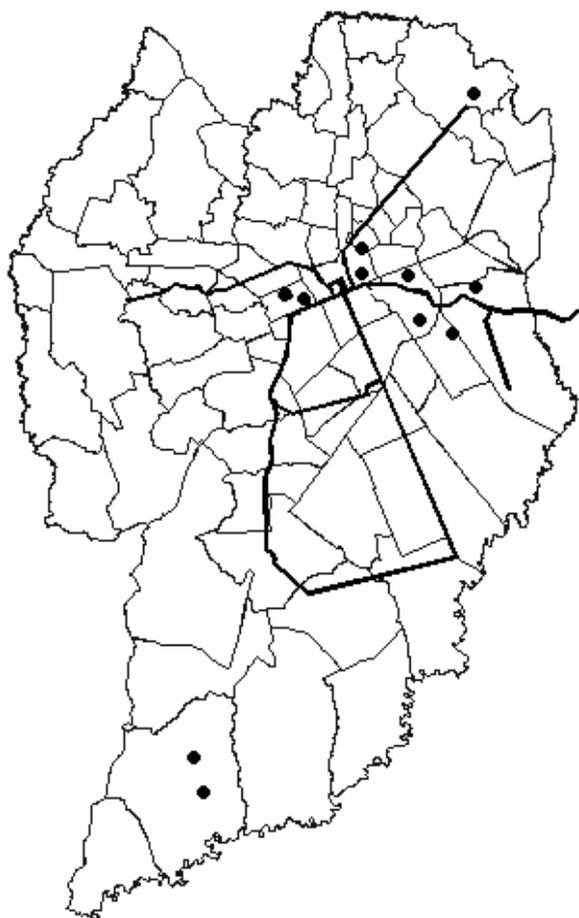


Figura 1 - Mapa da cidade de Curitiba com a localização das residências avaliadas

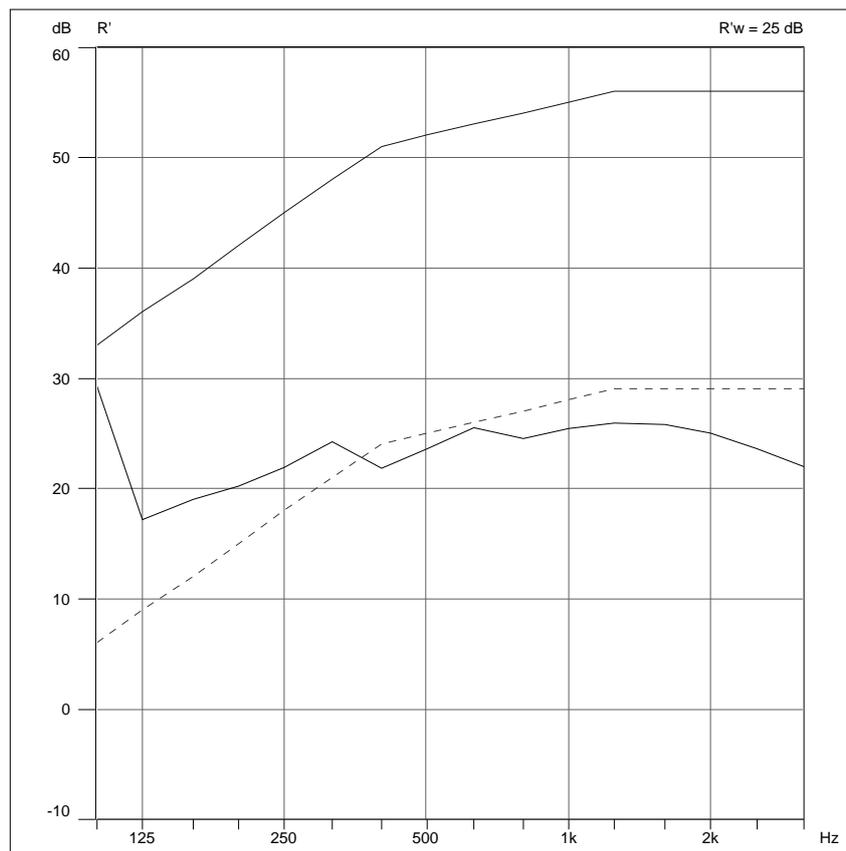


Figura 2 - Determinação do Isolamento Acústico segundo a ISO 717-1

Os equipamentos e *softwares* utilizados foram os seguintes: (a) analisador acústico Brüel & Kjaer modelo 2260 Investigator; (b) *Software Building Acoustics BZ 7204* Brüel & Kjaer; (c) *Software Qualifier 7830* Brüel & Kjaer; (d) amplificador de potência Brüel & Kjaer modelo 2716; (e) fonte sonora dodecaédrica Brüel & Kjaer modelo 4296; (f) conjunto de microfones do tipo *free field 1/2''* Brüel & Kjaer modelo 4190; e (g) conjunto de cabos e pré-amplificadores Brüel & Kjaer.

Para a simulação dos parâmetros de isolamento acústicos R'_w entre cômodos e $R'_{tr,s,w}$ para fachadas, foi utilizado o *software* Bastian 2.2, que utiliza os métodos de cálculo das normas europeias EN 12354-1 (EN, 2000a), que prescreve um método de predição do nível de isolamento acústico entre cômodos de residências, e EN 12354-3 (EN, 2000b), que indica um método para a simulação do isolamento acústico de fachadas.

