

Acústica e Vibrações

Sociedade Brasileira de Acústica - Sobrac

Dezembro de 2014 - Vol. 29 ▶ N° 46

SOBRAC 30 ANOS: História e Perspectivas para a Acústica e suas áreas afins no Brasil

Desempenho Acústico de Sistemas de Piso: Estudos de Caso Para Isolamento ao Ruído Aéreo e de Impacto

Uma nova abordagem para validar auralizações de modelagem computacional usando índices de articulação

Inteligibilidade de Fala por Listas de Palavras Foneticamente Balanceadas num Átrio Projetado Segundo Padrões Construtivos Green Building

Medição de Potência Sonora de Ônibus Urbanos na Condição Parado

Influência da Dimensão das Aberturas na Qualidade Acústica de Salas de Aula Naturalmente Ventiladas

Avaliação dos níveis de pressão sonora em cabines acústicas desmontáveis do Paraná

Representação acústica de material absorvedor no domínio do tempo utilizando filtros de resposta ao impulso finito na modelagem discreta de Huygens

Expediente

Revista da Sociedade Brasileira de Acústica –
SOBRAC
ISSN 1983-442X
UFSM - CT - Sala 212
Av. Roraima nº 1000, Camobi
CEP 97105 900 Santa Maria RS
www.acustica.org.br
e-mail:sobrac@acustica.org.br
Skype ID: sobrac_acustica

Diretoria SOBRAC 2010/2014

Presidente: Dinara X. da Paixão
dinaraxp@yahoo.com.br
Vice-Presidente: Newton Sure Soeiro
nsoeiro@ufpa.br
1º Secretário: Gilberto Fuchs de Jesus
gilberto@acustica.org.br
2º Secretário: Krisdany Vinícius S. M. Cavalcante
krisdany@acustica.blog.br
1º Tesoureiro: Roberto Jordan
jordan@acustica.org.br
2º Tesoureiro: Daniel Fernando B. Zajarkiewicz
daniel@totalsafety.com.br
sobrac@acustica.org.br

Conselho

Aloísio Leoni Schmid
Débora Barreto
Elcione Maria Lobato de Moraes
Gustavo da Silva Vieira de Melo
Julio A. Cordioli
Léa Cristina Lucas de Souza
Ranny L. X. Nascimento Michalski
Ricardo Eduardo Musafir
Sérgio Luiz Garavelli
Stelamaris Bertoli Rolla

Suplentes

Antonio Carlos Lobo Soares
David Akkerman
Rafael Antônio Comparsi Laranja

Corpo Editorial

Newton Sure Soeiro - UFPA
Ranny L. X. Nascimento Michalski - INMETRO
Elias Bitencourt Teodoro - UFU

Capa:

Camila Klein Severo - SOBRAC

Sumário

Editorial 02

Artigos

SOBRAC 30 anos: História e Perspectivas para Acústica
e suas áreas afins 03

Desempenho Acústico de Sistemas de Piso: Estudos de Caso
Para Isolamento ao Ruído Aéreo e de Impacto 13

A New Approach to Validate Computer Modeling
Auralizations by Using Articulation Indexes 20

Inteligibilidade de Fala por Listas de Palavras
Foneticamente Balanceadas num Átrio Projetado Segundo
Padrões Construtivos Green Building 28

Medição de Potência Sonora de Ônibus Urbanos na
Condição Parado 36

Influência da Dimensão das Aberturas na Qualidade
Acústica de Salas de Aula Naturalmente Ventiladas ... 47

Avaliação dos níveis de pressão sonora em cabines
acústicas desmontáveis do Paraná 57

Representação acústica de material absorvedor no
domínio do tempo utilizando filtros de resposta ao
impulso finito na modelagem discreta de Huygens ... 63

Informações

SOBRAC tem nova Diretoria 77

Editorial

A Comissão Editorial da Revista Acústica e Vibrações apresenta a Edição nº46, constituída por artigos selecionados no XXV Encontro da SOBRAC e outros que haviam sido submetidos aos revisores deste periódico, através do site da entidade, onde há essa possibilidade em fluxo contínuo.

Na Sessão de Encerramento do XXV Encontro da SOBRAC, realizado de 20 a 22 de outubro de 2014, na cidade de Campinas/SP, ocorreu a divulgação dos trabalhos que obtiveram as melhores pontuações na avaliação dos revisores do evento. Os autores de tais artigos, após atenderem as solicitações dos revisores da Revista Acústica e Vibrações, estão tendo seus textos publicados.

Para a composição da revista, foram criteriosamente analisados os artigos e selecionados os temas.

Informações sobre a nova Diretoria da SOBRAC e outros eventos completam essa 46ª Edição da Revista da Sociedade Brasileira de Acústica.

Os editores agradecem a todos que encaminharam seus trabalhos e esperam receber novas contribuições para as próximas edições da Revista Acústica e Vibrações.

Newton Sure Soeiro

Ranny L. X. Nascimento Michalski

Elias Bitencourt Teodoro

SOBRAC - 30 ANOS: História e Perspectivas para a Acústica e suas áreas afins no Brasil

Paixão, D. X.*

* Sociedade Brasileira de Acústica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, dinara.paixao@eac.ufsm.br

Resumo

A Sociedade Brasileira de Acústica, no ano em que completa trinta anos de existência, consolida sua representatividade e estabelece caminhos para o desenvolvimento da Acústica e suas áreas afins. O presente artigo mostra que, a partir de um planejamento de atividades de curto, médio e longo prazo, a entidade busca estruturar a atuação dos profissionais, empresas e instituições, consolidando a valorização do mercado, que se encontra em expansão. Alicerçados na experiência dessas três décadas de empenho e dedicação de alguns associados, construiu-se uma entidade pujante, mas que ainda precisa de um maior apoio para desenvolver plenamente os seus objetivos. Os trinta anos trouxeram um período de maturidade e, com ele, a esperança de muito sucesso nas realizações da SOBRAC, pois os associados conseguiram deixar para trás os problemas que, por longos anos, trouxeram desavenças e estagnaram a entidade. A reestruturação administrativa, com a criação dos Conselhos Deliberativo e Fiscal, bem como a valorização das Divisões Regionais foram pontos importantes para essa mudança de rumos. O reconhecimento do trabalho realizado e a conscientização da importância da atuação da entidade junto aos poderes públicos e instituições mobilizou os associados trazendo-lhes a vontade de contribuir, o que se constituiu num dos pontos principais para fundamentar as perspectivas para a Acústica e suas áreas afins no Brasil, pelos próximos anos. A implantação de um Comitê Técnico específico para normas na ABNT (a CEE 196 - Acústica) é um exemplo disso. Assim, observa-se que associados honorários, efetivos, estudantes e institucionais (empresas, universidades e centros de pesquisa) estão unidos para consolidar novas oportunidades para os profissionais e empresas, ao mesmo tempo em que asseguram benefícios para toda a população.

Palavras-chave: SOBRAC, Acústica no Brasil, Entidade de Classe.

1. INTRODUÇÃO

A Sociedade Brasileira de Acústica completou, em 21 de novembro de 2014, trinta anos de sua fundação. Nessas três décadas de existência, muitas foram as realizações, que suplantaram os problemas comuns em entidades desse gênero, garantindo que a SOBRAC pudesse comemorar essa data com a dignidade e a grandeza de uma entidade consolidada.

A coragem e a iniciativa dos fundadores, aliada ao empenho de alguns associados que – independente dos cargos que ocuparam – dedicaram muito do seu tempo e da sua energia, contribuíram para que a SOBRAC fosse alicerçada em bases sólidas. Dessa forma, mesmo nos momentos difíceis a entidade soube se reinventar, se modernizar e

se preparar para liderar um processo ímpar, que abre perspectivas importantes no mercado brasileiro e latinoamericano para aqueles que atuam em suas áreas de abrangência técnica e científica.

Nesse artigo, busca-se destacar as perspectivas vislumbradas, no Brasil, para a Acústica e suas áreas afins. Utiliza-se como embasamento a construção histórica da SOBRAC, seus objetivos, sua estruturação, suas atividades desenvolvidas e em desenvolvimento, suas propostas, bem como outras iniciativas que corroboram o fortalecimento desse domínio científico. O texto relaciona, ainda, ações normativas e legais que estão colaborando para uma maior conscientização sobre os problemas decorrentes de ruídos e vibrações e a necessidade e a possibilidade de corrigi-los.

2. ASPECTOS HISTÓRICOS

A ata de fundação da SOBRAC mostra que o início da década de oitenta era um momento de aproximação entre os profissionais, através da realização de encontros periódicos.

Durante o 3º Encontro Semestral de Acústica, em maio de 1984, em São Paulo, aconteceu a discussão sobre a possibilidade de “(...) constituição de uma sociedade sem fins lucrativos, capaz de congrega os acústicos no intuito de promover o desenvolvimento de sua área de conhecimento no país”. (SOBRAC, 1984)

No referido encontro, foi definida uma Comissão para elaborar uma primeira sugestão de Estatutos para a entidade, a ser levada para apreciação no próximo encontro semestral. Os membros indicados para concretizarem essa tarefa foram: Moysés Zindeluk, Roberto Tenenbaum, Jules Slama, Walter Hoffmann, Schaia Akkermann, João Baring, Leonidio Ribeiro Filho, Fernando Aidar, Samir Gerges e Gilderis Magrin.

A preocupação do “(...) grupo de cerca de 40 (quarenta) profissionais” presentes na reunião que aconteceu por ocasião do 4º Encontro Semestral de Acústica, realizado no INMETRO, no Rio de Janeiro, já expressava a “(...) necessidade de uma estrutura democrática e eficaz”, por isso foi rediscutida a oportunidade - ou não - de criação da entidade, antes do estudo do documento elaborado pela comissão. Aprovada, por maioria, a fundação da Sociedade Brasileira de Acústica, passou-se a análise da proposta estatutária da comissão, que foi conduzida pelo Prof. Roberto Tenenbaum. A transcrição da íntegra do documento aprovado está devidamente registrada na Ata de Fundação da entidade. (SOBRAC, 1984)

Assinam a Ata de Fundação da SOBRAC os seguintes associados: Lauro Xavier Nepomuceno, Moysés Zindeluk, Marco Antônio Nabuco de Araújo, Walter Érico Hoffmann, Fernanda Giamasi de Albuquerque

Lima, Adilson Vieira, Carlos Alberto Marques Teixeira, Tulio Passos Franklin, Carlos Eugênio Hime, Ibero Valdívia, Fernando Henrique Aidar, Paulo Cezar G. de Vasconcelos, Jacques Augustowski, Silvério Luiz Fusco, José Roberto Gomes, Mario Cardoso Pimentel, Carlos Moacir Grandi, Renan Roberto Brazzalle, Roberto Müller Heidrich, Benedito de Oliveira, Jules Ghislain Slama, Eduardo Bezerra de Andrade, Flavio Pereira Lall, Alberto Vieira de Azevedo, Maria Luiza Rocha Belderrain, Miguel Fernandes Gonzales, Pedro Alcantara de Souza Alvares, Eduardo Cszasnik, Daniel Segre, Conrado J. Silva de Marco, Telmo Adolfo Kotlhar, Roberto Tenenbaum, Samir Nagi Yousri Gerges, João Gualberto de Azevedo Baring e Eudes de Oliveira Mattar. Considera-se importante nominá-los, pois sua participação nesse momento histórico oportunizou que desfrutássemos, hoje, dos benefícios decorrentes da existência de uma entidade tradicional e reconhecida.

Na mesma reunião, em 21 de novembro de 1984, foi definida uma Diretoria e um Conselho Provisórios. Na reunião seguinte, em 09 de abril de 1985, na UFSC, em Florianópolis/SC, foram indicados uma nova Diretoria e outro Conselho, ambos ainda provisórios. As eleições para o biênio 1985/1987 só aconteceriam em setembro de 1985, com posse em 10 de outubro do mesmo ano, no Auditório do IPT, em São Paulo.

A primeira Diretoria da SOBRAC eleita para um mandato oficial ficou assim constituída: Presidente - João Gualberto de Azevedo Baring, Vice-Presidente - Roberto Starck Nogueira da Silva, 1º Secretário - Moysés Zindeluk, 2º Secretário - Luiza Arruda Nepomuceno, 1º Tesoureiro - Conrado Silva de Marco, 2º Tesoureiro - Ulf Hermann Mondl.

Ao longo desses trinta anos, muitas pessoas se revezaram nas atividades administrativas da SOBRAC, bem como na organização de eventos que deram suporte ao crescimento da

entidade, garantindo o reconhecimento nacional e internacional, hoje desfrutados.

Tanto a participação formal, em cargos diretivos ou no conselho, quanto à participação anônima de alguns associados, constituíram-se igualmente em contribuições fundamentais e dignas de extrema consideração. Acredita-se que, nesse período de comemoração dos 30 anos da SOBRAC, essas pessoas serão oportunamente lembradas.

3. AÇÕES DESENVOLVIDAS

No decorrer desses trinta anos, muitas ações efetivamente desenvolvidas contribuíram para a consolidação da SOBRAC.

3.1 Revista

As transformações ocorridas na Revista *Acústica e Vibrações* levaram ao seu reconhecimento científico. Atualmente, com ISSN 1983-442X, ela integra o Sistema *Qualis* da CAPES, como B4 ou B5, dependendo da área, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação da Revista Acústica e Vibrações no Qualis/CAPES

Classe	Área
B4	Interdisciplinar
B5	Arquitetura e Urbanismo
B5	Engenharias I
B5	Engenharias III
B4	Educação Física
B5	Ciências Ambientais

Fonte: Adaptado de SICAPES, 2014.

Dos tempos em que era apenas um conjunto de folhas xerografadas (um exemplar foi doado recentemente para o acervo da SOBRAC pelo

ex-presidente Marco Nabuco), passando pela época em que, na modalidade impressa, trazia comerciais de empresas (inclusive páginas amarelas e folhetos anexados) a *Acústica e Vibrações* evoluiu até o formato atual de revista científica *on line*, disponibilizada no site da entidade, para seus associados. Em 2014, está sendo publicada a sua 46ª edição e, ao longo do tempo, foi sendo solidificado o respeito pela excelência dos trabalhos divulgados.

3.2 Eventos

O Encontro da SOBRAC, que em 2014 alcançou sua XXV edição, entre os dias 20 a 22 de outubro, em Campinas/SP é o mais importante congresso multidisciplinar brasileiro de Acústica e suas áreas afins. Estruturado com mini cursos, palestras nacionais e internacionais - que abordam temas bem diversificados - e um grande número de trabalhos apresentados oralmente, o evento, realizado a cada dois anos, atrai pesquisadores, profissionais e estudantes. A exposição de produtos, softwares e equipamentos tem crescido em espaço físico e importância.

Além disso, a entidade realizou, ao longo de seus 30 anos, eventos internacionais importantes, como o *Internoise (International Congress and Exposition on Noise Control Engineering)*, o *ICSV (International Congress on Sound and Vibration)*, o *FIA (Congresso da Federação Iberoamericana de Acústica)*, entre outros.

Parcerias com profissionais, empresas e entidades de áreas específicas oportunizaram aos associados da SOBRAC quase uma dezena de edições do chamado *Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular - o SIBRAV*. Um número menor de edições não diminui a relevância do Simpósio de Metrologia em Acústica e Vibrações (SIBRAMA), que foi outro evento realizado pela SOBRAC há alguns anos atrás.

A Sociedade Brasileira de Acústica, desde 2012, tem sido parceira da AES Brasil na organização do evento técnico científico chamado *Convenção*, que acontece anualmente em São Paulo/SP, simultaneamente com a Exposição de Tecnologia: Áudio, Vídeo, Iluminação e Instalações Especiais.

Outra parceria a ser destacada é com a Marinha do Brasil, através do Instituto de Pesquisas da Marinha – IpqM, situado na Ilha do Governador, no Rio de Janeiro, o qual realiza, há mais de uma década, o Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina – ETAS. Além disso, o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM, localizado em Arraial do Cabo/RJ é associado institucional da SOBRAC.

3.3 Reestruturação administrativa

A reestruturação administrativa empreendida entre os anos de 2010 a 2014 possibilitou a atualização legal e contábil da entidade.

Após um criterioso e participativo processo de construção do novo Estatuto, o original de 1984 foi substituído vinte e sete anos depois.

A atualização do Estatuto, uma exigência legal, iniciou com a consulta aos conselheiros e aos integrantes da comissão anteriormente criada para esse fim e que não havia iniciado seu trabalho, com o objetivo de definir linhas gerais para a estrutura administrativa da entidade. A partir disso, foi elaborada uma primeira versão do documento, a qual foi enviada aos conselheiros para sugestões. Encaminhou-se o texto, com as contribuições recebidas, para as sugestões de todos os associados. Por fim, os associados receberam, por mensagem eletrônica, o documento resultante desse processo para sua análise antes da Assembleia de votação.

No dia 29 de novembro de 2011, no Bourbon Convention Ibirapuera, em São Paulo/SP, aconteceu a Assembleia Geral, na qual ficou aprovado o Estatuto da SOBRAC. Os trabalhos seguiram a seguinte metodologia: leitura de cada artigo (exposto em *Power point*),

possibilitando a solicitação de destaques por parte dos associados presentes; observação de destaques decorrentes das mensagens recebidas por correio eletrônico; votação dos destaques menos polêmicos; votação dos destaques mais polêmicos e, finalmente, aprovação geral do Estatuto e dos encaminhamentos necessários.

Dentre as principais alterações está a adoção da denominação - Associação Brasileira de Acústica - por exigência do Código Civil Brasileiro. Foi mantido o nome fantasia de Sociedade Brasileira de Acústica. Houve a criação do Regimento Geral e do Conselho Fiscal independente do Deliberativo.

Esse 1º Regimento Geral, criado para disciplinar a organização e o funcionamento da SOBRAC, sua dinâmica e as relações entre os órgãos de sua administração, comissões, divisões regionais e associados, foi aprovado na Assembleia realizada no dia 30 de maio de 2012, no Crowne Plaza Hotel, em Belém/PA, durante o XXIV Encontro da SOBRAC. Os procedimentos para a construção e votação do documento foram semelhantes aos empregados na elaboração do Estatuto, anteriormente descritos no presente texto.

Ainda em 2012, foi realizada a eleição para o Conselho Deliberativo e para o 1º Conselho Fiscal. Além disso, a entidade foi plenamente regularizada, obtendo o Alvará e demais documentos legais.

Na reunião do Conselho Deliberativo, realizada em São Paulo, em 09 de maio de 2013, foram apresentadas as imagens da sede da SOBRAC com o mobiliário devidamente patrimoniado, como mostram as Figuras 1 e 2.

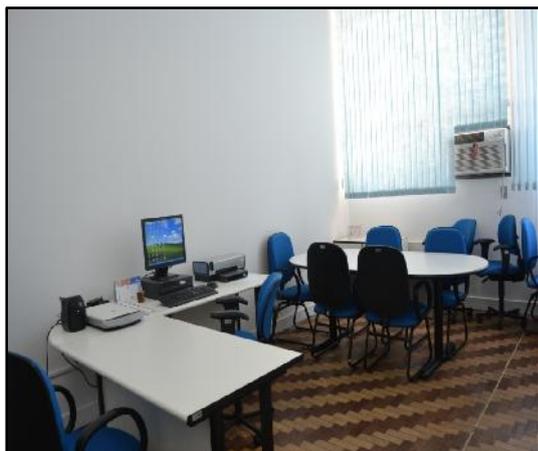


Figura 1: Sede da SOBRAC, no Centro de Tecnologia da UFSM.



Figura 3: Identidade Visual da SOBRAC, adotada a partir de 2013.



Figura 2: Etiqueta metálica que identifica o Patrimônio da SOBRAC

Nessa mesma reunião foi apresentada a nova logomarca da entidade, elaborada pela Assessora de Divulgação da SOBRAC, Jornalista Camila Severo, juntamente com a da Presidente da entidade. Foram mantidas as cores que anteriormente já caracterizavam a SOBRAC. Além disso, com o emprego do mapa do Brasil, buscou-se identificar a abrangência nacional da Sociedade Brasileira de Acústica. A Figura 3 ilustra a nova identidade visual, adotada a partir daquela data.

3.4 Normas Técnicas

A necessidade de harmonizar a linguagem, as conceituações e critérios das diversas normas de Acústica e suas áreas afins motivaram a aproximação da SOBRAC com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

A SOBRAC associou-se à ABNT e, desde 2010, trabalhou pela criação do Comitê Técnico ABNT/CEE 196 – Acústica, com funcionamento em espelho do TC 43 da ISO, com as mesmas comissões. Em 27 de junho de 2013, na cidade de Belo Horizonte, a CEE 196 – Acústica foi oficialmente instalada, tendo na Coordenação e na secretaria integrantes da Diretoria da SOBRAC.

Em menos de um ano de trabalho o Comitê Técnico concluiu sua 1ª norma, que após cumprir todos os trâmites legais, incluindo a consulta pública, foi publicada no dia 24 de novembro de 2014. Trata-se da ABNT NBR 16.313:2014 – Acústica – Terminologia.

4. AÇÕES EM DESENVOLVIMENTO

Há ações em desenvolvimento atualmente, que ainda precisam do esforço dos associados,

conselheiros e da diretoria da SOBRAC para que seus objetivos possam ser alcançados.

4.1 Políticas Públicas

A necessidade do estabelecimento de políticas públicas em todos os níveis tem sido uma preocupação para os dirigentes e associados da SOBRAC.

Após conseguir uma inédita Audiência Pública na Câmara Federal, que resultou na elaboração de um substitutivo reunindo diversos Projetos de Lei que tramitavam na Casa Legislativa, a SOBRAC acompanhou a aprovação na primeira comissão, mas, logo em seguida, o descaso na segunda comissão.

O substitutivo do PL nº 263/2007, que tem a ele apensados: PL nº 863/07, PL nº 2.330/07 e PL nº 621/11, foi apresentado na Comissão de Desenvolvimento Urbano (CDU) pelo Dep. William Dib e contemplou sugestões de representantes da SOBRAC e do IBAMA. O novo texto do projeto estabelece uma *Política Nacional de Conscientização, Prevenção, Controle e Fiscalização das Emissões Sonoras*. O referido projeto está parado na Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (CMADS) desde março de 2012, portanto há quase três anos. (CÂMARA FEDERAL, 2014)

A mudança na composição das Comissões, decorrente das eleições ocorridas em outubro de 2014 exigirá um esforço dos representantes da SOBRAC no sentido de sensibilizar os novos deputados e, posteriormente, os senadores.

4.2 Normas Técnicas

A SOBRAC indicou os coordenadores da Comissão de Estudos de Desempenho Acústico em Edificações, a CE- 02:135.01, responsável pela revisão das normas ABNT NBR 10.151 e NBR 10.152.

Espera-se que o longo e exaustivo trabalho dos integrantes da Comissão, que conta com a participação de um bom número de associados da SOBRAC, seja concluído em breve. A nova versão da NBR 10.152 já passou pela consulta pública e redação da versão final, aguardando apenas a publicação pela ABNT. Por outro lado, a NBR 10.151 está recebendo ajustes finais para ser encaminhada à consulta pública. É possível que as novas normas estejam à disposição da comunidade em 2015.

Enquanto isso, o Comitê Técnico ABNT/CEE 196 – Acústica tem uma agenda de atividades propostas, que inclui a tradução/adaptação de normas ISO e a proposta de novas normas em temas específicos, como os mapas acústicos.

4.3 Certificação de Profissionais

O Programa de Qualificação e Certificação de Profissionais é um compromisso dos associados da SOBRAC, assumido no evento de aniversário da entidade que foi exclusivo sobre esse tema, o qual foi realizado no dia 21 de novembro de 2011, no Museu Brasileiro de Escultura (MuBE), em São Paulo.

Naquela ocasião, foi apresentada a proposta e as possibilidades de viabilização, segundo experiências de outras instituições (ABHO – Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais; ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos). Após as explanações, realizou-se um debate entre a Diretoria e os associados, pois a opção por um programa desse tipo não poderia ser de uma gestão, mas da entidade como um todo, independente de quem fossem os seus próximos gestores. Tendo em vista que esse não era um fórum deliberativo, a decisão de implantar o Programa de Qualificação e Certificação de Profissionais aconteceu em 30 de maio de 2012, na Assembleia Geral Ordinária, realizada durante o XXIV Encontro da SOBRAC, em Belém/PA. Nessa oportunidade, foi criada uma comissão para elaborar uma Minuta do Regimento de Certificação a ser votado.

A análise e a votação de cada artigo do Regimento de Certificação ocorreram no dia 18 de novembro de 2012, durante Assembleia Geral realizada na sede do SINDUSCON, em São Paulo.

Nessa 1ª fase do Programa foram certificados apenas os profissionais que atenderam aos requisitos citados no Regimento de Certificação, comprovando sua atuação na Acústica e suas áreas afins. A outorga contempla as áreas de conhecimento e atuação do profissional, nas Modalidades F (Fundamental) e A (Aplicada) e nos Níveis I, II e III. Profissionais formados nas Engenharias, Arquitetura e Física são considerados como oriundos de áreas Fundamentais e os demais (Música, Direito, Saúde etc) constituem a modalidade Aplicada. Os níveis I, II e III correspondem à escolaridade: pós-graduação *stricto sensu*, graduação e ensino médio, respectivamente.

Uma comissão de cinco conselheiros da entidade foi auto certificada para implantar o Programa. Assim, em 2014, a SOBRAC já conta com um cadastro de quarenta e dois (42) associados certificados, os quais receberam um Selo e um Diploma numerado para controle da entidade, com validade de cinco anos, segundo estabelece o Regimento de Certificação. Um exemplo do Selo é mostrado na Figura 4.



Figura 4: Selo de Profissional Certificado.

É importante lembrar que o Programa destina-se, também, à qualificação dos profissionais. A certificação somente atingirá seus objetivos se for executada conjuntamente com a disponibilização de ferramentas (cursos, palestras, eventos etc) que possibilitem a qualificação e a atualização dos profissionais associados à SOBRAC.

Acredita-se que o fortalecimento das Divisões Regionais pode ser o diferencial necessário para o sucesso desse processo de desenvolvimento.

4.4 Revista

Há muito tempo vem sendo discutida e aprimorada a ideia de criação de uma nova Revista Científica coordenada pela SOBRAC.

A Tabela 2 mostra que as publicações consideradas A1 no sistema de avaliação Qualis da CAPES são em número extremamente reduzido, dificultando a divulgação dos trabalhos de pesquisadores brasileiros.

Tabela 2: Publicações A1 no Qualis/CAPES

Classe	Área
Engenharias I	Journal of Sound and Vibration ISSN - 0022-460X
Engenharias II	Nenhuma
Engenharias III	Journal of Sound and Vibration ISSN - 0022-460X
Engenharias IV	Ultrasound in Medicine & Biology – ISSN - 0301-5629
Engenharias IV	The Journal of the Acoustical Society of America - ISSN - 0001-4966

Fonte: Adaptado de SICAPES, 2014.

Foi estudada a viabilidade de adaptação da tradicional Revista Acústica e Vibrações para atender aos requisitos de um periódico científico, com uma melhor avaliação.

Após analisada a questão no Conselho Deliberativo da SOBRAC, considerou-se mais viável a criação de um novo periódico, com abrangência latinoamericana. Essa ideia foi compartilhada com a Associação dos Acústicos Argentinos (AdAA) e com a Associação Uruguaia de Acústica (AUA), cujas presidências a consideraram excelente, disponibilizando-se a colaborar.

A partir da criação do novo periódico, a Revista Acústica e Vibrações será reformulada, visando atender ao público de profissionais atuantes no mercado de trabalho, destinando seu espaço para publicação de textos mais aplicados, como: estudos de caso, novidades tecnológicas, produtos, materiais, serviços, entre outros temas.

Assim, a SOBRAC pretende manter duas publicações, uma destinada aos pesquisadores com excelente avaliação científica e outra voltada para a informação técnica e científica.

O desenvolvimento dessa ideia ainda está em elaboração, pois se trata de um trabalho criterioso e que necessita um grande empenho por parte das pessoas envolvidas.

4.5 Eventos

O Encontro da SOBRAC alcançou sua 25ª edição, por isso acredita-se que, por sua estrutura, excelência dos trabalhos e participação de palestrantes, públicos e expositores, ele já possa mudar seu status para evento internacional.

Em 21 de novembro de 2011 aconteceu o Evento de Aniversário da SOBRAC, com a proposta de que pudesse ser realizado anualmente, o que infelizmente não foi possível concretizar, mas espera-se seja retomado. O objetivo era abrir um canal de debate dos temas de interesse dos associados e

que não podem estar contemplados num evento técnico científico. O tema desse 1º Encontro foi a qualificação e a certificação de pessoas, dando início ao Programa posteriormente instituído.

Em 15 de maio de 2014, em São Paulo, a SOBRAC realizou, com o apoio da AES Brasil, o 1º Encontro de Cursos de Pós-graduação com ênfase em Acústica, Áudio, Vibrações e áreas afins. Com isso, buscou-se iniciar a mobilização dos pesquisadores, professores e estudantes para, a partir de uma atuação conjunta, viabilizar condições legais, recursos financeiros e veículos de divulgação, que permitam consolidar e ampliar os estudos nessas áreas no Brasil.

Para alcançar esse objetivo, foi proposta a realização de um cadastro dos pesquisadores que orientam Monografias, Dissertações e Teses em Acústica, Áudio, Vibrações e áreas afins, bem como o estabelecimento de uma pauta de discussões, um calendário de ações e uma formatação de atuação para atender às necessidades do grupo. A assessoria da SOBRAC já iniciou esse cadastro, a partir do Banco de Dados da Plataforma Lattes. Além disso, considerou-se importante a realização de novos encontros para a discussão do tema, que foi avaliado como de extrema relevância.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O momento vivenciado atualmente é ímpar para a Acústica e suas áreas afins no Brasil e, também, numa escala mundial.

A evolução dos estudos numéricos e tecnológicos tem possibilitado uma maior facilidade para atendimento aos anseios da população, na solução de problemas decorrentes de ruído e vibrações.

Programas computacionais, equipamentos e produtos estão mais acessíveis e disponibilizados em maior número. Há mais profissionais buscando formação e/ou aperfeiçoamento nesse domínio científico.

O mês de Janeiro de 2015 marca a formatura da 1ª turma de Engenheiros Acústicos do Brasil, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul. Sabendo-se que a Universidad Austral de Chile (UACH) forma Engenheiros Acústicos na cidade de Valdivia, desde 1967, é possível avaliar o déficit de profissionais que o Brasil precisa suprir.

O Curso da UFSM comprova o interesse e a necessidade de profissionais nessa área. Grande parte dos alunos matriculados é oriunda de outros estados brasileiros e do Distrito Federal. Acre, Pará, Tocantins, Maranhão, Pernambuco, Sergipe, Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina, são alguns dos estados de origem dos alunos que estudam em Santa Maria/RS. No futuro, portanto, poderá haver Engenheiros Acústicos em todas as regiões brasileiras. Sabe-se, no entanto, que empresas localizadas nos grandes centros estão ávidas por profissionais com essa formação diferenciada. A maioria dos integrantes da 1ª turma já permaneceu contratada logo após o término de seu estágio obrigatório, não retornando às suas cidades de origem.

Observando-se a experiência chilena, verifica-se que as gerações formadas em Valdivia abriram espaços importantes nas esferas de decisão do poder público. Naquele País, o ruído (ambiental, ocupacional etc.) é uma questão de saúde pública. O direcionamento das políticas públicas tem uma grande influência dos Engenheiros Acústicos que são funcionários de carreira do Ministério da Saúde e do Ministério do Meio Ambiente. No Ministério da Saúde, por exemplo, são quatro (04) Engenheiros Acústicos que trabalham exclusivamente nesse tema.

Em 1997, o acústico espanhol Antônio Calvo-Manzano chamava a atenção para a importância de um curso específico que contemplasse todas as peculiaridades da Engenharia Acústica.

