

Acústica e Vibrações

Sociedade Brasileira de Acústica - Sobrac

Dezembro de 2017 - Vol. 32 ▶ Nº 49

Estudo da técnica de identificação de sistemas implementada em microcontroladores Arduino Due e Teensy 3.6

Estimativa de pulso para a deconvolução de traços sísmicos

Análise numérica e experimental da medição da impedância acústica e absorção sonora utilizando a técnica *in situ* com dois microfones

Análise de um novo material polimérico para uso em tubo de descarga de compressores herméticos

Validação de realidade virtual acústica via testes de articulação em salas ruidosas e reverberantes

Uso da lã de PET para a absorção sonora e o isolamento acústico

Ferramenta para análise do desempenho acústico das edificações para fins de financiamento imobiliário

ISSN 2764-3611, 1983-442X

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Acústica & Vibrações

n. 49, dezembro de 2017, vol. 32

doi: [10.55753/ae.v32e49](https://doi.org/10.55753/ae.v32e49)

<https://revista.acustica.org.br>

ISSN: 2764-3611 (e) | 1983-442X (i)



Comissão Editorial

Editores

William D'Andrea Fonseca | ✉

Dinara Xavier Paixão | ✉

Márcio Henrique de Avelar Gomes | ✉

English Proofreader

Joseph Lacey | ✉

Capa e Diagramação

William D'Andrea Fonseca

Endereços Sobrac

UFSM – Centro Tecnológico – Sala 212

Av. Roraima no 1000, Camobi

Santa Maria, RS, Brasil - 97105-900

www.acustica.org.br | ✉

Diretoria Sobrac 2020–2022

Presidente: Stelamaris Rolla Bertoli | ✉

Vice-presidente: Débora Miranda Barretto | ✉

1º Sec.: Maria Lygia Alves de Niemeyer | ✉

2º Sec.: Krisdany V. S. M. Cavalcante | ✉

1º Tesoureiro: Roberto Jordan | ✉

2º Tesoureiro: Gustavo S. V. de Melo | ✉

Conselhos

Deliberativo 2015–2018

Gustavo da Silva V. de Melo, Dinara Xavier da Paixão, Fabiana Curado Coelho, Léa Cristina L. de Souza, Ranny L. X. N. Michalski.

Deliberativo 2017–2020

Newton Sure Soeiro, Ricardo E. Musafir, Julio A. Cordioli, Márcio H. de Avelar Gomes, Bianca Carla D. de Araújo

Fiscal 2017–218

Maria Lucia G. da Rosa Oiticica, Gilberto Fuchs de Jesus, Cândida de Almeida Maciel.

Informações

Todos os artigos publicados passam por um sistema de revisão-parecer duplo-cego antes da aceitação. Os pareceristas são profissionais com conhecimento notável no assunto. Os conteúdos dos artigos são de responsabilidade dos autores.

Sumário

| | |
|-----------------|---|
| Editorial | 3 |
|-----------------|---|

Artigos

| | |
|---|----|
| Estudo da técnica de identificação de sistemas implementada em microcontroladores Arduino Due e Teensy 3.6 | 5 |
| Estimativa de pulso para a deconvolução de traços sísmicos.. | 15 |
| Análise numérica e experimental da medição da impedância acústica e absorção sonora utilizando a técnica <i>in situ</i> com dois microfones | 31 |
| Análise de um novo material polimérico para uso em tubo de descarga de compressores herméticos | 43 |
| Validação de realidade virtual acústica via testes de articulação em salas ruidosas e reverberantes..... | 51 |
| Uso da lã de PET para a absorção sonora e o isolamento acústico | 59 |
| Ferramenta para análise do desempenho acústico das edificações para fins de financiamento imobiliário | 71 |

Encartes e Chamadas A&V

| | |
|---|----|
| XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica..... | 81 |
| I Concurso estudantil de acústica de salas Conrado Silva..... | 83 |

Contents in English

| | |
|-----------------------------------|----|
| <i>Editorial in English</i> | 93 |
|-----------------------------------|----|

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Editorial

A Comissão Editorial da Revista Acústica e Vibrações apresenta a Edição nº49. Esta edição traz sete artigos que abrangem assuntos relativos ao processamento de sinais aplicado a *técnica de identificação de sistemas* e deconvolução de traços sísmicos; análise numérica e experimental da medição da impedância acústica e absorção sonora; determinação de propriedades mecânicas para controle de ruído; realidade virtual acústica; e acústica de edificações.

A edição inicia-se com um trabalho que aborda aspectos como: pós-processamento de sinais, filtros, controle ativo e instrumentação. Tudo isso visando à implementação da *técnica de identificação de sistemas* em plataformas AD/DA-DSP de relativo baixo custo como o Arduino. No trabalho são utilizadas ferramentas de otimização matemática em conjunto com técnicas de filtragem. A abordagem é teórico-prática e a implementação em *hardware* é conduzida e testada em condições com e sem fone de ouvido. A discussão é frutífera no que tange a dificuldades e limitações das plataformas escolhidas.

O segundo artigo aborda o tema de imageamento sísmico a partir de métodos de pós-processamento de sinais, utilizando e discutindo aspectos da deconvolução entre o traço sísmico e o pulso emitido pela fonte. Ainda, um algoritmo de mínimos quadrados é empregado em conjunto com um filtro adaptativo para recuperar o sinal original. A teoria é apresentada previamente e há discussões pertinentes em dados simulados e reais, mostrando a efetividade das técnicas.

Na sequência há um trabalho que combina aspectos experimentais e de cunho numérico. O tópico é a medição de impedância acústica e absorção sonora de forma *in-situ*, empregando a técnica de dois microfones (ou sonda P-P). Ademais, é apresentada uma modelagem para fins comparativos utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM). As abordagens são colocadas em prática para algumas amostras/casos específicos, aclarando detalhes e limitações inerentes às metodologias.

O artigo seguinte propõe uma alteração construtiva em compressores herméticos (utilizados em refrigeradores) capazes de contribuir significativamente para a redução de ruído num ambiente. Trata-se de um ótimo exemplo relativo à prática da engenharia, que articula conhecimentos de mecânica dos sólidos, vibrações, acústica e métodos numéricos aplicados ao controle de ruído na fonte sonora. O leitor terá prazer em ler sobre o uso de um modelo de viga de Timoshenko aplicado ao levantamento experimental de parâmetros que são utilizados na modelagem por elementos finitos do compressor, a qual é utilizada para aferir a redução de potência vibratória esperada deste componente do refrigerador.

Uma abordagem para a avaliação da qualidade de uma aurilização (ou auralização) é o tema do artigo “Validação da realidade virtual acústica via testes de articulação em salas ruidosas e reverberantes”. Esse trabalho é uma evolução daquele apresentado em nossa edição anterior, agora em situações em que tanto a reverberação quanto o ruído de fundo são mais elevados. Os resultados obtidos por meio da realização dos testes em duas salas foram comparados com aqueles obtidos a partir da simulação computacional destes ambientes.

Para encerrar a seção de artigos, trazemos dois trabalhos relacionados à acústica de edificações. O primeiro deles apresenta uma caracterização de materiais na qual seu componente principal é a lã de PET, é avaliado o desempenho relativo ao isolamento aéreo e de impacto, bem como o seu coeficiente de absorção sonora. A manutenção de suas propriedades no decorrer dos anos e do uso também foi avaliada, de acordo com procedimento normatizado. Além de um resultado promissor obtido a partir de reaproveitamento de resíduos, destacamos a apresentação clara dos procedimentos descritos nas normas mais atuais.

O segundo desses artigos apresenta a criação de um banco de dados que fornece informações sobre isolamento sonoro aéreo e de impacto para diversas tipologias de elementos construtivos nacionais, algo urgente e essencial para tornar o trabalho do projetista mais eficiente. Tal banco de dados é apresentado na forma de uma planilha eletrônica que pode ser alimentada por seus usuários com dados experimentais obtidos tanto em laboratórios quanto em campo. Além de possibilitar a catalogação destes dados, modelos para estimativa do isolamento em situações específicas foram programados e facilitam o uso da ferramenta para avaliações prévias, que podem ser utilizadas por agências de financiamento imobiliário.

Fechamos a presente edição com a apresentação de uma novidade: o I Concurso Estudantil Conrado Silva, cujo regulamento pode ser lido no presente volume. Tal iniciativa visa aumentar a visibilidade e estimular o envolvimento de estudantes de diversos cursos com a Acústica. O concurso faz parte das atividades relativas ao XXVIII Encontro da Sobrac, a ser realizado em outubro de 2018 em Porto Alegre, RS, evento para o qual temos a satisfação de convidá-los!

Os editores da Revista Acústica e Vibrações — Edição n°49 — agradecem à Diretoria da Sobrac pelo apoio, aos autores e ao grupo de revisores, cujo trabalho foi imprescindível para tornar realidade essa publicação.

Cordialmente

Prof. Dr. William D'Andrea Fonseca

Prof^a. Dr^a. Dinara Xavier da Paixão

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

(Editores AeV)

Dezembro de 2017.

Estudo da técnica de identificação de sistemas implementada em microcontroladores Arduino Due e Teensy 3.6

Zorzo, A.*; Fonseca, W. D'A.*

* Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, {artur.zorzo, will.fonseca}@eac.ufsm.br

Resumo

A técnica de identificações de sistema é uma ferramenta poderosa na caracterização de sistemas dinâmicos. Uma das aplicações mais significativas desse algoritmo é em sistemas de controle ativo de ruído. Este trabalho tem por objetivo expor as teorias, a implementação e os resultados experimentais dessa técnica que faz o uso de filtros adaptativos e do algoritmo LMS. Dois microcontroladores, o Arduino Due e o Teensy 3.6, foram utilizados na implementação dos algoritmos e as velocidades de processamento e precisão dos resultados foram comparados. Para a parte experimental, filtros RC foram utilizados e os resultados das estimativas de resposta em frequência foram comparados com simulações numéricas. Além disso, uma estimativa da planta de um sistema de controle ativo de ruído em fones de ouvido foi obtida e comparada com uma resposta da medição dos transdutores e simulação dos filtros analógicos. Os resultados mostraram que o Arduino Due não foi capaz de lidar com altas frequências de amostragem devido às limitações do processador. O Teensy, por outro lado, foi capaz de gerar resultados satisfatórios até para frequências altas. As evidências obtidas revelaram que a precisão das estimativas dependem fortemente do número de coeficientes do filtro adaptativo utilizado e do parâmetro de convergência do algoritmo.

Palavras-chave: Função resposta em frequência, AD/DA, Otimização, Filtros adaptativos.

1. INTRODUÇÃO

Dispositivos ou instrumentos que são usados comumente possuem respostas impulsivas (RI) que geralmente não variam com o tempo. Para esses sistemas estáticos, existem diversos métodos bem fundamentados para medir suas respostas impulsivas e respostas em frequência (RI e FRF). Contudo, alguns sistemas são dinâmicos, significando que suas RIs são inconstantes e variam com o tempo. Assim, as análises em tempo e frequência utilizadas em sistemas estáticos não são adequadas para essas situações.

Um dos meios mais utilizados para a estimativa dessas funções é o método de identificação de sistemas. Esse método utiliza filtros de resposta ao impulso finitas (FIR) e um algoritmo de mínimos quadrados (MMQ ou LMS) para reduzir o erro de uma função de custo. Sendo que essa função é a diferença entre um sinal convolvido com o filtro FIR e a resposta do mesmo sinal aplicado ao sistema de interesse.