Esse *software* foi utilizado também por pesquisadores europeus que avaliaram o desempenho das normas europeias aqui referidas (CRAIK, 2002; SAARINEN, 2002; SIMMONS, 2001; SIMMONS, 2002).

O *software* Bastian possui um amplo banco de dados, composto de diversos elementos construtivos: paredes simples, paredes duplas,

lajes, janelas, portas e outros. Esse banco de dados contém parâmetros acústicos de elementos construtivos medidos em laboratório, tais como o índice de redução acústica R e a frequência crítica da partição f_c . No entanto, esses elementos, principalmente as portas e as janelas, apresentam valores muito diferentes dos utilizados no Brasil. Isso se deve ao fato de o *software* ter sido desenvolvido para ser utilizado na Europa, onde o clima é bem diferente do brasileiro e o poder aquisitivo da população é superior ao da população brasileira, e onde, principalmente, existem padrões elevados e rígidos de conforto acústico, no que tange ao isolamento acústico entre cômodos e de fachada.

Para utilizar essa ferramenta para prever os coeficientes de isolamento acústico na construção civil brasileira, foi necessário procurar informações de ensaios de laboratório que apresentassem dados dos elementos construtivos utilizados no país. Essa não foi uma tarefa fácil, pois os fornecedores de materiais de construção bem como os de portas e janelas não investem na realização desses ensaios, já que nem a legislação brasileira, nem os construtores, nem os consumidores exigem deles esse tipo de informação. Os dados foram obtidos de livros

clássicos em acústica como Beranek e Vér (1992), Cremer (1991), Cremer e Heckl (1995), Fasold e Veres (2003), Harris (1998) e Heckl e Müller (1994), e dos poucos trabalhos acadêmicos existentes e/ou encontrados sobre o tema, como Baring (1990), Recchia (2001) e Silva (2000).

Outra dificuldade encontrada para a realização das simulações foi a modelagem da geometria do ambiente avaliado, pois o *software* Bastian 2.2 só permite a inclusão de geometrias retangulares. A solução encontrada para solucionar esses problemas foi a de alterar a geometria do ambiente avaliado, porém mantendo-se o mesmo volume do ambiente, a mesma área da partição exposta direta ao ruído e a mesma proporção entre a área de parede e a área dos elementos.

Na Figura 3 pode-se observar a tela de trabalho do programa, bem como as diferentes configurações de trabalho dele.

Resultados e discussões

A Tabela 1 apresenta os resultados dos Índices de Redução Sonora Aparente, entre cômodos, medidos em campo.

Constata-se na Tabela 1 que, em todas as residências avaliadas, os índices de isolamento acústico entre os cômodos analisados apresentaram valores abaixo dos aceitáveis, se comparados com os exigidos pela norma DIN 4109 (DIN, 1989), que prescreve para o isolamento entre os cômodos internos um valor de $R'_w = 37$ dB, sendo recomendado o valor mínimo de 32 dB.

Os baixos valores de isolamento interno, encontrados nas residências que possuíam paredes de alvenaria, blocos de concreto ou *Dry Wall*, devem-se às portas de compensado de madeira utilizadas, que apresentam R'_w na faixa de 10 a 20 dB (LIPS, 1999). Esse tipo de porta é freqüentemente utilizada na construção civil, mas, segundo Lips (1999), não são adequadas para ser usadas em dormitórios. Também é importante destacar que o baixo desempenho das portas pode também ser influenciado pela má instalação delas.

Já as paredes construídas com blocos de concreto ou *Dry Wall* apresentam valores de isolamento elevados, com R'_w superior a 40 dB. Esses dados provêm de medições de laboratório efetuadas por Silva (2000).

Quanto às demais residências, devido à falta dos coeficientes de isolamento dos materiais que compõem as paredes, não foi possível precisar a causa dos baixos índices de isolamento. No

entanto, sabe-se que as portas utilizadas são as mesmas que as que compõem as demais residências; portanto, apresentam baixos índices de isolamento.

A Tabela 2 apresenta a porcentagem da energia sonora transmitida através de cada um dos elementos construtivos que compõem a partição avaliada. Essa transmissão é calculada pelo Método de Análise Estatística Energética, o qual é utilizado pelo *software* Bastian (CRAIK, 2002).

Seguindo o procedimento de cálculo do *software* Bastian, foi avaliada a partição 3 da residência 5, que apresenta como índice de isolamento acústico $R'_w = 31$ dB. Essa residência foi escolhida como exemplo por ser representativa da maioria das amostras estudadas, sendo construída em alvenaria de tijolos de 6 furos, com portas internas de compensado de madeira com espessura de 35 mm.