Pienso que ha llegado el momento de que la profesión acústica en su conjunto, apoyada por las asociaciones y los organismos competentes en la materia, comencemos una labor de mentalización de las autoridades académicas que conduzca a la instauración de una carrera universitaria en sus diferentes ciclos, específicamente destinada a la ciencia acústica. (CALVO-MANZANO, 1997)

O Brasil já iniciou o processo de consolidação da carreira de Engenheiro Acústico. Como afirma Calvo-Manzano, é importante que as entidades representativas dos profissionais da área sejam agentes determinantes nessa conscientização e mudança de postura.

A SOBRAC, por ocasião do IX Encontro Iberoamericano de Acústica, realizado de 1º a 03 de dezembro de 2014, em Valdivia, no Chile, sugeriu a elaboração de uma “Declaração de Intenções” assinada pelos diversos países que compõem a Federação Iberoamericano de Acústica (FIA), a qual foi aprovada e implementada na mesma ocasião. Nesse documento foi oficializada a intenção das entidades de trabalharem conjuntamente para o desenvolvimento de ações que visem harmonizar Políticas Públicas, Legislações e Normas Técnicas nas suas áreas de interesse, a exemplo do que já existe na Europa.

A nova estruturação da SOBRAC tem sido reconhecida e elogiada, servindo de modelo para outros países.

A criação do *Manual de Rotinas da Assessoria da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC*, apresentado na Assembleia Geral realizada em Campinas/SP, no dia 23 de outubro de 2014, por ocasião da homologação do resultado das eleições para a nova Diretoria, deverá facilitar o dia a dia na administração da entidade.

Ao longo do ano de 2015 as atividades lembrarão que a SOBRAC já completou trinta anos de fundação. A Figura 5 mostra o selo comemorativo criado para marcar esse exitoso período, o qual foi lançado durante o XXV Encontro da SOBRAC, em Campinas/SP.



Figura 4: Selo comemorativo

É preciso avançar muito mais. A população está se conscientizando dos problemas decorrentes da exposição a níveis sonoros inadequados. As reclamações crescem a cada dia e os órgãos públicos são cobrados para fiscalizar. Para isso, precisam treinar e dar condições de atuação para seus colaboradores, com equipamentos e softwares apropriados.

O mercado para a Acústica e todas as suas áreas afins está em plena expansão. A NBR 15.575 trouxe visibilidade para a Acústica Arquitetônica. A indústria e os pesquisadores brasileiros têm sido chamados para dar suporte em áreas estratégicas para o Ministério da Defesa e suas três forças militares: Exército, Marinha e Aeronáutica. O Sistema Único de Saúde (SUS) importa aparelhos auditivos e tem visto sua demanda aumentar consideravelmente com a maior longevidade da população e, também, sua crescente exposição, algumas vezes até voluntária, a níveis sonoros elevados.

Sabe-se que as questões que envolvem saúde não são apenas auditivas e, por isso, há muito mais a ser desenvolvido. Os mapas de ruído das cidades precisam ser, verdadeiramente, ferramentas de gestão urbana.

Nada disso será possível sem uma participação efetiva dos profissionais, empresas, instituições e todos os demais segmentos envolvidos com a Acústica e suas áreas afins.

As iniciativas que visam à informação e à conscientização das autoridades, da imprensa, das crianças e da população em geral são fundamentais. Espera-se que a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) declare o ruído como o tema a ser trabalhado em 2019.

Até lá, almeja-se que a SOBRAC e seus associados contribuam decisivamente para que o Brasil obtenha um excelente desempenho na melhoria da qualidade e vida das pessoas, em especial na solução de problemas de Acústica e suas áreas afins.

REFERÊNCIAS

- CALVO-MANZANO, A. Hacia una ingeniería acústica. *Revista de Acústica*, Vol. 28, N 3-4, 1997.
- CÂMARA FEDERAL. Proposições. Disponível em: http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=AD9A0FDCC4262BAA2151F87905EAE448.proposicoesWeb1?codteor=971343&filename=Parecer-CDU-25-11-2011 Acesso em: 26 nov 2014
- SICAPES – Sistema Integrado CAPES - WebQualis. Disponível em: <http://qualis.capes.gov.br/webqualis/publico/pesquisaPublicaClassificacao.seam> Acesso em: 26 nov 2014
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA. **Livro de ATAS**. Documento Original. SOBRAC, 1984.

Desempenho Acústico de Sistemas de Piso: Estudos de Caso Para Isolamento ao Ruído Aéreo e de Impacto

Nunes, M.F.O.; Zini, A.; Pagnussat, D.T.

*Laboratório de Tecnologia Construtiva, Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, RS, mfonunes@ucs.br

Resumo

Os sistemas de piso constituem um dos limites horizontais de separação de unidades habitacionais em edifícios, mas sua importância no isolamento acústico ainda não foi completamente considerada. O desempenho acústico de sistemas de piso é avaliado tanto para o ruído aéreo como para o ruído de impacto, e as características construtivas devem atender a requisitos específicos de transmissão sonora. Neste estudo, foram avaliados diferentes sistemas de piso e desempenho acústico ao ruído aéreo e ao ruído de impacto. Foram realizados ensaios em campo em lajes de concreto maciço, lajes treliçadas e laje nervurada, com revestimento cerâmico e com laminado de madeira, além de diferentes tipos de contrapiso. Os procedimentos das medições seguiram as normas ISO 140-4, 140-7 e 140-14 e o desempenho acústico foi determinado a partir de critérios da NBR 15575-3. Os resultados indicam que os sistemas de piso analisados com laje treliçada apresentam deficiência no isolamento sonoro ao ruído aéreo quando revestidas com laminado de madeira e, ao ruído de impacto quando revestidas com piso cerâmico. O único sistema de piso com valores de $D'_{nT,w}$ e $L'_{nT,w}$ com classificação de desempenho acústico superior foi com laje nervurada com cubetas de EPS, contrapiso com brita leve e piso laminado de madeira.

Palavras-chave: Isolamento acústico, ensaios em campo, sistemas de piso

1. INTRODUÇÃO

Devido ao adensamento urbano e a verticalização das construções, os sistemas de piso passaram a ter grande importância no conforto acústico, pois suas características e composição contribuem para a qualidade acústica em uma unidade habitacional. Ao contrário das paredes, que tem sua espessura mínima definida por alguns códigos de obra municipais, os pisos ainda não foram devidamente considerados como um elemento de separação entre unidades habitacionais e o principal critério para a escolha de um tipo de laje é a possibilidade de vencer um determinado vão, ao menor custo possível.

O desempenho acústico dos sistemas de piso é avaliado de acordo com as formas mais comuns de transmissão sonora em edifícios. O comportamento acústico frente ao ruído aéreo e ao ruído de impacto apresenta diferenças e as soluções construtivas nem sempre atendem simultaneamente aos dois requisitos. O ruído aéreo consiste em sucessivas ondas de pressão ou vibrações que são geradas pela fala ou

autofalantes e que são transmitidas pelo ar. Para esses casos, o aumento na massa dos fechamentos torna a transmissão da vibração mais difícil e, conseqüentemente, reduz a transmissão sonora para a superfície oposta. O ruído de impacto é causado pelo contato intermitente entre sólidos e, os exemplos mais comuns em edifícios residenciais incluem queda de objetos, caminhar de pessoas, arrastar de cadeiras, etc. As vibrações são criadas nos pisos e tendem a espalhar-se nos outros elementos conectados. Apesar dessas diferenças, pode existir uma estreita relação entre isolamento ao ruído aéreo e ao ruído de impacto para determinados sistemas construtivos, especialmente para pisos rígidos (JONES, 2008).

A estimativa teórica do isolamento acústico ao ruído aéreo em pisos segue o mesmo princípio da transmissão ao ruído aéreo em paredes. No entanto, os sistemas de piso são compostos por diferentes revestimentos e, em alguns casos por forros suspensos, o que pode dificultar a aplicação de modelos teóricos em função da diversidade de combinações

(HASSAN, 2009). Além disso, sistemas de piso compostos por lajes não homogêneas apresentam meios de propagação mais complexos e as variáveis são mais difíceis de se estimar, sendo necessário o conhecimento das diferenças entre o concreto maciço e demais materiais utilizados (HOPKINS, 2004).

Alguns sistemas de piso, com a utilização combinada de elementos leves sem finalidade estrutural, são amplamente utilizados no Brasil em lajes pré-moldadas, que utilizam materiais leves de enchimento colocados nas regiões tracionadas. Os materiais mais utilizados são blocos cerâmicos vazados, blocos de concreto celular ou blocos de poliestireno expandido (TRIGO *et al.*, 2008).

Apesar de cumprir adequadamente a função estrutural, lajes no sistema vigota/tabela, com blocos cerâmicos vazados, não tem o mesmo comportamento acústico que uma laje maciça, que apresenta características de material heterogêneo e ortotrópico (HOPKINS, 2004). A heterogeneidade da vigota/tabela causa diferenças significativas nos mecanismos de transmissão pelos flancos, comparado a homogeneidade da laje de concreto maciço, para uma densidade superficial similar. Sendo assim, a transmissão por flancos é um dos principais fatores que limitam o isolamento ao ruído aéreo nos sistemas de piso com laje vigota/tabela. No entanto, com a utilização de acabamentos nos flancos entre a parede de alvenaria, acima ou abaixo da laje, é possível melhorar seu desempenho ao ruído aéreo (PATRÍCIO, 2001).

Outro aspecto relevante e que caracteriza a complexidade do tema, nas considerações sobre a propagação do som em lajes pré-moldadas, é o tipo de vínculo existente entre blocos e vigas. Nesse sentido, pode-se considerar o vínculo do apoio simples entre os elementos e, até mesmo, das camadas de revestimento na face superior da laje. A composição, a espessura e o tipo de instalação podem caracterizar o sistema de piso como homogêneo, devido ao aumento da espessura total e aos vínculos rígidos (TOMASI;

NUNES, 2013), ou heterogêneo, devido a transmissão predominante pelas vigas de concreto colocadas em uma única direção (HOPKINS; TURNER, 2005; HOPKINS, 2004).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a influência de variações de tipos de laje, de contrapiso e de revestimentos no desempenho acústico ao ruído aéreo e ao ruído de impacto de sistemas de piso a partir de ensaios de campo.

2. MÉTODO

As medições foram realizadas em edifícios residenciais, nas cidades de Caxias do Sul/RS e Bento Gonçalves/RS, durante o ano de 2013.

Foram analisados sete diferentes sistemas de piso com laje de concreto maciço com espessuras de 10 e de 12 cm, laje treliçada com preenchimento de EPS e uma laje nervurada. Os revestimentos foram compostos por laminado de madeira e cerâmica, com variações no contrapiso. Para fins de agrupamento, os sistemas de piso foram classificados em homogêneos, com lajes de concreto maciço (Tabela 1) e heterogêneos, com lajes mistas (Tabela 2).

Tabela 1: Características dos sistemas homogêneos de piso analisados

Sigla	Tipo de laje	Revestimento	Área (m ²)
CL1	Concreto maciço 10 cm	Contrapiso de argamassa comum 5cm + laminado de madeira 7mm, com manta de fibras de polipropileno 5mm	17,56
CL2	Concreto maciço 10 cm	Contrapiso de argamassa comum 5cm + laminado de madeira 7mm, com manta polietileno expandido 2mm	12,24
CL3	Concreto maciço 12 cm	Contrapiso de argamassa com brita leve 4cm (1:2:3) + laminado de madeira 7mm, com manta de polietileno expandido 2mm	11,31
CC	Concreto maciço 12 cm	Contrapiso de argamassa com brita leve 4cm (1:2:3) + Porcelanato	16,15

Tabela 2: Características dos sistemas heterogêneos de piso analisados

Sigla	Tipo de laje	Revestimento	Área (m ²)
TL	Treliçada com enchimento de EPS 5cm e capa de concreto armado 4cm	Contrapiso de concreto 4 cm + laminado de madeira 7mm	7,57
TC	Treliçada com enchimento de EPS 5cm e capa de concreto armado 4cm	Contrapiso de concreto 4cm + cerâmica esmaltada	7,79
NL	Laje nervurada com cubetas de EPS	Contrapiso de argamassa com brita leve 5cm (1:1:4) e argamassa comum 2cm + laminado de madeira 7mm	10,50

As medições seguiram os procedimentos descritos nas normas ISO 140-4, ISO 140-7 e ISO 140-14, para ensaios em campo. Os locais das medições foram ambientes de dormitórios sobrepostos, que não diferem entre si em área nem em volume. Todas as medições foram realizadas em apartamentos finalizados, com as esquadrias instaladas, sem a ocupação dos usuários e sem mobília. Os equipamentos foram posicionados considerando-se o ambiente de baixo como sala de recepção e o de cima como sala de emissão, tanto para os ensaios de ruído de impacto como para os de ruído aéreo.

Nas medições de ruído aéreo a fonte sonora dodecaédrica B&K 4296, acoplada ao amplificador de potência B&K 2716, foi colocada em três posições e o microfone do analisador sonoro B&K 2270 foi acoplado por cabo e posicionado em cinco pontos na sala de emissão e cinco na sala de recepção. Para determinar o isolamento acústico ao ruído aéreo do sistema de piso, foram realizados quatro tipos de medições: níveis sonoros na sala de emissão (L1); níveis sonoros na sala de recepção (L2); ruído de fundo (B2); tempo de reverberação na sala de recepção (T2).

Nas medições de ruído de impacto a máquina de impactos B&K 3207 foi posicionada em quatro pontos distintos na sala de emissão e o microfone do analisador sonoro B&K 2270 foi acoplado por cabo e posicionado em cinco pontos distintos na sala de recepção. O isolamento acústico ao ruído de impacto do sistema de piso foi determinado a partir dos resultados de três tipos de medições: níveis sonoros na sala de recepção (L2); ruído de fundo (B2); tempo de reverberação na sala de recepção (T2).

As medições foram realizadas nas frequências entre 100 e 3.150 Hz nas bandas de 1/3 de oitava e a obtenção do número único da Diferença de Nível Padronizada Ponderada (D'_{nTw}) e do Nível Sonoro de Impacto Padronizado Ponderado (L'_{nTw}) seguiu procedimentos das normas ISO 717-1 e ISO 171-2, respectivamente. Ressalta-se que o isolamento ao ruído aéreo de um fechamento é definido a partir da diferença de níveis sonoros entre dois ambientes contíguos e quanto maior esse valor, maior será o isolamento ao ruído aéreo. Por outro lado, o isolamento ao ruído de impacto, que é propagado na estrutura dos edifícios, é definido a partir de níveis de pressão sonora absolutos que, quanto menores, melhor será o isolamento ao ruído de impacto.

Para a classificação do desempenho acústico foram utilizados os valores de referência da NBR 15575-3 para ruído aéreo (Tabela 3) e para ruído de impacto (Tabela 4).

Tabela 3: Critério de diferença padronizada de nível ponderada D'_{nTw}

Elemento	$D'_{nT,w}$ (dB)	Nível de Desempenho
Sistema de piso entre unidades habitacionais autônomas, no caso de pelo menos um dos ambientes ser dormitório	45 a 49	Mínimo
	50 a 55	Intermediário
	55	Superior

Fonte: (ABNT, 2013).

Tabela 4: Critério de nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado $L'_{nT,w}$

Elemento	$L_{nT,w}$ (dB)	Nível de Desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	66 a 80	Mínimo
	56 a 65	Intermediário
	55	Superior

Fonte: (ABNT, 2013).

3. RESULTADOS

3.1 Ruído aéreo

Os sistemas de piso analisados apresentam maior isolamento acústico nas altas frequências para o ruído aéreo. No gráfico da Figura 1, pode-se observar comparativamente os valores de diferença de nível sonoro padronizada $D'_{nT,w}$ dos sistemas de piso ensaiados. O sistema de piso composto por laje treliçada e piso cerâmico (TC) apresentou os menores valores medidos em todas as frequências. Até a frequência de 200 Hz, os valores apresentaram oscilações, sem uma hierarquia definida em relação ao isolamento acústico. A partir da frequência de 250 Hz, o comportamento do sistema de piso TL, composto por laje treliçada com revestimento de laminado de madeira, apresenta os menores valores de isolamento sonoro. Entre 315 e 1000 Hz os demais sistemas de piso apresentam uma hierarquia diferente, destacando-se os sistemas CL1 e NL com o maior isolamento acústico. A partir da frequência de 1000 Hz, o isolamento acústico ao ruído aéreo do sistema de piso NL apresenta valores crescentes e maiores que os demais. Nesse sistema, composto por laje nervurada, a diferença de nível sonoro padronizada tem valores de 60 dB na frequência de 1.000 Hz e de 75,8 dB a 3.150 Hz.

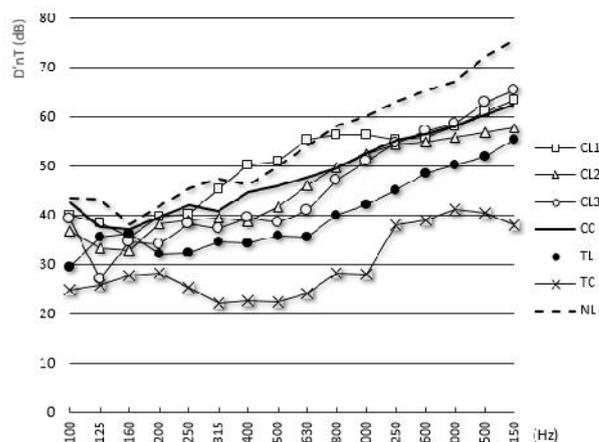


Figura 1 – Comparativo por frequência das Diferenças de Nível Sonoro Padronizada D'_{nT}

3.2 Ruído de impacto

Na Figura 2 são representados os valores de Nível Sonoro de Impacto Padronizado L'_{nT} dos sete sistemas de piso ensaiados. Os sistemas com revestimento cerâmico (TC e CC) apresentaram um comportamento diferente dos demais, com tendência ascendente na curva de L'_{nT} , contrário ao perfil gráfico da curva de referência da ISO 717-2. Até a frequência de 250 Hz, os valores apresentaram oscilações, sem uma tendência definida. A partir da frequência de 315 Hz os sistemas de piso CL1, CL3 e NL apresentam um perfil gráfico com decaimento mais acentuado que os demais a medida em que ocorre o aumento das frequências. Nesses três sistemas foi utilizado revestimento de piso laminado, mas somente esse tipo de revestimento pode não ser suficiente para assegurar o isolamento acústico adequado, pois os sistemas CL2 e TL não apresentaram um decaimento tão acentuado dos níveis sonoros.

No gráfico comparativo, também é possível estabelecer paralelos entre CL3/CC e TL/ TC e verificar que o revestimento com laminado de madeira em CL3 e TL aumenta o isolamento acústico ao ruído de impacto na comparação com o mesmo sistema de piso com revestimento cerâmico.

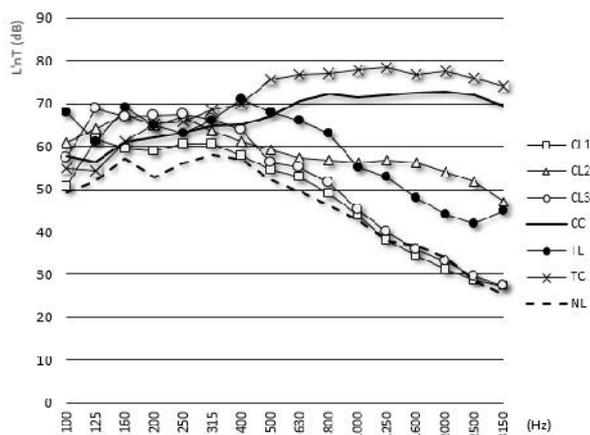


Figura 2 - Comparativo por frequência dos Níveis Sonoros de Impacto Padronizados L'_{nT}

3.3 Classificação de Desempenho

Os sistemas de piso analisados apresentaram classificações de desempenho diferentes para o ruído aéreo e ruído de impacto, com exceção do sistema NL que obteve classificação de desempenho superior em ambos.

O sistema de piso CL2 teve classificação mínima para o ruído aéreo e intermediária para o ruído de impacto. A alteração de desempenho ao ruído aéreo em relação ao sistema CL1 se justifica pela diferença de espessura e composição das mantas utilizadas. No sistema CL1 foi utilizada uma manta de fibras de polipropileno de 5 mm de espessura entre a laje e o contrapiso, conferindo um sistema massa-mola-massa mais eficiente que o utilizado no piso CL2.

A influência do revestimento nos sistemas de piso pode ser verificada na comparação entre os pisos com laje treliçada (TL e TC) e os pisos com laje de concreto maciço com espessura de 12 cm (CL3 e CC). Nesses casos ocorreu uma inversão na classificação de desempenho acústico insuficiente e a distinção entre o piso cerâmico (cerâmica esmaltada e porcelanato) e o laminado de

madeira. Na execução do sistema de piso com revestimento cerâmico os materiais de base cimentícia utilizados para a fixação das peças, depois de secos, conferem maior rigidez ao sistema, comparado ao laminado de madeira. No piso laminado, as peças não possuem vínculos rígidos com os demais elementos construtivos e podem proporcionar espaços para a transmissão do ruído aéreo por flancos, em casos de deficiência na execução dos sistemas de acabamento, seja por falta de preparo adequado da planicidade da base, seja por problemas de instalação das mantas ou do piso em si.

No sistema de piso NL, com laje nervurada, foram utilizadas várias camadas de materiais distintos, que conferem amortecimento eficiente ao conjunto. Nesse caso, a argamassa com brita leve atenua a transmissão do som pelos possíveis flancos. Deve-se também ressaltar que a elevada espessura do sistema NL também consiste em um fator relevante para o desempenho superior.

Os sistemas CL2 e CL3 aparentemente se distinguem pelo tipo de material do contrapiso, sendo CL2 com argamassa comum e CL3 com argamassa com adição da chamada brita leve. Em princípio, a argamassa com brita leve deveria apresentar um desempenho melhor, considerando-se a possibilidade do polímero incorporado na mistura apresentar maior resiliência. No entanto, de acordo com estudos anteriores (TUTIKIAN *et al.*, 2012), o aumento da proporção de polímero (brita leve) na argamassa não garante necessariamente o aumento no isolamento. Além disso, um traço 1:1:4 em volume, segundo os autores, pode ser mais indicado para melhorar o desempenho acústico em um sistema de piso. Desta forma, as limitações de desempenho acústico de sistemas que utilizam lajes treliçadas parecem ser mais preponderantes no resultado a ser atingido em comparação a incorporação da brita leve, para os casos estudados.

Tabela 5: Resultados e classificações de desempenho acústico dos sistemas de piso analisados

Sigla	Ruído Aéreo		Ruído de impacto	
	D' _{nT_w} (dB)	Classificação de Desempenho	L' _{nT_w} (dB)	Classificação de Desempenho
CL1	53	Intermediário	54	Superior
CL2	48	Mínimo	56	Intermediário
TL	29	Não atende	63	Intermediário
TC	49	Mínimo	85	Não atende
CL3	46	Mínimo	60	Intermediário
CC	51	Intermediário	78	Mínimo
NL	55	Superior	50	Superior

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas de piso são compostos por um conjunto de camadas que se destinam a atender diversas funções como, por exemplo, estruturais, de vedação, de segurança ao tráfego e de isolamento acústico; sendo que, os materiais que compõem essas camadas apresentam características diversificadas, com inúmeras possibilidades de combinações. São essas combinações, juntamente com a execução, que irão definir sua qualidade frente ao isolamento acústico.

Neste trabalho, sete sistemas de piso foram analisados considerando-se as principais variáveis que afetam o isolamento acústico, com as respectivas classificações de desempenho, que, em seis deles, se mostraram diferentes para o ruído aéreo e para o ruído de impacto.

Nos casos estudados, os sistemas considerados homogêneos com laje de concreto maciço, atenderam aos requisitos de desempenho acústico da NBR 15.575, com variações decorrentes dos vínculos estabelecidos na execução dos revestimentos. Os sistemas considerados heterogêneos, com diversos benefícios estruturais e econômicos, podem apresentar fragilidades no isolamento

acústico, mas as deficiências decorrentes da reduzida espessura e da ausência de vínculo entre as peças podem ser mitigadas com a utilização de materiais leves e de base cimentícia, em camadas alternadas.

Desta forma, pode-se afirmar que os materiais que constituem um sistema de piso não devem ser considerados isoladamente e que a análise global na definição de materiais e sistemas construtivos pode determinar soluções mais adequadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 15575-3. Edifícios Habitacionais - Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. 2013.
- HASSAN, O. A. B. **Building Acoustics and Vibration: Theory and Practice**. London: World Scientific Publishing Company, Incorporated, 2009. p. 947
- HOPKINS, C. Airborne sound insulation of beam and block floors: direct and flanking transmission. **Building Acoustics**, v. 11, n. 1, p. 1–25, 2004.
- HOPKINS, C.; TURNER, P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies. **Applied Acoustics**, v. 66, n. 12, p. 1339–1382, dez. 2005.
- ISO 140-7. Acoustics - Measurement of sound insulation inbuilding elements - Part 7 Field measurements of impact sound insulation of floors. 1998 a.
- ISO 140-4. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. 1998 b.
- ISO 140-14. Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Guidelines for special situations in the field. 2004.
- JONES, D. Acoustical noise control. In: BALLOU, G. (Ed.). **Handbook for sound engineers**. Oxford: Taylor & Francis, 2008. p. 65–94.
- PATRÍCIO, J. Can Beam-block Floors be considered Homogeneous Panels Regarding Impact Sound Insulation? **Building Acoustics**, v. 8, n. 3, p. 223–236, 1 set. 2001.
- TOMASI, A.; NUNES, M. F. DE O. **Desempenho acústico de sistemas de pisos em edifícios residenciais**. In: 44º Congresso Español de Acústica. **Anais...**Valladolid: Sociedad Española de Acústica, 2013

TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; CAMACHO, J. S. Avaliação do comportamento estrutural de protótipos de lajes pré-moldadas com concreto com resíduo de borracha de pneu. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 18, p. 37–50, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; NUNES, M. F. O.; LEAL, L. C.; MARQUETTO, L. Hormigón ligero con agregado reciclado de EVA para atenuación del ruido de impacto. **Materiales de Construcción**, v. 63, n. 310, p. 309–316, 31 jul. 2012.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Sindicato da Construção Civil – SINDUSCON – de Caxias do Sul/RS pelo suporte financeiro para aquisição de equipamentos e para bolsa de iniciação científica.

A New Approach to Validate Computer Modeling Auralizations by Using Articulation Indexes

Melo, V.S.G.^{*1}; Tenenbaum, R.A.^{*2}; Lucio Naranjo, J.F.⁺

^{*}Laboratory of Instrumentation on Dynamics, Acoustics and Vibrations – LIDAV, IPRJ-UERJ, Nova Friburgo, RJ, ¹vivasgmelo@gmail.com, ²ratenenbaum@gmail.com

⁺Faculty of Computer Engineering, National Politechnic School, Quito, Ecuador, jose.lucio@epn.edu.ec

Abstract

In this work, a new approach to validate computer modeling auralizations by using articulation indexes is presented. The generation of acoustical virtual reality with the proprietary computer code RAIOS is briefly described. The code simulates the room acoustics, including specular and diffuse reflections, and a set of artificial neural networks provides the room's binaural impulse responses at selected points in the audience region. Then, these responses are convolved with anechoic signals to generate virtual acoustical realities. In the sequel, the impulse responses at some room's positions are measured and the convolution with the anechoic signals is provided to obtain a virtual articulation index. Finally, the computer modeling auralizations are also reproduced to the subjects and the obtained articulation index results are compared for validation purposes.

Keywords: Auralization. Articulation Indexes. Artificial Neural Networks.

1. Introduction

Virtual acoustic reality is a rather new branch of acoustics due to the recent development of digital computation technology. The most interesting and useful result of this technique is the so-called auralization. As stated by Vorländer (2008), 'auralization is the technique of creating audible sound files from numerical (simulated, measured or synthesized) data.' This means that the auralization of a sound can bring to the listener not only the sound contents but also the influence of the ambient where it is reproduced.

Acousticians have been developing many metrics to evaluate, for instance, room acoustic quality. All of them are based on the monoaural room's impulse responses (T_{30} , C_{80} , D_{50} , among others) or on the binaural room's impulse responses ($IACC$, for instance). However, the auralization in some room's position is, essentially, a signal in a .wav or similar format and there is no metrics, up to now, to *quantify* it.

To validate the acoustical virtual reality, however, it is not enough to reproduce the auralized sound to people and ask them to compare with the actual sound in the original room, since the answers cannot provide more than generic opinions about the verisimilitude of the two sounds. In other words, this subjective evaluation is not sufficient to validate the adopted technique to generate the virtual acoustical reality. This raises, then, an aspect to investigate: Which metrics to use in order to *validate* an auralization?

A new methodology to validate auralizations is proposed in this work: To use the *articulation index* (AI) as a parameter to evaluate the auralizations quality. The AI is a metrics adopted to assess the word intelligibility in rooms. Very briefly, the AI is measured in a room by applying articulation tests to a group of subjects in the room. The average percentage of hits indicates the room's AI (MELO et al., 2013).

The proposed technique presented here is to use lists of monosyllables —recorded at an anechoic chamber in order to suppress the

influence of the recording room— to measure the articulation index at different positions in the room. Then, the room binaural impulse responses (BIR's) at some positions are measured with a dummy head (DH) through the room excitation with compensated sweeps (MÜLLER & MASSARANI, 2001). These BIR's are then convolved with the anechoic lists of monosyllables to produce what will be called as *auralizations of first kind*. The auralizations are then applied to subjects through equalized headphones to evaluate the (virtual of first kind) articulation index.

In the sequel, the room is simulated with the computer code RAIOS and the impulse responses are obtained in the corresponding points (receivers). Then, a set of artificial neural networks (ANN's) that models the head-related impulse responses (HRIR's) (BLAUERT, 1997) reads the simulator output and generates the BIR's at the selected points in the room. The modeled BIR's are then convolved with the anechoic lists of monosyllables to produce what will be called *auralizations of second kind*. It is worth noting that these last auralizations are genuinely numerical. Finally, the articulation tests are applied to the same subjects through equalized headphones, measuring the (third) AI. Finally, the three AI's are compared to *validate* the numerical auralization.

2. Room Acoustic Simulation

The room acoustic simulation is performed with the aid of the computational code RAIOS (Room Acoustics Integrated and Optimized Software), developed at the Laboratory of Instrumentation in Dynamics, Acoustics and Vibration – LIDAV, State University of Rio de Janeiro. The code RAIOS has proved to furnish reliable acoustic data, when it participated in the international intercomparison of room acoustics computer

simulation, the Round Robin 3 (BORK, 2005; TENENBAUM et al., 2007a and 2007b).

The code RAIOS provides the impulse response at selected points inside the simulated room. It also computes the main acoustical parameters according to ISO 3382 (1997). One of the main computer code's features is that the room simulation is performed by a hybrid procedure. The specular reflections are computed by a modified ray-tracing algorithm (CAMILO & TENENBAUM, 2002) and the diffuse reflections are simulated with a sound energy transition approach (KRUZINS & FRICKE, 1982). As stressed by Dalenbäck et al. (DALEMBÄCK et al., 1994), the diffuse reflections —that makes thicker the reverberant tail of a room impulse response— are particularly important in the auralization phase of a room simulation.

Figure 1 presents the main screen of the computational code RAIOS. It is seen, in the bigger area, the perspective of a simulated room, presenting its boundaries, the sound source and the receivers. At the right, it is shown the area of entries, as sound sources data, receiver's data, surface finishing data, and atmospheric conditions. At the bottom, it is shown the area for results output, presenting, in this case, the decays curves per octave band.

The output files of computer code RAIOS of interest in this research are the ones with extension .ray. Their contents include all wavefronts that reach each receiver, with the following information: Direction of arriving; global acoustic power; spectrum per octave band; and arriving time. This output will be the input of the artificial neural network, briefly described in the next section. It is worth noting that, in a simulation with good accuracy, the number of wavefronts that reach each receiver is of the order of 10^4 10^5 .