Existem diversas aplicações para essa técnica. No campo do controle ativo de ruído, ela é utilizada para estimar a RI da planta composta pelas respostas do alto-falante, conversores AD/DA, filtro *anti-aliasing*¹, microfone e do espaço de ar entre o alto-falante e o microfone. Esse filtro é, posteriormente, utilizado para corrigir um sinal de referência e melhorar a eficiência do sistema.

O tamanho do filtro e sua respectiva frequência de amostragem obtida dependem fortemente da capacidade de processamento do *hardware*. Filtragem adaptativa em tempo real usualmente exige *processadores digitais de sinais* (DSPs). Porém, como a tecnologia de processadores cresce consideravelmente todos os anos, a linha divisória entre DSPs e microcontroladores se tornou tênue. Uma grande parte dos microcontroladores atuais possuem capacidade de processamento e conversores suficientes para processamento digital de sinais.

¹Evita o efeito do dobramento espectral.

O principal objetivo do presente trabalho é analisar a performance de dois microcontroladores e o comportamento do algoritmo implementado para diferentes bandas de frequência e para diferentes parâmetros do algoritmo, como tamanho de passo e tamanho do filtro. Para isso, o algoritmo foi utilizado para estimar as respostas de alguns sistemas estáticos e os resultados foram comparados com as respostas simuladas ou medidas.

2. Identificação de sistemas

De acordo com Morgan e Kuo, a ideia básica por trás da técnica de identificação de sistemas é a construção de um modelo baseado na medição de um sinal modificado pelo sistema. O diagrama fundamental da técnica pode ser visto na Figura 1

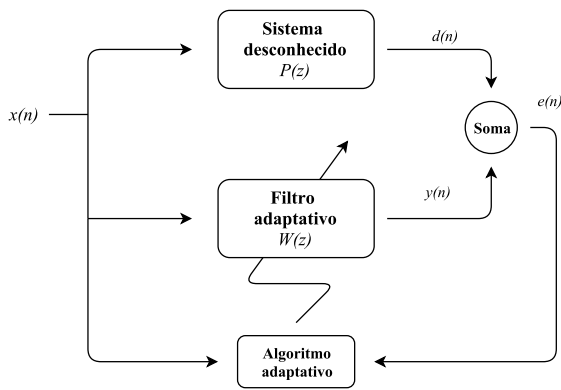


Figura 1: Diagrama da técnica de identificação de sistemas.

Um sinal de entrada $x(n)$, normalmente de banda larga como o ruído branco por exemplo, é gerado pelo processador e funciona como entrada tanto para o sistema em estudo quanto para o filtro adaptativo.

A saída do sistema desejado $P(z)$, expressa no diagrama por $d(n)$, e a saída do filtro $W(z)$, expressa por $y(n)$, são subtraídas de forma a gerar um sinal de erro $e(n)$.

O sinal de erro, assim como o sinal de entrada, são utilizados pelo algoritmo de minimização para ajustar os coeficientes do filtro de forma a minimizar a diferença das saídas.

Quando o erro atinge seu mínimo, a resposta impulsiva do filtro adaptativo está emulando a resposta de $P(z)$ da melhor forma possível. A medida que o sistema de interesse se modifica, o sinal de erro aumenta e o algoritmo volta a modificar os coeficientes do filtro de forma a modelar a nova RI.

Um dos algoritmos mais utilizados para o controle ativo de ruído, o algoritmo FXLMS realimentado, faz o uso dessa técnica para estimar a resposta de um planta composta por diversos subsistemas presentes no caminho do sinal. Esses subsistemas podem ser observados na Figura 2. Após a obtenção da estimativa, o filtro obtido é utilizado para filtrar um sinal de referência no algoritmo de controle principal.

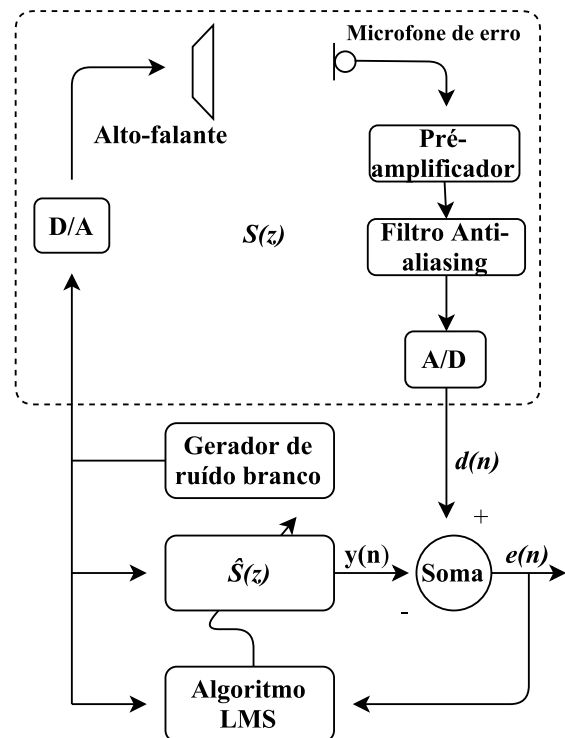


Figura 2: Utilização da técnica para a medição do caminho secundário em um sistema de controle ativo de ruído.

3. O algoritmo LMS e sua implementação

As equações relativas ao filtro e ao algoritmo adaptativo serão mostradas nesta seção (mais informações e respeito do algoritmo LMS podem ser encontradas em (CLARKSON, 1993)).

Aqui, os vetores e matrizes serão indicadas por letras maiúsculas e as quantidades escalares por letras minúsculas. O filtro FIR é definido como um vetor $W(n)$ com L coeficientes e a memória de valores de entrada é definida pelo vetor $X(n)$, com o mesmo número de termos, no qual $x(n)$ representa o valor atual da entrada, $x(n-1)$ o valor imediatamente anterior e assim por diante. Os vetores citados podem ser definidos por:

$$W(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)] \quad (1)$$

e

$$X(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)] . \quad (2)$$

Para cada instante de tempo n , o erro pode ser computado pela subtração dos *samples* (amostras) relacionados à saída do filtro e à saída do sistema de interesse, resultando em

$$e(n) = d(n) - y(n) . \quad (3)$$

A saída do filtro pode ser computada pela convolução em tempo real entre a resposta impulsiva do filtro e o vetor de entrada (Equação 4). Essa convolução também pode ser expressa pelo produto vetorial entre a transposta de $W(n)$ e o vetor de entrada. Logo, esse produto pode ser denotado por:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(n)x(n-i) = W^T(n)X(n) . \quad (4)$$

A Equação 5 é responsável pela atualização dos coeficientes do filtro adaptativo de modo a minimizar o quadrado do erro. O tamanho de passo, representado por μ , coordena a taxa na qual o algoritmo converge (KUO; MORGAN, 2009), assim,

$$W(n+1) = W(n) + \mu X(n)e(n) . \quad (5)$$

Na prática, o algoritmo não é capaz de atingir exatamente a solução ideal, porém, o resultado

obtido se aproxima do ideal. A medida do quão próximo a solução obtida chega da solução ideal é chamada de desajuste. Se o tamanho de passo é pequeno, o algoritmo toma mais tempo para convergir, porém, o resultado final se aproxima mais do ideal, tornando o desajuste pequeno. Em contrapartida, se μ é grande, o contrário acontece, o algoritmo converge rápido mas a solução final se distancia do valor desejado (Apolinário Jr, 2009).

As equações mostradas acima são implementadas a cada *sample*. Desta forma, a cada leitura do conversor, o valor de saída deve ser calculado antes da próxima leitura. Assim, o período de amostragem deve ser maior que o tempo que o processador leva para computar as equações.

Neste trabalho, a frequência de amostragem não foi fixada por meio de interrupções. O código foi programado de forma que cada leitura do AD é obtida assim que o valor de saída é convertido no DA, obtendo assim, a maior frequência de amostragem possível para a configuração e para o processador. Por esse motivo, o tamanho do filtro utilizado está diretamente relacionado com a máxima frequência de amostragem obtida. Existe então um compromisso entre a frequência de amostragem e o tamanho do filtro FIR. Se o filtro for muito pequeno, o sistema de estudo não será modelado de forma aceitável, especialmente se o sistema for complexo. Em contrapartida, se o filtro for muito grande, a frequência de amostragem e, por consequência, a máxima frequência de análise, será reduzida.

4. Descrição do hardware

Dois microcontroladores foram utilizados neste estudo, o Arduino Due (Arduino.cc, 2017) e o Teensy 3.6 (PJRC, 2017). As duas placas possuem processadores ARM cortex de 32 bits (mais informações podem ser encontradas em (Arm, 2017)). O Teensy possui um frequência de *clock* consideravelmente maior e possui mais memória RAM. Porém, a diferença mais relevante entre os dois microcontroladores é que o Arduino não possui unidade de ponto flutuante (UPF). Os parâmetros mais importantes

das duas placas podem ser vistos na Tabela 1.

Para este algoritmo escolhido, a UPF faz uma grande diferença no tempo de processamento visto que os coeficientes do filtro FIR tomam forma de ponto flutuante. A unidade é capaz de lidar com aritimética de pontos flutuantes em *hardware* (*hard float*), o que leva poucos ciclos de *clock*. A falta dessa unidade leva o processador a lidar com os números em *software* (*soft float*), processo que leva vários ciclos para ser completado.

As duas placas funcionam com uma tensão de operação de 3,3 V e possuem conversores AD/DA de 12 bits. O conversor DA do Arduino não é capaz de gerar valores analógicos em toda a faixa de tensão (0,0 a 3,3 V), sua saída é limitada de 0,55 a 2,75 V. O Teensy não possui essa limitação e os valores de saída podem assumir quaisquer valores entre 0,0 e 3,3 V.

Tabela 1: Tabela de comparações entre o Teensy 3.6 e o Arduino Due.

| | Arduino Due | Teensy 3.6 |
|----------------------------|-------------|------------|
| Frequência de clock | 84MHz | 180MHz |
| RAM | 96KB | 256KB |
| FPU | Não | Sim |
| Processador | ARM | ARM |
| | cortex-M3 | cortex-M4 |
| Profundidade | 32 bits | 32 bits |

5. Descrição do experimento

Um estudo inicial, para testar o funcionamento do algoritmo foi conduzido pela conexão da saída dos microcontroladores diretamente na entrada (vide Figura 3). Teoricamente, como não há alterações relevantes no sinal de medição (ruído branco), o filtro deve convergir para um impulso unitário ideal sem atraso.

Subsequentemente, um filtro RC passa-baixa e um passa-banda (Figuras 5 e 6) foram modelados. Um material detalhado sobre filtros analógicos pode ser visto em *Analog Devices Handbook* (Analog Devices; Zumbahlen, H. (Ed.),

2008). Os filtros foram montados em uma *proto-board* e suas respectivas entradas e saídas foram conectadas diretamente nas entradas e saídas dos microcontroladores, como pode ser visto na Figura 4.