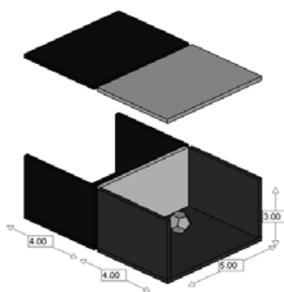
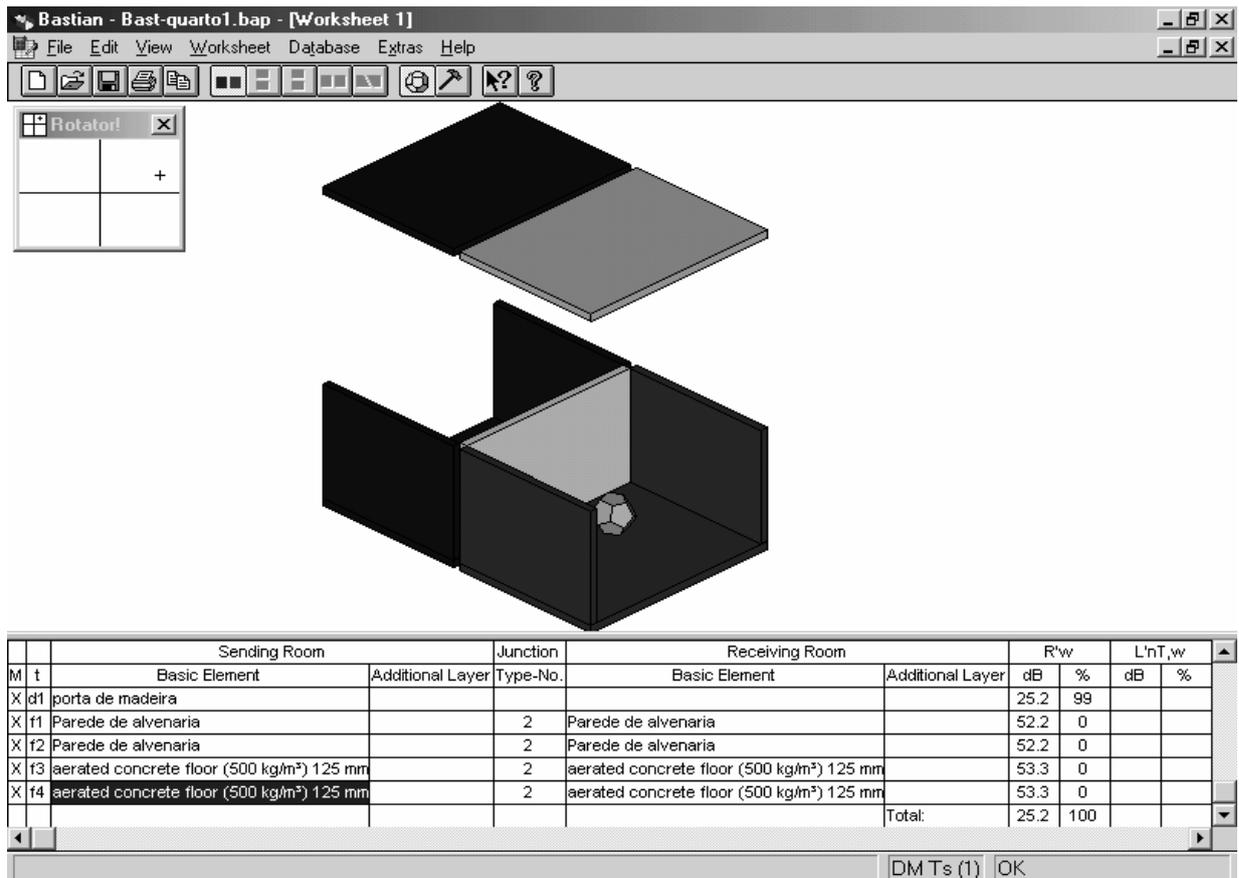
Na Tabela 2, observa-se que 94% da energia sonora são transmitidos através da porta. Esse resultado já era esperado, pois o índice de isolamento da porta é bem inferior ao da parede em que ela se encontra instalada.

Constata-se na Tabela 3 que em todas as 11 residências avaliadas os índices de redução sonora aparente das fachadas analisadas apresentaram valores abaixo dos aceitáveis, se comparados com os prescritos pelas normas internacionais, como a DIN 4109 (DIN, 1989), que tem seus valores apresentados na Tabela 4. Esses valores para o isolamento de fachada são estabelecidos em função do ruído externo. Nesse caso, pode-se observar que os valores obtidos nas medições ficaram bem abaixo do mínimo exigido, mesmo para regiões silenciosas, que é de 30 dB.

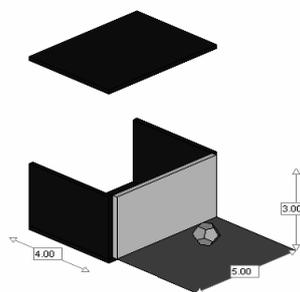
As baixas performances quanto aos níveis de isolamento das fachadas avaliadas nas residências com paredes de alvenaria ou blocos devem-se às janelas utilizadas, principalmente ao caixilho, que é o principal elemento responsável por determinar o índice de isolamento de uma janela (BARING, 1990).

O modelo de janela mais utilizada, na maioria das fachadas avaliadas, é a janela de alumínio de correr. Seu índice de isolamento de ruído determinado em laboratório R'_w apresentou o valor de 17 dB, medido por Recchia (2001).

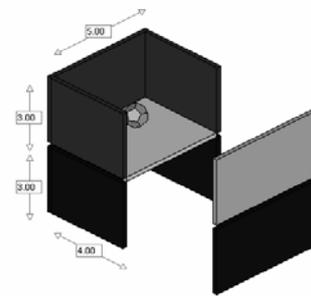
Outro ensaio efetuado em seu trabalho foi a avaliação dessa janela inserida em uma parede de alvenaria, e o resultado levantado em laboratório foi $R'_w = 20$ dB.