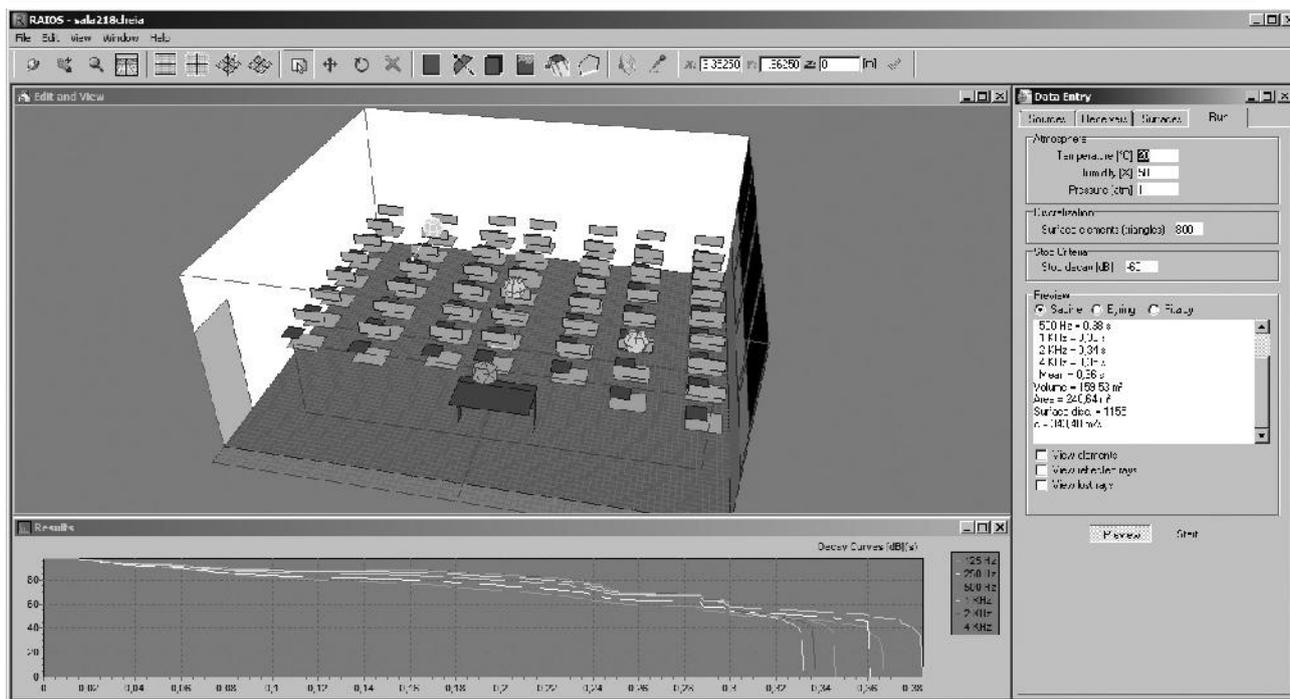


Figure 1: Main screen of computational code RAIOS showing the tested room. In the lower window it is shown one of the outputs, namely the decay curves per octave bands.

3. Generating the Virtual Bir's

Once the output of the computational code RAIOS is obtained, the binaural impulse responses (BIR's) is the next step to be achieved. To provide these responses, the head-related impulse responses (HRIR's) must be modeled precisely since they represent the kernel of the auralization procedure. There are several well known data banks with measurements of these functions, as in (GARDNER & MARTIN, 1995), for instance. However, all of them are discrete and very rarely one measured direction will fit to the actual arrival direction of a wavefront. This means that the HRIR's must be interpolated (AJDLER et al., 2005). Furthermore, since the wavefronts present a filtering of the acoustical ray's spectrum, due to the multiple reflections with absorption on the room boundaries and the natural frequency dependent attenuation due to the sound wave propagation, a spectral modification must be provided for each wavefront.

These procedures can be provided by a set of artificial neural networks (ANN's) (HAYKIN,

2009). The proposed method is capable to reconstruct the desired HRIR functions by means of spatial interpolation and spectral modification. In order to cover the whole reception auditory space, without increasing the network complexity, a structure of multiple networks (set), each one modeling a specific area, is used. The three main factors that influence the model accuracy — the network's architecture, the reception area's aperture angles and the HRIR's time shifts — are investigated and an optimal setup is adopted (LUCIO NARANJO et al., 2010, 2013). In the final configuration, the global area around the head is divided into 1898 sections, the time delays are preserved, and the architecture is the one shown in Fig. 2.

The ANN's entries are the wavefront direction, given by the azimuth and elevation angles, and the nine octave-bands spectrum between 32,5 Hz and 16 kHz. The outputs are the 128 coefficients considered as sufficient to model the HRIR's (TORRES et al., 2004). The best architecture — a balance between accuracy and computational cost — is the one

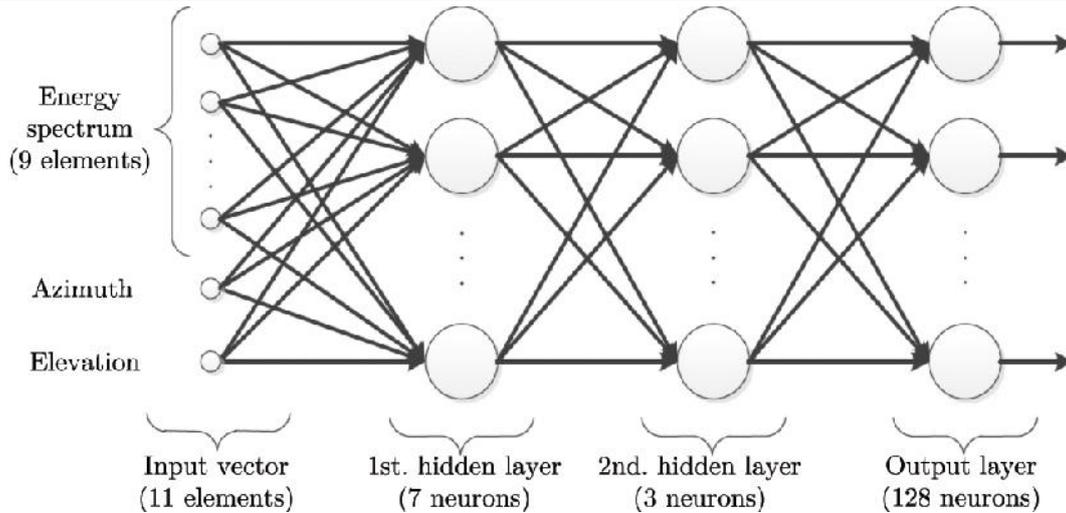


Figure 2: Artificial neural network basic architecture.

shown in Fig. 2, with seven neurons in the first hidden layer and three neurons in the second one

Figure 3 illustrates how the ANN model reproduces superbly the actual HRIR's. Among several tested directions, two directions were selected to be shown here. The graphics show that for the two measured

directions, the modeled HRIR's are very accurately recovered, being almost impossible, at naked eye, to find out the differences. The head related impulse response functions have a counterpart in the frequency domain, the so-called *head related transfer functions* (HRTF's). These are complex functions and the ANN model showed to fit both amplitude and phase.

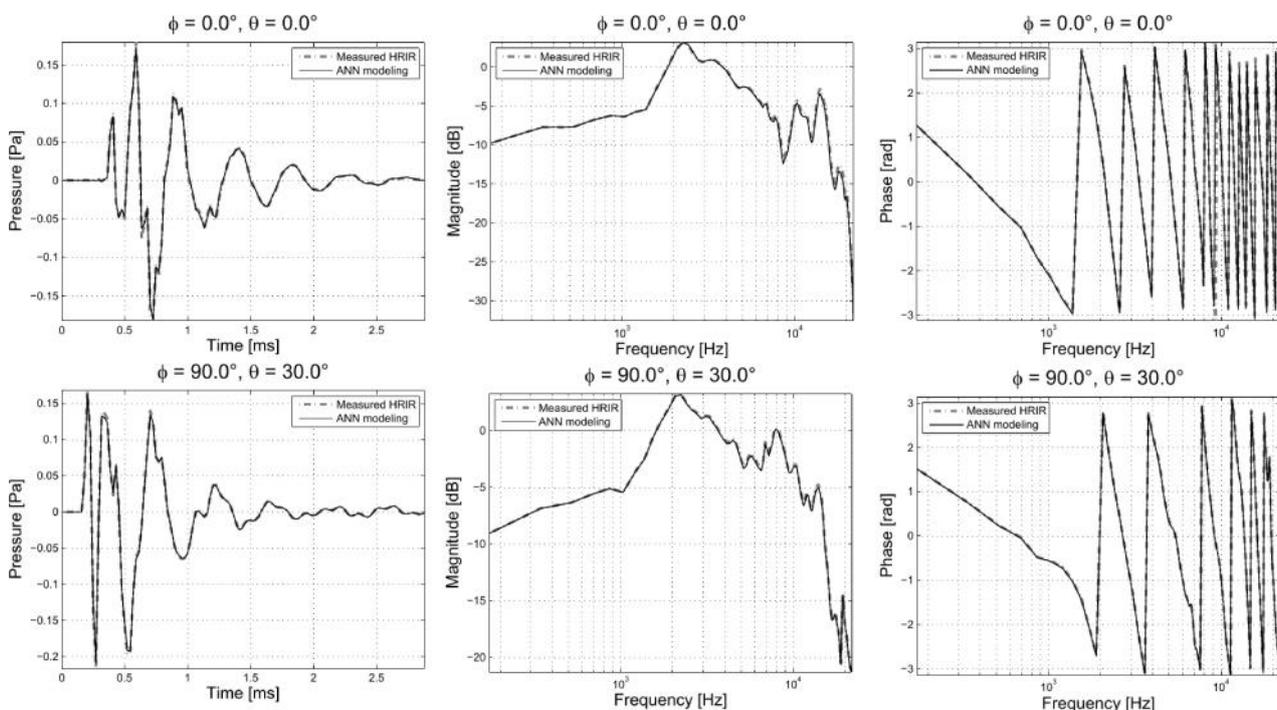


Figure 3: HRIR's measured and modeled by ANN's at two distinct directions, showing the very good fitting. The dashed lines (measured) are almost undistinguishable from the modeled ones (solid line). At left, the HRIR's; at the middle, the modulus of the HRTF's; at right, the corresponding phase.

4. The Methodology

With the aim at validating the numerically generated auralizations, the following steps were provided for the measurements and numerical modeling, constituting the adopted methodology, briefly described in the sequel. This methodology is similar to the one proposed by Melo et al. (2013), with the main difference that now auralizations generated by computer model are included.

1. Preparing a set of three lists with 100 monosyllables each, from 226 recordings registered in an anechoic chamber with a female professional speaker. It is worth noting that the lists of monosyllables are in the Portuguese language.

2. Measuring the transfer function of the dodecahedron used as sound source.

3. Measuring the headphones transfer functions used in the auralizations phase.

4. Conducting articulation tests (AT's) in the room with voluntary university student public. The results of these articulation tests are treated statistically and the actual average articulation index is computed.

5. Emitting compensated frequency sweeps through the dodecahedron, in the presence of public, and recording the binaural impulse responses (BIR's) in the room for three dummy head (DH) positions. Ten sweeps are emitted in order to extract an average binaural impulse response for each DH position in the tested room.

6. The background noise level present in each one of the tested rooms is recorded, with the DH, as well as other data such as the ambient temperature and the air relative humidity, for simulation purposes.

7. At the laboratory, the signals recorded by each DH position are deconvolved with the emitted sweep in order to obtain the binaural impulse responses (BIR's).

8. The BIR's are then convolved with the anechoic signal that contains the lists of monosyllables presented to the students in the classroom, in order to obtain the sound that would be heard in the rooms during the dictations, in the absence of the background noise. This signal contains the measuring room characteristics (its reverberation, for instance) but not the background noise.

9. The background noise registered during the articulation tests is extracted from the DH recordings, in a procedure which will be referred to as cutting (MELO et al., 2013).

10. The background noise extracted in the previous step is added to the signals obtained in Step 8 and the result is convolved with the headphones impulse response. This signal will be called *virtual auralization of the first kind*.

11. The virtual auralizations of first kind are reproduced through headphones to the same public. The results of these articulation tests are treated statistically and the average virtual articulation index (of the first kind) is computed.

12. The same anechoic lists of monosyllables are convolved with the output of the ANN's, that means, the computationally modeled BIR's, for each DH position, and the background noise obtained in Step 9 is added. Then, the signal is convolved with the headphones impulse responses. These results will be called *virtual auralizations of the second kind*.

13. The virtual auralizations of second kind are reproduced through the headphones to the same public. The results of these articulation tests are treated statistically and the average virtual articulation index (of the second kind) is computed.

14. The original articulation index results are compared with those of the two virtual ones.

5. Main Findings

In this preliminary study, all tests were performed in a university classroom (seen in Fig. 1) with a public of 40 volunteers. Three lists of 100 monosyllables each were presented to the students during the actual articulation tests. The same 300 monosyllables were presented to the students during the virtual articulation tests of the first and second kinds (a total of 900 monosyllables). However, the time interval between these three articulation tests (more than one week) turns almost impossible to the subjects to memorize the words.

The average room simulation quality produced by the computer code RAIOS, at the considered case, can be estimated by comparing some of its outputs, i.e., some of the computer simulated acoustic quality parameters with the measured ones, in the actual room. Table 1 presents the comparative result, for two microphone positions, of the following parameters: Definition, D_{50} ; Clarity index (for words), C_{50} ; Clarity index (for music), C_{80} ; and Center time T_s (BERANEK, 1996).

Table 1: Comparative results among some of the measured and simulated acoustical parameters.

	Parameter	D_{50} (%)	C_{50} (dB)	C_{80} (dB)	T_s (ms)
Position 1	Measured	80,2	6,1	9,9	32,5
Position 1	Simulated	81,3	6,4	9,8	32,6
	Abs. Diff.	1,1	0,3	0,1	0,1
Position 2	Measured	85,2	7,6	11,9	26,6
Position 2	Simulated	84,9	7,5	10,9	26,3
	Abs. Diff.	0,3	0,1	1,0	0,3

As can be seen in Table 1, the computer code RAIOS provided a very good simulation result, when compared with the measured ones. For the four parameters shown, the obtained absolute difference is very slight. However, this is not an unexpected result since the

classroom under consideration (see, Fig. 1) is a very simple ‘shoebox’ one.

The comparative results among the actual average articulation index, the average articulation index obtained with the virtual auralization of first kind, and the one obtained with the virtual auralization of the second kind are displayed on Table 2. The values are presented for each list of monosyllables and the ensemble average, in boldface. The error columns indicate the difference between the results of the articulation index obtained with the virtual auralizations and the articulation index effectively measured in the room.

Table 2: Consolidated summary of the obtained articulation indexes (%).

List	Actual AI	Virtual AI (1 st kind)	Error 1	Virtual AI (2 nd kind)	Error 2
1	86,62	86,62	0,00	87,14	0,52
2	94,86	91,54	-3,32	92,21	-2,65
3	95,82	91,31	-4,51	91,29	-4,53
Average	92,52	89,82	-2,70	90,21	-2,32

As can be seen in Table 2, there is a distribution in the articulation indexes that depends on the list of monosyllables used. For the actual AI the values go from a minimum of 86.62% to a maximum of 95.82%, a difference of 9.20%. In practice, this means that List 1 seems to the listeners to be more "difficult" to recognize than List 2 and List 3.

Comparing the results by list, it is seen that, for List 1, the Error 2 becomes 0.52%, for List 2, the Error 2 becomes -2.65% and for List 3, the Error 2 becomes -4.53%, the biggest one. In any case, all errors are below $\pm 5\%$, a value considered acceptable for uncertainty in articulation indexes (MELO et al., 2013), and approximately one half of the difference found among the actual AI's for the three lists. Furthermore, it is worth noting that the absolute value of the ensemble average error,

i.e., the error for the 300 monosyllables, was lower than 2.5%.

6. Conclusions and Remarks

A new approach to validate acoustical virtual reality obtained by numerical simulation was presented. The adopted metrics is the articulation index obtained in the room with actual articulation tests. Two virtual articulation indexes were determined. The first one comes from binaural impulse responses measurements in the room under consideration, resulting in the auralizations of the first kind. The second one was performed strictly through computational simulation, resulting in the auralizations of the second kind. The main subject of this research is then to find out if the numerical auralization can be validated by using articulation indexes.

The results showed that the proposed metrics to validate computer modeling auralizations are reliable, with an average absolute error lower than 2.5%.

Of course, not all dimensions of an auralized sound are covered by the proposed technique. Indeed, there are aspects in the auralization, such as sound coloration and sound localization, that are not evaluated by the proposed metrics. Nevertheless, it was presented a simple way to quantify computer auralizations quality.

Similarly to the room acoustics sound quality parameters, other metrics are to be found. For example, the directional sound characteristics of a virtual auralization could be evaluated by using a specially prepared room with a matrix array of points to be selected by the headphones user. However, many details of such experiments are still under investigation (WERSNYI, 2009).

The proposed methodology, including the headphones equalization and the correction of the non-linearity of the sound source, among others, must be strictly followed to ensure that

the bulk of the spurious influences in the measurements are suppressed.

Usually, the output of a numerical simulator of room acoustics — and, as a consequence, the output of the artificial neural networks — brings the influence of the internal room acoustics, but the background noise is void. The inclusion of the background noise in the auralizations of the second kind (Step 12 of the methodology) proved to be necessary to introduce verisimilitude in the heard sounds and the actual disturbance that the background noise introduces in the articulation tests.

There are some studies that might accompany this one. The first one is to extend the tests to a great number of rooms, preferentially with different acoustic conditions. The second one is to introduce controlled noise in the room to check its effect on the articulation indexes. The third one is to verify if there is an important influence on the language in the results. Since this last can only be exercised by native language listeners, the authors leave here the suggestion to another research group to reproduce our tests in a different language.

7. Acknowledgments

The authors acknowledge the FAPERJ, for its financial support. We would like also to thank to the cooperation of the undergraduate student Lucas R. Santos.

References

- AJDLER, T., FALLER, C., SBAIZ, L. AND VETTERLI, M., 2005. Sound Field Analysis along a Circle and Its Applications to HRTF Interpolation. *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 56(3), 156–175.
- BERANEK, L. 1996. **Concert and Opera Halls: How They Sound**. Acoustical Society of America, Woodbury.
- BLAUERT, J., 1997. **Spatial Hearing**. The MIT Press, Cambridge.
- BORK, I. 2005. Report on the 3rd Round Robin on room acoustics computer simulation – Part 2: Calculations. *Acustica united with Acta Acustica*, Vol. 91(4), 753–763.

- CAMILO, T.S. AND TENENBAUM, R.A. 2002. Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas - Parte 1: combinação dos métodos de traçado de raios e de transição de energia. **XX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica**, Rio de Janeiro. (In Portuguese).
- DALEMBÄCK, B.I., KLEINER, M. AND SVENSSON, P. 1994. A macroscopic view of the diffuse reflection. **J. Audio Engin. Soc.**, Vol. 42(10), 973–987.
- GARDNER, B., MARTIN, K., 1995. HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone. **J. Acoust. Soc. Am.**, Vol. 97(6), 3907–3908.
- HAYKIN, S., 2009. **Neural Networks and Learning Machines**. Prentice Hall, New Jersey.
- ISO 3382, 1997. Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- KRUZINS, E., FRICKE, F.R., 1982. The prediction of sound fields in non-diffuse spaces by a ‘random walk’ approach. **J. Sound and Vib.**, Vol. 81(4), 549–564.
- LUCIO NARANJO, J.F.L., TENENBAUM, R.A. AND TORRES, J.C.B., 2010. Using Artificial Neural Networks to generate virtual acoustic reality applied on escape training in blind conditions **Int. Rev. Chem. Eng.**, Vol. 2(6), 754–759.
- LUCIO NARANJO, J.F.L., TENENBAUM, R.A., TORRES, J.C.B., 2013. Accuracy validation of the ANN’s interpolation technique through the use of acoustic quality parameters. **XVI Computer Modeling Meeting**, Ilhéus.
- MELO, V.S.G., TENENBAUM, R.A. AND MUSAFIR, R.E., 2013. Intelligibility assessment in elementary school classrooms from binaural room impulse responses measured with a childlike dummy head. **Applied Acoustics**, Vol. 74, 1436–1447.
- MÜLLER, S. & MASSARANI, P.M., 2001. Transfer-functions measurements with sweeps. **J. Audio Eng. Soc.**, Vol. 2001, 443–471.
- TENENBAUM, R.A., CAMILO, T.S., TORRES J.C.B. AND GERGES, S.N.Y., 2007a. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 1 - Theoretical and numerical aspects. **J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Engin.**, Vol. 29(2), 211–221.
- TENENBAUM, R.A., CAMILO, T.S., TORRES J.C.B. AND STUTZ, L.T., 2007b. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 - Validation of the computational code RAIOS 3. **J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Engin.**, Vol. 29(2), 222–231.
- TORRES, J.C.B., PETRAGLIA, M.R., AND TENENBAUM, R.A., 2004. An Efficient wavelet-based HRTF for auralization **Acta Acustica united with Acustica**, Vol. 90(1), 108–120.
- VORLÄNDER, M., 2008. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality** Springer, Berlin
- WERSNYI, G., 2009. Effect of emulated head-tracking for reducing localization errors in virtual audio simulation **IEEE Transactions On Audio, Speech, And Language Processing**, Vol. 17, n. 2, pp. 247–252.

Inteligibilidade de Fala por Listas de Palavras Foneticamente Balanceadas num Átrio Projetado Segundo Padrões Construtivos Green Building

OLIVEIRA, Helton Luiz Santana*; VERGARA, E. Felipe⁺.

*Petróleo Brasileiro S.A, Universidade Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, heltonluiz@petrobras.com.br

+ Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, e.f.vergara@ufsc.br

Resumo

Este artigo apresenta um estudo sobre inteligibilidade de fala com base no método das listas de palavras foneticamente balanceadas ajustadas para a língua portuguesa na forma usualmente empregada na cidade do Rio de Janeiro. O estudo é aplicado num átrio central envidraçado de usos múltiplos existente no edifício de um dos campi de uma universidade corporativa. São apresentadas características típicas da edificação, a forma de estruturação do tipo de ensaio de inteligibilidade e exibidos os resultados obtidos em três sequências de execução e compara a coerência dos resultados mediante aplicação do teste estatístico não paramétrico de Kruskal-Wallis.

Palavras-chave: Inteligibilidade de fala, palavras foneticamente balanceadas, Acústica de edifícios, Átrio.

1. Introdução

O edifício objeto deste estudo abriga a sede da universidade corporativa de uma grande organização empresarial brasileira que atua, de forma integrada, no setor econômico de energia. Esta universidade corporativa tem por atribuições o desenvolvimento de soluções educacionais corporativas dirigidas à melhoria da capacitação dos empregados dessa companhia. No edifício em estudo um dos elementos arquitetônicos de maior destaque é o grande átrio envidraçado de usos múltiplos e, que fica localizado no centro das prumadas da edificação.

A condução dos trabalhos deste estudo é guiada, sobretudo pelas diretrizes da norma ANSI/ASA S3.2 (2009). Esta abordagem permite determinar a inteligibilidade de fala através de testes subjetivos desenvolvidos com a participação de voluntários selecionados de acordo com critérios específicos. Pela inexistência deste tipo de teste padronizado para as características da língua portuguesa tal como é falada na cidade do Rio de Janeiro.

2. Objetivos

Os objetivos que nortearam o estudo desenvolvido para a construção deste artigo são:

- Identificar como os critérios de arquitetura sustentável empregados atualmente no projeto de edificações comerciais consideram as questões de condicionamento acústico;
- Estimar os níveis de inteligibilidade de fala através de testes subjetivos para a qualificação do átrio.

3. Construções Sustentáveis e Acústica

Segundo Kubba (2006), as construções sustentáveis têm se tornado objeto de norma em muitos novos projetos de construção. Programas nacionais e locais promovem os princípios de construção sustentável estão florescendo em nível mundial. O termo edificação verde ou sustentável é relativamente novo para a língua portuguesa, e uma definição precisa ainda não está bem consolidada. Edifícios sustentáveis e/ou verdes também são conhecidos como "edifícios de alto desempenho".

Na visão de Kwok & Grondzik (2013) a promoção da discussão sobre as certificações de edificações sustentáveis ajuda a

compreender a grande força que tem favorecido o repensar dos projetos e dos requisitos de desempenho das edificações.

Segundo Zunino (2011), o primeiro método de avaliação ambiental de edifícios é o BREEAM, lançado em 1990 no Reino Unido. Em 1998 o conselho americano de construções sustentáveis - USGBC lançou o sistema de liderança em energia e projeto ambiental - LEED. Sistemas semelhantes de avaliação, classificação e certificação de construções sustentáveis têm sido verificados em vários países do mundo, por exemplo: na França tem-se a certificação de alta qualidade ambiental das edificações - HQE; no Canadá tem-se o 'Green Globes'; no Japão tem-se o sistema de avaliação compreensiva para a eficiência ambiente construído - CASBEE; na Alemanha tem-se o sistema da Sociedade Alemã de Construção Sustentável - DGNB; na Austrália tem-se o Sistema nacional australiano de classificação do ambiente construído - NABERS; na África do Sul tem-se a Ferramenta de Avaliação de Construções Sustentáveis - SBAT; em Portugal tem-se o 'LiderA' (acrônimo de Liderar pelo Ambiente para a Construção Sustentável).

Segundo a ABRAMAT (2012) entre 2010 e 2011 a importância da construção civil na economia brasileira é estimada em 8,9% do PIB nacional, sendo que o valor agregado da cadeia produtiva de construção movimentou neste período cerca de R\$ 315,276 bilhões e empregou uma força de trabalho total de 12.845.257 pessoas. A despeito disso, de acordo com Zunino (2011) a construção civil é apontada como um dos setores de maior impacto ambiental, seja pelos recursos extraídos da natureza, pela queima de combustíveis fósseis, pelos rejeitos poluentes, pelo desmatamento, problemas hidro geológicos e impactos pós-ocupação. No Brasil essa busca pela sustentabilidade, sobretudo quanto aos aspectos de eficiência energética tornou-se objeto da lei federal 10.295/2001 (Brasil, 2001).

De acordo com Mahdavi (2007), a maioria dos átrios são espaços inerentemente polivalentes, tornando assim muito difícil especificar os

requisitos inequívocos e de desempenho. Por serem generosamente dimensionadas as entradas, áreas de transição em geral e soluções de átrio, em particular, tem ganhado uma grande popularidade na arquitetura. Existe, contudo, certa falta no estudo científico da acústica de tais espaços e só recentemente foram feitos maiores esforços para estudar sistematicamente as características acústicas para átrios.

Sob o ponto de vista de acústica, segundo Mahdavi (2007), o projeto de espaços do tipo átrio parece não atender explicitamente às exigências acústicas. A acústica dos átrios geralmente não suporta a maneira como os espaços são utilizados e os tempos de reverberação nos átrios em sua maioria são muito longos. As propriedades acústicas dos elementos de construção raramente são especificadas nas documentações arquitetônicas. Percebeu-se no caso de átrios dificuldades em determinar com precisão os coeficientes de absorção das superfícies. Também se verificou que a documentação de arquitetura de edifícios em geral e de átrios em particular, precisam incluir informações detalhadas sobre as propriedades acústicas de materiais e componentes aplicados.

A ampla gama de opções em geometrias e materiais de construção utilizados representa um desafio adicional. Em comparação com espaços mais típicos de desempenho acústico (salas de concertos, espaços de teatro, cinemas, etc.), no caso dos átrios têm-se menos orientações de projeto explícitas e menor disponibilidade de experiências documentadas. As simulações baseadas em previsões de desempenho acústico no caso de átrios são especialmente perturbadas com incertezas, não só devido a problemas de modelagem de geometria, mas também por causa das dificuldades em especificar corretamente as propriedades dos materiais envolvidos.

Os materiais empregados no átrio central avaliado neste estudo (ver figura 1) são listados

na Tabela 1, onde são descritas as áreas dos respectivos materiais.



Figura 1: Planta baixa com destaque para a localização do átrio central na edificação em estudo e vista em perspectiva desse mesmo ambiente. Fonte: RRA (2008).

Tabela 1: Composição de áreas por tipo de materiais empregados

Material Empregado	Área total exposta [m ²]	Área total [%]
Aço inoxidável – AISI 304	139,3	2,94
Alvenaria de tijolos rebocada e pintada em látex	631,9	13,36
Piso de granito Santa Cecília 55cm x 55cm x 2,5cm	783,6	16,56
Revestimentos de mármore branco levigado	218,0	4,61
Painel de vidro insulado 'low-e' 5mm+0,38PVB+5mm	2.958,3	62,53
Total geral	4.731,1	100,00

Fonte: Oliveira (2013).

4. Inteligibilidade de Fala: avaliação subjetiva

Segundo a definição da norma internacional IEC 60849 (2002) a inteligibilidade é a medida da proporção do conteúdo de uma mensagem de voz que pode ser entendida corretamente. De acordo com Oliveira (2013) a inteligibilidade de fala não é uma quantidade física tal como: Ampère, Volts, Watt, Ohm, ao contrário ela é uma medida do grau em que se pode entender um idioma num dado contexto de espaço-tempo. É muito importante ressaltar que a fala não é necessariamente inteligível pelo fato de ser audível, pois os sinais da fala podem ser influenciados por ecos e/ou distorções devido às características do ambiente.

Na descrição de Lancastre (1988) os testes de inteligibilidade da palavra têm seus resultados influenciados pelo tipo de material de teste e pelo tipo de resposta requerida dos ouvintes. Quanto ao tipo de material de teste, estes podem ser: palavras, logátomos (sons de discurso sem significado para os ouvintes) e frases.

Para Lancastre (1988) quanto ao tipo de resposta requerida dos ouvintes podem ser: Testes de resposta fechada ou Testes de resposta livre. Nos testes de resposta fechada, o ouvinte é exposto a um número finito de alternativas de resposta e se vê diante da escolha da resposta que lhe pareça mais correta, sendo exemplos de teste de resposta fechado: Teste de rima diagnóstica e Teste de rima modificada. Num teste de resposta livre, segundo Lancastre (1988) o ouvinte atribui a resposta que julga ser igual à que foi proferida repetindo-a ou escrevendo-a, constituindo um exemplo deste teste de inteligibilidade o conhecido teste de palavras foneticamente balanceadas (*Phonetically Balanced Test* – PB Test).

5. Estruturação de um Teste por Palavras Foneticamente Balanceadas

A estruturação de um teste de inteligibilidade de fala pelo método das listas de palavras foneticamente balanceadas em língua

portuguesa é desafiador pois listas de palavras que são insumo básico não são amplamente disponíveis tal como ocorre em outros idiomas, como por exemplo na língua inglesa. Por isso, tais listas precisam ser elaboradas a partir do próprio reconhecimento da frequência dos fonemas que caracterizam a língua portuguesa, o que segundo Zaidan e Sameshima (2003) apresenta a distribuição de frequência de ocorrência que é apresentada na figura 2 que é apresentada no final do artigo para melhor visualização.

O processo de balanceamento fonético de um material de fala não se limita à mera contagem dos fonemas e a correspondente verificação de sua presença ou não no material. Para um material ser considerado como foneticamente balanceado a ocorrência dos fonemas no corpus a ser considerado balanceado deve obedecer à tendência de ocorrência dos fonemas numa amostragem significativa da língua na qual o material está sendo balanceado.

Como critério referencial, Zaidan e Sameshima (2003) consideram que as listas de palavras podem ser consideradas foneticamente balanceadas quando alcançam um grau de correlação maior ou igual a 95% no teste de Spearman, cuja expressão matemática é dada por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m) \cdot (y_i - y_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2}} \quad [\text{Eq.01}]$$

Sendo que r representa o coeficiente de correlação de Spearman; x_i a i -ésima medida da variável X; y_i a i -ésima medida da variável Y; x_m o valor médio da variável X; y_m o valor médio da variável Y; n o número de pares de valores de X e Y.