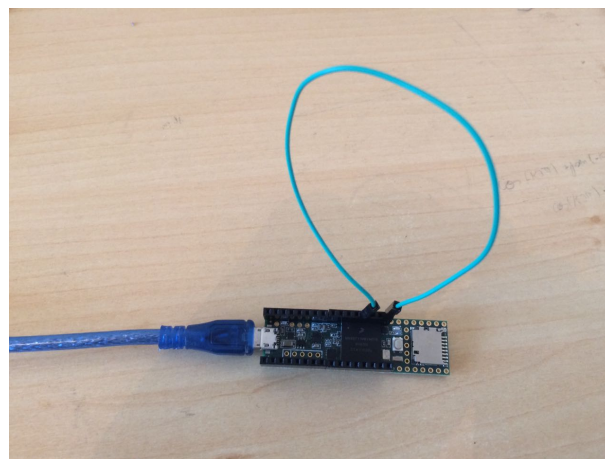


Figura 3: Teensy 3.6 na configuração de ligação direta entre a saída e a entrada.

Para os experimentos com os filtros analógicos, um filtro *anti-aliasing* não foi projetado e utilizado devido à variação brusca de frequências de amostragem entre os experimentos. Assim, erros devido a *aliasing* podem ter ocorrido nas estimativas (TAN; JIANG, 2013).

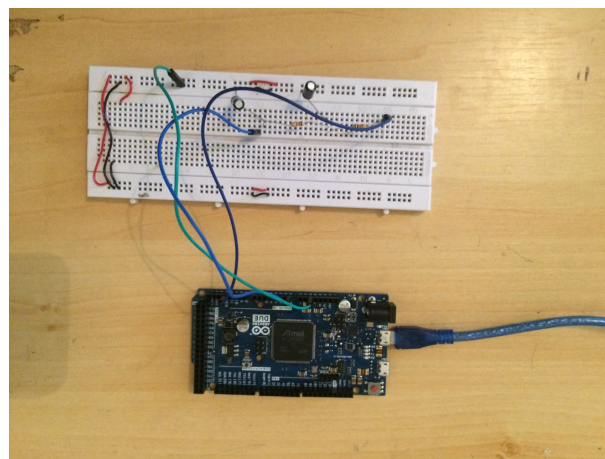


Figura 4: Arduino Due conectado ao filtro passa-baixa.

As estimativas foram feitas com filtros de 10, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 coeficientes e as variações nas respostas em frequência foram observadas. Em uma etapa anterior, as frequências

de amostragem para cada número de coeficientes foram calculadas por meio das funções de temporizador dos próprios microcontroladores.

Para cada filtro, o algoritmo foi inicializado, e após o tempo necessário para garantir a convergência (com um tamanho de passo igual a $2,5 \cdot 10^{-11}$), a resposta impulsiva do filtro foi coletada e analisada. Em seguida, a resposta em frequência foi obtida a partir da resposta impulsiva e comparada com a resposta em frequência simulada dos filtros analógicos.

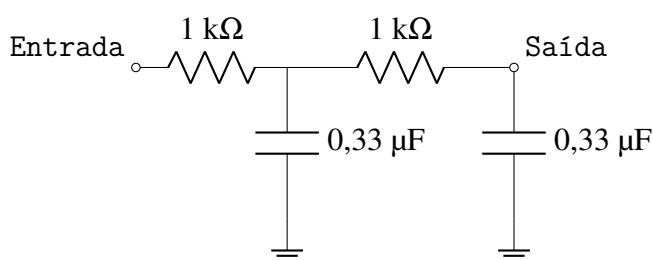


Figura 5: Filtro RC passa-baixa.

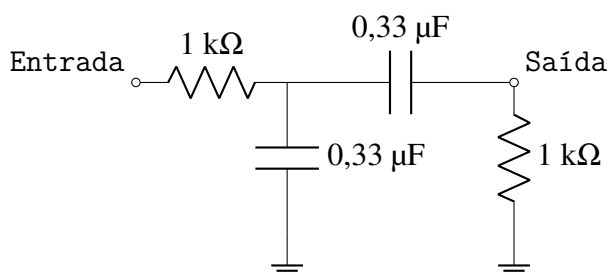


Figura 6: Filtro RC passa-banda.

O filtro passa-baixa foi modelado com um filtro de 100 coeficientes e diferentes tamanhos de passo foram computados com o objetivo de comparar os erros devido ao desajuste. Para este experimento, o algoritmo foi finalizado a um valor fixo de 5000 iterações, cerca de 2 segundos de tempo de convergência.

Por fim, para a obtenção de um resultado inicial qualitativo de um sistema de maior complexidade, um sistema de controle ativo de ruído em fones de ouvido foi estimado utilizando a plataforma Teensy e comparado com a medição do fone de ouvido convoluída com a resposta da simulação do filtro *anti-aliasing* utilizado.

A estimativa seguiu o mesmo molde apresentado na Figura 2. A partir da análise da resposta em frequência do microfone e do pré-amplificador utilizados no projeto do sistema de controle, foi constatado que esses sistemas possuem uma resposta em frequência relativamente plana na faixa de frequências analisada. Portanto, os sistemas que alteram o sinal de forma mais significativa são o alto-falante do fone de ouvido e o filtro *anti-aliasing* utilizado. Desta forma, uma medição do fone de ouvido foi feita utilizando um simulador de cabeça e torso (veja Figura 7) e a resposta obtida foi multiplicada pela resposta em frequência da simulação do filtro.

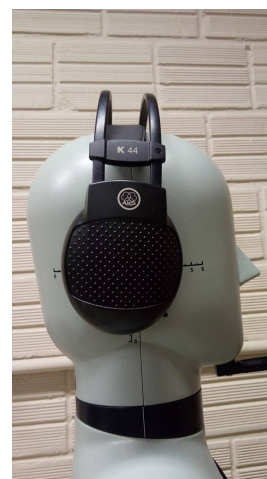


Figura 7: Medição do fone de ouvido AKG K44 em simulador de cabeça e torso.

Posteriormente, o sistema de controle foi montado no simulador de cabeça e torso e a estimativa por meio do método de identificação de sistemas foi obtida para filtros de 25, 50, 100 e 150 coeficientes, utilizando o mesmo tamanho de passo que nos experimentos anteriores.

As respostas foram então comparadas na faixa de frequências relativas às frequências de amostragem obtidas.

6. Resultados e discussões

Para cada tamanho de filtro, os processadores foram capazes de computar uma frequência de amostragem máxima. Uma comparação entre essas frequências para os dois processadores e

os diferentes filtros pode ser vista na Tabela 2. O Teensy foi capaz de calcular as equações de forma rápida o suficiente para gerar frequências de amostragem relativamente altas. O Arduino, por outro lado, não foi capaz de atingir frequências altas. Por esse fato, não foram testados filtros com mais de 100 coeficientes

Tabela 2: Frequência de amostragem obtida para cada tamanho de filtro.

| Tamanho do filtro (L) | Arduino Due | Teensy 3.6 |
|-----------------------|-------------|------------|
| 10 | 16000 Hz | 66600 Hz |
| 25 | 6500 Hz | 52600 Hz |
| 50 | 3500 Hz | 38400 Hz |
| 75 | 2500 Hz | 30300 Hz |
| 100 | 1700 Hz | 24350 Hz |
| 125 | - | 21250 Hz |
| 150 | - | 18500 Hz |

Uma interpolação cúbica foi feita com os valores da Tabela 2 de forma a obter uma aproximação das frequências de amostragem. Os resultados das interpolações podem ser vistos nas Figuras 8 e 9.

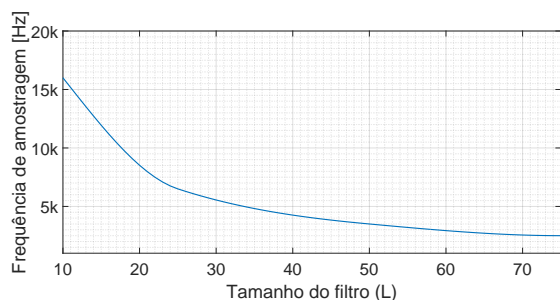


Figura 8: Interpolação cúbica entre as frequências de amostragem obtidas para cada tamanho de filtro - Arduino Due.

Os resultados obtidos pela conexão da saída diretamente na entrada dos microcontroladores podem ser observados na Figura 10. Como esperado, os resultados convergiram para um impulso ideal aproximado. A menor amplitude do pico principal da RI obtida pelo Arduino pode ser explicada pela limitação de tensão no conversor DA (que age como um atenuador), visto que o valor obtido de 0,66 no primeiro *sample*

é exatamente o valor obtido pela divisão entre faixas de tensão de entrada e saída:

$$\frac{2,75 - 0,55}{3,3 - 0,0} = 0,666. \quad (6)$$

Além disso, os coeficientes subsequentes não convergiram a zero, como era esperado. Por outro lado, os resultados obtidos pela plataforma Teensy (em azul) se mostraram muito próximos do impulso ideal.

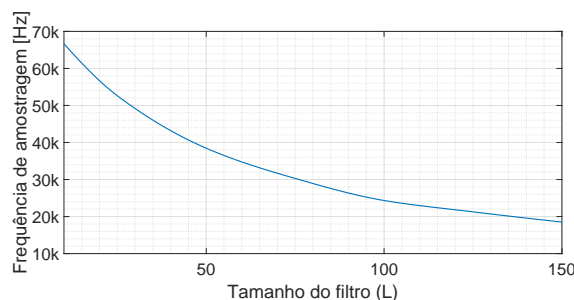


Figura 9: Interpolação cúbica entre as frequências de amostragem obtidas para cada tamanho de filtro - Teensy 3.6.

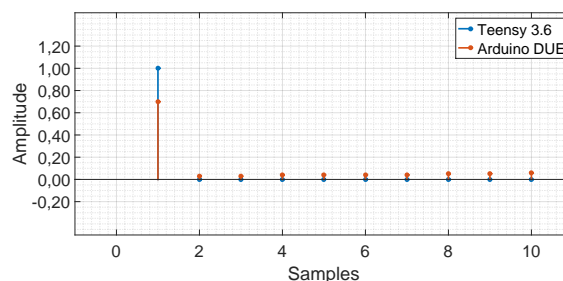


Figura 10: Respostas impulsivas para a configuração de ligação direta, Arduino em vermelho e Teensy em azul.

As Figuras 11 e 12 mostram os resultados obtidos pelas estimativas do filtro passa-baixa obtidas pelo Arduino. Cada curva foi plotada até a metade de sua respectiva frequência de amostragem. Pode-se perceber que para o filtro de 10 coeficientes, embora o resultado se aproxima de um filtro passa-baixa, o resultado não convergiu de forma satisfatória para o filtro testado. Para filtros maiores, melhores resultados foram obtidos na faixa de frequências disponível. Contudo, as baixas frequências de amostragem obtidas não são adequadas para a modelagem de

sistemas que operam em frequências mais altas, como no caso dos filtros adotados para esse estudo.

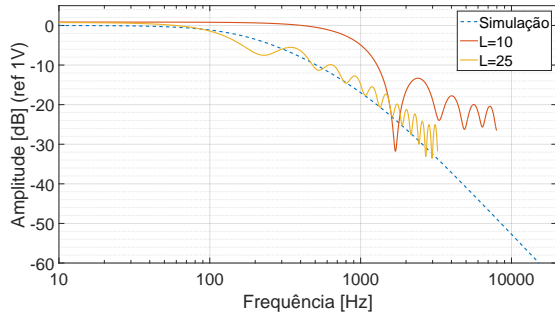


Figura 11: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-baixa (simulação e $L = \{10, 25\}$) - Arduino Due

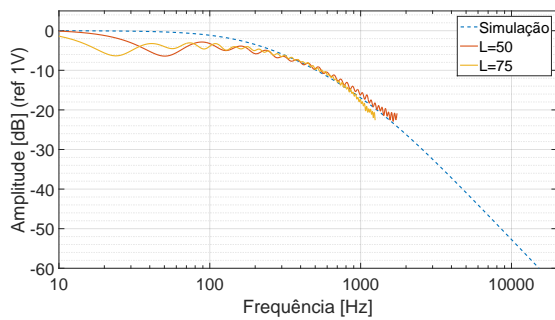


Figura 12: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-baixa (simulação e $L = \{50, 75\}$) - Arduino Due.