(a) Simulação entre Cômodos (Paredes)



(b) Simulação de Fachadas



(c) Simulação entre Cômodos (Pisos)

Figura 3 - Tela de Trabalho do *Software* Bastian

Amostra	Residência	Partição	Padrão	Paredes	R'_w
1	1	1	Alto	Alvenaria convencional	28
2	1	2	Alto	Alvenaria convencional	29
3	1	3	Alto	Alvenaria convencional	26
4	1	4	Alto	Alvenaria convencional	27
5	2	1	Alto	Alvenaria convencional	25
6	2	2	Alto	Alvenaria convencional	27
7	3	1	Alto	Alvenaria convencional	29
8	4	1	Alto	Gesso <i>Dry Wall</i>	28
9	4	2	Alto	Gesso <i>Dry Wall</i>	29
10	4	3	Alto	Gesso <i>Dry Wall</i>	27
11	5	1	Alto	Alvenaria convencional	31
12	5	2	Alto	Alvenaria convencional	30
13	5	3	Alto	Alvenaria convencional	31
14	6	1	Popular	Alvenaria convencional	28
15	7	1	Popular	Alvenaria convencional	28
16	7	2	Popular	Alvenaria convencional	28
17	7	3	Popular	Alvenaria convencional	29
18	7	4	Popular	Alvenaria convencional	27
19	8	1	Popular	Blocos de concreto	26
20	8	2	Popular	Blocos de concreto	26
21	8	3	Popular	Blocos de concreto	25
22	9	1	Popular	Madeira 2,5 cm de espessura	20
23	9	2	Popular	Madeira 2,5 cm de espessura	23
24	9	3	Popular	Madeira 2,5 cm de espessura	23
25	10	1	Popular	Madeira e <i>blockboard</i>	25
26	11	1	Popular	Poliestireno e argamassa	30

Tabela 1 - Resultados das avaliações do isolamento ao ruído aéreo entre os cômodos das residências avaliadas

Elemento construtivo	Parcela da energia sonora transmitida (%)
Parede de separação	3
Porta	94
Parede lateral direita	0
Parede lateral esquerda	0
Piso	1
Teto	1

Tabela 2 - Porcentagem da energia sonora transmitida - residência 5, partição 3

Amostra	Residência	Partição	Padrão	Parede	Janela	$R'_{tr,s,w}$
1	1	5	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	21
2	2	3	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	21
3	2	4	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	22
4	2	5	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	22
5	3	2	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	22
6	3	3	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	19
7	4	4	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	22
8	5	4	Alto	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	23
9	6	2	Popular	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	21
10	6	3	Popular	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	23
11	7	5	Popular	Alvenaria convencional	Alumínio Vidro 4 mm	19
12	7	6	Popular	Blocos de concreto	Alumínio Vidro 4 mm	20
13	8	4	Popular	Blocos de concreto	Alumínio Vidro 4 mm	20
14	8	5	Popular	Blocos de concreto	Alumínio Vidro 4 mm	20
15	9	4	Popular	Madeira 2,5 cm de esp.	Madeira Vidro 4 mm	16
16	10	2	Popular	Madeira e <i>blockboard</i>	Madeira Vidro 4 mm	18
17	11	2	Popular	Poliestireno e argamassa	Ferro Vidro 4 mm	18

Tabela 3 - Resultados das avaliações do isolamento ao ruído aéreo para a fachada das residências avaliadas

Ruído externo	Salas de estar, dormitórios, salas de aula e similares
Leq dB	R'_w mínimo da fachada dB
Até 55	30
56 até 60	30
61 até 65	35
66 até 70	40
71 até 75	45
76 até 80	50
maior que 80	Especificação especial

Tabela 4 - Índice de isolamento acústico da fachada em função do nível externo de ruído de tráfego - DIN 4109

Quanto às demais residências, devido à falta dos coeficientes de isolamento dos materiais que compõem as paredes, não foi possível precisar a causa dos baixos índices de isolamento, porém se sabe que as janelas utilizadas apresentam baixos índices de isolamento, conforme medição em laboratório realizada por Rechia (2001).

A Tabela 5 apresenta a porcentagem da energia sonora que, segundo o *software* Bastian, passa em cada um dos elementos construtivos que compõem a partição 4 da residência 5, que apresenta como coeficiente de isolamento acústico 21,6 dB. Essa partição foi escolhida como exemplo por ser representativa da maioria das amostras estudadas, pois foi construída em alvenaria de tijolos de 6 furos e possui janela de alumínio de correr com vidro simples.

Na Tabela 5, observa-se que 99% da energia sonora são transmitidos através da partição avaliada, ou seja, a janela de alumínio de correr.

Como o resultado da medição realizada entre dois cômodos da residência 5, separados apenas por parede de alvenaria, apresenta índice de isolamento acústico de 47 dB, portanto muito superior aos 21,6 dB obtidos na partição 4, que possui a mesma composição de parede, porém com uma janela de alumínio de correr, é possível perceber que a janela é o elemento por onde a maior parte da energia sonora é transmitida.

Realizou-se também uma simulação substituindo, no modelo construído no Bastian, a janela de alumínio de correr utilizada no Brasil por uma de alumínio com vidro de 4 mm mais câmara de ar de 10 mm mais vidro de 4 mm utilizada na Europa. Mesmo sendo este modelo de janela um dos mais simples utilizados na Europa, o cálculo indicou que o coeficiente de isolamento da partição passou de 21,6 dB para 37 dB.

É possível, então, perceber que, se houver uma melhora na qualidade das janelas utilizadas nas residências estudadas, estas passarão a apresentar níveis bem melhores de isolamento acústico em suas fachadas.

Verificou-se, ainda, não haver diferença significativa entre os níveis de isolamento apresentados pelas fachadas das residências de padrão mais elevado, que formam o conjunto das amostras de 1 a 8, e o das residências de padrão popular, que formam o conjunto das demais amostras, já excluída a de número 15, que foi obtida na casa de madeira, e as de número 16 e 17, que foram influenciadas pelo péssimo estado de conservação das portas.