Para a elaboração das listas a serem balanceadas, Zaidan e Sameshima (2003) recomendam que as palavras escolhidas, além de terem uma distribuição fonética semelhante ao do idioma correntemente em uso e, sejam comuns para que o teste não seja influenciado

pelo vocabulário. Também devem ser adequadas para a idade e nível educacional. Deve-se dar também atenção ao número de sílabas.

Para se incluir as considerações sobre o número de sílabas das palavras, explicita-se que segundo Viaro e Guimarães-Filho (2007), na língua portuguesa em uso no Brasil a distribuição de sílabas obedece ao seguinte:

Tabela 2: Distribuição silábica das palavras da língua portuguesa.

Número de sílabas	Palavras transcritas [%]
1	0,36
2	7,76
3	24,38
4	31,96
5	21,96
6	9,23
7	3,09
8	0,95
9	0,24
10	0,05
> 10	0,01

Fonte: Adaptado de Viaro e Guimarães-Filho (2007).

A despeito de palavras com três, quatro e cinco sílabas serem as mais frequentes da língua portuguesa, estas não são recomendadas porque devido a sua maior duração poderia fornecer pistas acústicas ao ouvinte e assim facilitando seu reconhecimento durante a realização do teste de inteligibilidade.

Também do estudo de Viaro e Guimarães-Filho (2007), no que se refere à tonicidade, as palavras da língua portuguesa são assim distribuídas:

Tabela 3: Distribuição da tonicidade das palavras da língua portuguesa.

Tonicidade	Ocorrências [%]
Monossílabos tônicos e átonos	0,36
Oxítone	24,92
Paroxítone	62,52
Proparoxítone	12,20
TOTAL	100,00

Fonte: Adaptado de Viaro e Guimarães-Filho (2007).

6. Resultados e Discussão

Compôs a amostra efetiva neste estudo um total de 28 indivíduos voluntários, sendo 71,4% dos participantes do sexo masculino e 28,6% do sexo feminino, com idades variando desde 26 anos até 64 anos (média = 41,8 anos). Do que foi declarado pelos voluntários todos têm a língua portuguesa como idioma nativo e não houve quaisquer registros de deficiência auditiva sensorioneural de grau leve e/ou severo, tampouco nenhum dos participantes foi identificado como usuário de aparelho de amplificação sonora individual (AASI).

O percentual de inteligibilidade de fala num teste com lista de palavras foneticamente balanceadas, segundo a ANSI/ASA (2009), pode ser avaliado por meio da seguinte fórmula:

$$I_{\%} = \frac{100}{T} \times \left(R - \frac{W}{N-1} \right), \quad [\text{Eq. 02}]$$

Onde, $I_{\%}$ representa o índice de inteligibilidade da fala expresso em percentagem; T o número de itens no teste; N o número de alternativas de cada item; R o número de itens corretamente identificados; W o número de erros na identificação de itens.

A figura 3, que é exibida no final do artigo para melhor visualização, apresenta a distribuição de fonemas da língua portuguesa, presentes na lista de palavras nº 01, utilizada no teste de palavras foneticamente balanceadas. Como se pode ver na figura 3, esta primeira lista assegura um grau de correlação não paramétrica de Spearman equivalente a 97,85% com a lista geral do corpus de referência.

Um comparativo dos índices subjetivos de inteligibilidade por palavras foneticamente balanceadas é apresentado na tabela 4 que se segue. Notar que o desvio relativo foi da ordem de 5%, sugerindo uma faixa estreita de variação entre as estimativas.

Tabela 4: Comparação de índices de inteligibilidade de palavras “I%” nas três rodadas da avaliação subjetiva por lista de palavras foneticamente balanceadas.

I [%]	Rodada			Média	Desvio-Padrão	/μ
	1	2	3			
	42,8	39,9	44,3	42,3	2,2	5,1%

Com a realização de cada uma das três rodadas do experimento de inteligibilidade foram obtidos diferentes resultados em termos de números de acertos, registros em branco e registros incorretos feitos pelos voluntários.

Uma destas rodadas é exibida na tabela 5 que é apresentada adiante para uma melhor visualização.

A seguir se apresenta uma análise de variância sobre os resultados de inteligibilidade obtidos por experimentos subjetivos feitas com o emprego do método não paramétrico de Kruskal-Wallis. Considerando-se que não há como assegurar que os dados atendam aos requisitos para emprego de uma análise de variância paramétrica, ao mesmo tempo em que não se quer sacrificar o rigor da análise aplica-se a análise de Kruskal-Wallis conforme resumido na Tabela 6, que é apresentada no final do artigo para melhor visualização.

Da análise de Kruskal-Wallis conclui-se que não se pode rejeitar hipótese nula! Isto é, não há diferenças significativas entre médias dos valores de inteligibilidade subjetiva por listas de palavras foneticamente balanceadas.

7. Conclusões

O presente estudo possibilitou concluir que tal como afirma Mahdavi (2007), o projeto de espaços do tipo átrio e, em particular o átrio considerado no presente estudo, parece não atender explicitamente às exigências acústicas no que tange à inteligibilidade de fala.

O teste de inteligibilidade pelo método das listas de palavras foneticamente balanceadas revelou-se de execução complexa tanto pelas questões logísticas quanto pela baixa disponibilidade de voluntários dispostas a submeter-se à sua realização.

A inteligibilidade média de fala no átrio de estudo foi de 42,5% o que revela uma baixa

aptidão deste ambiente para a comunicação por voz humana.

CHIFRE	22	1	5	43,99
BOLSA	21	0	7	41,99

Tabela 5: Índice de inteligibilidade de palavras foneticamente balanceadas na primeira rodada do experimento da avaliação subjetiva.

PALAVRA	ACERTOS	BRANCOS	ERROS	I [%]
PONTA	18	3	7	35,98
MUITA	24	0	4	47,99
GRADE	25	0	3	49,99
CESTA	27	0	1	54,00
FUNDO	28	0	0	56,00
MINHA	22	2	4	43,99
LOUCO	16	6	6	31,98
PADRE	26	1	1	52,00
DRAMA	1	2	25	1,95
MILHO	28	0	0	56,00
SALA	24	0	4	47,99
SENTA	26	0	2	52,00
PIRES	24	2	2	47,99
TARDE	15	4	9	29,97
QUEIJO	28	0	0	56,00
TRAÇO	23	0	5	45,99
ÓRFÃO	11	13	4	21,97
CREME	27	0	1	54,00
LINDO	25	2	1	49,99
SINO	24	0	4	47,99
TESTA	13	2	13	25,97
UVA	22	1	5	43,99
DENTE	17	1	10	33,98
ÓRGÃO	18	5	5	35,98
CINTO	19	0	9	37,98
BECO	24	2	2	47,99
DIA	27	0	1	54,00
CINCO	27	0	1	54,00
LADO	22	0	6	43,99
MANGA	28	0	0	56,00
SÓTÃO	17	6	5	33,98
PURA	14	4	10	27,97
QUEDA	9	13	6	17,96
PENA	26	1	1	52,00
RUA	19	3	6	37,98
TIRA	19	0	9	37,98
RISO	12	8	8	23,97
SUCO	24	0	4	47,99
TIME	20	1	7	39,98
VILA	26	0	2	52,00
BODE	26	1	1	52,00
PASTA	25	1	2	49,99
NADA	23	4	1	45,99
SARA	9	0	19	17,96
BÊNÇÃO	28	0	0	56,00
ZÍPER	27	1	0	54,00
NAVE	27	1	0	54,00
LATA	16	3	9	31,98

REFERÊNCIAS

ABRAMAT. **perfil da cadeia produtiva da construção e da indústria de materiais**. São Paulo: Abrammat / Rio de Janeiro: FGV, 2012.

ANSI/ASA. **S3.2-2009**. Method For Measuring The Intelligibility Of Speech Over Communication Systems. Acoustical Society Of America. 2009

IEC. **IEC-60.268-16**: Sound System Equipment – Part 16: Objective Rating Of Speech Intelligibility By Speech Transmission Index. Edition 4, 2011.

_____. **IEC 60.849**: Sound Systems For Emergency Purposes. 2002.

KUBBA, S. **Handbook Of Green Building Design And Construction: Leed®, Breeam®, And Green Globes®**. New York: Butterworth-Heinemann, 2012.

KWOK, A. G.; GRONDZIK, W. T. **Manual De Arquitetura Ecológica**. 2ª ed. Porto Alegre- RS: BOOKMAN, 2013.

LANCASTRE, M. M. M. F. Q. **A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas Através de Análises de Caráter Objetivo e Subjetivo**. 1988. 207f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1988.

MAHDAVI, A.; PAK, J. G.; LECHLEITNER, J. Acoustics Of Atria: Contrasting Measurement And Modeling Results. In: **BS2007 Proceedings Of The 10th International Building Performance Simulation Association Conference And Exhibition**", B. Zhao, D. Yan, X. Zhou, C. Wang, C. Li, J. Wang, X. Zhou, J. Li, B. Cao, Q. Deng (Hrg.). 1219-1226, 2007.

OLIVEIRA, H. L. S. **Caracterização e Análise de Parâmetros Acústicos do Átrio de Usos Múltiplos num Edifício Comercial Construído Segundo os Critérios do “Green Building Council do Brasil”**. 2013. 219f. (Monografia de Especialização – Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2013.

VIARO, M. E.; GUIMARÃES-FILHO, Z. O. Análise quantitativa da frequência dos fonemas e estruturas silábicas portuguesas. **Estudos linguísticos XXXVI**(1), janeiro-abril, 2007.

ZAIDAN, E.; SAMESHIMA, K. Desenvolvimento de listas de palavras foneticamente balanceadas para avaliação do processamento auditivo. **Pró-fono Revista de Atualização Científica**. Barueri (SP)., v. 15, n. 3, p. 307-316, set-dez, 2003.

ZUNINO, L. **Rotulagem e Certificação: Análise Crítica das Certificações, Selos e Premiações**

Nacionais e Internacionais Utilizadas no Brasil, Relativos à Urbanização e Construção Sustentável. Rio de Janeiro, 2011 <http://archive.iclei.org/fileadmin/user_upload/documents/lacs/portugues/programas/ccps_-_rj/versao_executiva_15mar11/secao_iii_4_certificacao_es_docfinal.pdf> acesso em 15 ago. 2013, 10:15:10.

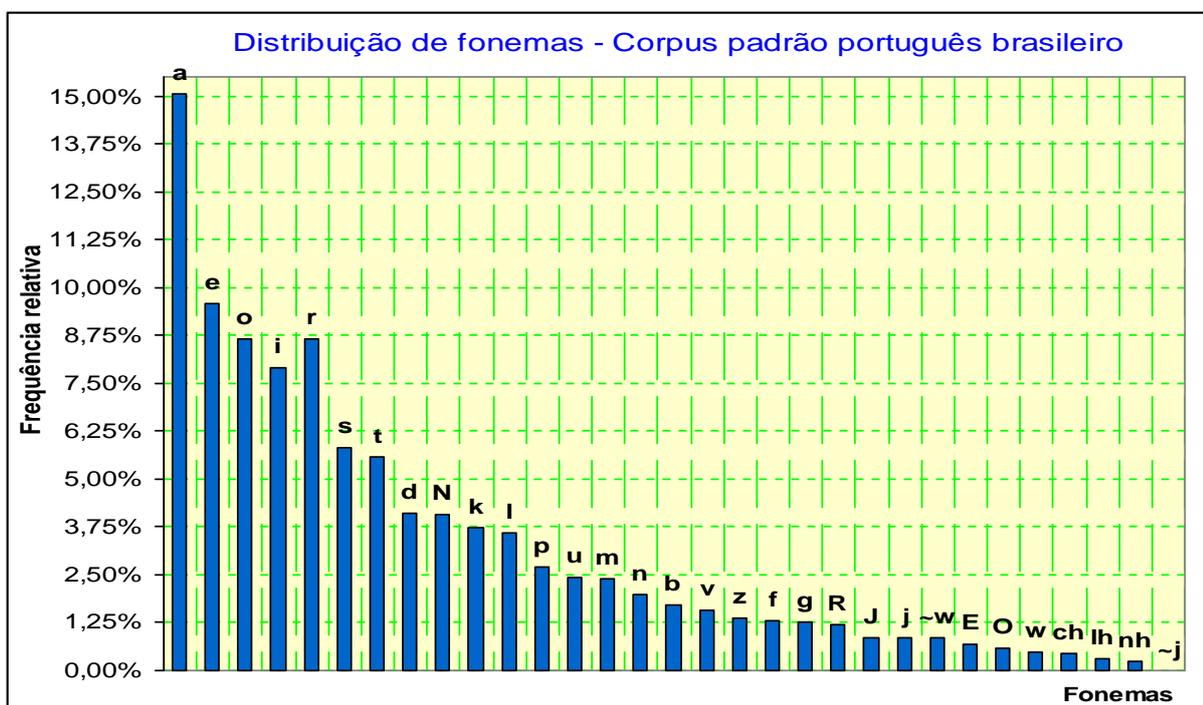


Figura 2: Distribuição de ocorrência de fonemas no corpus da língua portuguesa. Fonte: Elaborado a partir dos dados de Zaidan e Sameshima (2003).

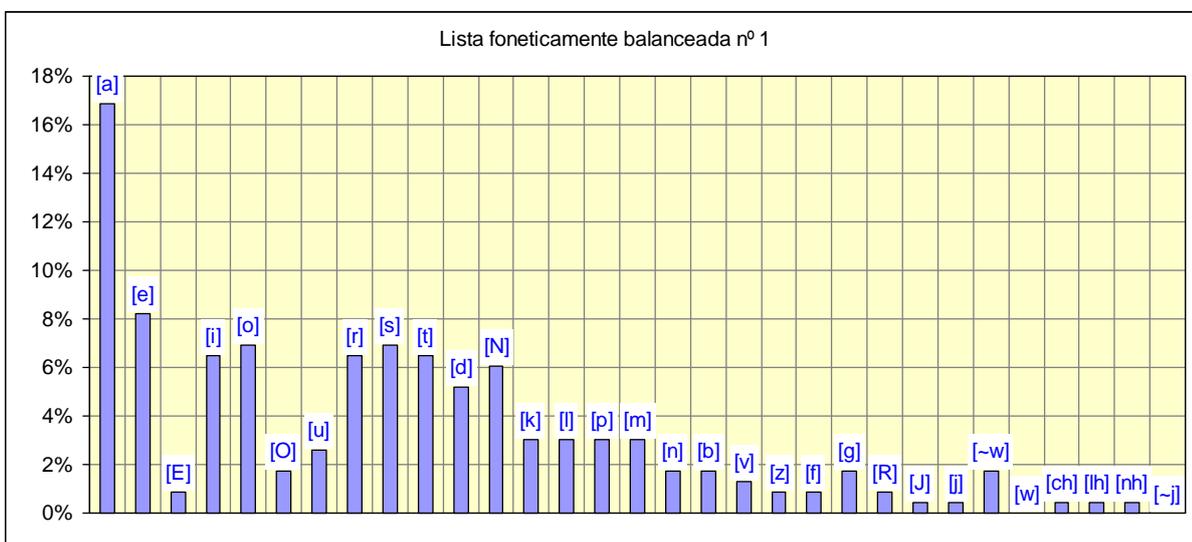


Figura 3: Distribuição de fonemas da lista utilizada no primeiro teste de inteligibilidade por palavras foneticamente balanceadas.

Tabela 6: Resumo da análise de Kruskal-Wallis para as rodadas do experimento de inteligibilidade por listas de palavras foneticamente balanceadas.

	1ª rodada	2ª rodada	3ª rodada	Somatório
ni: Número de itens por rodada	50	50	50	150,00
Ri: Somatório dos postos por rodada	3.990	3.221	4.114	11.325
Ri ² /n	318.402,00	207.496,82	338.499,92	864.398,74
Hcalc	4,9595	m (Número de grupos com postos empatados)		
(Ti ³ -Ti)	17.724	Fator de correção: C	0,994748	
k=	3	Valor corrigido: Hcorr	4,98578	=k-1
=	5%	Chi-Square (=5%; =2)	5,9915	2
Decisão	Não Rejeitar a hipótese nula! Ho			

Medição de Potência Sonora de Ônibus Urbanos na Condição Parado

Chung, A.*; Pinheiro, V. H.†; Musafir, R. E.*†‡

* Programa de Engenharia Mecânica/COPPE/UFRJ;

† Depto de Engenharia Mecânica/Escola Politécnica/UFRJ;

‡ Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente/Escola Politécnica/UFRJ;

Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

chung.alexandra@gmail.com; victorhenrique@poli.ufrj.br; rem@mecanica.coppe.ufrj.br.

Resumo

Neste artigo são calculados, segundo a norma ISO 3744:2010, os níveis de potência sonora, em dB_A , de dois ônibus urbanos na condição parado, em aceleração. Foram testadas diferentes configurações de medição usando uma caixa de referência, na forma de paralelepípedo sobre um plano refletor, com o objetivo de verificar a possibilidade de simplificar medição da potência. Os valores obtidos para os níveis de potência sonora se mantêm próximos para as diferentes configurações, sugerindo que as mais simples podem ser empregadas na medição de potência sonora desses veículos e de outros semelhantes.

Palavras-chave: Acústica, potência sonora, ruído de ônibus.

1. Introdução

Para o ruído ambiental urbano, o tráfego rodoviário é a fonte de ruído dominante (BERGLUND *et al.*, 1999; PAZ *et al.*, 2009; SÃO PAULO, 2011), onde se destacam os veículos pesados (NELSON, 1987) sendo, destes, os ônibus os que causam o maior incômodo (ROTT, 1995). O ruído de tráfego é representado pela emissão coletiva de fontes sonoras e constituído por combinações entre o ruído de propulsão (ruído do motor, entrada de ar, sistema de arrefecimento, sistemas de exaustão, transmissões e frenagem) e o ruído de rolamento (pela interação do pneu com o solo) e o ruído aerodinâmico (devido à interação do ar com o corpo do veículo em movimento) (MITCHELL, 2009).

Com o intuito de realizar um estudo inicial sobre o ruído de propulsão dos ônibus, foram realizadas seis medições da potência sonora na condição parado, em dois ônibus de mesmo modelo, as medições sendo baseadas na ISO 3744:2010.

2. Determinação do Nível de Potência Sonora – ISO 3744:2010

A norma ISO 3744:2010, cujo título, traduzido para o português, seria “Acústica – Determinação do nível de potência sonora e do nível de energia de fontes de ruído utilizando a pressão sonora – Método de engenharia para campo livre sobre um plano refletor”, (BS EN ISO, 2010) especifica um método de medição sobre uma superfície que envolve a fonte de ruído (máquina ou equipamento) e que é delimitada por um ou mais planos refletores, num ambiente que, exceto pela presença dessas superfícies, se aproxima da condição de campo livre. O método admite diversas possibilidades para o cálculo da potência sonora e emprega, além da superfície de medição, uma caixa de referência (semi-esférica, paralelepípedo, cilíndrica ou em combinações de superfícies) que depende do formato da fonte. De modo geral, o posicionamento dos microfones é obtido dividindo-se trechos da superfície de medição em partes retangulares ou triangulares que contenha um tamanho de no máximo até $3d$, onde d é a distância entre a caixa de referência e o microfone (chamada de *distância de medição*) que deve ser de pelo

menos 0,25 m e preferencialmente maior que 1 m.

Neste trabalho, para a medição dos níveis de ruído dos ônibus, foi considerada uma caixa de referência em forma de paralelepípedo sobre um plano refletor. A Figura 1 exemplifica uma opção para o posicionamento dos microfones neste caso. A Figura 2 detalha opções para esse

posicionamento, inclusive para o caso em que haja a necessidade de se acrescentar posições adicionais — quando a fonte sonora for muito grande ou houver regiões nas quais a emissão de ruído é predominante.

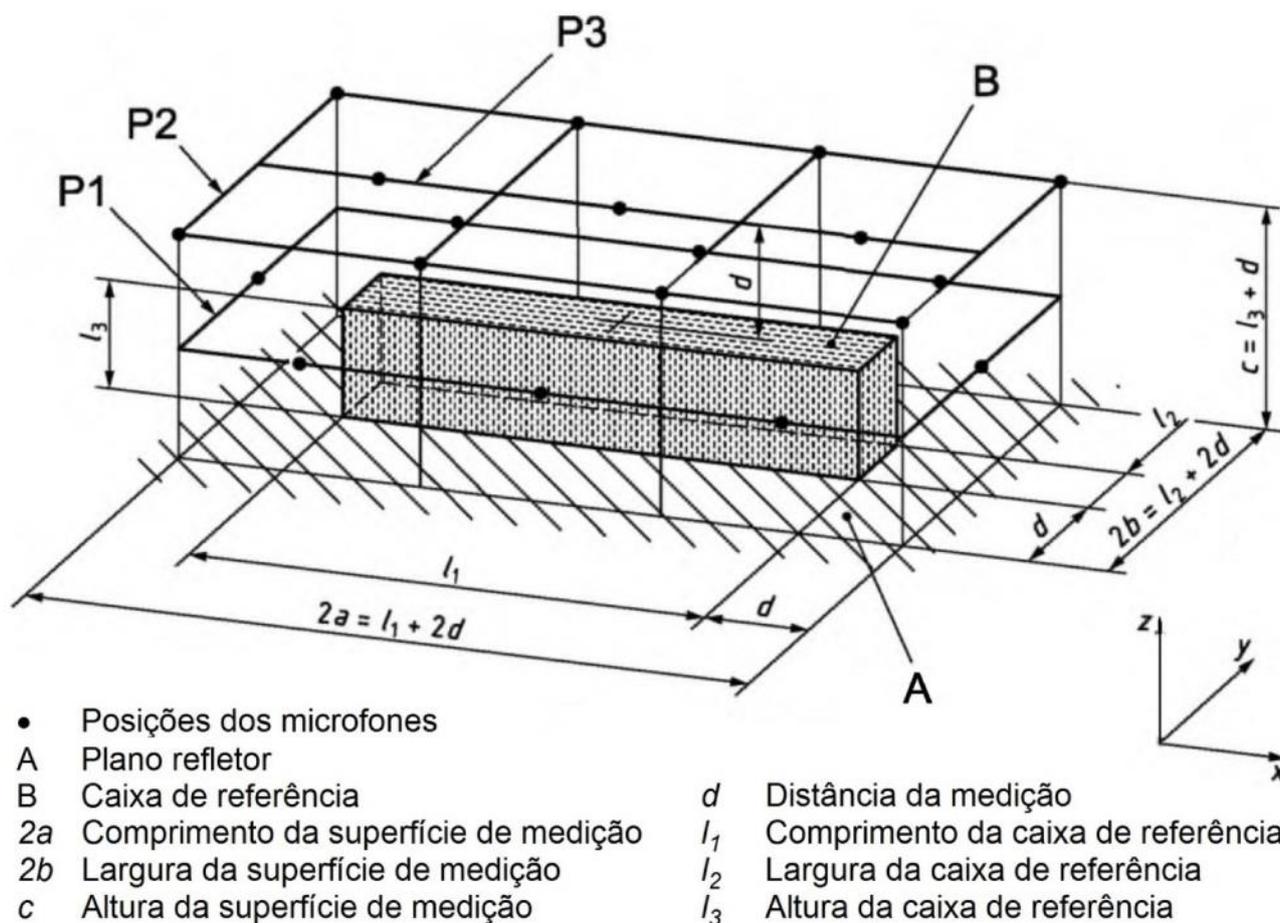


Figura 1: Exemplo de uma superfície de medição em paralelepípedo com as posições dos microfones.

Fonte: BS EN ISO 3744:2010, Figura C.9, pg. 50.

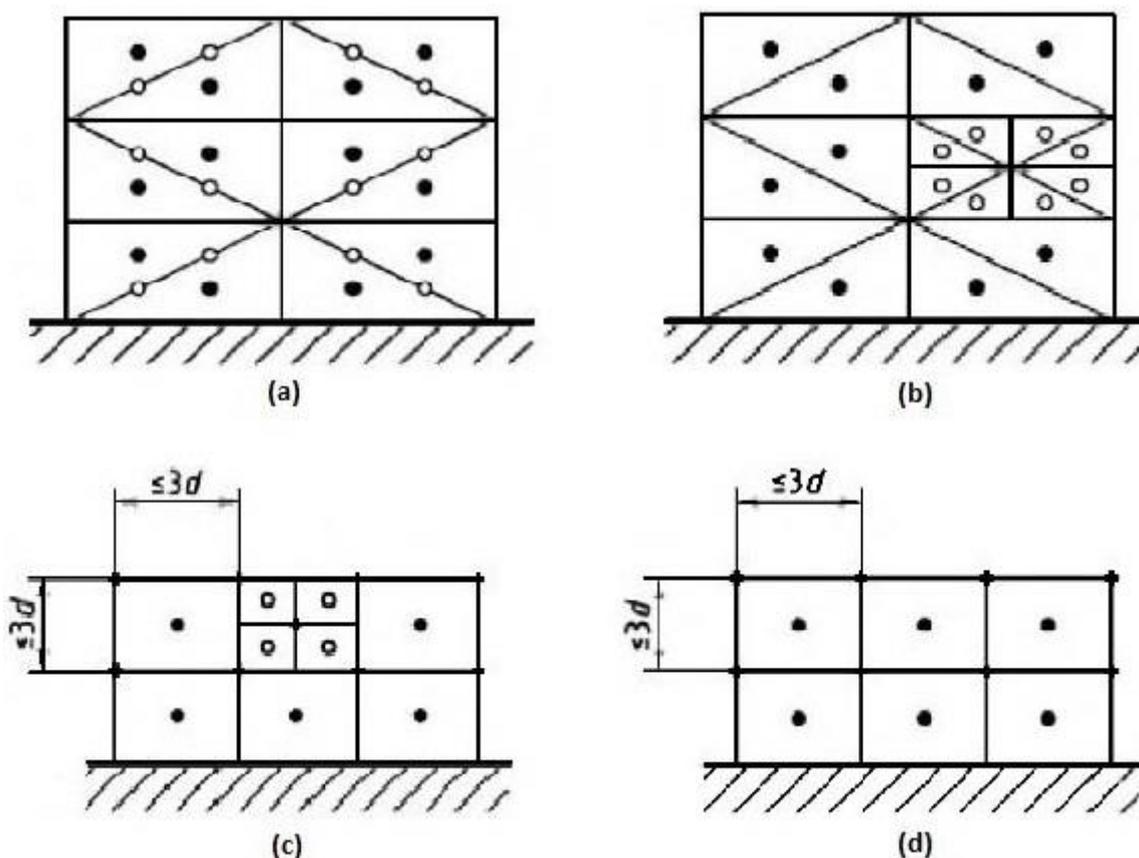


Figura 2: Exemplos de posições de microfones para uma superfície de medição em paralelepípedo constituída de: (a) e (b) áreas parciais triangulares com posições de microfones adicionais, (c) áreas parciais retangulares com posições de microfones adicionais e (d) áreas parciais retangulares.

Fonte: BS EN ISO 3744:2010, Figuras. C.1 – (c), C.3, C.5 e C.6, pgs. 45 à 47.

As medições podem ser feitas em bandas de frequência ou pelo nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderado pela curva A, L_{Aeq} , e o nível de potência sonora é obtido como

$$L_W = \overline{L_p} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

onde $\overline{L_p}$ representa a média logarítmica dos níveis de pressão sonora medidos pelos microfones, considerando correções quanto ao ruído de fundo, K_1 , e ao ambiente de medição, K_2 ; S é a área total da superfície de medição e $S_0=1 \text{ m}^2$.

Para um paralelepípedo sobre um plano refletor a superfície S é:

$$S = 4(ab + bc + ca) \quad (2)$$

onde a , b e c (Figura 1) são as dimensões de comprimento, largura e altura, respectivamente, da superfície de medição, sendo constituídas por:

$$a = 0,5l_1 + d, \quad b = 0,5l_2 + d,$$

$$c = l_3 + d, \quad (3), (4), (5)$$

onde l_1 , l_2 e l_3 são as dimensões de comprimento, largura e altura, respectivamente, da caixa de referência.

O valor de $\overline{L_p}$ é obtido por

$$\overline{L_p} = \overline{L'_p} - K_1 - K_2 \quad (6)$$

onde $\overline{L'_p}$ é a média logarítmica dos níveis de pressão sonora medidos considerando as diversas posições dos microfones, sendo calculado:

- se as posições dos microfones estiverem associadas a áreas parciais desiguais (Figuras 2 a, b e c) por:

$$\overline{L'_p} = 10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_M} S_i 10^{\frac{L'_{pi}}{10}} \right]; \quad (7)$$

- se as posições dos microfones forem uniformemente distribuídas, de forma que a área associada a cada medição seja sempre a mesma (Figura 2 d), por:

$$\overline{L'_p} = 10 \log \left[\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{\frac{L'_{pi}}{10}} \right] \quad (8)$$

onde L'_{pi} é o L_{Aeq} global ou em bandas de frequência, medido em cada posição de microfone; N_M é o número de posições dos microfones; S é a área total da superfície de medição em metros; S_i é a área parcial da superfície de medição associada ao microfone i , em m^2 .

A correção para o ruído de fundo K_1 pode ser calculada pela expressão:

$$K_1 = -10 \log \left(1 - 10^{-\frac{\overline{L'_p} - L_{p(RF)}}{10}} \right) \quad (9)$$

sendo $\overline{L_{p(RF)}}$ a média logarítmica do ruído de fundo medido em todos os pontos. A medição para o ruído de fundo é realizada nos mesmos pontos, porém com a fonte sonora desligada, e seu cálculo é feito de acordo com as equações. (7) e (8).

As correções feitas pelas condições do ambiente de medição K_2 dependem do local em que são feitas as medições. Para o caso de medições em espaço aberto, livre de reflexões, limitado por uma superfície plana e rígida, como concreto ou asfalto, o valor de K_2 é menor que 0,5 dB e pode ser negligenciado.

A necessidade do uso de posições adicionais de microfones pode ser avaliada através do índice de direcionalidade aparente, D_i , dado por

$$D_i = L'_{pi} - [\overline{L'_p} - K_1] \quad (10)$$

onde L'_{pi} é o L_{Aeq} , global ou em bandas de frequência, medido em cada posição de microfone com a correção do ruído de fundo. Para as regiões em que D_i for maior que 5 dB, é recomendado o uso de mais posições.

3. Equipamentos, Descrição dos Ônibus, Locais e Dados de Medição

As medições foram realizadas em dois locais nas dependências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ:

- nas vias próximas ao Pólo de Biotecnologia do Rio de Janeiro – BIO-RIO (Figura 3)
- na área de estacionamento do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes II) com dimensões de aproximadamente 40 x 200 metros, (Figura 4).



Figura 3: Local das medições – Área de estacionamento do Cenpes.



Figura 4: Local das medições – via próxima ao BIO-RIO.

Os equipamentos utilizados foram: três medidores integradores de nível sonoro fabricados pela 01dB – Solo, classe 1 (#5070) e classe 2 (#469 e #341), acoplados ou não a um Notebook HP ProBook 4530s; software dBFA Suite versão 4.9; calibrador de nível sonoro 01dB – Cal02, classe 2; termohigrômetro Minipa – MT-242; fita métrica e suporte para microfone.

Foram analisados dois ônibus do modelo Mercedes Benz/Marcopolo Torino U, Diesel, ano 2011, com motor de velocidade máxima de rotação de 2200 rpm e com dimensões aproximadas de 12 x 2,5 x 3 metros. A Tabela 1 apresenta os parâmetros considerados em cada medição.

Nas medições 1 e 2, foram utilizados pontos fixos e intervalos de medição de

aproximadamente 30 segundos. A Figura 5 mostra os valores obtidos e a localização dos pontos onde as medições foram realizadas. A Figura 6 mostra somente a localização dos pontos, os valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros e equipamentos utilizados nas medições de ruído.