Com o Teensy, por outro lado, bons resultados foram obtidos para o filtro analógico. Esses resultados podem ser vistos nas Figuras 13 e 14. Para filtros com poucos coeficientes, as estimativas não tomaram forma do resultado esperado e várias oscilações apareceram em altas frequências. Contudo, o erro entre a curva esperada e a estimada reduz drasticamente com o aumento do tamanho do filtro. Para filtros com mais de 100 coeficientes as respostas foram satisfatórias.

As fases para os maiores filtros obtidas com o Teensy também foram comparadas com as simulações. Os resultados podem ser vistos na Figura 15. Os resultados também convergiram para valores satisfatórios embora alguns erros tenham ocorrido para frequências altas.

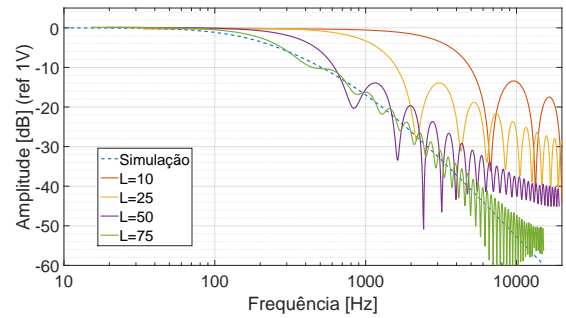


Figura 13: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-baixa (simulação e $L = \{10, 25, 50, 75\}$) - Teensy 3.6.

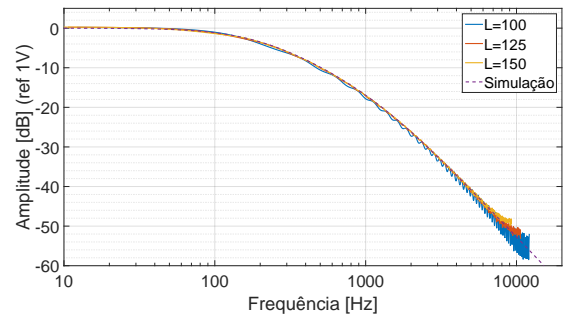


Figura 14: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-baixa (simulação e $L = \{100, 125, 150\}$) - Teensy 3.6.

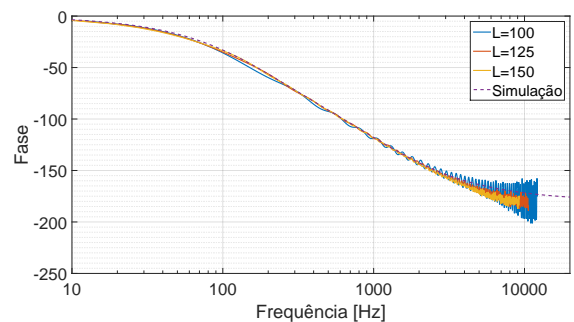


Figura 15: Estimativa da fase do filtro passa-baixa (simulação e $L = \{100, 125, 150\}$) - Teensy 3.6.

Para a configuração passa-banda, o Arduino não foi capaz de gerar bons resultados (vide Figuras 16 e 17). A porção passa-baixa do filtro possui uma frequência de corte muito alta para o processador. Assim, a melhor estimativa foi obtida pelo menor filtro já que ele foi o único que conseguiu modelar o decaimento em altas frequências.

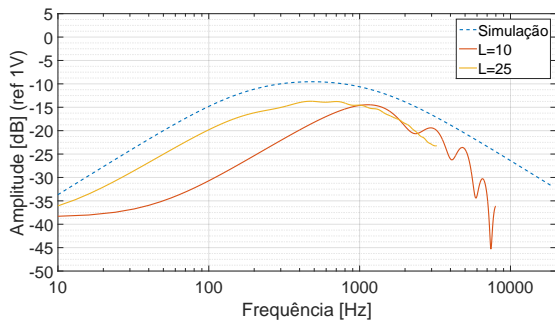


Figura 16: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-banda (simulação e $L = \{10, 25\}$) - Arduino Due.

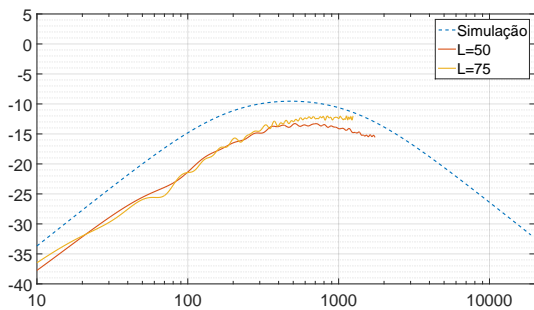


Figura 17: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-banda (simulação e $L = \{50, 75\}$) - Arduino Due.

Os resultados para a estimativa do filtro passa-banda obtidos pelo Teensy podem ser vistos nas Figuras 18 e 19. Para filtros com poucos coeficientes, a placa não foi capaz de modelar o filtro analógico. Para filtros com mais coeficientes, os resultados convergiram para os esperados na maior parte do espectro. É possível observar que nos extremos da faixa de frequências alguns erros ocorreram. Esse fator pode ser explicado pela baixa amplitude da resposta do filtro analógico nessas áreas, visto que o algoritmo funciona pela minimização do quadrado do erro, e valores de baixas amplitudes, como no caso dessas faixas do espectro, contribuem pouco para o valor global do erro.

A resposta de fase para os maiores filtros pode ser vista na Figura 20. Novamente pode-se observar que nos extremos do espectro a estimativa divergiu do resultado esperado.

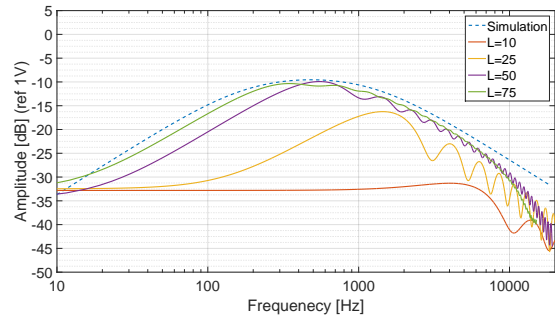


Figura 18: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-banda (simulação e $L = \{10, 25, 50, 75\}$) - Teensy 3.6.

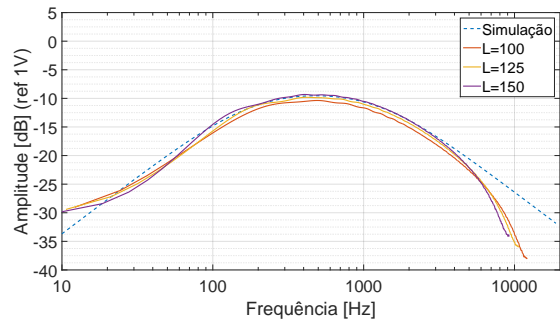


Figura 19: Estimativa da resposta em frequência do filtro passa-banda (simulação e $L = \{100, 125, 150\}$) - Teensy 3.6.

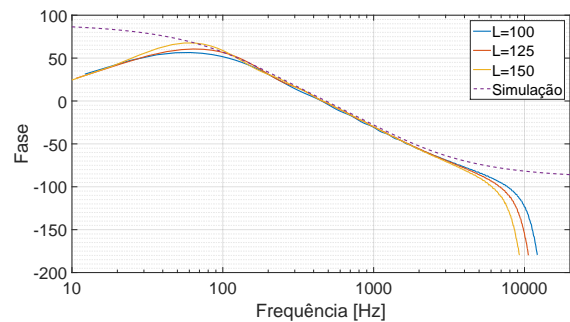


Figura 20: Estimativa da fase do filtro passa-banda (simulação e $L = \{100, 125, 150\}$) - Teensy 3.6.

O estudo da variação do tamanho de passo pode ser visto na Figura 21. Para valores menores que $3,57 \cdot 10^{-9}$ a estimativa não convergiu, foi possível observar que tamanhos de passo menores produzem menores desajustes e, por consequência, melhores resultados as custas de um tempo maior de convergência. Valores maiores que $2,5 \cdot 10^{-11}$ também não convergiram no tempo de convergência determinado.

Os resultados obtidos para a comparação entre a estimativa utilizando a técnica de identificação de sistemas e os resultados da medição dos fones de ouvido convoluídos pela resposta da simulação do filtro podem ser vistos nas Figuras 22 e 23.

Pode-se observar que os dois menores filtros não foram capazes de estimar de forma satisfatória os sistemas em baixas frequências. Porém, as curvas seguem o formato geral da resposta da medição até frequências mais altas.

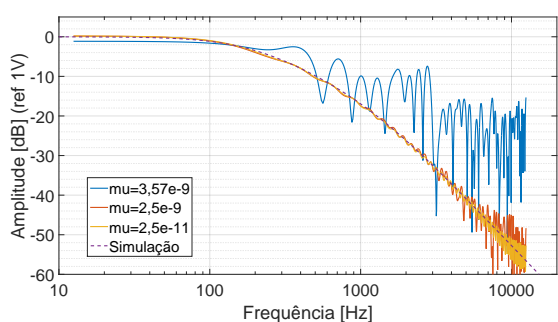


Figura 21: Variação do tamanho de passo para um filtro de 100 coeficientes - Teensy 3.6.

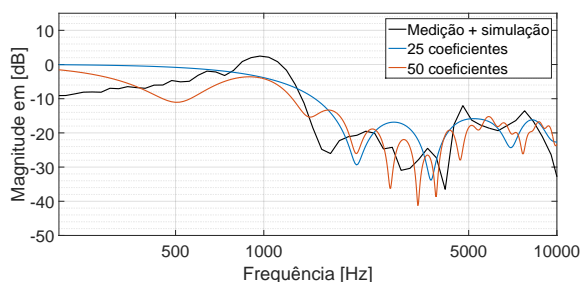


Figura 22: Comparação entre as resposta medida + simulada e estimada do caminho de sinal do sistema de controle ativo de ruído.

Para os maiores filtros, a máxima frequência de análise obtida foi baixa para sistemas de áudio. As curvas obtidas a partir das estimativas foram coerentes para baixas frequências mas não foram capazes de modelar o decaimento após a ressonância em 1000 Hz de forma satisfatória. Porém, com a exceção do pico na ressonância e do decaimento subsequente, as curvas se mostraram próximas da obtida pela medição.

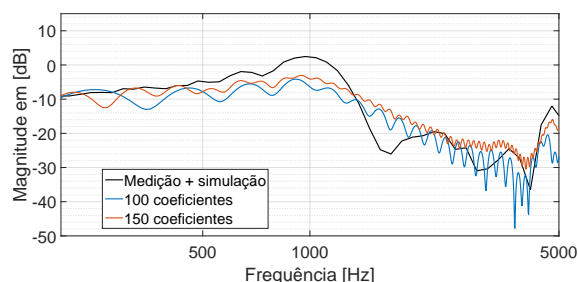


Figura 23: Comparação entre as resposta medida + simulada e a estimada do caminho de sinal do sistema de controle ativo de ruído.