Na seção seguinte é apresentada a análise estatística e comprovam-se as afirmações acima realizadas.

Análise estatística

A Figura 4 apresenta para os cômodos internos das residências avaliadas os resultados medidos *in situ* e simulados pelo *software* Bastian dos Índices de Redução Sonora Aparente R'_w .

Na Figura 4 é possível observar que houve proximidade entre os valores medidos e simulados, portanto o *software* Bastian, que tem seu método de cálculo embasado na norma EN 12354-1 (EN, 2000a), apresentou bom desempenho na simulação do nível de isolamento entre os cômodos das residências avaliadas.

Para corroborar essa afirmação, foi realizada uma análise estatística inferencial dos dados, para identificar se as amostras estudadas, simulada e medida, apresentariam uma mesma característica, a saber, o índice de isolamento acústico ponderado aparente R'_w (BAJPAI *et al.*, 2000). A estatística inferencial foi escolhida para que se pudesse, ao

final, generalizar para a população o que foi observado nas amostras.

Dentro da estatística inferencial, optou-se pela realização de um teste de hipóteses estatísticas. Um teste de hipótese fundamenta-se em um conjunto de regras que permitem, a partir dos resultados experimentais (amostrais), rejeitar ou não tal hipótese, associando a essa decisão determinada confiança.

Inicialmente, foi realizada a análise estatística descritiva das amostras. Foram calculados valores de medidas de posição (valores únicos que representam uma característica da amostra) e dispersão (valores de intervalo em torno de um valor característico da amostra). Com esses resultados foi verificada a normalidade das amostras através da análise gráfica da função *Q-QPLOT*, onde ambas apresentaram distribuição normal.

Em seguida, foi calculado o grau de associação de covariância entre as variáveis, contudo esse valor não foi determinístico dentro do estudo, servindo somente como parcela no desenvolvimento dos testes estatísticos. As covariâncias encontradas eram aproximadamente iguais, admitindo-se um erro de variabilidade de 5% (critério rigoroso).

As amostras foram submetidas a um teste estatístico seqüencial, pelo qual se comprovou a independência entre as variáveis das amostras. Após a comprovação de independência entre as variáveis, o teste inferencial adequado para comparação entre as amostras seria o de comparação de médias entre populações.

Entre os inúmeros testes de comparação entre médias, optou-se pelo teste de *T-Hotelling*, no qual as amostras devem apresentar as seguintes características: (a) tamanho da amostra menor ou igual a 30; (b) distribuição normal; (c) variáveis independentes; e (d) covariâncias reais aproximadamente iguais (BAJPAI *et al.*, 2000).

Elemento construtivo	Parcela da energia sonora transmitida (%)
Parede de separação	1
Janela	99
Parede lateral direita	0
Parede lateral esquerda	0
Piso	0
Teto	0

Tabela 5 - Porcentagem da energia sonora transmitida - residência 5, partição 4

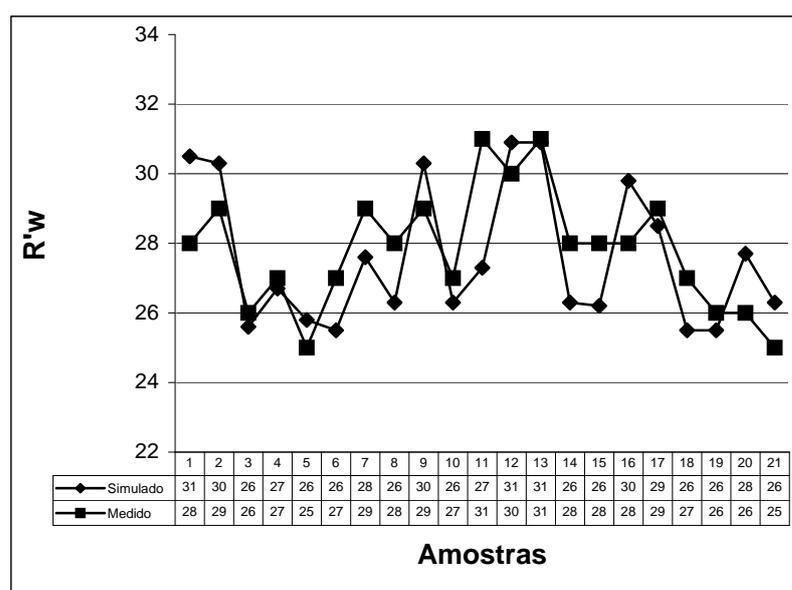


Figura 4 - Comparação dos Índices de Isolamento Acústico R'_w Medidos e Simulados

Foi então formulada uma hipótese inicial “H₀”, que admitia que as médias estimadas das amostras eram iguais, condição esta que indica que as amostras são semelhantes, pois a média é um valor único que representa a amostra. Assim:

$$H_0: \underline{\mu}_1 - \underline{\mu}_2 = 0$$

ou

$$H_0: \underline{\mu}_1 = \underline{\mu}_2$$

onde:

μ_1 = média dos parâmetros simulados; e

μ_2 = média dos parâmetros medidos.