Medição /Ônibus	Velocidade de rotação do motor (rpm)	l_1 (m)	l_2 (m)	l_3 (m)	d (m)	Medidores utilizados
1/1	1650	12	2,5	3,0	1,0	#5070 e #469
2/1	1650	12	2,5	3,0	1,0	#341
3/1	1650	12	2,5	3,0	1,5	#469
4a/2	1100	12	2,5	3,0	1,0	#341
4b/2	1650	12	2,5	3,0	1,0	#341
4c/2	2200	12	2,5	3,0	1,0	#341

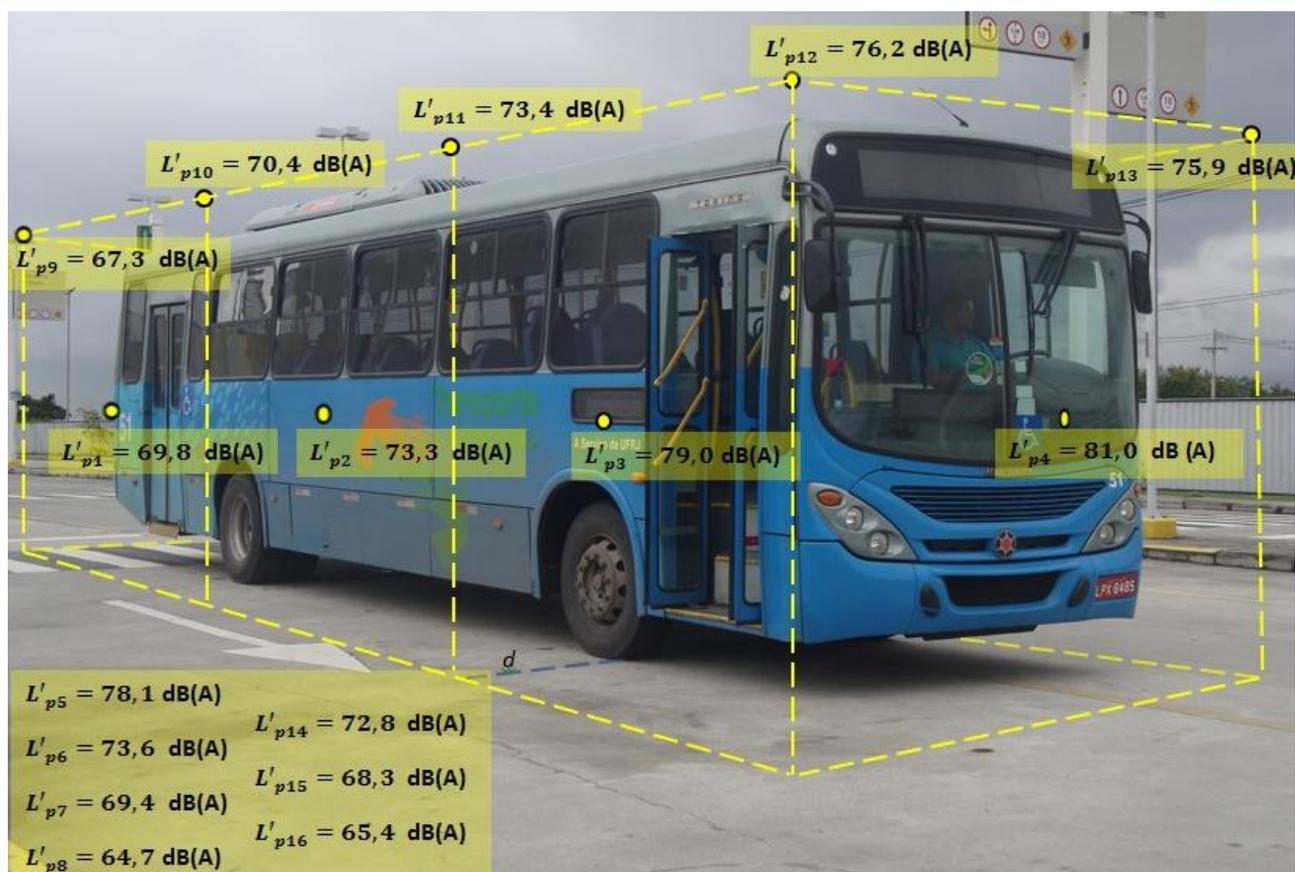


Figura 5: Dados da medição 1 e representação da superfície com pontos de medição (os pontos 5 a 8 continuam sequencialmente na lateral, em sentido anti-horário e os pontos 13 a 16 continuam sequencialmente na parte superior, em sentido anti-horário)

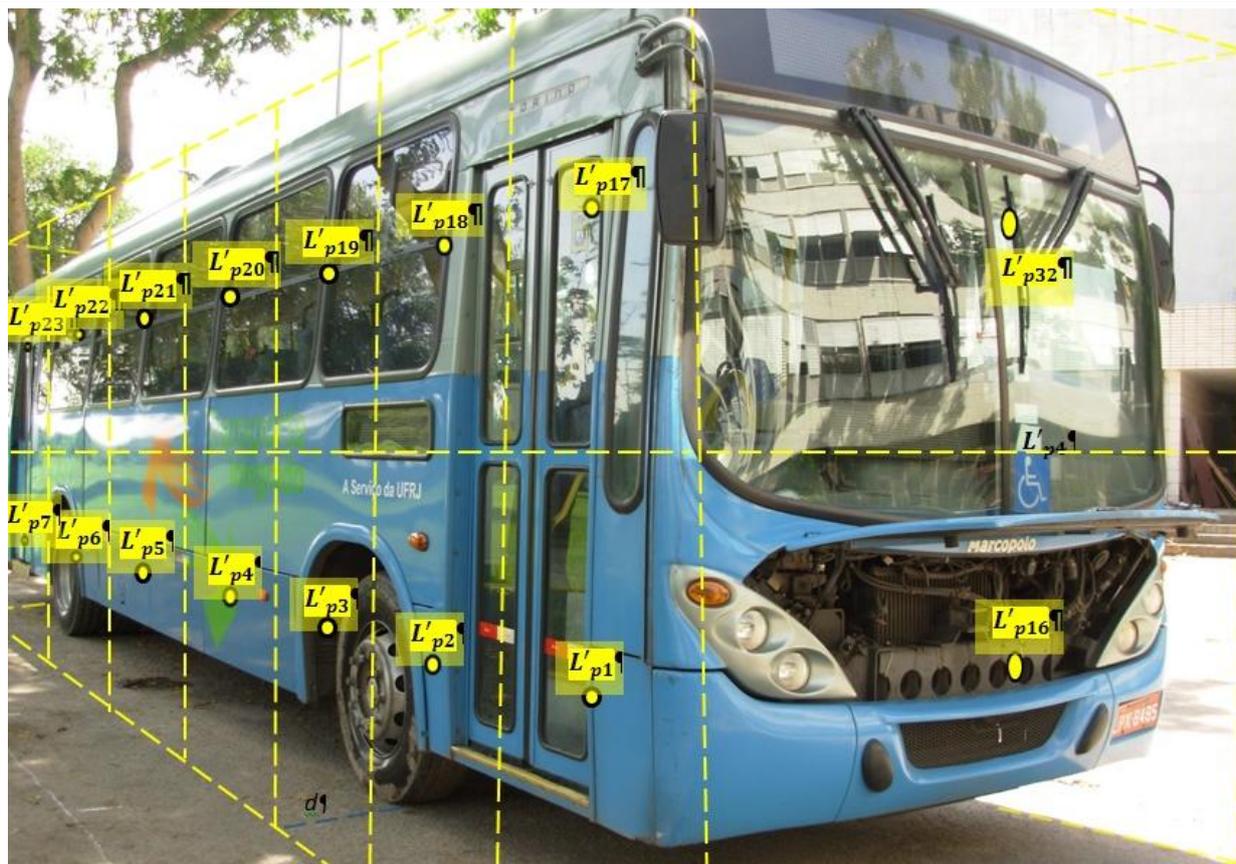


Figura 6: Representação da superfície da medição 2 e pontos de medição (os pontos 8 a 15 continuam sequencialmente na lateral inferior, em sentido horário e os pontos de 24 a 31 continuam sequencialmente na lateral superior, em sentido horário)

Nas medições 3, 4a, 4b e 4c, o entorno do ônibus foi percorrido continuamente ao longo das alturas definidas, durante aproximadamente 1 minuto para cada uma; o registro dos dados foi realizado a cada 100 ms para a medição 3 e a cada 125 ms nas medições 4a, 4b e 4c. Para essas medições, feitas de forma contínua, o número de pontos foi obtido a partir do intervalo de registro. Nas Figuras 7 e 8 são representadas as linhas onde foram feitas as medições. Os valores dos níveis equivalente obtidos são apresentados na Figura 7 para a medição 3 e na Tabela 3 para as medições 4ª, 4b e 4c.

Tabela 2: Nível equivalente em cada ponto na medição 2.

Posições dos microfones (i)	(dB _A)	Posições dos microfones (i)	(dB _A)
1	85,0	17	76,6
2	84,6	18	77,0
3	78,5	19	74,8
4	75,6	20	71,8
5	73,3	21	69,3
6	70,5	22	67,6
7	70,0	23	65,8
8	70,7	24	65,4
9	71,1	25	67,4
10	72,8	26	68,7
11	75,6	27	71,1
12	78,4	28	74,2
13	83,1	29	75,7
14	83,1	30	77,1
15	85,5	31	78,4
16	86,2	32	79,2



Figura 7: Resultados parciais da medição 3 e representação da superfície com as linhas no entorno do ônibus nas alturas definidas utilizadas na medição.



Figura 8: Representação da superfície com as linhas no entorno do ônibus nas alturas utilizadas na medição 4.

Tabela 3: Nível equivalente a alturas definidas para diferentes velocidades de rotação do motor (medições 4a, 4b e 4c).

Altura das linhas de medição (m)	Medição 4a – 1100 rpm	Medição 4b – 1650 rpm	Medição 4c – 2200 rpm
	L'_p (dB _A)	L'_p (dB _A)	L'_p (dB _A)
0,5	76,5	78,8	82,6
1	73,9	78,1	81,5
1,5	73,3	75,6	80,0
2	70,8	73,3	78,1
2,5	68,6	71,8	76,0
3	68,9	71,1	-
3,5	66,5	69,5	74,5
s 3,5	65,4	66,3	71,5

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo dos níveis de potência sonora foram utilizados dois procedimentos: considerar a área total da superfície de medição, conforme a eq. (2), ou considerar somente os valores obtidos nas áreas laterais, sem os da superfície superior (ou seja, sem os pontos 9 a 16 na medição 1; na medição 3; sem o valor de $L'_{ps3,5m}$ na medição 4 — ver Figuras 5, 7 e 8), considerando-se, nesse caso, $S = 4(ac + bc)$. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.

Observa-se, da Tabela 4, que para a rotação do motor de 1650 rpm, a diferença entre os valores calculados considerando todos os pontos (medições 1, 2, 3 e 4b) ou apenas os pontos laterais (medições 1*, 2*, 3* e 4b*) é muito pequena: as medições 1 e 1* a diferença essencialmente nula (0,1 dB_A), enquanto que a maior diferença foi observada entre as medições 2 e 2*, sendo, no entanto, de 1,5 dB_A. O emprego do procedimento simplificado se justifica porque os níveis de pressão sonora obtidos na parte superior da superfície de referência são sempre inferiores (ver, por exemplo, Figura 7) aos medidos na altura do motor (1 m) e do escapamento (0,5 m). Como os pontos superiores são os mais trabalhosos de se medir, a opção de descartá-los é uma simplificação vantajosa.

Tabela 4: Valores dos níveis de potência sonora dos ônibus na condição parado, considerando tanto a área total da superfície de medição como considerando apenas os valores obtidos nas áreas laterais (número de medição com asterisco).

Medição	L_W (dB _A)	\overline{L}_p (dB _A)	S (m ²)	$\overline{L}_{p(B)}$ (dB _A)
1	98,0	74,8	211	51,0
1*	97,9	76,2	148	51,0
2	102,2	79,0	211	56,4
2*	100,7	79,0	148	56,4
3	100,4	76,1	267	54,9
3*	99,0	76,3	185	54,9
4a	95,5	72,2	211	48,5
4a*	94,4	72,7	148	48,5
4b	98,7	75,4	211	48,5
4b*	97,5	75,8	148	48,5
4c	102,4	79,2	211	48,5
4c*	101,4	79,7	148	48,5

Das Tabelas 1 e 4 pode-se inferir que o valor de L_W obtido para o ônibus 1 através da medição 3 é o mais confiável, pois nela o número de pontos considerado é muito superior aos utilizados nas demais (medições 1 e 2). Para a medição 1, por exemplo, embora tenham sido utilizados poucos pontos, o valor encontrado para L_W difere da medição 3 em 2,4 dB_A. Para este caso, também foi realizado o cálculo de L_W utilizando-se apenas o valor de L'_{p2m} da medição 3 (ver Figura 7) e considerando apenas a área lateral, para compará-lo com o valor de L_W obtido com pontos fixos à mesma altura (medição 1*, Tabela 4). O resultado deste cálculo foi $L_W = 99,1$ dB_A, com pequena diferença (1,2 dB_A) em relação ao valor da medição 1* de 97,9 dB_A. Utilizando-se apenas o valor de $L'_{p2,5m}$ essa diferença seria menor ainda (0,3dB_A, sendo $L_W = 97,6$ dB_A). Além disso, o resultado simplificado, considerando somente o valor de L'_{p2m} , difere apenas de 1,3 dB_A do obtido com todas as linhas contínuas da medição 3. Isso indica que realizar a medição em apenas uma linha contínua, ou mesmo em pontos fixos discretos, próximo à altura média do ônibus pode levar a resultados satisfatórios.

Tabela 5: Índice de direcionalidade aparente – medição 1.

Posições dos microfones (<i>i</i>)	D_i
1	-5,0
2	-1,5
3	4,2
4	6,2
5	3,3
6	-1,2
7	-5,4
8	-10,3
9	-7,5
10	-4,4
11	-1,4
12	1,4
13	1,1
14	-2,0
15	-6,5
16	-9,6

Tabela 6: Índice de direcionalidade aparente – medição 2.

Posições dos microfones (<i>i</i>)	D_i	Posições dos microfones (<i>i</i>)	D_i
1	5,9	17	3,3
2	5,6	18	-2,4
3	2,4	19	-3,3
4	-2,4	20	-5,7
5	-5,0	21	-8,7
6	-7,0	22	-11,0
7	-9,1	23	-12,8
8	-8,9	24	-14,1
9	-8,3	25	-13,1
10	-6,7	26	-11,3
11	-4,3	27	-8,9
12	-1,6	28	-7,3
13	3,1	29	-4,0
14	4,0	30	-2,6
15	5,7	31	-1,1
16	6,9	32	-0,2

Foram também calculados, para as medições 1 e 2, os valores do índice de direcionalidade aparente para cada ponto, D_i , mostrados nas Tabelas 5 e 6. Os valores obtidos para os pontos em que o índice de direcionalidade aparente excede 5 dBA, apresentados em vermelho, são aqueles localizados próximos aos locais de maior ruído do ônibus

(escapamento e motor dianteiro), como já era esperado.

Nas medições 1 e 2, os níveis de potência sonora obtidos através da eq. (7), que considera áreas desiguais, foram muito próximos aos obtidos utilizando-se a eq. (8), com diferenças menores que 0,3 dBA. Isso porque as únicas áreas desiguais e ligeiramente maiores que as demais são a da frente e a da parte traseira do ônibus, o que não leva a variações substanciais no resultado. Comparando os valores da medição 4, tem-se que há um aumento do nível de potência sonora de aproximadamente 3 dBA quando se aumenta a rotação do motor de 1100 rpm para 1650 rpm e um aumento de aproximadamente 4 dBA ao aumentar a rotação de 1650 rpm para 2200 rpm. Ou seja, dobrando-se a rotação do motor, houve um aumento em 7 dBA no nível de potência sonora.

5. CONCLUSÃO

Dada a diferença muito pequena entre os valores obtidos considerando a área total do ônibus e apenas a área lateral, conclui-se que é possível simplificar a medição diminuindo o número de pontos utilizados, por exemplo, desconsiderando os pontos superiores que são mais trabalhosos para medir. Realizar a medição em apenas uma linha contínua, ou mesmo em pontos fixos discretos, próximo à altura média do ônibus também pode levar a resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- BERGLUND, B., LINDVALL, T., SCHWELA, S. H., **Guidelines for community noise**. eds. Geneva, World Health Organization, 1999. Disponível em: <<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2014.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN ISO 3744: Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane**. Brussels, 2010. 79p.
- MITCHELL, P., **Speed and Road Traffic Noise: The role that lower speeds could play in cutting noise from traffic**. Report commissioned by the UK

- Noise Association, 2009. Disponível em:
<<http://cfile240.uf.daum.net/attach/023FD13B50EBB0D50C66C8>>. Acesso em: 22jun. 2014.
- NELSON, P.M., Transportation Noise Reference Book, Butterworth & Co. 1987. In: KEULEMANS, C., **Sound power measurements on heavy vehicles to study propulsion noise in the EU-project IMAGINE**. Disponível em: <http://www20.vv.se/fu/d-resultat/Publikationer_000001_000100/Publikation_000091/Volvo%20test%20orig.pdf>. Acesso em: 22jun. 2014.
- PAZ, E. C., ZANNIN, P.H.T, “Avaliação do ruído de tráfego como índice de poluição sonora”, **Revista Brasileira de Acústica e Vibrações**, no 40, pp. 56 – 62, mar. 2009.
- ROTT, João A. A., **Mapa simplificado de ruído para a cidade de Porto Alegre**. Dissertação M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 1995.
- SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Transporte. Secretaria do Verde e do Meio Ambiente. **Plano de Controle de Poluição Veicular no Município de São Paulo**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/pdf/biblioteca_tecnica/PCPV.pdf>. Acesso em: 22jun. 2014.

Influência da Dimensão das Aberturas na Qualidade Acústica de Salas de Aula Naturalmente Ventiladas

Silva, J.T.*; Oiticica, M.L.G.R⁺

*Grupo de Estudos do Ambiente Sonoro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, jordana_t@hotmail.com

+ Grupo de Estudos do Ambiente Sonoro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, mloiticica@hotmail.com

Resumo

As condições acústicas das salas de aula podem interferir diretamente no processo de ensino e aprendizagem. Alguns componentes construtivos podem influenciar em tais condições. No clima quente-úmido, as aberturas são utilizadas com a finalidade principal de proporcionar a ventilação natural. Situações de conflito entre as necessidades de conforto ambiental podem ser verificadas quando tais componentes também permitem a entrada dos ruídos externos, ocasionando decréscimo no isolamento sonoro. Além dos aspectos relacionados ao isolamento e à ventilação, torna-se necessária a abordagem da interferência das aberturas na qualidade acústica interna. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da dimensão das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL. A metodologia consistiu em análises paramétricas, com base em resultados dos parâmetros de qualidade acústica: Tempo de Reverberação (TR), Clareza (C_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), obtidos por meio da simulação computacional. Através dos resultados, observou-se a que o aumento da área de abertura acarreta em melhorias expressivas nos valores dos parâmetros acústicos. O conhecimento sobre o efeito das aberturas na qualidade acústica interna pode auxiliar o projeto arquitetônico no processo de tomada de decisões por parte dos arquitetos.

Palavras-chave: Qualidade acústica, simulação computacional, salas de aula, aberturas, janelas.

1. INTRODUÇÃO

Nos ambientes de sala de aula, a comunicação oral corresponde ao principal mecanismo de transmissão do conhecimento, de forma que a aprendizagem está relacionada diretamente à compreensão das palavras e à inteligibilidade da fala. A qualidade acústica de um ambiente depende de alguns aspectos, tais como, a forma geométrica, a absorção acústica dos materiais internos, fontes sonoras, bem como seu entorno e efeitos das aberturas no ambiente (GERGES, 2000). Alguns estudos relacionam a influência das características arquitetônicas do ambiente com os resultados nos parâmetros acústicos, a exemplo de Amorim (2007), com a avaliação dos parâmetros acústicos resultantes das diferentes formas geométricas de salas de aula

padronizadas da rede pública de ensino de Campinas-SP.

Em função da necessidade de atendimento aos requisitos de conforto ambiental no contexto da arquitetura escolar, verifica-se que em regiões de clima tropical, como o Brasil, o conflito entre as recomendações de projeto baseados no conforto são constantes. As aberturas são elementos significativos de tal conflito, pois, se por um lado, há a necessidade da entrada da ventilação natural, a fim de atender às exigências de conforto térmico, por outro lado, observa-se que as aberturas tornam as salas sujeitas ao ruído ambiental, o que consequentemente pode trazer prejuízos à inteligibilidade da fala. As aberturas, geralmente, são apontadas como pontos de maior permeabilidade do som, sendo objeto de estudo em trabalhos

direcionados para a temática do isolamento acústico das edificações.

Com o intuito de minimizar o problema da dicotomia entre os aspectos térmicos e acústicos, vale citar os trabalhos de Araújo (2010) e Oiticica (2010), com o desenvolvimento de componentes arquitetônicos, elemento vazado (cobogó) e peitoril ventilado, respectivamente; que possibilitam simultaneamente a passagem da ventilação natural e isolamento sonoro.

A acústica de salas dedica-se ao estudo de ambientes fechados. No entanto, espaços abertos, com a existência de aberturas, são frequentemente projetados, devido à necessidade da utilização da ventilação natural como estratégia para resfriamento térmico passivo, como é o caso de Maceió-AL, bem como da necessidade em garantir condições acústicas favoráveis ao desenvolvimento das atividades nos ambientes, de acordo com o seu uso. Portanto, torna-se necessária a abordagem da interferência das aberturas na determinação da qualidade acústica no interior dos ambientes.

Diante das recomendações em relação aos vãos de aberturas para ventilação natural, a exemplo da NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005), ao sugerir grandes áreas de abertura, implicações além dos aspectos de ventilação natural e isolamento acústico necessitam de estudos, a exemplo do efeito das aberturas do ponto de vista do comportamento sonoro dos ambientes, e conseqüentemente, suas implicações em relação aos parâmetros de qualidade acústica.

A maior parte da literatura (KUTTRUFF, 1979; EGAN, 1988; MEHTA *et al.*, 1999) considera a janela como um perfeito absorvedor acústico, visto que a parcela total do som que incide na abertura é transmitida para o meio externo à edificação. Assim, o coeficiente de absorção (α) da abertura corresponde a 1 (um), para todas as frequências, de modo que 100% da energia sonora incidente neste componente é

absorvida, o que conseqüentemente pode favorecer a obtenção de resultados mais baixos do Tempo de Reverberação.

Martellotta (2012) aponta que a absorção sonora através das aberturas tem sido raramente considerada na acústica de salas, verificando-se apenas a existência de estudos relacionados às pequenas aberturas (geralmente com poucos centímetros de largura), com a abordagem da perda de transmissão (*transmission loss*) devido às aberturas (WILSON; SOROKA, 1965; SAUTER; SOROKA, 1970; SGARD *et al.*, 2007), mas nada sobre grandes aberturas.

Em virtude das janelas serem os principais elementos de abertura empregados nos ambientes de salas de aula, o presente estudo baseou-se na variável de dimensão de tais componentes arquitetônicos, por se tratar de um importante aspecto que pode ser decidido pelo arquiteto, e conseqüentemente, pode interferir na qualidade acústica. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da dimensão das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.

2. MÉTODO

O trabalho em questão consiste em uma análise paramétrica da influência da dimensão das aberturas na qualidade acústica de salas de aula, com o auxílio da simulação computacional. O método aplicado foi dividido em três etapas, descritas a seguir.

2.1 Levantamento de dados

Foram consultados 56 projetos arquitetônicos disponíveis em arquivos digitais, o que equivale a cerca de 58% do universo de edificações escolares registradas pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira - INEP (INEP, 2013). Foram levantados os dados relativos às dimensões de 502 salas de aula, além dos percentuais de área de abertura em relação à área de piso, e posteriormente, realizou-se

uma análise estatística baseada na moda, ou seja, na frequência de ocorrência.

A caracterização físico-constructiva da arquitetura escolar no âmbito da rede pública de ensino de Maceió-AL baseou-se nos trabalhos sobre a arquitetura pública escolar local, além de visitas *in loco*. A Figura 1 apresenta uma síntese dos materiais e componentes arquitetônicos de uma sala de aula, que pode ser considerada como representativa da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.



Figura 1: Sala de aula representativa da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL

Como componentes arquitetônicos destinados à ventilação natural nas salas de aula, têm-se as janelas e os rasgos. Em relação à tipologia das aberturas recorrentes, destaca-se o emprego de janelas pivotantes verticais de madeira, que permite a total abertura do vão (Figura 2). Os rasgos se localizam geralmente opostos às janelas, voltados para os corredores e representam a totalidade da área de abertura do vão e objetivam proporcionar a ventilação cruzada no ambiente, pois desempenham a função de saída da corrente de ar interna (Figura 3).



Figura 2: Janela pivotante vertical



Figura 3: Rasgo

2.2 Caracterização dos modelos para simulação computacional acústica

As dimensões do modelo de sala de aula, de 6m (largura), 8m (comprimento) e 3m (pé-

direito), foram definidas de acordo com a sala mais recorrente, identificada na análise estatística. Os coeficientes de absorção sonora () dos materiais de acabamento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes de absorção sonora () dos materiais componentes do modelo de sala de aula

MATERIAL	Frequência (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	
PAREDE	Reboco liso sobre alvenaria de tijolos ou blocos	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
	Revestimento cerâmico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
PISO	Concreto aparente, tratado e polido	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
TETO	Reboco	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
ABERTURA	Vão aberto	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
PORTA	Porta de madeira comum pintada	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10

Fonte: Adaptado de Bistafa (2006, p. 236-237).

Além das dimensões, outras características relativas à geometria permaneceram fixas, tais como a parede que contém os rasgos e a porta. A única partição que sofre alterações nos modelos trata-se da parede que contém as janelas, oposta à parede que possui os rasgos (Figuras 4 e 5).

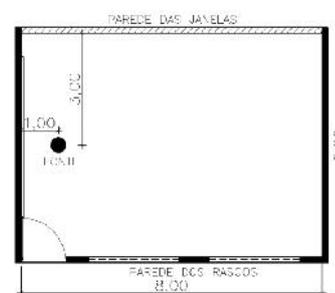


Figura 4: Modelo da sala de aula: planta-baixa (dimensões em metros)

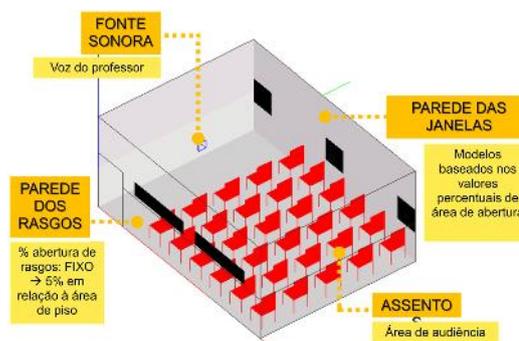


Figura 5: Modelo da sala de aula no Ease 4.3, com a representação das características

A fim de verificar o efeito da variável de dimensão das aberturas na qualidade acústica da sala de aula, os modelos foram baseados nos valores percentuais de abertura em relação à área de piso do ambiente, indicados no Quadro 1. A escolha de tais valores foi baseada nas áreas percentuais recomendáveis pelas normas técnicas relacionadas ao desempenho térmico das edificações e no condicionamento térmico passivo, de recomendações técnicas do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - FUNDESCOLA (MEC, 2002). Tais informações foram cruzadas com os valores percentuais de abertura mais recorrentes, identificados na etapa de levantamento de dados acerca das aberturas existentes.

Quadro 1: Percentuais de abertura em relação à área de piso considerados nos modelos de simulação

DIMENSÃO	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
REPRESENTAÇÃO EM VISTA DA PARDEDE DE JANELAS							
ÁREA DE ABERTURA TOTAL* (RASGOS+JANELAS)	4,8m ²	7,2m ²	9,6m ²	12m ²	14,4m ²	16,8m ²	19,2m ²
ÁREA DE ABERTURA DE JANELA	2,4m ²	4,8m ²	7,2m ²	9,6m ²	12m ²	14,4m ²	18,8m ²

Cada um dos valores percentuais de abertura em relação à área de piso correspondem ao somatório da área de janela e de rasgos. Dessa forma, por exemplo, 10% de abertura em relação à área de piso corresponde a 5% de rasgos em relação à área de piso e 5% de janelas em relação à área de piso.

2.3 Simulação computacional acústica

Para obtenção dos resultados dos parâmetros acústicos, optou-se pela simulação computacional, com o auxílio do programa Ease 4.3. O referido programa utiliza-se da Equação de Sabine (1922) ou da Equação de Eyring (1930) para o cálculo clássico do

Tempo de Reverberação (TR). Além do TR, parâmetros acústicos, como a Clareza (C_{50}), o Índice de Transmissão (STI) e a Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), podem ser obtidos por meio do método de traçado de raios e do método das fontes imagens.

Tendo em vista a relevância de determinados parâmetros acústicos na qualidade acústica de salas de aula, a presente avaliação considerou os seguintes parâmetros: Tempo de Reverberação (TR), Clareza (C_{50}), o Índice de Transmissão (STI) e a Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons).

A fonte sonora utilizada trata-se de uma das configurações padrões da voz humana masculina disponível no programa, disposta a 1,7m acima do piso, que corresponde à altura de um indivíduo adulto, e localiza-se à frente dos assentos dos alunos, a 3m de distância da parede das janelas. O ruído de fundo adotado nas simulações foi de 50 dB(A), estimado para a sala desocupada. Utilizou-se o mapeamento com reflexões como forma de simulação. Para o cálculo de Tempo de Reverberação (TR) realizado nas simulações foi utilizada a Equação de Sabine (1922).

2.4 Tratamento dos dados

A avaliação da qualidade acústica foi realizada em dois níveis.

Inicialmente, foram analisados comparativamente os valores mais críticos em cada um dos modelos, ou seja, os valores registrados no assento menos favorecido da sala de aula. Assim, foi possível avaliar a situação mais prejudicial para o aluno/ouvinte, tendo como pressuposto de que na sala de aula deveria ser garantida condições satisfatórias de inteligibilidade da fala, independente da localização na área dos assentos/público receptor. Os resultados dos parâmetros acústicos obtidos foram verificados em relação à conformidade com as recomendações técnicas e normas relacionadas (Tabela 2).

Tabela 2: Parâmetros acústicos com seus respectivos conceitos e referências

PARÂMETROS ACÚSTICOS	CONCEITO	REFERÊNCIAS
Tempo de Reverberação (TR)	- Trata-se do tempo necessário para que o nível de pressão sonora em um ambiente decaia os primeiros 60 dB após a interrupção do sinal sonoro (MEHTA <i>et al</i> , 1999). - TR recomendável de até 0,6s (para salas de aula desocupadas, de volume de até 283m ³ , nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz).	ANSI S12.60 (2002)
Clareza (C₅₀)	- O parâmetro C ₅₀ é indicado para medir a definição em que os sons são percebidos numa sala, expressa em dB. - Valores de C ₅₀ acima de 2 dB favorecem a inteligibilidade da palavra.	Marshall (1994)
Índice de Transmissão da Fala (STI)	Corresponde a um dos parâmetros mais utilizados na avaliação da qualidade acústica de salas nas quais a compreensão das palavras é imprescindível. Considera a interferência do ruído de fundo e a reverberação, uma vez que tais aspectos podem prejudicar a inteligibilidade da fala. Os valores de STI podem variar entre 0 (zero), que representa inteligibilidade nula e 1 (um), que corresponde à inteligibilidade excelente.	IEC 60268-16 (2011)
Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)	A %ALCons destina-se à quantificação da porcentagem da perda na articulação, que é baseada na percepção das palavras pelos ouvintes. Considera as características acústicas da fonte sonora e da sala, do volume do ambiente (V) e do TR. - Os valores de %ALCons variam entre 0%, que corresponde à excelente inteligibilidade da fala e 100%, que representa inteligibilidade nula.	IEC 60268-16 (2011)

Em relação ao segundo aspecto analisado, avaliou-se a distribuição espacial dos resultados dos parâmetros, auxiliada pela observação dos mapas acústicos dos modelos. Com o intuito de representar as posições (assentos) dos alunos na sala de aula e obter resultados dos parâmetros acústicos nos locais mais prováveis de ocupação do ambiente por parte de seus usuários/ouvintes, a área de mapeamento, também chamada de área de audiência, foi dividida em 30 pontos (Figura 6), representados pelos quadrados. A altura do ponto em relação ao piso foi de 1,20m, que

corresponde à altura aproximada de uma pessoa sentada.