7. Considerações finais

Ambos os processadores mostraram uma grande diferença no tempo de processamento. O Arduino não foi capaz de estimar os sistemas em uma faixa de frequência como a do áudio para a maior parte dos filtros digitais utilizados. Porém, o autor acredita que para sistemas vibracionais a técnica poderia ser utilizada sem grande problemas com esse processador. Com o Teensy, resultados satisfatórios foram obtidos mesmo para relativas altas frequências.

Para as estimativas dos filtros analógicos, alguns erros foram observados, especialmente nas porções do espectro de menor amplitude. Esse comportamento acontece devido a própria forma como o algoritmo é construído, visto que ele funciona pela diminuição do erro medido no domínio do tempo, e as frequências nas quais a resposta do sistema é muito baixa, contribuem pouco para o valor global do erro.

O valor do tamanho de passo é responsável tanto pelo desajuste quanto pelo tempo de convergência do algoritmo. Se o sistema de interesse varia rapidamente, um grande valor do tamanho do passo deve ser utilizado, para garantir uma convergência rápida. Porém, se esse valor for muito alto, o modelo obtido não será uma boa estimativa do sistema.

Os resultados da comparação para o sistema de controle ativo de ruído revelaram que para sistemas muito complexos, mesmo filtros com grandes coeficientes não são capazes de estimar

de forma adequada as respostas dos transdutores e filtros envolvidos. Além disso, pôde-se notar que filtros com um maior número de coeficientes geram melhores resultados em baixas frequência, o que é desejado para sistemas de controle ativo de ruído, visto que eles só são eficazes para grandes comprimentos de onda. Contudo, de acordo com Kuo e Morgan (KUO; MORGAN, 2009), para sistemas de controle a estimativa do caminho secundário não precisa ser igual a resposta real dos sistemas. A convergência do algoritmo não é afetada de forma muito significativa por diferenças de amplitude na estimativa.

REFERÊNCIAS

Analog Devices; Zumbahlen, H. (Ed.). *Linear Circuit Design Handbook*. Newnes/Elsevier, 2008. doi: [10.1016/B978-0-7506-8703-4.X0001-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8703-4.X0001-6).

ISBN 978-0750687034. Disponível em: <https://www.analog.com/en/education/education-library/linear-circuit-design-handbook.html>.

Apolinário Jr, J. A. (Ed.). *QRD-RLS Adaptive Filtering*. [S.l.]: Springer, 2009. doi: [10.1007/978-0-387-09734-3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09734-3). ISBN 978-0387097336.

Arduino.cc. *What is Arduino?* 2017. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acessado em 12/12/2017.

Arm. *Processors Cortex-M Series*. 2017. <https://www.arm.com/products/processors/cortex-m>. Acessado em 12/12/2017.

CLARKSON, P. M. *Optimal and Adaptive Signal Processing: A Volume in the Electronic Engineering Systems Series: 3*. [S.l.]: CRC-Press, 1993. doi: [10.1201/9780203744925](https://doi.org/10.1201/9780203744925). ISBN 978-0367450076.

KUO, S. M.; MORGAN, D. R. *Active Noise Control Systems – Algorithms and DSP Implementation*. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 978-0471134244.

PJRC. *Teensy USB Development Board*. 2017. <https://www.pjrc.com/store/teensy36.html>. Acessado em 12/12/2017.

TAN, L.; JIANG, J. *Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications*. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2013. ISBN 978-0124158931.

Estimativa de pulso para a deconvolução de traços sísmicos

Bousfield, M. M.¹; Cordioli, J. A.²; Barrault, G. F. G.³

¹ Lab. de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, marina.bousfield@lva.ufsc.br

² Lab. de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, julio.cordioli@ufsc.br

³ Lab. de Oceanografia Costeira, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, guillaume.barrault@ufsc.br

Resumo

O método sísmico está entre as técnicas mais utilizadas para a investigação da estrutura geológica de regiões submersas. Uma etapa importante do processamento de dados sísmicos é a deconvolução entre o traço sísmico e o pulso emitido pela fonte, capaz de retornar a refletividade do meio estudado. Essa operação possui fontes conhecidas de erros como a falta de conhecimento prévio da forma do pulso e a escolha do algoritmo de deconvolução. Tendo em vista que quando há o conhecimento sobre o pulso enviado pela fonte, técnicas mais simples e robustas para a deconvolução podem ser aplicadas, este trabalho propõe um método para obter a forma do pulso emitido pela fonte, buscando aprimorar a deconvolução. A forma de onda do pulso pode ser representada como uma combinação de funções simples. Para obter os coeficientes das funções, um filtro adaptativo alimentado por um algoritmo de mínimos quadrados (LMS) foi utilizado. Os coeficientes adaptativos do filtro são atualizados em um sistema retroalimentado, criando um estimador que reconstrói a forma de onda original, sem distorções. Para a aplicação da deconvolução, foram utilizados dados simulados e reais. O algoritmo se mostrou robusto e estável. Os resultados para a deconvolução com a utilização do pulso estimado se mostraram superiores à utilização da onda direta e à técnica probabilística.

Palavras-chave: imageamento sísmico, algoritmo adaptativo, recuperação de pulso.

1. INTRODUÇÃO

Antagonicamente à forma como são feitas as investigações geológicas em ambiente terrestre, nos submersos há dificuldade em acessar o local investigado. Com isso, é comum o uso de métodos geofísicos de investigação, aplicados indiretamente e de forma não invasiva. Dentre estes, são destacados os acústicos, que utilizam os fenômenos de propagação da onda sonora como fundamento para obtenção de informações sobre o fundo marinho (AYRES, 2001). De todas as formas de radiação conhecidas, o som é a que se propaga no ambiente submerso da melhor forma.

O método sísmico, um dos mais utilizados métodos acústicos, visa obter informações a respeito da subsuperfície marinha por meio da interação do som com as camadas geológicas, analisando tempos de retorno e amplitudes das ondas refletidas devido a contrastes de impedância acústica (SHERIFF, 2004).

De acordo com Bacon, Simm e Redshaw (2003), um levantamento sísmico baseia-se na seguinte sequência de eventos: (i) ondas acústicas com amplitude e frequência de interesse são geradas mecanicamente a partir de uma fonte e direcionadas para o fundo marinho; (ii) a onda se propaga da fonte até a região de interesse através da coluna d'água sofrendo alterações até encontrar o fundo; (iii) parte da energia é refletida e parte refratada para outras camadas do substrato com intensidades dependentes do contraste de impedância acústica do meio; (iv) o sinal retorna à superfície da água trazendo informações a respeito da propagação da onda (tempo de propagação, amplitude e fase de retorno) e é captado por receptores sensíveis à pressão sonora; e (v) os sinais recebidos, os chamados traços sísmicos, são analisados e registrados.

O correto processamento de dados sísmicos é imprescindível para que os dados de tempo e frequência possam ser convertidos em imagens que trazem informação correta a respeito da

geologia investigada. Existem várias etapas no processamento de dados sísmicos, algumas bem desenvolvidas e aprimoradas, outras demandam mais estudo. Dentre estas, destaca-se a deconvolução dos sinais, que busca remover o efeito do pulso sonoro enviado pela fonte e ressaltar as características do ambiente (YILMAZ, 1987). Na prática, a deconvolução retira o efeito borrado do dado sísmico e torna as reflexões na sub-superfície muito mais evidentes na imagem da seção geológica gerada (YILMAZ, 1987; ROBINSON, 1981).

A deconvolução possui fontes conhecidas de erros que devem ser levadas em conta na hora da aplicação, como a presença do ruído, a estimativa do pulso enviado pela fonte e a escolha do algoritmo apropriado (YILMAZ, 1987). Cada caso deve ser avaliado para que a melhor metodologia seja empregada.

Existem algumas metodologias para a deconvolução de sinais baseadas em premissas e suposições. De acordo com Wadsworth et al. (1953), é possível dividi-las em dois grandes grupos: probabilística e determinística. Segundo Yilmaz (1987), os métodos determinísticos são aplicados quando se tem conhecimento sobre a forma da onda sonora enviada pela fonte, já os métodos probabilísticos consistem na utilização de teorias estatísticas para a obtenção desta. Existem algumas formas de obter o pulso enviado pela fonte e uma delas é a medição direta no local de aquisição (ARYA, 1978). Porém, os registros do pulso no traço se sobrepõe e tornam-se complicados de se diferenciar. Além disso, as medições diretas não incluem as funções de transferência da coluna d'água e da subsuperfície (WHITE; O'BRIEN, 1974). Apesar disso, a forma do pulso permanece relativamente constante durante as medições, o que permite mediante a aplicação de algumas técnicas, que seja possível restaurá-la (WHITE; O'BRIEN, 1974).

Tendo isto em vista, o artigo tem como objetivo a aplicação de uma técnica baseada na busca de uma combinação de funções simples que recuperam a forma do pulso enviado pela fonte, visando a melhor recuperação da refletividade

do fundo marinho em investigações sísmicas.

Primeiramente a metodologia para a realização do trabalho é exposta na Seção 2 e seguida por um grande bloco de análise de técnicas de deconvolução de dados sísmicos, na Seção 3. Com isso, a teoria e desenvolvimento do algoritmo adaptativo proposto é descrita na Seção 4. Por fim, técnicas de deconvolução selecionadas e o algoritmo adaptativo são aplicados a um conjunto de dados reais da indústria do petróleo na Seção 5.

2. METODOLOGIA

De forma inicial, uma análise sobre as técnicas de deconvolução de dados sísmicos será realizada. Após esta etapa, será aplicada uma técnica baseada na busca por uma combinação de funções simples que recuperam a forma do pulso enviado pela fonte através de um filtro adaptativo alimentado por um algoritmo de mínimos quadrados, apresentada em (BOUSFIELD et al., 2016). Primeiramente, a escolha de funções simples e o algoritmo adaptativo são expostos. É utilizado um pulso de *airgun* para a aplicação da técnica de recuperação do pulso.

Com o método validado e exposto e com a utilização de um perfil de refletividade de um ambiente simulado (Figura 1), uma técnica de deconvolução determinística é aplicada com a utilização da onda direta retirada do sinal acústico e com a utilização do pulso estimado pelo algoritmo adaptativo proposto. Estes resultados são comparados aos resultados referentes à aplicação da deconvolução probabilística. Para a comparação foram criados parâmetros capazes de retornar informações sobre a semelhança do dado obtido com o desejado. O primeiro deles é a diferença entre refletividades (Δ_h), dado por

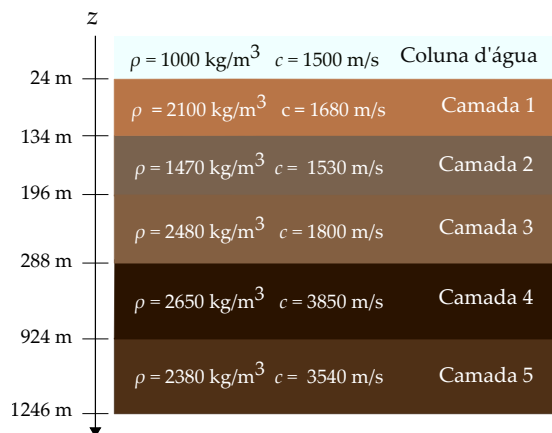
$$\Delta_h = \sum_{t=0}^T [h(t) - h_{\text{est}}(t)]^2, \quad (1)$$

na qual $h(t)$ é a refletividade simulada, $h_{\text{est}}(t)$ é a refletividade estimada, t a variável tempo e T é o tempo total do sinal. Já para obter informações sobre a precisão na detecção das amplitudes das reflexões, foi criado um parâmetro de coerência

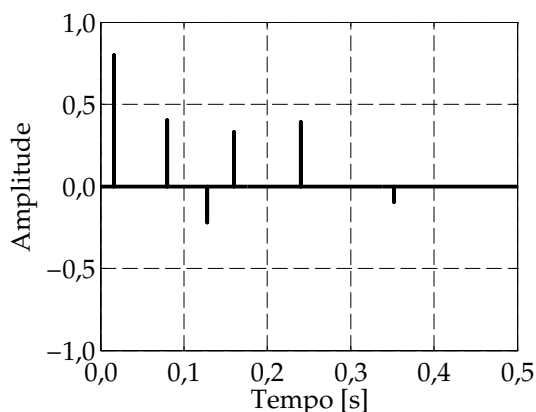
entre as amplitudes (ξ), dado por:

$$\xi = \sum_{t=0}^T \left[\frac{(h_{est}(t) + h(t))^2}{h_{est}(t)^2 + h(t)^2} - 1 \right] \frac{1}{NR}, \quad (2)$$

na qual NR é o número de reflexões.