A estatística do teste de *T-Hotelling* (T^2) é dada pela expressão abaixo:

$$T^2 \cdot \frac{n_1 + n_2 - p - 1}{(n_1 + n_2 - 2)p} \leq F_{p, n_1 + n_2 - p - 1}^{(\alpha)}$$

onde:

$$T^2 =$$

$$\left[(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2) \right]^T \left[\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) Sp \right]^{-1} \left[(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2) \right]$$

n_1 e n_2 = tamanhos das amostras;

p = número de variáveis;

α = nível de significância; e

$F_{p, n_1 + n_2 - p - 1}^{(\alpha)}$ = valor na distribuição *F-Normal*.

Esse cálculo fornece um valor único. A hipótese “H₀” é aceita, se o valor encontrado no cálculo da estatística do teste for igual ou inferior ao valor retirado da tabela para uma curva *F-Normal* (distribuição gaussiana), em função das características das amostras (tamanho “n” da amostra e número de variáveis “p”), que definem os seus graus de liberdade, e do nível de significância adotado de 5%.

O nível de significância considerado para o teste foi de 5% (critério rigoroso), isto é, a possibilidade de o teste estar correto é de 95%. A hipótese inicial foi confirmada, pois a condição para sua aceitação, de que a estatística do teste apresentasse um valor menor que o do *F-Normal*, foi atendida, uma vez que a estatística do teste resultou no valor 0,1202, conseqüentemente, menor que o valor do *F-Normal*, que foi de 4,0847. Portanto, a hipótese de igualdade das médias foi confirmada, o que significa dizer que as amostras são iguais ou semelhantes, com um intervalo de confiabilidade de 95%.

A Figura 5 apresenta os resultados medidos e simulados dos índices de redução sonora aparente das fachadas. Na Figura 5 é possível observar que houve proximidade entre os valores medidos e simulados, portanto o *software* Bastian, que tem seu método de cálculo embasado na norma EN 12354-3 (EN, 2000b), apresentou bom desempenho na simulação do nível de isolamento das fachadas das residências avaliadas, havendo uma discordância maior apenas nas amostras 11 a 14, referentes às residências 7 e 8, tendo sido prejudicado o resultado medido na residência 8 pelo fato de existirem aberturas no forro da residência para permitir a visualização do madeiramento do telhado. Porém, essa diferença ficou na ordem de 3 dB, que foi recomendado como o valor do coeficiente de segurança a ser utilizado quando se utiliza o *software* Bastian.

Esse valor do coeficiente de segurança de 3 dB foi sugerido pelo pesquisador dinamarquês Simmons, que publicou trabalhos sobre a norma EN 1235-4 (SIMMONS, 2001; 2002). Essa sugestão foi em forma de comunicação pessoal por e-mail.

Para corroborar a conclusão de que o *software* Bastian apresentou bom desempenho, foi realizada uma análise estatística inferencial dos dados utilizando-se o teste de comparação de médias de *T-Hotelling*, que foi escolhido por ser o mais adequado em função das seguintes premissas testadas: a) tamanho da amostra menor ou igual a 30; b) distribuição normal; c) variáveis independentes; e d) covariâncias reais iguais.

Foi então formulada uma hipótese inicial “H₀”, em que se admitiu $\mu_1 = \mu_2$, ou seja, a média dos parâmetros medidos (μ_1) é igual à média dos parâmetros simulados (μ_2), utilizando-se um nível de significância de 5% (critério rigoroso), isto é, a possibilidade de o teste estar correto é de 95%.

A hipótese inicial foi corroborada, pois a condição para sua aceitação, de que a estatística do teste apresentasse um valor menor que o do *F-Normal*, foi atendida, uma vez que a estatística do teste resultou no valor 4,1182, conseqüentemente, menor que o valor do *F-Normal*, de 4,2252. Portanto, a hipótese de igualdade das médias foi confirmada, o que significa dizer que as amostras são iguais ou semelhantes, com um intervalo de confiabilidade de 95%.

Por fim, realizou-se mais uma análise estatística, pela qual se buscou saber se o índice de isolamento acústico obtido nas moradias de alto padrão é superior aos índices de isolamento acústico das moradias de padrão popular.

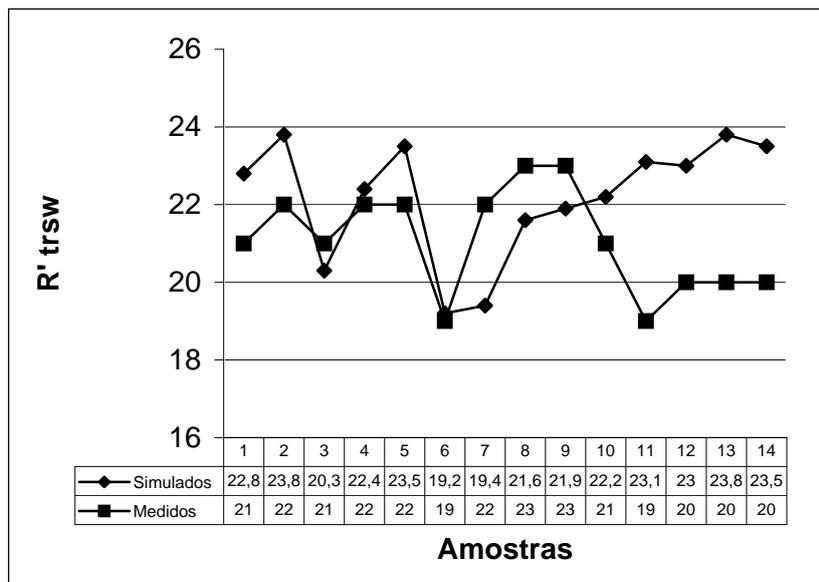


Figura 5 - Comparação dos Índices de Isolamento Acústico $R'_{tr,s,w}$ Medidos e Simulados para as Fachadas

Para tanto, foi realizada uma análise estatística inferencial dos dados utilizando-se o teste de comparação de médias de *T-Hotelling*, que foi escolhido por ser o mais adequado em função das seguintes premissas testadas: a) tamanho da amostra menor que 30; b) distribuição normal; c) variáveis independentes; e d) covariâncias reais iguais.