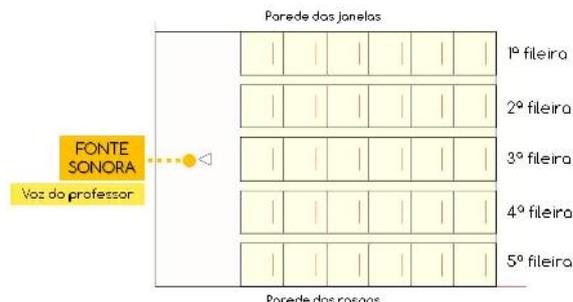


Figura 6: Modelo de sala de aula em planta-baixa, com a representação da fonte sonora e assentos/área de audiência

Para análise dos resultados dos parâmetros acústicos foram enfatizadas as frequências sonoras a partir de 500Hz, visto que a maior contribuição para a inteligibilidade da fala é obtida a partir dessa faixa de frequência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Influência da dimensão nos resultados críticos dos parâmetros acústicos

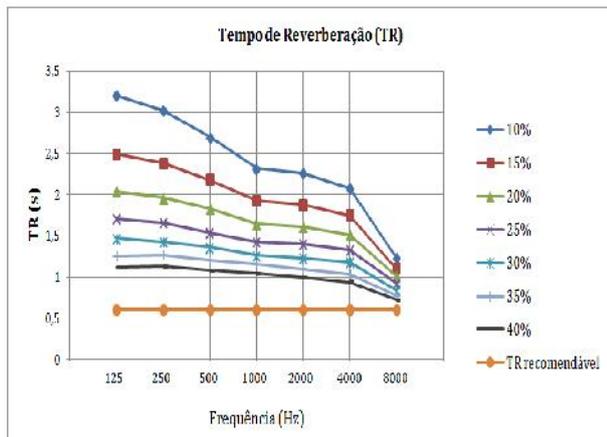
Ao considerar o efeito da variável de dimensão das aberturas, verifica-se que os valores de Tempo de Reverberação (TR) excedem às recomendações presentes nas normas ANSI S12.60: *Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools* (ANSI, 2002) e NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados (1992) (Gráfico 1).

Uma vez que a norma ANSI S12.60 (2002) indica TR de até 0,6s para salas de aula desocupadas, de volume de até 283m³, nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, pode-se observar, através do Gráfico 1, que o modelo com 40% de abertura em relação à área de piso obteve os valores mais favoráveis de TR, embora possua valores acima de 1s na maior parte das frequências consideradas (Gráfico 1).

As simulações comprovam que com a alteração da área de abertura, do menor percentual para do maior percentual de

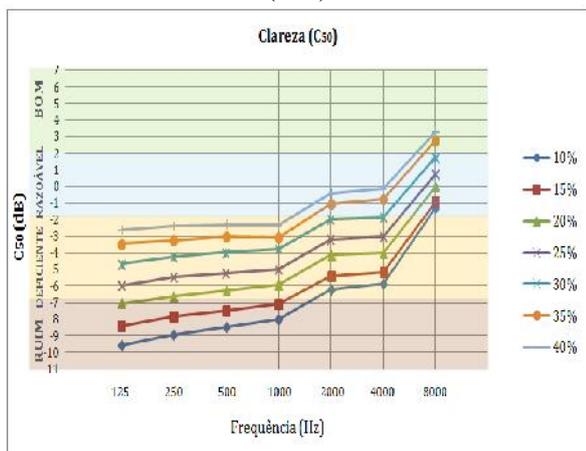
abertura, de 10% para 40%, o TR passa de 2,7s para 1,08s (na frequência de 500Hz), o que aponta um decréscimo de cerca de 60% do valor de TR. Verifica-se que a cada aumento de 5% de área de abertura de janela, há uma melhoria nos valores de TR (500Hz) em torno de 10% a 19%.

Gráfico 1: Resultados críticos do Tempo de Reverberação (TR)



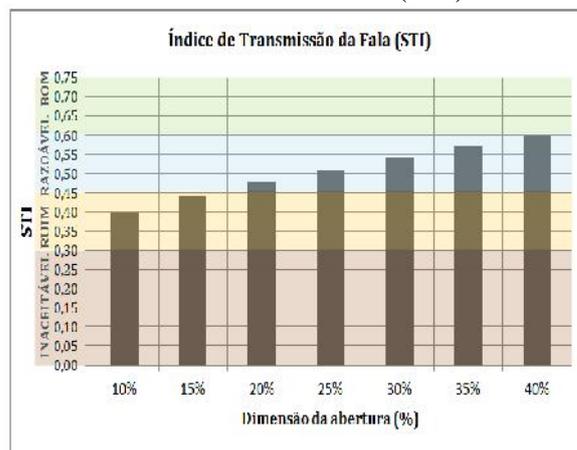
Os resultados de Clareza (C_{50}), conforme apresentados no Gráfico 2, indicam que o aumento da dimensão das aberturas acarreta em melhorias nos valores do parâmetro. Ao comparar a variação dos valores de C_{50} em função do aumento a cada 5% de área de abertura dos modelos, verifica-se o acréscimo no C_{50} (500Hz) em torno de 12% a 24%, a depender do modelo.

Gráfico 2: Resultados críticos de Clareza (C_{50})



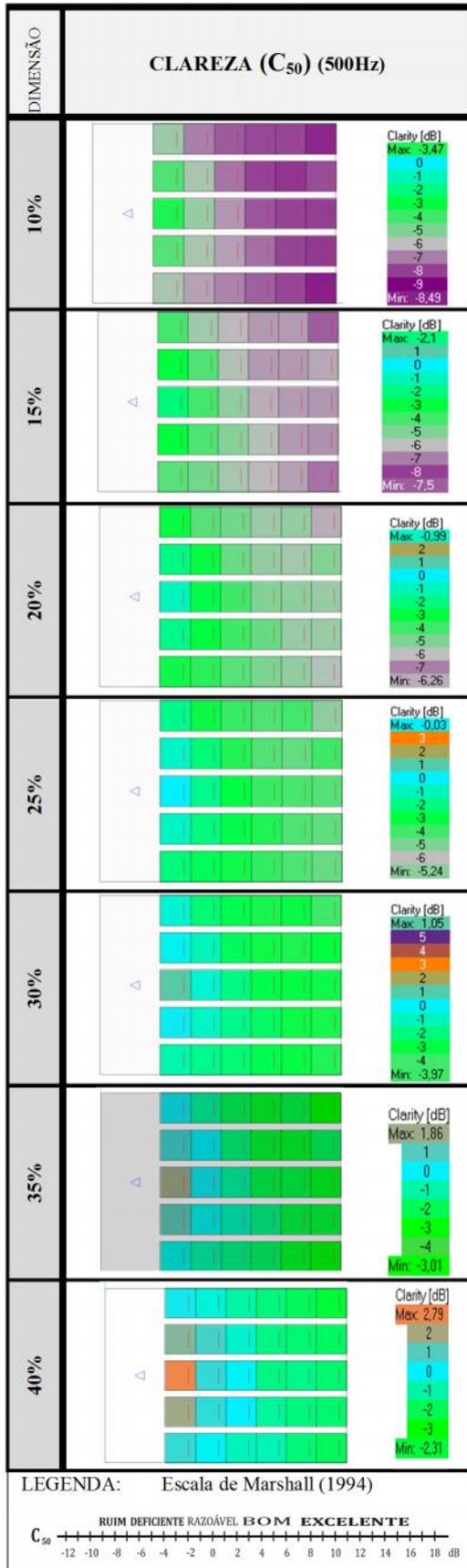
Os resultados indicam que com o aumento da área de abertura, valores mais favoráveis do Índice de Transmissão da Fala (STI) são observados, conforme ilustrado no Gráfico 3. Em relação à melhoria dos resultados de STI em função do aumento da dimensão da abertura, constata-se que a mudança do modelo com 10% de abertura para 40%, respectivamente, o valor passa de 0,40 para 0,60, o que representa um acréscimo por volta de 33% nos resultados. O aumento em 5% de área de abertura dos modelos representa o ganho em torno de 5% a 10% nos valores de STI.

Gráfico 3: Resultados críticos do Índice de Transmissão da Fala (STI)

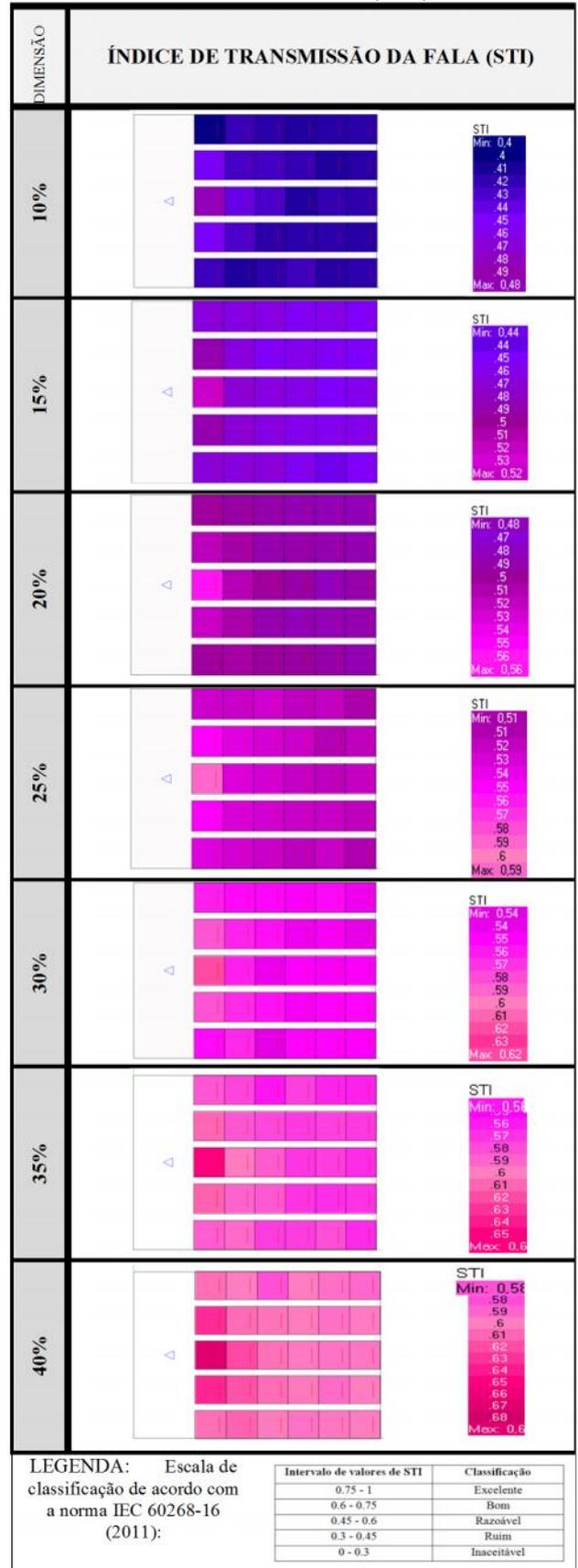


Assim como os resultados dos parâmetros discutidos anteriormente, os valores críticos de Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons) mais favoráveis foram obtidos com o aumento da dimensão das aberturas, conforme apresentado no Gráfico 4. O efeito do aumento da dimensão da abertura, de 10% para 40% em relação à área de piso, implica em uma melhoria nos valores de %ALCons por volta de 65%, passando %ALCons de 19,28% (modelo 10% de abertura) %ALCons de 6,64% (modelo 40% de abertura). Ao relacionar a variação dos valores de %ALCons em função do acréscimo em 5% de área de abertura dos modelos, os resultados sugerem uma melhoria que varia em torno de 13% a 20% nos valores.

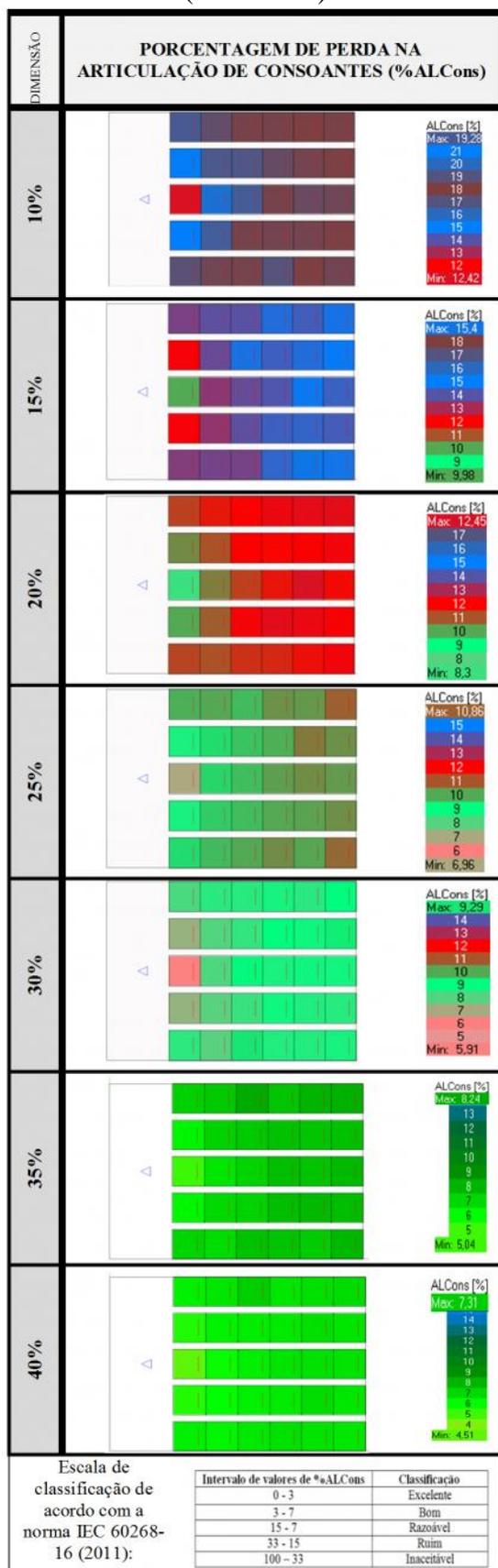
Quadro 2: Mapas acústicos: Clareza (C_{50}) na frequência de 500Hz



Quadro 3: Mapas acústicos: Índice de Transmissão da Fala (STI)



Quadro 4: Mapas acústicos: Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)



4. CONCLUSÕES

Tendo em vista a importância das aberturas para o conforto térmico em regiões de clima quente-úmido, a variável de dimensão das aberturas consiste em um dos aspectos mais estudados no âmbito da ventilação natural. Por envolver decisões de projeto por parte do arquiteto, também torna-se necessária a investigação acerca das implicações desses componentes arquitetônicos na qualidade acústica interna.

Por meio dos resultados dos parâmetros acústicos nos assentos críticos, comprovou-se que o aumento da área de abertura constitui-se como uma estratégia para obtenção de melhores resultados, visto que as aberturas representam expressiva capacidade de absorção sonora. Observa-se que o aumento da área de abertura contribui para a maior uniformidade dos resultados dos parâmetros acústicos na sala de aula, principalmente em se tratando dos modelos com maiores percentuais de abertura, acima de 20% de abertura.

O aumento da dimensão das aberturas, além de favorecer a ventilação natural no interior da sala de aula, também contribui para captação da iluminação natural. As aberturas, tidas como componentes de controle ambiental, quando bem planejadas, podem contribuir para o projeto de edificações escolares mais sustentáveis, ambientalmente adequadas e confortáveis, por meio de alternativas passivas de projeto de acordo com os conceitos de arquitetura bioclimática

É necessário fazer a ressalva de que as edificações escolares que requerem o uso da ventilação natural devem ser associadas ao planejamento da localização no contexto urbano, a fim de evitar níveis de ruído acima dos toleráveis, visto que as aberturas podem interferir expressivamente no decréscimo do isolamento sonoro do ambiente. Além da preocupação com o entorno, o zoneamento das escolas pode favorecer maior proteção dos ambientes de salas de aula em relação às fontes sonoras externas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220** – Desempenho térmico de edificações (partes 1, 2 e 3). Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- _____. **NBR 12179** – Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- AMORIM, A. E. B. **Formas geométricas e qualidade acústica de salas de aula**: estudo de caso em Campinas-SP. Dissertação (Mestrado). Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.
- ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI S12.60**: Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools. Accredited Standards Committee S12, Noise. Standards Secretariat Acoustical Society of America, Melville, NY: American National Standards Institute, Inc, 2002, 50p.
- ARAÚJO, B. C. D. de. **Proposta de elemento vazado acústico**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
- BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 368p.
- EGAN, M. David. **Architectural Acoustics**. New York: McGraw-Hill, 1988. 411p.
- EYRING, C. F. Reverberation time in “dead” rooms. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v.1, p.217-241, 1930.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2.ed. Florianópolis: NR Editora, UFSC, 2000. 696p.
- IEC - INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60268-16**: Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index, 2011.
- INEP - Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **DataEscolaBrasil**. Disponível em: <<http://www.dataescolabrasil.inep.gov.br/dataEscolaBrasil/>> . Acesso em: 01/05/2014.
- KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. 2.ed. London, UK: Applied Science Publishers LTD., 1979. 300p.
- MARSHALL, L. G. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 96, p.2251-2261, 1994.
- MARTELLOTTA, F. On the sound absorption by openings in rooms (L). **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 132, n.5, p. 2951–2954, 2012.
- MEC - MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA. **Espaços educativos** – ensino fundamental: subsídios para elaboração de projetos e adequação de edificações escolares. Cadernos técnicos, n. 4, v.2. Brasília: FUNDESCOLA, 2002.
- MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural acoustics: principles and design**. Columbus: Prentice Hall, 1999. 446p.
- OITICICA, M. L. G. da R. **Desempenho acústico de diferentes tipologias de peitoris ventilados**. Tese (Doutorado). Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.
- SABINE, W. C. **Collected Papers on Acoustics**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1922.
- SAUTER, A.; SOROKA, W. W. Sound transmission through rectangular slots of finite depth between reverberant rooms. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 47, n.1, p.5–11, 1970.
- SGARD, F.; NELISSE, H.; ATALLA, N. On the modeling of the diffuse field sound transmission loss of finite thickness apertures. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 12, n.1, p.302–313, 2007.
- WILSON, G. P.; SOROKA, W. W. Approximation to the diffraction of sound by a circular aperture in a rigid wall of finite thickness. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 37, n.2, 1965, p.287–297.

Avaliação dos níveis de pressão sonora em cabines acústicas desmontáveis do Paraná

Ribas, A*; Hoffmann, W; Gonçalves, C. G. O*; Albizu, E*; Muller, A. P+; Pasini, S+.

*Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba-PR

+CREFONO 3, Curitiba-PR

Contato:angela.ribas@utp.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi analisar a qualidade do ambiente sonoro em cabines audiométricas instaladas na jurisdição do Conselho Regional de Fonoaudiologia 3ª Região, à luz da ISO 8253-1. Foram avaliadas 25 cabines audiométricas desmontáveis, cuja seleção foi aleatória. Utilizou-se o medidor de nível de pressão sonora Bruel&Kjaer modelo 2150 equipado com um microfone modelo 4144. O método utilizado foi o de medição direta. Registrou-se que 80% da amostra reprovou na avaliação, pois os valores de L_{max} ultrapassaram o recomendado pela norma, principalmente no que se refere às baixas frequências (31,5 Hz a 630 Hz).

Palavras-chave: Fonoaudiologia; audiometria; cabine acústica; ruído; medição.

1. Introdução

A Audiologia é um dos ramos da ciência que se preocupa em avaliar, diagnosticar e prevenir problemas auditivos nos seres humanos [1]. No Brasil tem sido objeto de estudo de profissionais da área da saúde, como médicos e fonoaudiólogos que atuam na área dos distúrbios da comunicação, e de profissionais de outras ciências, como físicos e engenheiros, que se preocupam com a normatização e construção dos equipamentos utilizados nas mensurações da audição.

Para atuar na avaliação da audição e estabelecer o diagnóstico audiológico, tanto médicos como fonoaudiólogos lançam mão de exames auditivos, dentre eles a audiometria tonal limiar.

Por audiometria tonal limiar entende-se o exame subjetivo que determina o nível mínimo de audição de uma pessoa, e se houver perda auditiva, caracteriza o tipo, o grau e a configuração da mesma [2,3].

Para determinar estas características os profissionais avaliam a audição do indivíduo sob teste de duas maneiras: utilizando fones

supra-aurais, que determinam os limiares auditivos tonais por via aérea; e utilizando um vibrador ósseo que é colocado sobre o mastóide, e que possibilita a obtenção dos limiares tonais por via óssea [1]. Para coletar estes limiares o profissional necessita de um audiômetro devidamente ajustado e calibrado e uma cabine acústica que atenua o ruído externo.

A cabine acústica, assim como o audiômetro, devem ser avaliados periodicamente, com vistas a manter a qualidade do exame audiométrico e evitar que o ruído externo interfira na coleta de dados gerando laudos audiológicos inadequados [3].

De acordo com a ISO 8253-1 [4], para se determinar o limiar de audição de um indivíduo em 0 dBNA, os níveis de ruído no ambiente onde ocorre a avaliação devem ser controlados. A norma estabelece, portanto, os níveis máximos (L_{max}) de pressão sonora permitidos para o ruído ambiente na cabine audiométrica com vistas a atingir este objetivo.

Em 2003, preocupados com as condições das cabines audiométricas utilizadas pelos fonoaudiólogos em todo o Brasil, os

Conselhos de Fonoaudiologia publicaram a resolução CFFa 296/2003 [5]. De acordo com esta resolução, era dever do fonoaudiólogo realizar a medição de níveis de pressão sonora nas cabines e, havendo irregularidades, caberia ao profissional a sua adequação. Esta resolução se baseou em estudos desenvolvidos pelo Grupo de Trabalho (GT3), da Comissão de Eletroacústica integrante do Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica Iluminação e Telecomunicações (COBEI) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que na época era composta por membros de entidades de classe, como Conselhos de Fonoaudiologia, Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia (SBFa), Academia Brasileira de Audiologia (ABA), representantes do Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) e outros interessados. O GT3 estudava e traduzia, na época, a ISO 8253-1, os estudos avançaram e em 2009 foi publicada a resolução CFFa 364/2009 [6], atualmente em vigor, que determina que a cabine deve atender às especificações da ISO 8253-1, bem como, que cabe ao fonoaudiólogo manter a cabine sempre dentro destas especificações.

Em 2010 os Conselhos de Fonoaudiologia se instrumentalizaram e capacitaram para que, durante as visitas de fiscalização, possam avaliar as cabines audiométricas dos fonoaudiólogos inscritos, sendo que, nos Estados do Paraná e Santa Catarina, esta tarefa é da competência do Conselho Regional de Fonoaudiologia - 3ª Região (CREFONO 3).

Durante as visitas de fiscalização promovidas pelo CREFONO 3 [7] verificou-se que muitos certificados de medição de ruído de fundo em cabines estavam em desacordo com as normas vigentes. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi analisar a qualidade do ambiente sonoro em cabines fiscalizadas na jurisdição do CREFONO 3, à luz da ISO 8253-1.

2. Material e Método

Este estudo foi realizado a partir de convênio firmado entre o Programa de Mestrado e

Doutorado em Distúrbios da Comunicação da Universidade Tuiuti do Paraná e o CREFONO 3.

Foram utilizados dados que compõem o acervo da Comissão de Orientação e Fiscalização do CREFONO 3 e a amostra foi composta por 25 cabines audiométricas desmontáveis instaladas no estado do Paraná.

A seleção das cabines foi aleatória. As primeiras 25 cabines desmontáveis identificadas pelo fiscal do CREFONO 3, neste caso o examinador, foram incluídas neste estudo.

Utilizou-se o medidor de nível de pressão sonora Bruel&Kjaer modelo 2150 equipado com um microfone modelo 4144 do mesmo fabricante.

O método utilizado foi o de medição direta, em conformidade com a Recomendação CFFa 11/2010 [8], ou seja:

- a) utilizar medidor de nível de pressão sonora classe 1;
- b) deixar o local de teste configurado de acordo com sua utilização rotineira;
- c) utilizar três posições fixas de microfone distribuídas em uma esfera de raio de 0,2 m, centrada no ponto de referência, a uma altura de 1,20 m, direcionado para a porta;
- d) realizar medições com ponderação em frequência linear utilizando-se filtros de bandas de 1/3 de oitava centradas nas frequências normalizadas de 31,5 Hz a 8000 Hz;
- e) realizar as medições em um período de no mínimo 60 segundos.

Finalizada a medição o examinador anotou em planilha eletrônica os valores de L_{max} e L_{eq} obtidos nas seguintes frequências: 31.5 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz, 1600 Hz, 2000 Hz, 2500 Hz, 3150 Hz, 4000 Hz, 5000 Hz, 6300 Hz e 8000 Hz. A incerteza de medição estimada foi de 5 dB, o que permite um incremento de 8 dB nos níveis máximos

permitidos. O examinador também registrou o tempo de uso da cabine (em meses), o local onde a mesma estava instalada e o número de acessos externos existentes na sala de teste.

Considerando que a ISO 8253-1 determina que os valores registrados devem ser os de L_{max}, procedeu-se as seguintes análises: se a cabine avaliada atende a norma; em que frequências isto acontece; e como se comporta o Leq destas cabines.

3. Resultados

Das 25 cabines avaliadas, 80% foi reprovada na avaliação, pois os valores de L_{max} ultrapassaram o recomendado pela norma ISO 8253/1, principalmente no que se refere às baixas frequências (31,5 Hz a 630 Hz). As cabines em que os valores de L_{max} se mantiveram dentro dos limites aceitáveis são as de número 1, 7, 13, 15 e 24.

A tabela 1 mostra o número de cabines em que o L_{max} permitido foi ultrapassado, por frequência e o gráfico 1 destaca a faixa de frequências em que ocorre o problema.

Tabela 1: Número de inadequações por frequência

Frequência (Hz)	Número de cabines em que o L _{max} permitido foi ultrapassado
31,5	2
40	0
50	1
63	3
80	4
100	5
125	1
160	6
200	19
250	12
315	9
400	10
500	4
630	2

800	0
1000	0
1250	0
1600	0
2500	0
3150	0
4000	0
5000	0
6300	0
8000	0

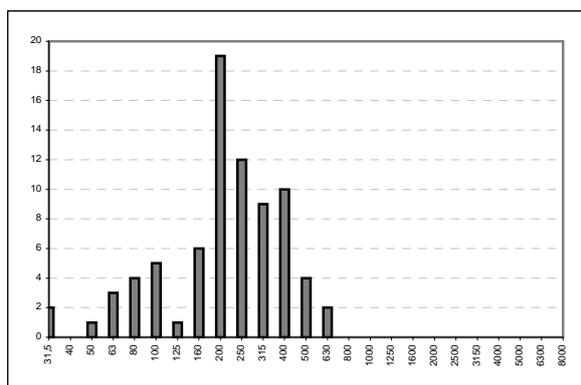


GRÁFICO 1 – Registro de inadequações das cabines por frequência (Hz)

A tabela 2 mostra o número de acessos externos do ambiente de teste, como portas e janelas que configuram-se como áreas de passagem de som do ambiente externo para o ambiente onde a cabine estava instalada, bem como o tempo de uso e sua mobilidade.

Tabela 2: Caracterização da amostra segundo número de acessos na sala de teste, tempo de uso da cabine e mobilidade

Cabine	Número de acessos externos	Tempo de uso da cabine em meses	Mobilidade
1	1	14	Fixa
2	1	24	Móvel
3	1	27	Móvel
4	2	32	Fixa
5	1	12	Móvel
6	1	18	Móvel

7	1	18	Fixa
8	2	27	Móvel
9	2	42	Móvel
10	1	35	Móvel
11	1	36	Fixa
12	2	12	Móvel
13	1	18	Fixa
14	1	24	Fixa
15	1	48	Fixa
16	2	36	Móvel
17	1	36	Fixa
18	1	14	Móvel
19	2	24	Fixa
20	2	48	Móvel
21	2	12	Móvel
22	1	36	Fixa
23	1	48	Móvel
24	1	18	Fixa
25	1	48	Móvel

Analisou-se a diferença entre L_{max} e L_{eq} em todas as frequências para todas as cabines. Verificou-se que ela variou de 1 dB até 24 dB, sendo que as maiores diferenças registradas entre L_{max} e L_{eq} fornece um indicativo sobre a presença de eventos de curta duração no ambiente de teste, ou seja, impactos por exemplo.

4. Discussão

As cabines acústicas devem atender a duas funções: isolar os sons externos e minimizar as interferências de ondas sonoras geradas no interior das mesmas [9]. Normalmente o que se observa nas medições realizadas, é que as cabines pecam por não atenuarem o ruído externo. Caso isto ocorra, os sons ouvidos pelo indivíduo sob teste poderão ser mascarados pelo ruído externo [10], o que gera redução dos limiares auditivos e, conseqüentemente, exames audiométricos com laudos inadequados. Neste estudo, verificou-se que 80% das cabines que compuseram a amostra foram reprovadas na avaliação, ou seja, estavam fora dos critérios estabelecidos e, portanto, não atendiam às condições básicas necessárias para realização de exames audiométricos.

Segundo literatura consultada [2] uma cabine audiométrica perde sua condição de atenuar ruídos por diferentes motivos: desgaste de peças de encaixe, ressecamento das borrachas da porta e janela, orifícios de passagem dos cabos mal vedados, mudança de local de instalação, falta de manutenção, tempo de uso. Além disto, no caso de cabines desmontáveis, a prática revela que a montagem e desmontagem das mesmas acaba por danificar peças e encaixes, o que gera fendas por onde pode passar o som indesejado.

Das cinco cabines que foram aprovadas, todas possuem apenas um acesso à sala de teste, o que reduz a possibilidade de ruído externo interferindo no ambiente de teste; apesar de móveis, as cabines são utilizadas em apenas um ambiente de teste, portanto foram consideradas fixas; o tempo de uso variou de 14 meses a mais de 48 meses. Todos estes fatores concorrem para que a qualidade de atenuação das mesmas seja boa.

Com relação às demais cabines, ou seja, as 20 (80%) que reprovaram na avaliação, verificamos o que segue:

Considerando-se que a incerteza de medição foi de 5 dB, verificou-se que os problemas ocorrem majoritariamente na faixa de 63 Hz a 630 Hz, conforme demonstrado na tabela 1. Este comportamento é previsível, posto que as cabines desmontáveis pecam por falta de massa, o que concorre para menor atenuação de baixas frequências [9]. As cabines desmontáveis avaliadas por este estudo são leves, e portanto, possuem menos massa, o que pode ser a causa das inadequações observadas em baixas frequências.

Observou-se, ainda, que 60% das cabines reprovadas estão instaladas em salas de teste que possuem dois acessos externos. Nas salas de teste onde há vários acessos externos é comum a entrada de sons indesejados, especialmente os de impacto, provenientes de outros ambientes (rua, corredor, outras salas de atendimento). Considerando-se que, quando se trata de ambientes limitados, a propagação da onda sonora pode sofrer influência de

fenômenos como reflexão, refração, difração e absorção [11], é de se supor que a quantidade de massa das cabines desmontáveis não é suficiente para fazer o isolamento necessário.

Com relação ao tempo de uso, 60% tem mais de 32 meses. Com o passar do tempo, as cabines desmontáveis, que em geral são móveis, podem apresentar vazamento de som, que passa por fendas nas junções e nas portas, tornando-as ineficientes nas altas frequências. Manutenções constantes em cabines que estão no mercado há mais tempo garantem seu bom funcionamento, sendo que o Conselho Federal de Fonoaudiologia determina que anualmente esta verificação aconteça [6].