(a) Ambiente simulado



(b) Reflexão simulada

Figura 1: Ambiente e refletividade modelados.

Por fim, o algoritmo e as deconvoluções são aplicados a dados reais de sísmica marinha para a comparação dos resultados e validação da metodologia. A análise da diferença entre os resultados é realizada visualmente por meio da localização e identificação de estruturas e de ambiguidades.

3. TÉCNICAS DE DECONVOLUÇÃO

Existem diversas técnicas de deconvolução, tanto determinísticas quanto probabilísticas. Algumas delas foram discutidas e analisadas no trabalho de Bousfield (2017) e levando em conta os resultados, neste trabalho serão aplicadas a

técnica determinística da divisão espectral e a técnica probabilística da deconvolução em impulsos.

3.1 Deconvolução via divisão espectral

Segundo Gurrola, Baker e Minster (1995) e Sipkin e Lerner-Lam (1992), a deconvolução em sua forma convencional de divisão espectral, funciona muito bem para casos em que desconsidera-se a presença de ruído:

$$H(f) = Y(f)/X(f), \quad (3)$$

na qual $H(f)$, $Y(f)$ e $X(f)$ são respectivamente os espectros da refletividade do fundo marinho, do traço sísmico e da pulso enviado pela fonte. Com isto, pelo fato de as medições tanto de $x(t)$, o pulso enviado, quanto de $y(t)$, o traço sísmico, em geral, possuírem ruído, é necessário prestar atenção neste tipo de operação.

Além disso, deve-se ressaltar, como feito por Warner (2009), que por se tratar de uma divisão espectral, caso algum dos espectros utilizados para a realização da deconvolução não apresentem componentes em determinada frequência, a divisão se torna uma indeterminação matemática, levando a uma instabilidade do método da divisão espectral. Com isso, uma das formas usuais de estabilizar a divisão espectral, é por meio de um fator de amortecimento ou de regularização, δ , para que valores próximos a zero no denominador da divisão espectral sejam evitados. Segundo Gurrola, Baker e Minster (1995) e Warner (2009), a adição do fator de amortecimento no espectro é equivalente à inserção de ruído branco no domínio do tempo, o que faz com que os pequenos valores no denominador sejam substituídos e a inversão seja estabilizada. Desta forma, o espectro da refletividade do meio investigado pode ser dado por:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f) + \delta}. \quad (4)$$

Com a adição de δ há o aumento em amplitude e suave aumento da largura do espectro, o que altera o seu efeito como um filtro passa-baixa. Esta adição auxilia na redução do ruído

de alta frequência, e conseqüentemente, leva a uma perda de amplitude da refletividade do meio. Isso se deve ao fato de que, por ser uma série de impulsos, a refletividade possui uma faixa de frequência ampla.

4. Deconvolução em impulsos

Nesse procedimento, o pulso enviado pela fonte é desconhecido e se deseja obter informações sobre a refletividade. Desta forma, estimativas estatísticas são realizadas para que resultados sejam obtidos. A deconvolução cega¹ abriu muitos caminhos nas pesquisas envolvendo processamento de dados sísmicos, porém suas premissas são frequentemente violadas, o que a torna inefetiva em muitos casos (ARYA, 1978).

Uma das técnicas probabilísticas mais utilizadas, é a deconvolução por impulsos². Segundo Mousa e Al-Shuhail (2011), para a aplicação é assumido que: (1) a Terra é composta por camadas horizontais de velocidade constante; (2) o pulso enviado é de fase mínima; (3) a refletividade do substrato é uma série de impulsos aleatórios; (4) não há componente de ruído. Esta técnica tem por objetivo converter o pulso enviado pela fonte em um Delta de Dirac ($\delta(t)$). Pode-se obter um filtro inverso que retira a parte previsível do traço sísmico, relacionada ao pulso (PEACOCK; TREITEL, 1969; WARNER, 2009). Com o efeito do pulso eliminado, se tem a informação sobre a refletividade do meio. O filtro inverso $v(t)$ é tal qual:

$$x(t) * v(t) = \delta(t). \quad (5)$$

Como não se tem a informação do pulso enviado pela fonte, é necessário estimá-lo ou encontrar relações entre espectro de amplitude ou autocorrelações do traço sísmico e o pulso. Assumindo uma série de premissas e relações, como descrito por Bousfield (2017) e Mousa e Al-Shuhail (2011), conclui-se que o espectro de amplitude do traço, $Y(f)$, é uma versão escalada do espectro de amplitude do pulso enviado pela fonte, $X(f)$. Com isso, pode-se inferir que

¹Do inglês: *Blind deconvolution*.

²Do inglês: *Spiking deconvolution*.

é possível utilizar o espectro ou a autocorrelação do traço sísmico na ausência da informação sobre o pulso para o cálculo do filtro inverso.

5. RECUPERAÇÃO DE PULSO

Levando em conta a série de premissas assumidas pelas técnicas de deconvolução probabilísticas, em geral, as técnicas determinísticas retornam melhores resultados (MOUSA; AL-SHUHAIL, 2011; YILMAZ, 1987; BOUSFIELD, 2017). Com isso, a estimativa da assinatura da fonte é um dos problemas clássicos da sísmica de exploração (IKELLE; ROBERTS; WEGLEIN, 1997). Segundo Rondenay (2009) e Warner (2009), é uma etapa importante e que pode contribuir para a inserção de erro na obtenção da refletividade do meio.

Para apresentar e validar o método de recuperação de pulso, um sinal de *airgun* foi escolhido para ser utilizado como referência. Sua escolha ocorreu devido à sua ampla utilização na investigação sísmica marinha e devido à repetibilidade e à confiabilidade da sua assinatura espectral. Pulsos emitidos por *airgun* podem ser considerados como sendo de fase mínima (LAMOUREUX; MARGRAVE, 2007), devido à sua característica de apresentar alta energia nos primeiros instantes, apresentando estabilidade para deconvolução. Apesar desta escolha, o método pode ser adaptado para ser aplicado a qualquer outro pulso.

Uma série de métodos de decomposição pode ser utilizada para modelar o sinal de referência, tais como: Fourier, Séries de Wavelet e Decomposição Empírica de Modos (BOUSFIELD et al., 2016). Contudo, é possível escolher duas ou mais funções simples que quando combinadas podem reconstruir as principais características do pulso da fonte com a utilização de menos coeficientes, o que possibilita a diminuição do ruído. O conceito de decomposição de um sinal em várias funções já foi utilizado por alguns autores em diversos campos de pesquisa como uma abordagem de decomposição de pulsos arteriais (BARUCH et al., 2011) e na confecção de métodos para comunicação em banda larga

(JIA et al., 2010).

Com isso, o método proposto faz a união de duas ou mais funções simples no domínio do tempo (t) para a reconstrução do pulso enviado pela fonte. No caso, como um pulso de *airgun* é analisado, foram escolhidos um cosseno e uma função exponencial a serem multiplicados:

$$f_1(t) = \cos(2\pi\alpha t) \quad e \quad (6)$$

$$f_2(t) = e^{-\pi^2\beta^2 t^2}, \quad (7)$$

na qual α , correspondente à frequência da função cosseno, e β à abertura da função exponencial, são os coeficientes a serem adaptados.

Deve-se ressaltar que é desejável ter um conhecimento prévio da possível forma de onda do pulso para que as funções sejam escolhidas. Com isso, qualquer outra combinação de funções que seja capaz de recuperar o pulso enviado pode ser utilizada. É importante notar que existe uma relação de compromisso: quanto menos funções simples e coeficientes a combinação tiver, mais robusto será o sistema já que menos graus de liberdade reconstruirão o padrão de ruído intrínseco ao traço, fazendo com que o sistema não seja afetado por ele. Por outro lado, o número de graus de liberdade também influencia na eficiência da fiel reprodução do pulso estimado.

5.1 Algoritmo adaptativo

Um algoritmo adaptativo foi projetado para encontrar automaticamente os coeficientes adaptativos das funções simples que minimizam o erro entre a referência e o pulso que é estimado através dos coeficientes adaptados. É possível discretizar o tempo total de medição em blocos que representam a obtenção cada traço (n).

A entrada do sistema é o pulso original enviado pela fonte \bar{x} , que passa a ser corrompido por ruído z e resulta no sinal ruidoso observado x , aqui utilizado como referência. O pulso de referência, x , pode ser obtido através da onda direta presente no traço. Tendo conhecimento da distância entre fonte e receptor e da velocidade de propagação do som na água, é possível

calcular a posição da onda direta e o pulso de referência pode ser obtido de forma simples.