Foi então formulada uma hipótese inicial “ H_0 ”, na qual se admitiu $\mu_1 = \mu_2$, ou seja, a média das residências de alto padrão “ μ_1 ” é igual à média das residências de baixo padrão “ μ_2 ”, utilizando-se um nível de significância de 5% (critério rigoroso), isto é, a possibilidade de o teste estar correto é de 95%.

A hipótese inicial foi corroborada, pois a condição para sua aceitação, de que a estatística do teste apresentasse um valor menor que o do *F-Normal*, foi atendido, uma vez que a estatística do teste resultou no valor 2,1866, conseqüentemente, menor que o valor do *F-Normal*, de 4,2565. Portanto, a hipótese de igualdade das médias foi confirmada, o que significa dizer que as amostras são iguais ou semelhantes, com um intervalo de confiabilidade de 95%.

Essa constatação leva à reflexão de que os construtores não estão levando em consideração o conforto acústico na hora de projetar e construir as residências, pois pessoas que adquirem residências de alto padrão podem pagar por elementos construtivos que venham a lhes proporcionar mais conforto, e se não o fazem é por desconhecimento ou por falta de opção.

Conclusões

Este trabalho mostrou que as medições *in situ* são de extrema importância, uma vez que elas apresentam o desempenho real dos ambientes e elementos construtivos, como o presente caso de desempenho referente ao isolamento acústico. No entanto, para a realização de medições sejam *in situ* ou em laboratório, necessita-se de muitos e caros equipamentos e de uma equipe muito bem treinada.

O presente trabalho apresentou também uma alternativa às medições, que é a simulação computacional. Essa alternativa é interessante, pois permite avaliar acusticamente a edificação ainda na fase de projeto e também simular possíveis modificações para solucionar deficiências de desempenho apresentadas.

No entanto, os *softwares* disponíveis no universo da acústica são em sua totalidade desenvolvidos na Europa e nos EUA. Foi observado neste trabalho que o padrão mais simples de janela para fachada na Alemanha não é atendido pelas residências aqui avaliadas, que englobam residências de alto padrão. Isso é extremamente preocupante.

Constatou-se que em todas as residências avaliadas os índices de redução sonora entre os cômodos analisados apresentaram valores abaixo dos aceitáveis, se comparados com os exigidos por normas internacionais, como a DIN 4109, que prescreve para o isolamento entre os cômodos internos avaliados um valor de R'_w índice de isolamento de ruído recomendado de 37 dB e um valor mínimo de 32 dB.

Constatou-se também que em todas as 11 residências avaliadas os índices de redução sonora aparente das fachadas analisadas apresentaram valores abaixo dos aceitáveis, se comparados com os prescritos pelas normas internacionais, como a DIN 4109, que tem seus valores apresentados na Tabela 4. Esses valores são estipulados em função do ruído externo. Nas edificações avaliadas pode-se observar que o valor obtido nas medições ficou abaixo do mínimo exigido, mesmo para regiões silenciosas, que é de 30 dB.

Foi comprovado estatisticamente, com análise para pequenas amostras ($n < 30$), não haver diferença significativa entre os índices de isolamento acústico medidos nas residências de padrão elevado e os medidos nas residências de padrão popular. Essa constatação leva-nos a reflexão de que existe falta de aplicação do conhecimento no que concerne à busca pelo conforto acústico. No universo das amostras estudadas, mesmo nas residências de alto padrão, os construtores não levaram em consideração o conforto acústico na hora de construir. Os usuários, aparentemente, não exigem isso dos construtores e dos projetistas ou por falta de conhecimento, ou de opção, ou, até mesmo, de orientação de quem tenha por eles sido contratado para realizar o projeto de suas residências. Nesse caso, os construtores também podem estar mal orientados por projetistas que, ignorando e/ou desconhecendo os princípios básicos de conforto acústico – no caso específico deste trabalho, o isolamento acústico –, não trazem para seus projetos e, conseqüentemente, para discussão com aqueles essa variável, conforto acústico, que é hoje de suma importância para a busca da qualidade de vida.

O *Soundscapes* (SZEREMETTA; ZANNIN, 2006; ZANNIN *et al.*, 2001, ZANNIN *et al.*, 2003) das cidades em geral, e das grandes cidades em particular, está a cada dia mais poluído acusticamente. Aos poucos resta somente o refúgio dos lares para que os indivíduos busquem locais de tranquilidade, e estes merecem, então, toda a atenção daqueles que têm a incumbência de projetá-los e daqueles que têm a incumbência de torná-los uma realidade habitável.

Referências

BARING, J. **O desempenho acústico de caixilhos de fachada no contexto do controle da poluição sonora urbana**. 1990. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

BERANEK, L. L.; VÉR, I. L. **Noise and vibration control engineering: principles and applications**. 4. ed. New York: Wiley Interscience Publications, 1992. 823 p.

BELOJEVIC, G.; JAKOVLEVIC, B. Subjective reactions for traffic noise with regard to some personality traits. **Environmental International**, Belgrado, v. 23, n. 2, p. 221-226, 1997.