73% das cabines reprovadas são efetivamente móveis, ou seja, são transportadas com frequência para outros ambientes de teste, pois os profissionais atendem empresas e indústrias que necessitam avaliar funcionários periodicamente, e a legislação prevê a realização do exame em ambiente silencioso [12]. O ideal é que, sempre que uma cabine é montada em um novo ambiente de teste, novas medições sejam realizadas com vistas a garantir os níveis adequados de atenuação.

É importante salientar que este estudo não verificou as luminárias utilizadas no interior das cabines, pois algumas apresentam componentes tonais na faixa de frequências em torno de 200 Hz. Fica aqui registrado um limite do trabalho que deve ser investigado futuramente, em novos estudos.

5. Considerações finais

Este estudo permitiu verificar que o número de cabines audiométricas utilizadas no estado do Paraná, em desacordo com a legislação vigente, é elevado, o que pode comprometer a qualidade dos exames audiológicos realizados.

É de grande importância sensibilizar os profissionais que realizam as avaliações, para a necessidade de avaliação constante das cabines e adequação das mesmas às normas vigentes.

Os encontros promovidos pelo GT3 sempre demonstraram que os vários atores que se ocupam das questões audiológicas são importantes e podem contribuir para o desenvolvimento de serviços audiológicos de qualidade.

Conselhos de classe e cursos de formação, seja em nível de graduação ou pós-graduação, de fonoaudiólogos e médicos especialistas, devem orientar sobre a importância da avaliação das condições ambientais das salas de teste audiológico bem como a necessidade de calibração dos equipamentos utilizados.

As indústrias que fabricam cabines audiológicas devem se preocupar em desenvolver equipamentos de qualidade.

Incrementar o serviço de fiscalização é um bom instrumento capaz de sensibilizar a classe.

Por fim, a colaboração de cientistas e técnicos nestas questões é fundamental, pois grupos de estudo interdisciplinares promovem o crescimento intelectual e principalmente colaboram para o desenvolvimento científico.

Referências

- [1] Musiek, F.E.; Rintelmann, W.F. *Perspectivas atuais em avaliação auditiva*. São Paulo: Manole, 2002.
- [2] Russo, I.C.P.; Santos, T.M.M. *A prática da udiologia clínica*. São Paulo: Cortez, 2005.
- [3] Conselho Federal de Fonoaudiologia. *Audiometria Tonal Limiar, logoaudiometria e medidas de imitância acústica*. Brasília: CFFa, 2009.
- [4] ISO 8253-1:1989: *Acoustics – Audiometric test methods – part 1: basic pure tone air and bone conduction threshold audiometry*.
- [5] Conselho Federal de Fonoaudiologia. *Resolução 296/03. Dispõe sobre calibração de equipamentos audiológicos e dá outras providências*. Brasília: CFFa, 2003.
- [6] Conselho Federal de Fonoaudiologia. *Resolução 364/09. Dispõe sobre o nível de pressão sonora das cabinas/salas de teste audiológicos*. Brasília: CFFa, 2009.
- [7] Conselho Regional de Fonoaudiologia. *Banco de dados da Comissão de Orientação e Fiscalização*. Curitiba: CREFONO 3, 2012.

[8] Conselho Federal de Fonoaudiologia. *Ambiente acústico em cabina/sala de teste*. Brasília: CFFa, 2010.

[9] Russo, I.C.P. *Acústica e psicoacústica aplicadas à Fonoaudiologia*. São Paulo: Lovise, 1993.

[10] Silva, P. *Acústica arquitetônica*. Belo Horizonte: EDTAL, 2005.

[11] Menezes, P.L; Neto, S.C; Motta, M.A. *Biofísica da Audição*. São Paulo: Lovise, 2005.

[12] Ministério do Trabalho e do Emprego. *Portaria 19 de 9 de abril de 1998*. Brasília: Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho, 1998.

Representação acústica de material absorvedor no domínio do tempo utilizando filtros de resposta ao impulso finito na modelagem discreta de Huygens

de Carvalho, R.S.T.*; Cordioli, J.A.†

*Laboratório de Vibrações e Acústica, UFSC, Florianópolis, SC, renato@lva.ufsc.br

†Laboratório de Vibrações e Acústica, UFSC, Florianópolis, SC, renato@lva.ufsc.br

Resumo

Nos últimos anos renovou-se o interesse em métodos numéricos no domínio do tempo em vista de aplicações como síntese sonora e da necessidade de se obter a resposta impulsiva de sistemas acústicos. A Modelagem Discreta de Huygens (DHM) é um dos métodos disponíveis e que oferece determinadas características interessantes, tais como implementação computacional relativamente simples e baixo custo computacional. Apesar de o método ter sido largamente utilizado no campo do eletromagnetismo, sua aplicação em acústica ainda se encontra numa condição limitada, especialmente em relação à descrição adequada de materiais de absorção nas fronteiras do domínio analisado. O principal objetivo deste artigo é mostrar a aplicabilidade dos filtros FIR - *Finite Impulse Response* na representação de materiais absorvedores no método DHM, sem degradar significativamente o seu desempenho computacional. Neste trabalho, o DHM foi utilizado para obter indiretamente as funções de resposta em frequência de uma cavidade acústica, com e sem a presença de materiais de absorção. Os resultados numéricos e os tempos computacionais foram comparados com modelos elaborados em Elementos Finitos (FE). Observou-se excelente concordância entre os métodos, com grande vantagem para o método DHM em termos do custo computacional.

Palavras-chave: Modelagem Discreta de Huygens, *Finite Impulse Response*, Elementos Finitos.

1. Introdução

Em 1690, Huygens em seu Tratado da Luz [1] propôs uma teoria na qual considera a luz como uma onda, o que permite que a posição de uma frente de onda em um tempo futuro possa ser prevista baseada em sua posição atual. Huygens estabeleceu que cada ponto de uma frente de onda pode ser considerada como o centro de uma perturbação secundária capaz de gerar novas pequenas ondulações. A frente de onda em qualquer instante futuro pode ser considerada como a superposição destas pequenas ondulações mencionadas. Este conceito físico de propagação pode ser implementado computacionalmente, considerando o tempo e o espaço no domínio discreto. A primeira forma discretizada do modelo físico de Huygens foi concebida com o objetivo de simular a propagação de ondas para casos bidimensionais em campos eletromagnéticos [2]. A fim de proporcionar a base teórica, o método foi originalmente proposto utilizando conceitos específicos

da teoria da linha de transmissão. Entretanto, o método tem sido utilizado em outras áreas de engenharia, levando ao desenvolvimento de novas abordagens teóricas. Uma abordagem relativamente nova, denominada de modelagem discreta de Huygens [3], foi concebida com o foco em aplicações na área de acústica. Este nome refere-se diretamente a uma forma discretizada do Princípio de Huygens. Tal como afirmado por [3], o método aplicado é análogo à versão original publicada por Johns e Beurle [2], conhecida como Método das Matrizes de Linha de Transmissão (TLM). Entretanto, diferentemente dos métodos tradicionais, tais como diferenças finitas e elementos finitos, em que um procedimento de discretização é aplicado ao modelo matemático da equação da onda [4], o DHM pode ser considerado como uma abordagem mais diretamente ligada a física do problema, uma vez que não envolve a representação do problema por uma equação diferencial [5]. A ideia principal consiste em obter diretamente equações algébricas

em um domínio discretizado, com base nas leis de conservação e continuidade da física [4-9], tais como conservação da massa; conservação da quantidade de movimento e continuidade de campo de pressão e velocidade. No DHM, o domínio analisado é dividido em subdomínios, a fim de aplicar individualmente as leis mencionadas. Na abordagem acústica, as unidades básicas ou nós da malha são formados a partir de cruzamentos de tubos virtuais. Deste procedimento, obtém-se o chamado nó DHM com um determinado número de ramos e uma região de descontinuidade de impedância acústica localizada, gerada pelo cruzamento dos ramos, definindo o volume de controle. A malha DHM é obtida ligando os ramos do nó analisado com os ramos dos nós adjacentes. Estes ramos exercem a função de uma guia de onda e a propagação ocorre quando um sinal incidente desloca-se para o centro do nó através de um dos ramos e, seguindo os princípios de conservação, espalha-se pelos ramos deste nó. O pulso desloca-se para os nós adjacentes e, no instante de tempo seguinte, soma-se ao pulso proveniente de outras regiões da malha. Deve-se ressaltar que o método DHM demonstra excelente desempenho computacional, especialmente quando comparado aos métodos numéricos tradicionais, como FEM e BEM [10]. Outro aspecto diz respeito as fronteiras acústicas que, geralmente, possuem comportamento acústico dependente da frequência. Isto significa que a onda refletida difere em termos de fase e amplitude em relação à onda incidente para cada frequência analisada [11]. Este fato é especialmente importante e um aspecto particular da teoria DHM que ainda não está adequadamente desenvolvido. A abordagem mais simples seria a de transformar os valores conhecidos de impedância do domínio da frequência para o domínio do tempo, utilizando todos os coeficientes da resposta impulsiva do sistema analisado [12]. No entanto, esta abordagem resulta em um custo computacional proibitivo [10]. Em função desta dificuldade, muitos autores optam por utilizar um valor único para o fator de reflexão na representação da condição de contorno em simulações DHM [3], o que limita a aplicação para materiais não dispersivos ou independentes da frequência.

Diferentes tentativas para modelar os materiais dispersivos no domínio do tempo podem ser encontradas na literatura [12-15]. Em [12], um ajuste polinomial foi utilizado para modelar a impedância no domínio de frequência, enquanto que em [13], foi adotada uma aproximação da impedância como a soma de sistemas lineares. Em [14], coeficientes FIR foram utilizados para modelar a absorção atmosférica. A abordagem adotada em [15] conduziu a um método para a condição fronteira aplicado em diferenças finitas, na qual dois tipos possíveis de fronteira são considerados, isto é, comportamento tipo mola e tipo massa. Em resumo, o fator de reflexão de um material pode assumir um único valor, o que permite a análise de uma única frequência, ou de materiais não dispersivos, ou mesmo um conjunto de coeficientes relacionados com a resposta ao impulso do material. O último caso permite uma análise multifrequencial em uma única rodada de simulação. Assim, um tipo de resposta ao impulso truncada deve ser obtida, de modo a determinar a forma como o material de absorção se comporta no domínio do tempo. Este objetivo foi atingido neste trabalho de uma forma computacionalmente eficiente utilizando coeficientes de um filtro digital FIR. Além disso, realiza-se também a derivação passo a passo da matriz de espalhamento para um meio homogêneo, não dissipativo e anisotrópico, uma vez que mesmo em publicações de referência como em [3] e [5], determinados aspectos específicos não são detalhados, tais como os pressupostos físicos aplicados e a derivação da fórmula para o cálculo da velocidade de partícula.

2. Conceitos Fundamentais

Conforme proposto por Huygens [1], a propagação da frente de onda pode ser representada pela superposição de infinitas fontes pontuais, cada uma radiando pequenas frentes de onda esféricas, tal como ilustrado na Fig. 1. A luz proveniente do ponto A se expande em uma frente de onda inicial, na qual cada ponto desta frente se comporta como uma nova fonte de onda luminosa. As fontes secundárias (b, b, b), partindo da frente de onda no instante t_1 , formam um conjunto de pequenas ondulações que formarão uma nova

frente de onda no instante t_2 . Novamente fontes terciárias (c, c, c, \dots) darão origem a pequenas ondulações que formarão uma nova frente de onda e, assim, sucessivamente. Através deste modelo físico de propagação é possível prever uma posição futura da frente de onda a partir de sua posição atual.

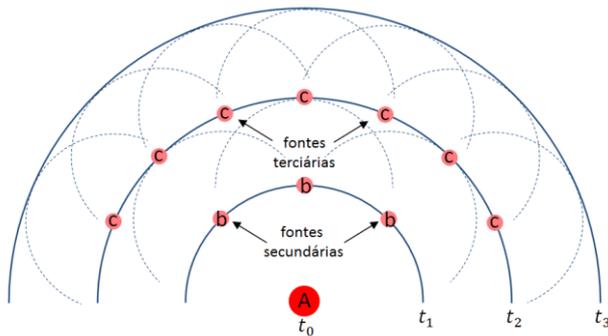


Fig. 1 - Representação do modelo físico de Huygens

Encontra-se na literatura alguns trabalhos com tratamentos matemáticos para o princípio de Huygens, buscando analogias com a solução de Green para a equação da onda. Entretanto, por não ser de fundamental importância para a compreensão e aplicação numérica do princípio, este aspecto não será explorado ao longo deste artigo. Recomendam-se aos interessados os seguintes trabalhos de referência: [16-20]. A ideia básica da modelagem discreta de Huygens consiste em quebrar o domínio contínuo mostrado na Fig. 1 em subdomínios, a fim de aplicar o Princípio de Huygens e as leis de conservação individualmente. A Fig. 2 ilustra uma sequência de propagação do sinal em uma malha bidimensional resultante da divisão do domínio contínuo em elementos discretos (nós). Como consequência, uma rede ou matriz de nós é formada, separados pelas distâncias Δx e Δy nas direções x e y , respectivamente, descrevendo assim o espaço discretizado e possibilitando o cálculo das variáveis associadas ao campo em cada nó da malha em intervalos de tempo discretos $t_d = k\Delta t$. Os valores destas variáveis em pontos intermediários aos nós podem ser obtidos através de diferentes técnicas matemáticas de interpolação. Diante das informações já apresentadas, pode-se resumir o

mecanismo de propagação do sinal na malha DHM em três passos principais, a citar: excitação ou incidência de um pulso em um nó arbitrário; espalhamento desta energia incidente e; conexão com os ramos dos nós adjacentes. A cada passo $k\Delta t$, os pulsos viajam do centro de um nó até os centros dos nós imediatamente adjacentes, através dos ramos que os conectam. Quando um pulso atinge um determinado nó, é chamado de pulso incidente, sendo que uma parcela da sua energia é distribuída para os outros ramos deste nó, enquanto a parcela restante é refletida para o nó que deu origem ao pulso incidente. Os sinais espalhados tornam-se sinais incidentes em nós adjacentes no próximo tempo discreto $(k + 1)\Delta t$. Este processo se repete até que o tempo total de simulação seja atingido.

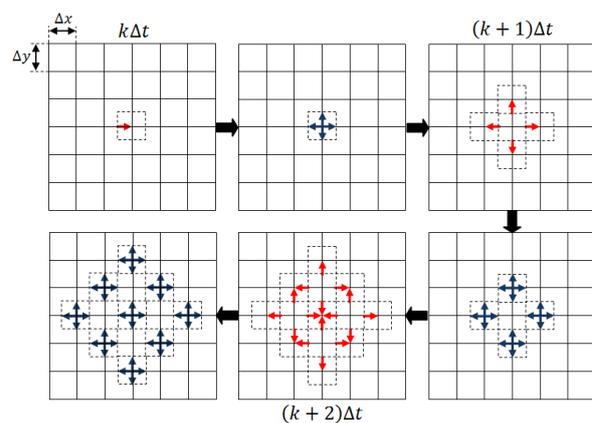


Fig. 2 - Exemplo de uma sequência de propagação bidimensional.

O ponto-chave do método consiste no cálculo dos sinais espalhados através da matriz de espalhamento. Em eletromagnetismo, a matriz de espalhamento é geralmente derivada utilizando leis e conceitos da teoria de linha de transmissão, que contém implicitamente a conservação de carga e energia. Uma analogia direta pode ser aplicada em acústica, entretanto, no presente estudo, uma abordagem com enfoque direto nas leis de conservação é aplicada. É válido lembrar que o mesmo procedimento pode ser extrapolado para casos tridimensionais ou topologias que considerem as perdas, heterogeneidade e comportamento anisotrópico do meio analisado. Na seguinte de-

casos tridimensionais ou topologias que considerem as perdas, heterogeneidade e comportamento anisotrópico do meio analisado. Na seguinte derivação, uma onda acústica é considerada propagando-se através de guias de onda e junções, considerando as seguintes premissas físicas: o fluido é homogêneo, não viscoso, isotrópico e sem condutividade térmica; o fluxo é uniforme quando ondas planas acústicas cruzam a fronteira do volume de controle; não há fonte de massa ou energia dentro do volume de controle e a força gravitacional é negligenciada. Com o objetivo de facilitar a exposição matemática deste conceito, será considerado um nó sem perdas bidimensional, com a dimensão z colapsada. Este nó é formado por quatro ramificações ortogonais denominadas de ramos ou portas, com impedâncias acústicas $Z_1; Z_2; Z_3; Z_4$ e áreas da seção transversal $S_1; S_2; S_3; S_4$ respectivamente. Na região compartilhada ou junção entre os ramos, é definido um volume de controle V , finito, fixo e indeformável, tal qual ilustrado pela Fig. 3. Considera-se que para cada um dos r ramos, sendo $r = 1 : 4$, há uma onda ou sinal acústico incidente p_r^i . Para cada onda incidente nos ramos do nó, geram-se ondas espalhadas, uma refletida no ramo de incidência e as outras transmitidas para os demais ramos do nó. A soma de todas as pressões espalhadas em cada ramo r , resulta nas pressões espalhadas totais, denominadas p_r^s .

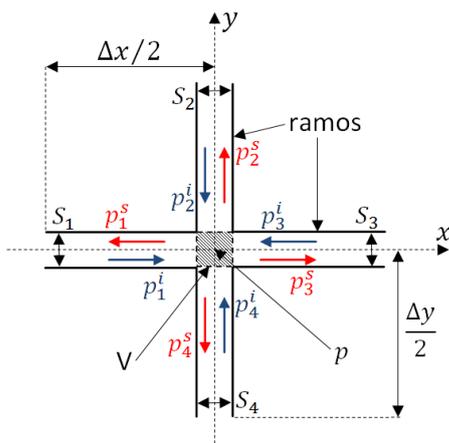


Fig. 3 - Ondas incidentes e espalhadas em um nó 2D sem perdas.

Primeiramente, consideram-se ondas planas conhecidas e harmônicas incidentes $p_r^i(x, t_d)$ em um nó arbitrário:

$$\begin{aligned} p_1^i(x, t_d) &= P_1^i \exp[j(\kappa x - \omega t_d)], \\ p_2^i(x, t_d) &= P_2^i \exp[j(-\kappa y - \omega t_d)], \\ p_3^i(y, t_d) &= P_3^i \exp[j(-\kappa x - \omega t_d)], \\ p_4^i(y, t_d) &= P_4^i \exp[j(\kappa y - \omega t_d)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Ao encontrar uma mudança de impedância acústica na junção dos ramos, as ondas incidentes em cada ramo r resultam em quatro ondas de pressão espalhadas $p_{r1}^s, p_{r2}^s, p_{r3}^s, p_{r4}^s$. Uma delas é refletida pelo mesmo ramo da onda incidente e as demais transmitidas para os outros ramos. A soma de todas as ondas espalhadas em cada ramo devido à onda incidente p_r^i resulta nos sinais espalhados p_r^s , dados por:

$$\begin{aligned} p_1^s(x, t_d) &= P_1^s \exp[j(-\kappa x - \omega t_d + \phi)], \\ p_2^s(x, t_d) &= P_2^s \exp[j(\kappa y - \omega t_d + \phi)], \\ p_3^s(y, t_d) &= P_3^s \exp[j(\kappa x - \omega t_d + \phi)], \\ p_4^s(y, t_d) &= P_4^s \exp[j(-\kappa y - \omega t_d + \phi)], \end{aligned} \quad (2)$$

nas quais P_r^i e P_r^s são, respectivamente, as amplitudes das ondas incidentes e espalhadas em um dado ramo r , $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária, $\kappa = \omega/c$ é o número de onda, $t_d = k\Delta t$ é o tempo discreto, ω é a frequência angular, c é a velocidade da onda; ϕ é o ângulo de fase e x e y são as coordenadas Cartesianas. A matriz de espalhamento pode ser obtida pela aplicação das seguintes leis fundamentais da física no volume de controle [4, 5, 13] em um dado instante discreto $k\Delta t$:

Conservação da massa: o fluxo de massa líquida através da superfície de controle definida no centro de nó ($x = 0, y = 0$) deve ser igual a zero, o que leva a

$$\rho [(U_1^i + U_1^s) + (U_2^i + U_2^s) + (U_3^i + U_3^s) + (U_4^i + U_4^s)] = 0, \quad (3)$$

na qual ρ é a densidade e U_r^i e U_r^s são as velocidades de volume das ondas incidente e espalhadas em cada ramo. Uma vez que a impedância acústica pode ser definida como $z = p/U = p/uS = Z/S$, reescreve-se a Eq. (3) em termos das ondas de pressão sonora e impedâncias acústicas específicas, tal que:

$$\rho \left[S_1 \left(\frac{p_1^i}{Z_1} - \frac{p_1^s}{Z_1} \right) + S_2 \left(\frac{p_2^i}{Z_2} - \frac{p_2^s}{Z_2} \right) + S_3 \left(\frac{p_3^i}{Z_3} - \frac{p_3^s}{Z_3} \right) + S_4 \left(\frac{p_4^i}{Z_4} - \frac{p_4^s}{Z_4} \right) \right] = 0. \quad (4)$$

Considerando que o nó sem perdas bidimensional tem características geométricas idênticas, o que implica em $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_g$, sendo g o índice que representa a guia de onda. Assim, a equação de conservação da massa simplifica-se para:

$$\frac{p_1^i - p_1^s}{Z_1} + \frac{p_2^i - p_2^s}{Z_2} + \frac{p_3^i - p_3^s}{Z_3} + \frac{p_4^i - p_4^s}{Z_4} = 0. \quad (5)$$

Continuidade do campo de pressão sonora: A pressão sonora p_n deve ser igual em todos os ramos na posição cartesiana $x = 0, y = 0$, tal que:

$$\begin{aligned} p_n &= p_1^i + p_1^s, \\ p_n &= p_2^i + p_2^s, \\ p_n &= p_3^i + p_3^s, \\ p_n &= p_4^i + p_4^s. \end{aligned} \quad (6)$$

Essas expressões são reorganizadas em termos de cada uma das ondas espalhadas desconhecidas. Iniciando pela onda espalhada p_1^s , obtém-se:

$$\begin{aligned} p_2^s &= p_1^i + p_1^s - p_2^i, \\ p_3^s &= p_1^i + p_1^s - p_3^i, \\ p_4^s &= p_1^i + p_1^s - p_4^i. \end{aligned} \quad (7)$$

Substituindo as Eqs. (1, 2, 7) na Eq. (5) e considerando a posição Cartesiana ($x = 0; y = 0$) e $\phi = 0$, a seguinte expressão em termos de amplitudes de pressão e admitância ($Y = 1/Z$) é obtida:

$$P_1^s = \frac{(Y_1 - Y_2 - Y_3 - Y_4)P_1^i + 2Y_2P_2^i + 2Y_3P_3^i + 2Y_4P_4^i}{(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)} \quad (8)$$

Considerando a condição de espalhamento isotrópico, na qual a admitância é idêntica em todos os ramos ($Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y_4 = Y_g$), obtém-se a primeira equação para um nó sem perdas bidimensional:

$$4P_1^s = -2P_1^i + 2P_2^i + 2P_3^i + 2P_4^i. \quad (9)$$

Esta expressão refere-se a onda espalhada em um dado ramo causada pelas ondas incidentes nos demais ramos. Aplicando-se o mesmo procedimento aos demais sinais espalhados (p_2^s, p_3^s, p_4^s), obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned} 4P_1^s &= -2P_1^i + 2P_2^i + 2P_3^i + 2P_4^i, \\ 4P_2^s &= +2P_1^i - 2P_2^i + 2P_3^i + 2P_4^i, \\ 4P_3^s &= +2P_1^i + 2P_2^i - 2P_3^i + 2P_4^i, \\ 4P_4^s &= +2P_1^i + 2P_2^i + 2P_3^i - 2P_4^i. \end{aligned} \quad (10)$$

Este conjunto de equações é válido para todos os nós da malha. Portanto, o sistema de equações pode ser representado na forma matricial:

$$\begin{matrix} n \\ \left\{ \begin{matrix} P_1^s \\ P_2^s \\ P_3^s \\ P_4^s \end{matrix} \right\} \\ k \end{matrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ \left\{ \begin{matrix} P_1^i \\ P_2^i \\ P_3^i \\ P_4^i \end{matrix} \right\} \\ k \end{matrix}, \quad (11)$$

ou

$$\begin{matrix} n \\ k \end{matrix} \mathbf{p}^s = \mathbf{S}_{k}^n \begin{matrix} n \\ k \end{matrix} \mathbf{p}^i, \quad (12)$$

termina se há perdas, mudanças de meio e consequentemente a velocidade de propagação, ou mesmo se o material apresenta comportamento não isotrópico. É válido lembrar que as mesmas expressões podem ser obtidas ao se realizarem os balanços de quantidade de movimento e energia carreada pela massa através do volume de controle, uma vez que todas as propriedades associadas a um fluido estão sujeitas aos princípios de conservação. Como consequência do princípio de continuidade de campo, a amplitude resultante de pressão ${}^n P$ no centro do nó é obtida pela soma da amplitude das ondas incidente e espalhadas em cada ramo. Desta forma, substituindo a Eq. (8) na Eq. (6), obtém-se

$${}^n P = \frac{(2{}^n P_1^i Y_1 + 2{}^n P_2^i Y_2 + 2{}^n P_3^i Y_3 + 2{}^n P_4^i Y_4)}{(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)} \quad (13)$$

A Eq. (13) pode ser simplificada e a pressão sonora no centro do nó fica

$${}^n P = \frac{{}^n P_1^i + {}^n P_2^i + {}^n P_3^i + {}^n P_4^i}{2} \quad (14)$$

Inspirado pela conservação do fluxo magnético [6] aplicada em eletromagnetismo, as componentes da velocidade de partícula em um dado nó n , em um determinado tempo discreto $k\Delta t$, são obtidas pela aplicação do princípio da conservação da quantidade de movimento nas direções x e y , resultando nas seguintes expressões:

$${}^n V_x \left(\sum_{i=1,3} \rho_i S_i \right) = \sum_{i=1,3} {}^n V_i \rho_i S_i = \frac{{}^n P_1^i - {}^n P_1^s}{Z_1} \rho_1 S_1 + \frac{{}^n P_3^s - {}^n P_3^i}{Z_3} \rho_3 S_3, \quad (15)$$

$${}^n V_y \left(\sum_{i=2,4} \rho_i S_i \right) = \sum_{i=2,4} {}^n V_i \rho_i S_i = \frac{{}^n P_2^s - {}^n P_2^i}{Z_2} \rho_2 S_2 + \frac{{}^n P_4^i - {}^n P_4^s}{Z_4} \rho_4 S_4. \quad (16)$$

Descrevendo o sinal espalhado em termos do sinal incidente utilizando a Eq. (10), bem como considerando a simplificações mencionadas anteriormente para os ramos, obtém-se

$${}^n V_x = \frac{{}^n P_1^i - {}^n P_3^i}{Z_g}, \quad (17)$$

$${}^n V_y = \frac{{}^n P_4^i - {}^n P_2^i}{Z_g}. \quad (18)$$

Finalmente, o seguinte conjunto de expressões é necessário para estabelecer as conexões e propagação do sinal acústico entre os nós:

$$\begin{aligned} {}^n P_1^i(x_d, y_d) &= {}^{n-1} P_3^s(x_d, y_d - 1), \\ {}^n P_2^i(x_d, y_d) &= {}^{n-1} P_4^s(x_d - 1, y_d), \\ {}^n P_3^i(x_d, y_d) &= {}^{n-1} P_1^s(x_d, y_d + 1), \\ {}^n P_4^i(x_d, y_d) &= {}^{n-1} P_2^s(x_d + 1, y_d), \end{aligned} \quad (19)$$

nas quais x_d e y_d são as posições discretas dos nós. Estas expressões são auxiliadas pela Fig. 4, que ilustra que cada um dos sinais espalhados em dado nó arbitrário n , em um passo de tempo anterior $(k-1)\Delta t$, se tornará um sinal incidente em seu nó adjacente no passo de tempo atual $k\Delta t$.

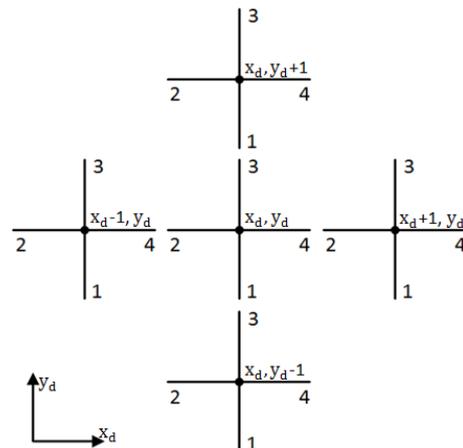


Fig. 4 - Posição cartesiana discretizada (x_d, y_d) de um nó arbitrário e seus adjacentes.

Vale lembrar que todas as expressões deduzidas para um nó sem perdas bidimensional podem ser derivadas para um nó genérico com um número

arbitrário de ramos, com perdas e comportamento anisotrópico, conforme algumas versões demonstradas em [3, 10, 13, 21]. Neste estudo em particular, utilizou-se um nó escalar tridimensional sem perdas [22] para a rede de nós interna a malha, o qual utiliza a equação de espalhamento

$$\begin{matrix} n \\ \left\{ \begin{matrix} P_1^S \\ P_2^S \\ P_3^S \\ P_4^S \\ P_5^S \\ P_6^S \end{matrix} \right\} \\ k \end{matrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -2 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -2 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -2 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -2 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & -2 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -2 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ \left\{ \begin{matrix} P_1^i \\ P_2^i \\ P_3^i \\ P_4^i \\ P_5^i \\ P_6^i \end{matrix} \right\} \\ k \end{matrix} \quad (20)$$

e para os nós localizados nas adjacências ao contorno da malha, o processo de espalhamento e conexão é descrito na próxima seção.

2.1. Implementação DHM para as condições de fronteira utilizando filtros FIR

Uma fronteira pode ser modelada de diferentes maneiras, dependendo do método numérico utilizado e da aplicação em questão. No caso do método DHM, as fronteiras são incorporadas no modelo a partir de valores de impedância de superfície Z_s ou fator de reflexão Γ_s no domínio do tempo, impostas as extremidades dos ramos dos nós adjacentes ao limite da fronteira, conforme ilustrado na Fig. 5. O sinal de pressão ${}_{k-1}p_3^s$, no instante $(k-1)$, segue na direção da fronteira após o espalhamento gerado pelo nó adjacente. Ao atingi-la, o mesmo é refletido na proporção definida pelo fator de reflexão Γ_s , resultando na pressão ${}_k p_3^i$. Este fator expressa uma razão entre as amplitudes das pressões refletida e incidente.