A partir de análises qualitativas do pulso de referência, x , nos domínios do tempo e da frequência, definem-se as funções simples, os coeficientes de entrada a serem adaptados pelo algoritmo e um erro inicial. Estes são enviados para o filtro adaptativo para que com base nas informações dadas os coeficientes adaptativos das funções simples, v , possam ser atualizados. Os coeficientes atualizados são levados para o aplicador, que configura os novos valores na combinação de funções simples, gerando o pulso estimado, \hat{x} . Desta forma, é possível calcular o erro entre o pulso de referência, x , e o estimado, \hat{x} , que pode ser dado pela subtração vetorial

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n). \quad (8)$$

Contudo, é necessária uma função objetivo capaz de retornar um valor escalar para servir de parâmetro de semelhança entre pulso de referência e estimado e para ser utilizado na próxima iteração na descoberta dos novos coeficientes, v . Porém, a simples soma do vetor de erro (Eq. (8)) pode camuflar a diferença entre $\hat{x}(n)$ e $x(n)$ devido à interferência destrutiva. Tendo isso em vista, foi estabelecida uma função objetivo que retorna um escalar, dada pela soma do erro, $e(n)$, ao quadrado ponderada pelo tamanho do vetor de erro (T), exibida na forma vetorial:

$$e'(n) = \frac{1}{T} e^T(n) \cdot e(n). \quad (9)$$

A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos do sistema adaptativo retroalimentado proposto, no qual as linhas grossas indicam o fluxo de um vetor e as finas indicam o fluxo de um escalar. O método para a atualização dos coeficientes adaptativos baseada nas informações pretéritas escolhido foi o Método dos Mínimos Quadrados (LMS). De implementação computacional simples e intuitiva, o LMS permite a alteração do vetor gradiente através da modificação da função objetivo (LU et al., 2007). Para que a minimização da função objetivo (Eq. (9)) fosse realizada a cada iteração, foi escolhido o Método do Gradiente de Descida, que busca o ponto mínimo da função objetivo escolhida seguindo a

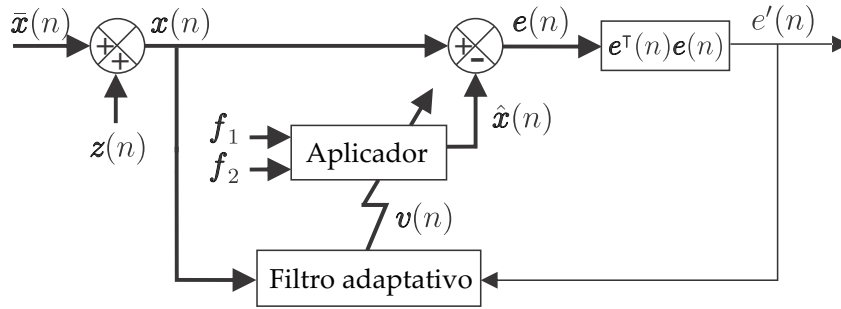


Figura 2: Diagrama de blocos do algoritmo adaptativo.

direção oposta do vetor gradiente do erro em relação aos coeficientes, gerando a atualização dos coeficientes como segue:

$$\mathbf{v}(n) = \mathbf{v}(n-1) - \mu e'(n-1) \nabla e'(n-1), \quad (10)$$

na qual

$$\mathbf{v}(n) = [\alpha \quad \beta]^T, \quad (11)$$

é o vetor de coeficientes atualizados, μ é o coeficiente de convergência e $\nabla e'(n)$ é o gradiente de $e'(n)$ ou a derivada parcial do erro instantâneo em relação ao vetor de coeficientes $\mathbf{v}(n)$. Considerando a combinação de Eq. (6) e Eq. (7), o pulso estimado (\hat{x}), as derivadas parciais da função objetivo podem ser calculadas como segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e'}{\partial \alpha} &= 4\mathbf{x}^T(n) \left(\pi \mathbf{t} \circ \text{sen}(2\pi\alpha\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\beta^2\mathbf{t}^2} \right) \\ &\quad - 2\pi \sum_{t_i=0}^T \left(t_i \cdot \text{sen}(4\pi\alpha t_i) \cdot e^{-2\pi^2\beta^2 t_i^2} \right); \end{aligned} \quad (12)$$

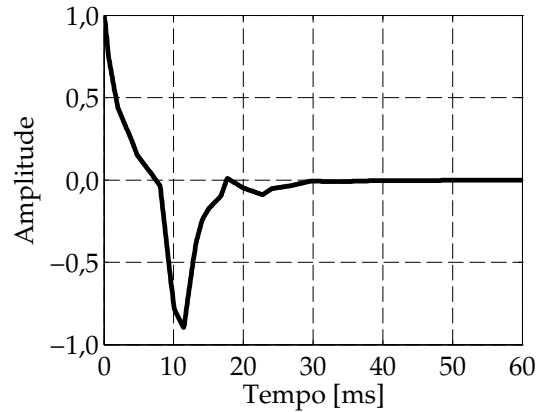
$$\begin{aligned} \frac{\partial e'}{\partial \beta} &= 4\mathbf{x}^T(n) \left(\pi^2 \beta \mathbf{t}^2 \circ \cos(2\pi\alpha\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\beta^2\mathbf{t}^2} \right) \\ &\quad - 4\pi^2 \beta \sum_{t_i=0}^T \left(t_i^2 \cdot \cos^2(2\pi\alpha t_i) \cdot e^{-2\pi^2\beta^2 t_i^2} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

na qual \circ é o produto de Hadamard.

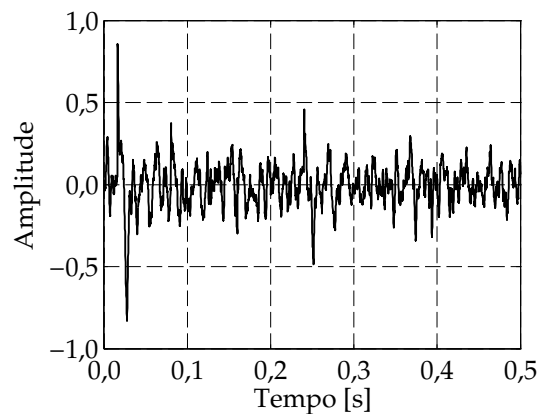
5.2 Deconvoluções com o pulso estimado

Com o método já validado em Bousfield (2017), Bousfield et al. (2016), Bousfield et al. (2016), buscou-se a simulação de um conjunto de pulsos reais. A assinatura de *airgun* registrada por Mikaelson (2013) e exposta na Figura 3 (a) foi utilizada para a geração de um traço sísmico simulado, resultado da convolução entre o pulso

e a refletividade modelada, exposta na Figura 1, com adição do ruído característico descrito por Wenz (1962), que inclui ruído de bolhas, vento, fluxo d'água e de tráfego marítimo em regiões rasas, com amplitude de 0,6. O traço sísmico resultante é exposto na Figura 3 (b).



(a) Pulso de *airgun* (MIKAELSEN, 2013)



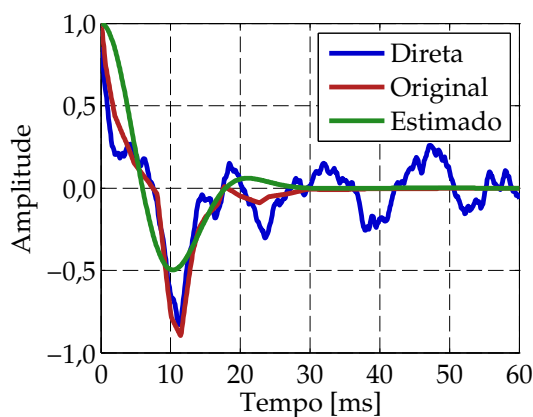
(b) Traço sísmico simulado

Figura 3: Pulso real de *airgun* e traço sísmico simulado utilizados para validação do método.

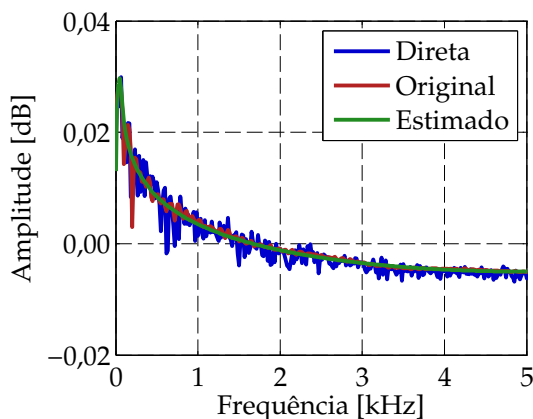
O algoritmo foi aplicado com um coeficiente

de convergência de $\mu = 3 \times 10^{-3}$ e um total de 10^3 iterações. Como referência para o algoritmo, a própria onda direta foi utilizada tendo em vista que em uma situação real se tem conhecimento sobre a geometria do problema.

A Figura 4 (a) ilustra a onda direta (pulso ruidoso) em azul, o pulso original (que se busca estimar) em vermelho e o pulso estimado através do algoritmo, em verde.



(a) Domínio do tempo



(b) Domínio da frequência

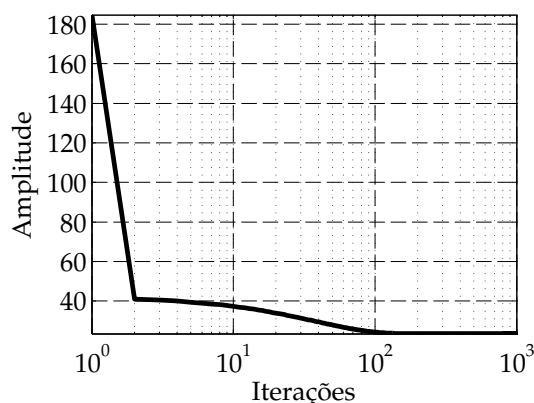
Figura 4: Comparação entre os pulsos *airgun* original, de referência e estimado.

Nessa, é qualitativamente perceptível que o pulso estimado recupera alguma informação sobre frequência e amplitude, mas não atinge o pulso original de forma exata. Isso se deve ao fato de se tratar de um pulso real de *airgun*, não tão simples de estimar através de apenas duas funções. Mais funções simples podem ser adicionadas à combinação, porém, a adição de graus de liberdade, como mencionado, além de poder

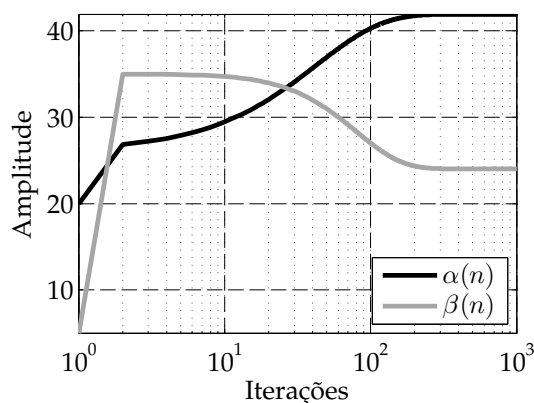
contribuir para uma estimativa melhor, poderia levar a reprodução do ruído da onda direta.

A Figura 4 (b) expõe os espectros de amplitude, mostrando que a estimativa se mantém fiel aos outros dois espectros com uma característica menos ruidosa, devido à não reprodução pelas funções simples.

A evolução do erro entre o pulso estimado e a onda direta com o número de iterações é exibida no gráfico da Figura 5 (a), na qual percebe-se que logo após a 100ª iteração há uma convergência da diferença. Já a Figura 5 (b) ilustra a evolução dos coeficientes, na qual percebe-se que o algoritmo, com o número de iterações, converge para valores únicos.



(a) Evolução do erro



(b) Evolução dos coeficientes

Figura 5: Convergência do método com pulso real de *airgun*.

Como o pulso é estimado com a utilização de funções simples, sua Transformada de Fourier pode ser facilmente calculada. Com isso, um

filtro inverso pode ser definido diretamente e os coeficientes adaptativos podem ser utilizados como entrada do filtro:

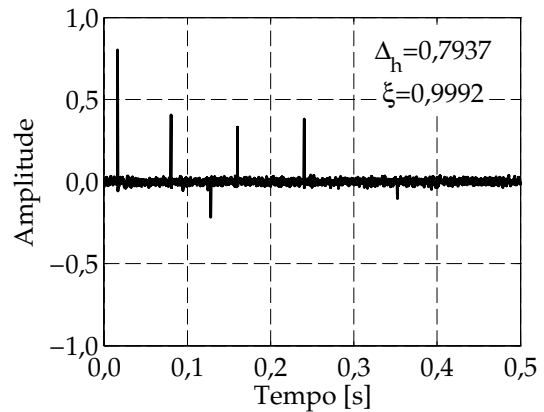
$$V(\omega) = \frac{2\sqrt{2}\pi\beta}{i} \left(\exp\left(-\frac{(\omega-2\pi\alpha)^2}{4\pi^2\beta^2}\right) + \exp\left(-\frac{(\omega+2\pi\alpha)^2}{4\pi^2\beta^2}\right) \right)^{-1} \quad (14)$$

A utilização do filtro inverso, com a inserção dos coeficientes adaptativos estimados faz com que o custo computacional seja bastante reduzido e permite a realização da deconvolução de forma prática e rápida.