BAJPAI, A. C.; MUSTOE L. R.; WALKER D. *Matemática avançada para engenharia*. Departamento de Matemática para Engenharia, Loughborough University of Technology. Editora HEMUS, 510 B, 2000. 165 p.

BASTIAN HANDBOOK; METZEN, A. H. **Bastian: the building acoustics planning system – user manual**. Berlin: Saint-Gobain Isover, 2002. 178 p.

BRÜEL & KJAER. **Technical Documentation 2238 and 2260 Integrating and Logging Sound Level Meter**. Naerum, Denmark, 1995 and 1998.

CREMER, L.; HUBERT, M. **Vorlesungen über technische akustik**. Vierte Auflage mit 177 Abbildungen. Springer-Verlag, 1990.

CREMER, L.; MÜLLER, H. A. **Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik**. 2. völlig neubearbeitete Auflage. S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1978.

CRAIK, B. **What's is EN 12354**. Edinburgh, 2002. Disponível em: <http://www.ioa.org.uk/meetings/reports/Bs_EN_12354/BS_EN_12354.html>. Acesso em: 14 jun. 2002.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **DIN 4109: Schallschutz im Hochbau**. Germany, 1989.

EN. EUROPEAN NORM. **EN 12354-1: Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms**. UK, 2000a.

EN. EUROPEAN NORM. **EN 12354-3: Building Acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound**. UK, 2000b.

FASOLD, W.; VERES, E. **Schallschutz und Raumakustik in der Praxis**. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. Huss-medien GmbH. Berlin: Verlag Bauwesen, 2003.

HARRIS, C. M. **Noise control in buildings: a practical guide for architects and engineers**. 2 ed. Nova York: McGraw-Hill, 1998. 646 p.

HECKL, M.; MÜLLER, H. A. **Technischen akustik**. 2. Auflage. Springer -Verlag Berlin Heidelberg. New York, 1995.

ISO. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 140-3**: Acoustic. Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 3: laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. Geneva, 1998a.

ISO. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 717-1**: Acoustic: Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Geneva, 1996.

ISO. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 140-4**: Acoustic: Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneva, 1998b.

ISO. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 140-5**: Acoustic: Measurement of sound insulation in building and of building elements. Part 5: Field measurements of airborne sound of façade elements and façades. Geneva, 1998c.

ISO. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 354**: Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room. Geneva, 1985.

KAGEYAMA, T.; KABUTO, M.; NITTA, N.; KUROKAWA, Y.; TAIRA, K.; SUZUKI, S.; TAKEMOTO, T. A cross-sectional study on insomnia among Japanese adult women in relation to night-time road traffic noise. **Journal of Sound and Vibration**, England, v. 205, n. 4, p. 387-391, 1997.

KUTRUFF, H. **Einführung in der Akustik**. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2006.

LAAICA. Laboratório de acústica ambiental, industrial e conforto acústico. Disponível em: <www.demec.ufpr/laboratorios/laaica>. Acesso em: 01 ago. 2007.

LIPS, W. **Lärmbekämpfung in der Haustechnik**. Berlin: Expert-Verlag, 1999. 404 p.

MASCHKE, C. **Preventive medical limits for chronic traffic noise exposure**. Fórum Acústico, Sevilha, v. 85, p. 448, 1999.

PAZ, E. C.; FERREIRA, A.; ZANNIN, P. H. T. Comparative study of the perception of urban noise. **Revista de Saúde Pública**, v. 39, p. 467-472, 2005.

RECCHIA, C. **Estudo do desempenho acústico dos elementos construtivos que compõem a fachada**. 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

SILVA, D. **Estudo da isolamento sonora em paredes divisórias de diversas naturezas**. 2000. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

SIMMONS, C. Systematic comparison of sound insulation measured in situ with building elements. In: THE INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS (ICA). **Proceedings...** Rome, 2001.

SIMMONS, C. **Simple presentation of expected impact sound levels for a test flooring laid on 35 Standardized Concrete Slabs, Using EN 12354**. Fórum Acústico, Sevilha, 2002.

SAARINEN, A. Reduction of external noise by building facades: tolerance of standard EN 12354-3. **Applied Acoustics**, Finland, v. 63, n. 5, p. 529-545, 2002.

SZEREMETA, B., ZANNIN, P. H. T. A paisagem sonora de Curitiba. **Engenharia e Construção**, v. 113, p. 30-37, 2006.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO (UK). **Résumé d’Orientation des Directives de l’OMS Relatives au Bruit dans l’Environmental**. Disponível em: <<http://www.who.int/home.page/>>. Acesso em: 5 abr. 2003.

ZANNIN, P. H. T.; DINIZ, F. B.; FERREIRA, J. A. C. Environmental noise pollution in residential areas of the city of Curitiba. **Acustica**, v. 87, p. 625-628, 2001.

ZANNIN, P. H. T.; DINIZ, F. B.; FERREIRA, J. A. C. environmental noise pollution in the city of Curitiba, Brazil. **Applied Acoustics**, v. 63, p. 351-358, 2002.

ZANNIN, P. H. T.; DINIZ, F. B. Annoyance caused by urban noise to the citizens of the city of Curitiba, Brazil. **Revista de Saúde Pública**, v. 36, n. 4, p. 521-524, 2002.

ZANNIN, P. H. T.; DINIZ, F. B.; FERREIRA, J. A. C. A survey of urban noise annoyance in a large Brazilian city: the importance of a subjective analysis in conjunction with an objective analysis. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 23, p. 245-255, 2003.