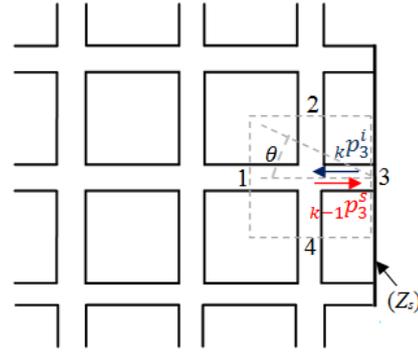


Fig. 5 - Impedância de superfície na fronteira da malha

Se considerarmos uma situação cuja incidência é aleatória, a impedância expressa a razão entre pressão e velocidade de partícula, assim como aplicando as condições de contorno, obtém-se o fator de reflexão para um dado ângulo de incidência θ [11]:

$$\Gamma_s(\theta) = \frac{p_s^r}{p_s^i} = \frac{Z_s \cos \theta - Z_g}{Z_s \cos \theta + Z_g} = \frac{{}_k p_3^i}{{}_{k-1} p_3^s} \quad (21)$$

nas quais Z_s e Z_g são, respectivamente, a impedância de superfície e a impedância da guia de onda. Entretanto, no modelo de impedância normalmente aplicado no método DHM, admite-se que o material da fronteira possui comportamento localmente reativo, ou seja, a componente normal da velocidade de partícula na fronteira depende apenas da pressão sonora em frente ao nó da superfície, e não da pressão nos nós adjacentes. Portanto, o comportamento reflexivo ou impedância independe do ângulo de incidência da onda e, assim, para uma incidência normal ($\theta = 0$) à superfície obtém-se:

$$\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_g}{Z_s + Z_g} \quad (22)$$

Desta forma, o processo de conexão com o momento seguinte é realizado utilizando a seguinte expressão:

$${}_k p^i = \Gamma_s ({}_{k-1}) p^s. \quad (23)$$

Para garantir o sincronismo dos pulsos da malha durante os processos de espalhamento e conexão, é importante que a impedância de superfície seja definida na malha em uma distância dos nós que garanta um intervalo de tempo fixo Δt . Considerando as fronteiras como sistemas ideais e estabelecendo uma analogia com a versão do método utilizado em estudos de eletromagnetismo, a impedância, o fator de reflexão e coeficiente de absorção podem assumir os seguintes valores extremos [4, 5, 7, 9, 11, 13]:

$Z_s \ll Z_g$; $\Gamma \rightarrow -1$; $\alpha \rightarrow 0$, modelando uma parede "macia" (*soft wall*) ou um condutor perfeito (curto-circuito) no caso do eletromagnetismo, resultando em ondas refletidas com fase oposta a onda incidente. ex.: interface água-ar;

$Z_s \gg Z_g$; $\Gamma \rightarrow 1$; $\alpha \rightarrow 0$, modelando uma parede rígida (*hard wall*) ou uma parede magnética (circuito aberto) no caso do eletromagnetismo, resultando em ondas refletidas em fase com a onda incidente. ex.: parede de concreto;

$Z_s = Z_g$; $\Gamma = 0$; $\alpha \rightarrow 1$, modelando a propagação de campos no espaço aberto (*free field*) ou o casamento de impedâncias, o que repercute em absorção total da onda incidente. ex.: câmara anecóica.

Os fatores de reflexão tanto podem assumir um valor fixo, permitindo a análise de uma única frequência ou múltiplas frequências se o material comportar-se como não dispersivo, quanto assumir um conjunto de valores relacionados com a resposta impulsiva do material. Este último modelo possibilita a análise no domínio do tempo quando o material pertencente à malha apresenta um comportamento dispersivo ou variável com a frequência. A alternativa direta é transformar valores já conhecidos da impedância de superfície no domínio da frequência para valores de fator de reflexão e posteriormente para o domínio do tempo utilizando a transformada inversa de Fourier. Entretanto, em virtude do grande número de coeficientes, esta abordagem se mostra inviável

ao convoluir os dados de absorção com o sinal da onda incidente. Diante desta limitação computacional, para representar o material em um método numérico como o DHM, utiliza-se uma espécie de resposta impulsiva truncada, ou seja, com um número de coeficientes muito menor que a resposta impulsiva completa. Esta resposta truncada pode ser obtida e incluída no algoritmo através da utilização de um filtro FIR. O filtro digital FIR é caracterizado por uma equação a diferenças¹ ou resposta filtrada $y(k)$ resultante de uma combinação linear dos valores prévios e atuais do sinal de entrada $x(k)$. Em outras palavras, a saída resultante da passagem do sinal pelo filtro FIR digital genérico é dada por, uma convolução entre o sinal de entrada e os coeficientes do filtro², conforme:

$$y(k) = \sum_{i=0}^N h_i x(k-i), \quad (24)$$

na qual N é a ordem do filtro, $x(k)$ o sinal de entrada, $y(k)$ o sinal de saída e h_i os coeficientes do filtro. Fazendo uma analogia desta equação com os dados apresentados pela Fig. 5 e Equação (23), tem-se que o sinal de saída $y(k)$ representa o sinal refletido pela fronteira que se tornará a pressão sonora incidente ${}_k p_r^i$ em um nó adjacente e $x(k)$ representa a pressão sonora espalhada pelo nó ${}_{k-1} p_r^s$ no instante anterior. O fator de reflexão Γ neste caso é representado no domínio do tempo pelos $(N+1)$ coeficientes h_i do filtro FIR projetado. O algoritmo implementado é capaz de realizar esta operação para um conjunto qualquer de nós pertencentes à fronteira, representando a região onde existe um material com impedância variável na frequência, porém em uma simulação no domínio do tempo. Resultados obtidos pela implementação deste conceito podem ser verificados no Item 3. Os coeficientes FIR foram calculados utilizando o método dos mínimos quadrados. Os resultados obtidos com a aplicação deste conceito são discutidos na próxima seção.

¹ Equação utilizada em sinais digitais.

² Estes coeficientes podem ser obtidos de forma indireta através de diferentes técnicas matemáticas ou mesmo através de modelos concebidos diretamente no domínio do tempo..

3. Resultados Numéricos

3.1. Caracterização do Modelo

A fim de validar o método discreto de Huygens descrito na seção anterior, uma cavidade acústica foi simulada com e sem considerar um material acústico aplicado em sua fronteira superior. Em primeiro lugar, na Seção 3.2, um modelo analítico e um modelo de elementos finitos (abordagem direta) da cavidade sem absorção são utilizados para validar os resultados DHM. Nas Seções 3.3 e 3.4, quando se considera materiais acústicos, cinco das faces da cavidade são definidos como rígidas, enquanto que para uma face (superior), a condição de contorno é definida utilizando os valores de impedância complexa (FEM) e fator de reflexão (DHM). O sistema físico está ilustrado na Fig. 6 e detalhado na Tabela 3.1.

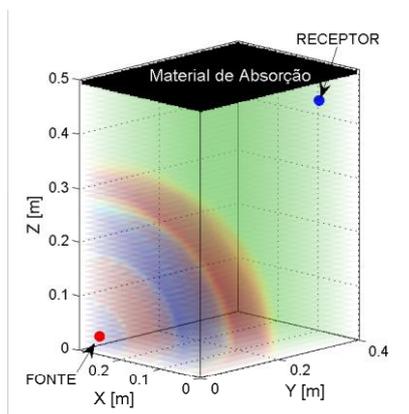


Fig. 6 - Sistema físico aplicado em FEM e DHM

Tabela 3.1 - Informações da Cavidade (FEM e DHM)

Parâmetros	Valores
Dimensões da Cavidade [m]	0,3 x 0,4 x 0,5
Dimensões do nó [m]	0,01 x 0,01 x 0,01
Número de nós	60.000 (30 x 40 x 50)
Posição da fonte [m]	S (0,03; 0,03; 0,03)
Posição do Receptor [m]	R (0,25; 0,35; 0,45)

Os parâmetros de simulação para todos os casos apresentados são obtidos através da definição da frequência de corte do problema analisado. Uma vez que esta informação é conhecida, a resolução espacial necessária pode ser calculada utilizando o critério $\Delta l \leq 0.1 v_g / f_c$ [2, 5, 6, 9], na qual f_c é a frequência de corte e $v_g = c\sqrt{3}$ é a velocidade da guia de onda [10][23][10, 23]. Finalmente, o intervalo de tempo adotado pode ser obtido utilizando a expressão $\Delta t = \Delta l / v_g$. A fonte monopolo (em vermelho - Fig. 6a) foi considerada em ambos os modelos e posicionada na coordenada S (0,03; 0,03; 0,03). No método DHM, a função impulso é utilizada como sinal de entrada, uma vez que esta fonte excita idealmente infinitas frequências do espectro. No entanto, em situações práticas, uma função sinc $x(t) = \text{sinc}(\pi f_c t)$ com frequência de corte f_c deve ser utilizada a fim de reduzir a influência do erro de *aliasing* na operação FFT (*Fast Fourier Transform*) para o cálculo da resposta em frequência $H(K)$, funcionando como um filtro passa-baixa. O receptor (em azul - Fig. 6a) foi colocado perto do canto oposto a fonte, coordenada R(0,25; 0,35; 0,45), procurando maximizar a intensidade dos modos acústicos. A partir da função de resposta ao impulso é possível obter por meio da FFT, as funções de transferência entre a fonte e o ponto receptor para o campo acústico gerado no interior da cavidade.

3.2. Cavidade Rígida

Com a finalidade de reforçar a validação do código DHM implementado, utilizou-se como referência um modelo FEM no domínio da frequência e um modelo analítico, considerando a cavidade com paredes rígidas. O modelo analítico baseia-se na expansão dos modos da cavidade conforme apresentado em [11, 24].

$$p(x, y, z, t) = \rho c^2 \hat{U} \sum_{i,j,k=0}^{I,J,K} \frac{\omega \Psi_{ijk}(x, y, z) \Psi_{ijk}(x_0, y_0, z_0)}{V_{ijk}(\omega^2 - \omega_{ijk}^2)} \cos(\omega t(25) + \phi - \pi/2),$$

na qual ρ e c são a densidade e velocidade do som, respectivamente, \hat{U} é a velocidade de volume, Ψ_{ijk} e $f_{ijk} = \omega_{ijk}/2\pi$ são as funções que definem as formas modais e frequências naturais, respectivamente, V_{ijk} é o volume modal e i, j, k são os índices modais em cada direção Cartesiana. Para as simulações, utilizaram-se os dados detalhados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros e resultados da simulação

Parâmetros	Valores
Tempo de simulação (t_s)	0,5 s
Passo de tempo (Δt)	$\cong 1,68 \times 10^{-5}$ s
Número de iterações	17.846
Passo de frequência (Δf)	2 Hz
Velocidade de volume (\hat{U})	$1e^{-5}$ m ³ /s
Tempo de processamento da CPU ^a	DHM $\cong 255$ s FEM $\cong 16.200$ s

a. Processador Intel Core (TM) i7 CPU @ 2.93 GHz 6 GB RAM, Windows 64 bits

Vale observar que o código implementado necessitou de 255 s para finalizar a simulação, aproximadamente 63 vezes mais rápido que a simulação em elementos finitos. A Fig. 7 ilustra os resultados para as respostas em frequência obtidas pelo método FEM (Comsol v4.3[®]), DHM (DHM3D) e utilizando o modelo analítico. Como consequência do tempo de simulação adotado, $t_s = 0,5$ s, o passo de frequência obtido após aplicação da transformada de Fourier é igual a $\Delta f = 2$ Hz. Observa-se que a discretização espectral conduz a diferenças de amplitude entre as curvas, especialmente na região das frequências de ressonância. Uma vez que a ressonância corresponde a um pico de amplitude, mesmo pequenos deslocamentos na frequência, podem resultar em diferenças significativas. Portanto, o aumento da resolução espectral tende a reduzir este erro.

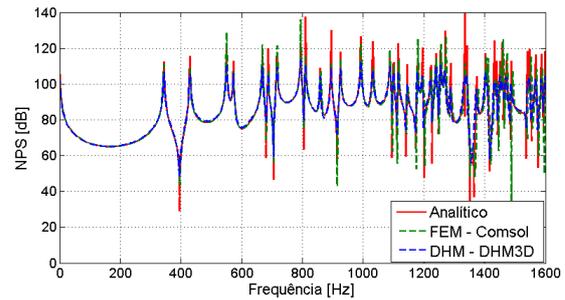
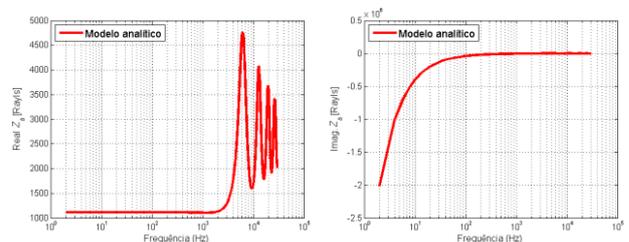


Fig. 7 - Resposta em frequência - Cavity Rígida

Nas próximas seções, dois tipos de material absorvedor sonoro (fictício e melamina) são utilizados para validar a representação das condições de contorno utilizando filtros FIR.

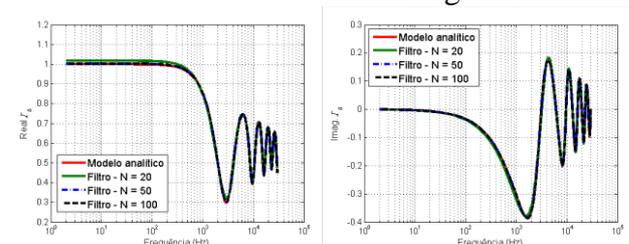
3.3. Filtro FIR – Material Fictício

Coefficientes FIR para um material fictício foram indiretamente obtidos a partir de dados calculados utilizando o modelo analítico no domínio da frequência apresentado em [25-26], considerando os seguintes parâmetros: tortuosidade 1,5, porosidade de 20%, resistividade ao fluxo de 100.000 N.s/m⁴ e espessura da amostra de 0,02 m. A partir destes valores, as partes reais e imaginárias da impedância superfície (Z_s) foram obtidos e aplicados diretamente na simulação em elementos finitos. Os valores do fator de reflexão (Γ_s) foram utilizados como dados de entrada no cálculo dos coeficientes no domínio de tempo, necessários para a simulação DHM.



a) Impedância - Parte Real

b) Impedância - Parte Imaginária



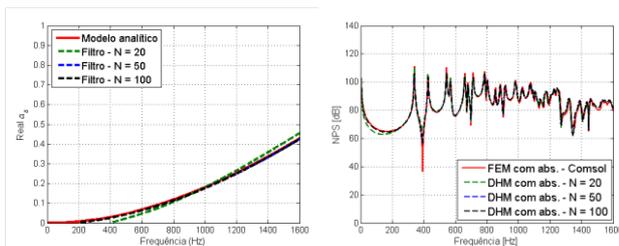
a) Parte Real

b) Parte Imaginária

- c) Fator de Reflexão - Parte Real d) Fator de Reflexão - Parte Imaginária

Fig. 8 - Impedância de superfície e fator de reflexão no domínio da frequência - Material Fictício

Os valores de referência (modelo analítico) para impedância complexa (Z_s) podem ser verificados na Fig. 8a e 8b. A convergência para o valor de referência do fator de reflexão complexo (Γ_s) e coeficiente de absorção (α_s) para três ordens de filtro diferentes ($N = 20$; $N = 50$; $N = 100$) estão ilustrados respectivamente nas Fig. 8c, 8d e Fig. 9a. Neste caso, observa-se que os erros mais significativos ocorrem apenas quando se utiliza um filtro de ordem $N = 20$. O impacto destes erros pode ser identificado no gráfico da Fig. 9b, que ilustra a resposta em frequência da cavidade obtida via FEM e via DHM para as três opções de ordem de filtro.



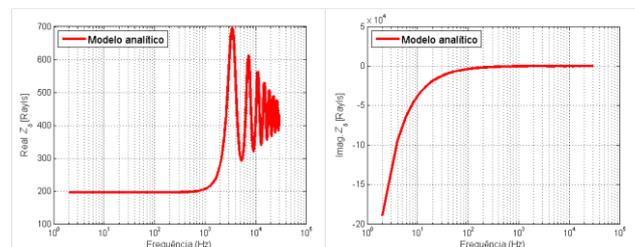
a) Coeficiente de absorção b) Resposta em frequência
Fig. 9 - Resultados após aplicação do material fictício

Em geral, tem-se um bom nível de concordância entre as curvas. Pequenos erros podem ser observados para frequências inferiores a 200 Hz, especialmente quando $N = 20$. Neste tipo de material, a utilização de um filtro com ordem 50 é suficiente para garantir uma boa precisão. Os resultados são dependentes de diferentes fatores, particularmente o tipo e a ordem do filtro, bem como a técnica matemática utilizada para calcular seus coeficientes. Se a curva de referência no domínio da frequência tem uma variação suave, pode-se esperar que os filtros de ordem relativamente baixa sejam capazes de representar o comportamento do material em uma simulação de domínio

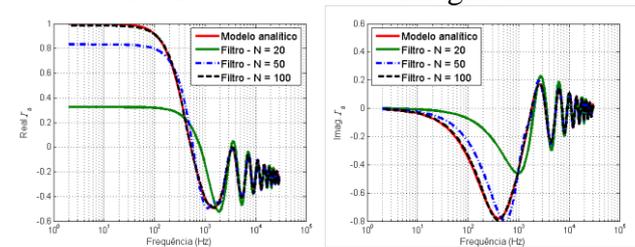
de tempo. A fim de tornar confirmar o procedimento adotado, outro material é analisado na seção seguinte.

3.4. Filtro FIR – Melamina

De forma análoga à seção anterior foram realizadas simulações considerando o material de absorção melamina, que é comumente utilizado em tratamentos acústicos. Neste caso, os parâmetros de entrada para obtenção da curva de referência foram estimados com base em dados experimentais [26]. Desta forma, utilizou-se: tortuosidade 1,0, porosidade de 99%, resistividade ao fluxo de 9.500 N.s/m^4 e espessura da amostra de $0,043 \text{ m}$. A curva de impedância complexa de referência (Z_s) pode ser verificada na Fig. 10a e 10b. A convergência para o valor de referência do fator de reflexão complexo (Γ_s) e coeficiente de absorção (α_s) para três ordens de filtro diferentes ($N = 20$; $N = 50$; $N = 100$) estão ilustrados respectivamente nas Fig. 10c, 10d e Fig. 11a.



a) Impedância - Parte Real b) Impedância - Parte Imaginária

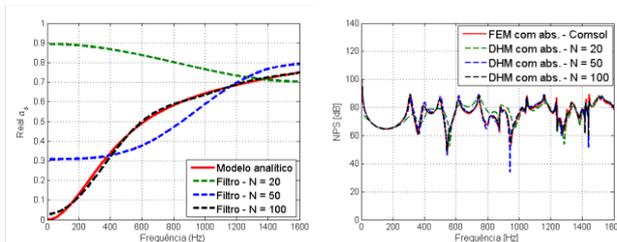


c) Fator de Reflexão - Parte Real d) Fator de Reflexão - Parte Imaginária

Fig. 10 - Impedância de superfície e fator de reflexão no domínio da frequência - Melamina

A Fig. 11b ilustra a resposta em frequência da cavidade após a aplicação do filtro FIR. É possível identificar desvios do valor de referência, especialmente para ordem $N = 20$, o que demonstra

que, para a melamina, torna-se mais difícil representar a curva de referência utilizando poucos coeficientes do filtro. Quanto maior a ordem do filtro, mais próximo da curva de referência. Ainda que ordens de filtro mais elevadas tornem-se necessárias para descrever adequadamente o comportamento da melamina no domínio do tempo, o algoritmo DHM apresenta um desempenho consideravelmente melhor que as simulações computacionais em elementos finitos (ref. Tabela 3.3), sem degradar significativamente o tempo de simulação em relação ao caso quando não há elementos com absorção.



a) Coeficiente de absorção b) Resposta em frequência

Fig. 11 - Resultados após aplicação da Melamina

É importante notar que o algoritmo implementado permite incorporar modelos em que o fator de reflexão é dependente de outras variáveis, tais como ângulo de incidência. No entanto, para a análise apresentada, presume-se que a influência dessa variável é pequena e a incidência é normal a superfície..

Tabela 3.3 - Síntese dos dados da simulação para ambos os materiais - com absorção

Parâmetros	Valores
Tempo de simulação (t_s)	0,5 s
Passo de tempo (Δt)	$\cong 1,68 \times 10^{-5}$ s
Número de iterações	17.846
Passo de frequência (Δf)	2 Hz
Tempo de processamento da CPU ^a	DHM (N = 20) \cong 300 s DHM (N = 50) \cong 310 s DHM (N = 100) \cong 325 s FEM \cong 16.200 s

a. Processador Intel Core (TM) i7 CPU @ 2.93 GHz 6 GB RAM, Windows 64 bits

Em resumo, o conceito chave do procedimento consiste em obter, através de técnicas matemáticas eficientes, coeficientes capazes de descrever adequadamente materiais dependentes da frequência em uma simulação no domínio do tempo, sem degradar significativamente o desempenho computacional.

4. Conclusões

Neste estudo foi realizada a implementação de um algoritmo para representação do comportamento acústico de materiais no domínio do tempo utilizando filtros FIR. O fator de reflexão pode ser representado por um conjunto de coeficientes relacionados com a resposta impulsiva do material, o que permite a análise multifrequencial em uma única rodada de simulação do método DHM. Dois tipos de materiais foram considerados utilizando como dados de referência a resposta em frequência obtidas a partir de simulações em elementos finitos. Em ambos os casos, os resultados apresentaram elevado nível de concordância, porém, com grande vantagem em favor do método DHM no que tange ao tempo de processamento. Diante destes resultados, pode-se concluir que filtros FIR podem ser aplicados com sucesso na modelagem do fator de reflexão no domínio do tempo. Outras técnicas baseadas em modelos analíticos no domínio do tempo e também no projeto de filtros de resposta ao Impulso (IIR) devem ser exploradas a fim de investigar as soluções que produzam melhores resultados em termos de concordância com os dados de referência e custo computacional. Estas técnicas podem ser complexas e requerem atenção especial por parte do pesquisador, possibilitando que muitos estudos futuros sejam desenvolvidos.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES e CNPq pelo financiamento da pesquisa.

6. Referências

- [1] Christian Huygens, *Traité de la lumière*, GAUTHIER-VILLARS ET CIE, Ed. Paris, 1920.
- [2] Peter B. Johns and Raymond L. Beurle, "Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, pp. 1203-1208, 1971.
- [3] Y. Kagawa, T. Tsuchiya, B. Fujii, and K. Fujioka, "Discrete Huygens' Model approach to sound wave propagations," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 218, no. 3, pp. 419-444, 1998.
- [4] Suhas V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Mary A. Phillips and Edward M. Millmann, Ed.: Taylor&Francis, 1980.
- [5] Donard de Cogan, William J. O'Connor, and Susan Pulko, *Transmission Line Matrix (TLM) in Computational Mechanics*: CRC Press, Inc., 2005.
- [6] Christos Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method: TLM*, Donald G. Dudley, Ed.: Wiley-Blackwell, 1995.
- [7] V. Trenkic, C. Christopoulos, and T. M. Benson, "Simple and Elegant Formulation of Scattering in TLM Nodes," *Electronics Letters*, vol. 29, no. 18, pp. 1651-1652, 1993.
- [8] Jonathan L. Herring, "Developments in the Transmission-Line Modelling Method for Electromagnetic Compatibility Studies," University of Nottingham, 1993.
- [9] Christos Christopoulos, "The Transmission-Line Modeling (TLM) Method in Electromagnetics," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 1, no. 1, pp. 1-132, 2006.
- [10] R.S.T. Carvalho, "Modelo Físico de Huygens na solução discretizada de campos acústicos," Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [11] Heinrich Kuttruff, *Room Acoustics*, 4th ed., Taylor & Francis, Ed.: Taylor & Francis, 2001.
- [12] Jan Hofmann and Kurt Heutschi, "Simulation of outdoor sound propagation with a transmission line matrix method," *Applied Acoustics*, vol. 98, pp. 158-172, 2007.
- [13] Gwenaël Guillaume, Judicaël Picaut, Guillaume Dutilleux, and Benoît Gauvreau, "Time-domain impedance formulation for transmission line matrix modelling of outdoor sound propagation," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, pp. 6467-6481, 2011.
- [14] Takao Tsuchiya, "Numerical Simulation of Sound Wave Propagation with Sound Absorption Using Digital Huygens' Model," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 7B, pp. 4809-4812, 2007.
- [15] Konrad Kowalczyk and Maarten van Walstijn, "Formulation of Locally Reacting Surfaces in FDTD/K-DWM Modelling of Acoustic Spaces," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 94, pp. 891-906, 2008.
- [16] Peter B. Johns, "A new mathematical model to the physics of propagation," *Radio and Electronic Engineer*, vol. 44, no. 12, pp. 657-666, 1974.
- [17] Peter Enders, "Huygens' principle and the modelling of propagation," *European Journal of Physics*, vol. 17, no. 4, p. 226, 1996.
- [18] Peter Enders and Christian Vanneste, "Huygens' principle in the transmission line matrix method (TLM). Global theory," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 14, pp. 1099-1204, 2001.
- [19] Peter Enders and Christian Vanneste, "Huygens' principle in the transmission line matrix method (TLM). Local theory," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 16, pp. 1099-1204, 2003.
- [20] Peter Enders, "Huygens' Principle as Universal Model of Propagation," *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 3(1), pp. 19-32, 2009.
- [21] Gwenaël Guillaume, Judicaël Picaut, Guillaume Dutilleux, and B. Gauvreau, "Use of the transmission line matrix method for the sound propagation modelling in open-space," 2008.
- [22] Dok Hee CHOI and Wolfgang J.R. HOEFER, "The simulation of three dimensional wave propagation by a scalar TLM model," *IEEE MTT-S DIGEST*, pp. 70-71, 1984.

- Spaces," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 94, pp. 891–906, 2008.
- [16] Peter B. Johns, "A new mathematical model to the physics of propagation," *Radio and Electronic Engineer*, vol. 44, no. 12, pp. 657-666, 1974.
- [17] Peter Enders, "Huygens' principle and the modelling of propagation," *European Journal of Physics*, vol. 17, no. 4, p. 226, 1996.
- [18] Peter Enders and Christian Vanneste, "Huygens' principle in the transmission line matrix method (TLM). Global theory," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 14, pp. 1099-1204, 2001.
- [19] Peter Enders and Christian Vanneste, "Huygens' principle in the transmission line matrix method (TLM). Local theory," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 16, pp. 1099-1204, 2003.
- [20] Peter Enders, "Huygens' Principle as Universal Model of Propagation," *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 3(1), pp. 19-32, 2009.
- [21] Gwenaël Guillaume, Judicaël Picaut, Guillaume Dutilleul, and B. Gauvreau, "Use of the transmission line matrix method for the sound propagation modelling in open-space," , 2008.
- [22] Dok Hee CHOI and Wolfgang J.R. HOEFER, "The simulation of three dimensional wave propagation by a scalar TLM model," *IEEE MTT-S DIGEST*, pp. 70-71, 1984.
- [23] Y. Kagawa, T. Tsuchiya, K. Fujioka, and M. Takeuchi, "Discrete Huygens' Model approach to sound wave propagations--Reverberation in a room, sound source identification and tomography in time reversal," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 225, no. 1, pp. 61-78, 1999.
- [24] Douglas D. Reynolds, *Engineering Principles of Acoustics*. Boston: Allyn and Bacon, Inc., 1981.
- [25] Julian Tizianel et al., "Transport parameters and sound propagation in an air-saturated sand," *Journal of Applied Physics*, vol. 86, novembro 1999.
- [26] Paulo Henrique Mareze, "Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida," Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.



SOBRAC tem nova Diretoria (2015/2016)

Dinara Paixão (Presidente 2010/2014), Lygia Niemeyer (2ª Tesoureira), Newton Soeiro (Presidente 2015/2016), Débora Barreto (Vice-Presidente), Daniel Bondarenc (2º Secretário), Stelamaris Rolla (1ª Secretária) e Júlio Cordioli (1º Tesoureiro)

A Assembleia Geral Ordinária, realizada em Campinas/SP, no dia 23 de outubro de 2014, homologou o resultado do Processo Eleitoral. Os eleitos assumem os cargos em 1º de janeiro de 2015, como preceituam o Estatuto e o Regimento da SOBRAC.

A Diretoria da SOBRAC, com mandato até 31 de dezembro de 2016, denominada Chapa "Continuidade e Integração", está constituída pelos seguintes associados efetivos:

Presidente: Newton Sure Soeiro;
Vice-Presidente: Débora Miranda Barreto;
1º Secretária: Stelamaris Rolla Bertoli;
2º Secretário: Daniel Fernando Bondarenc Zajarkiewicz;
1º Tesoureiro: Júlio Apolinário Cordioli
2º Tesoureiro: Maria Lygia Alves De Niemeyer.

O Conselho Deliberativo da SOBRAC eleito para o período 2015/2018, ou seja, quatro anos, ficou assim constituído:

Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski; Gustavo Da Silva Vieira De Melo; Dinara Xavier Da Paixão; Léa Cristina Lucas De Souza e Fabiana Curado Coelho.

Para integrar o Conselho Fiscal 2015/2016, ou seja, dois anos, os eleitos foram:

Márcio Henrique de Avelar Gomes; Maria Luiza Belderrain e Aline Lisot.

As Coordenações Regionais, com mandatos de 1º de janeiro de 2015 até 31 de dezembro de 2016 são citadas a seguir.

✓ Regional Nordeste: Coordenador Regional - Danilo Fortuna Mendes De Souza; Vice-Coordenador Regional - Francisco Aurélio Chaves Brito; 1º Secretário Regional - Bianca Carla Dantas De Araújo; 2º Secretário Regional - Ítalo César Montalvão Guedes; 1º Tesoureiro Regional - Maria Lúcia Gondim Da Rosa Oiticica e 2º Tesoureiro Regional - Otávio Joaquim Da Silva Junior.

✓ Regional Norte: Coordenador Regional - Gustavo da Silva Vieira de Melo; 1º Secretária Regional - Elcione Maria Lobato de Moraes e 1º Tesoureiro - André Luis Silva Santana.

✓ Regional do Rio de Janeiro: Coordenadora Regional - Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski; Secretária

Regional - Viviane Suzey Gomes de Melo e
Tesoureira Regional - Jeanne Denise Bezerra
de Barros.

✓ Regional São Paulo: Coordenadora
Regional - Stelamaris Rolla Bertoli; Secretário
Regional - Daniel Fernando Bondareno
Zajarkiewicz e Tesoureira Regional - Léa
Cristina Lucas De Souza.

✓ Regional Centro-Oeste: Coordenadora
Regional - Cândida de Almeida Maciel;
Secretária Regional - Maria Alzira de Araújo
Nunes e Tesoureira Regional - Ludmila de
Araújo Correia.

✓ Regional Rio Grande do Sul:
Coordenadora Regional - Maria Fernanda de
Oliveira Nunes; Secretário Regional -
Leonardo Pilau Arzeno e Tesoureira Regional
- Claudia Rogéria Gaida.

✓ Regional Santa Catarina: Coordenador
Regional - Roberto Jordan; Secretário
Regional - Mauricy Cesar Rodrigues de Souza
e Tesoureiro Regional - Erasmo Felipe
Vergara.

Os novos dirigentes da SOBRAC irão
trabalhar para atender as seguintes propostas:

1. Manter e aprimorar as ações que vêm sendo
desenvolvidas pela atual Diretoria Executiva
da SOBRAC, referentes à parte legal e ao
maior reconhecimento de entidades a nível
nacional e internacional;

2. Criar Grupos de Trabalho em subáreas da
Acústica e Vibração, de modo a contribuir com
o desenvolvimento técnico-científico;

3. Desenvolver e implementar ações de
valorização e ampliação do quadro de
associados;

4. Incentivar e dar colaboração no sentido de
que sejam criadas em todas as regiões do Brasil
as Divisões Regionais da SOBRAC;

5. Dar continuidade ao processo de outorga
pela SOBRAC de Certificação em Acústica e

Vibrações, nas modalidades F (Fundamental) e
A (Aplicada), nos níveis I, II e III;

6. Manter a publicação anual da Revista
Acústica e Vibração, procurando dar um
ênfase mais técnico, e criar uma Revista de
periodicidade Bianaual, para publicação de
artigos científicos, com um Corpo Editorial de
alta qualificação, de modo a se ter uma boa
classificação no Programa Qualis da CAPES,
nas áreas de Engenharia e Arquitetura.

7. Criar um fórum permanente de discussão de
temas relativos à poluição sonora urbana, de
modo a subsidiar as ações do Poder Legislativo
e Executivo na gestão dessa problemática.

8. Elaborar um Guia de Organização de
Eventos Técnico Científicos, que estabeleça
procedimentos com padrão de contabilidade
financeira na SOBRAC, visando atender à
legislação do país e buscando uniformizar a
organização e a realização dos mesmos, com a
garantia de um padrão de qualidade mínimo e
um menor custo de realização.

Os contatos continuam sendo:

www.acustica.org.br

sobrac@acustica.org.br



ISSN 2764-3611, 1983-442X