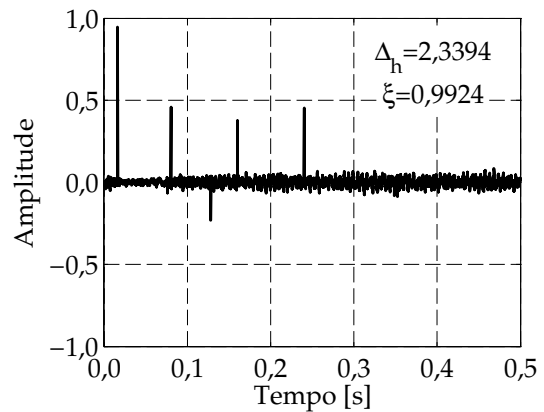
O pulso estimado foi utilizado para a aplicação do algoritmo de deconvolução determinística. Com isso, comparou-se o desempenho da operação com a utilização da onda direta e do pulso estimado e também, com a deconvolução em impulsos, técnica probabilística. A Figura 6 ilustra as refletividades estimadas através da deconvolução via divisão espectral sem amortecimento, tendo em vista que se trata de um pulso considerado de fase mínima e não necessita de fator de regularização.

Qualitativamente é possível perceber que a refletividade obtida através do pulso estimado (Figura 6 (a)) apresenta menos ruído e encontra de forma mais precisa as reflexões do ambiente simulado do que a obtida através da utilização da onda direta retirada do traço sísmico (Figura 6 (b)). A refletividade estimada (h_{est}) através da utilização do pulso estimado (\hat{x}) apresenta todas as seis reflexões, enquanto a que utiliza a onda direta (x) mascara a sexta reflexão, próxima à 0,35 s.

Fazendo uma análise quantitativa, a diferença entre as refletividades estimadas pela deconvolução e as simuladas (Δ_h) é menor quando estima-se o pulso através do algoritmo adaptativo com um valor de $\Delta_h = 0,7937$, enquanto o valor para a utilização da onda direta é de $\Delta_h = 2,3394$, aproximadamente 95% maior. O fator de coerência de picos (ξ) para o caso em que utiliza-se o pulso estimado é de $\xi = 0,9992$ enquanto para o caso da onda direta é de $\xi = 0,9924$, ou seja, as amplitudes são melhores encontradas quando utiliza-se do pulso estimado para deconvolver o traço sísmico.



(a) Com pulso estimado



(b) Com onda direta

Figura 6: Comparação dos resultados da deconvolução via divisão espectral com pulso estimado e com onda direta.

Já a Figura 7 ilustra o resultado obtido para a aplicação da deconvolução em impulsos, técnica probabilística, sem a informação do pulso.

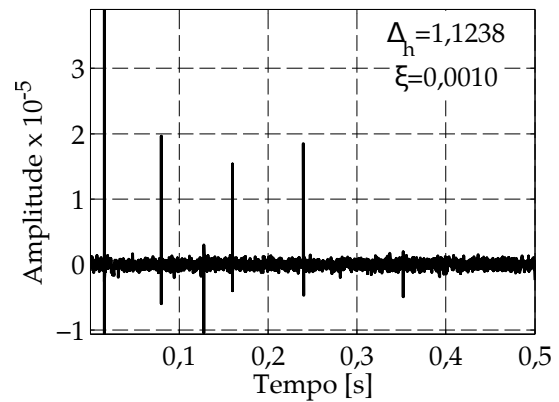


Figura 7: Aplicação a deconvolução em impulsos ao traço sísmico

Apesar de não demandar muito esforço para a

aquisição do pulso, a deconvolução em impulsos traz resultados, quando analisados qualitativamente, com ruído semelhante à técnica de divisão espectral com a onda direta, porém há a inserção de artefatos em direção oposta às reflexões, que são bem localizadas. Além disso, as amplitudes não são bem estimadas, sendo alteradas em até cinco ordens de grandeza, o que leva a um baixo valor de $\xi = 0,001$.

Deve-se levar em conta que a utilização de diversos traços sísmicos e a realização do empilhamento pretérito à deconvolução pode diminuir consideravelmente o ruído presente nas refletividades estimadas pela deconvolução.

A aplicação da deconvolução determinística se mostrou superior à probabilística. Os melhores resultados, com os menores erros e maior localização de reflexões quando às amplitudes de reflexões foram obtidos através da deconvolução determinística com a utilização do pulso estimado. Isso se deve ao fato de que a estimativa do pulso retira o ruído do sinal, deixando, na medida do possível, as características principais do pulso.

Como a onda direta está presente no traço sísmico e pode ser utilizada para estimar o pulso enviado pela fonte através do filtro adaptativo proposto, o método é promissor para a realização desta etapa do processamento sísmico.

6. APLICAÇÃO A DADOS REAIS

Para comparação e validação das técnicas de estimativa de pulso e deconvolução foram utilizadas dados sísmicos reais cedidos ao grupo. A linha sísmica de trabalho possui 150 traços sísmicos, totalizando 4 km de extensão, aquisitada do mar em direção à costa. Na Figura 8, são exibidos os traços com 4096 amostras temporais cada, totalizando uma duração de 8,2 s (tempo de propagação em duas vias) em estado bruto.

Aplicou-se aos dados, uma correção para a divergência geométrica da propagação sonora. Com os dados corrigidos, se deu início à análise por meio da aplicação do algoritmo da estima-

tiva do pulso para apenas um traço. Tomou-se cuidado em selecionar a onda direta de forma a obter um pulso de fase mínima, tendo em vista que é sabido que este tem um desempenho melhor nas técnicas de deconvolução (BOUSFIELD, 2017; MOUSA; AL-SHUHAIL, 2011).

O pulso de *airgun* pode ser estimado com as mesmas funções simples utilizadas para a exposição do método (Eq. (6) e Eq. (7)). Desta forma, o algoritmo para estimativa do pulso enviado pela fonte foi aplicado ao primeiro traço. O coeficiente de convergência utilizado foi de $\mu = 0,6$ e foram realizadas 1000 iterações.

Como a onda direta é conhecida, é possível observar o espectro de amplitude para encontrar coeficientes iniciais plausíveis. Com isso, se faz com que o algoritmo convirja e não desestabilize com a escolha de coeficientes iniciais discrepantes da solução. Com a análise, novos picos relevantes podem levar a inserção de novas funções simples que sejam capazes de reconstruir o espectro de forma mais precisa. Nesse caso, serão utilizados apenas o cosseno e a exponencial como funções para reconstrução do pulso, o que torna possível apenas a reconstrução de um pico de frequência.

A Figura 9 ilustra a onda direta e a estimativa do pulso obtida no domínio do tempo e da frequência. Mediante análise qualitativa se nota que o pulso estimado recupera a forma da onda direta de maneira satisfatória. O espectro, por ter sido utilizado apenas um cosseno para a estimativa do pulso, reproduz apenas um dos picos.

A convergência dos coeficientes α (frequência do cosseno) e β (abertura da exponencial) ocorre antes de 200 iterações e é visualizada na Figura 10. A mesma convergência é percebida para o erro (Eq. (9)) entre a onda direta e pulso estimado, que cai e estabiliza próximo a 2.

Com a estimativa do pulso, foi realizada a deconvolução de todos os traços. Aplicou-se a divisão espectral com amortecimento (devido à instabilidade de dados reais) com $\delta = 0,01$.

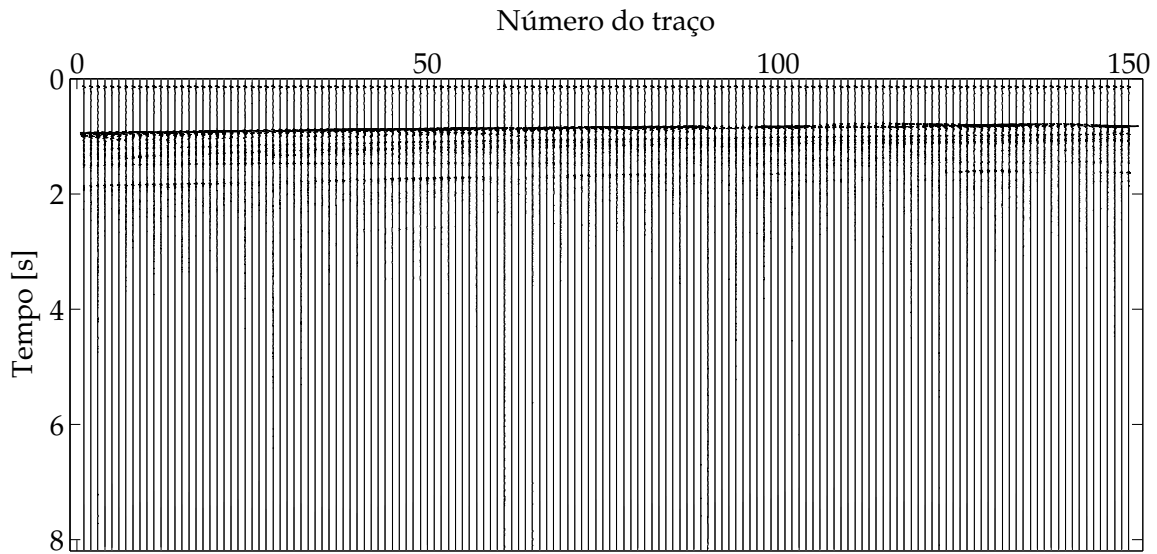
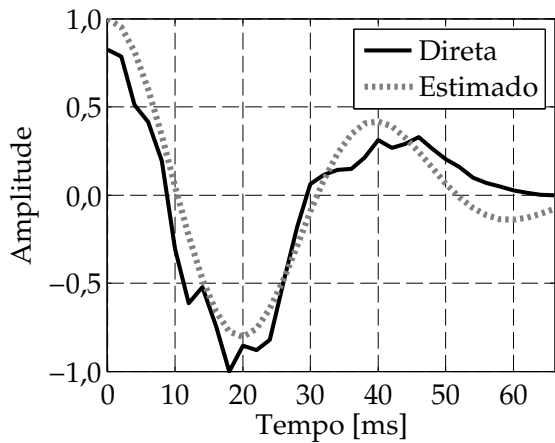
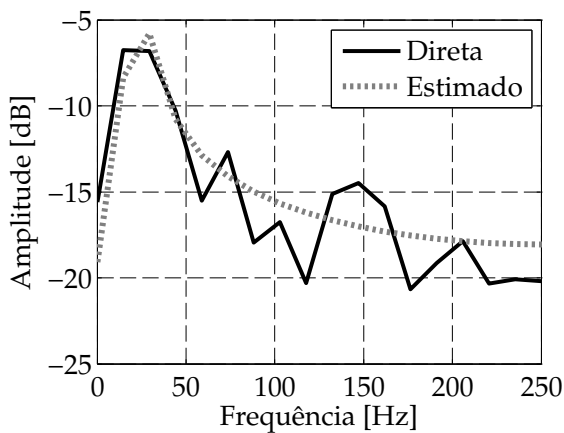


Figura 8: Traços da linha sísmica analisada em estado bruto.

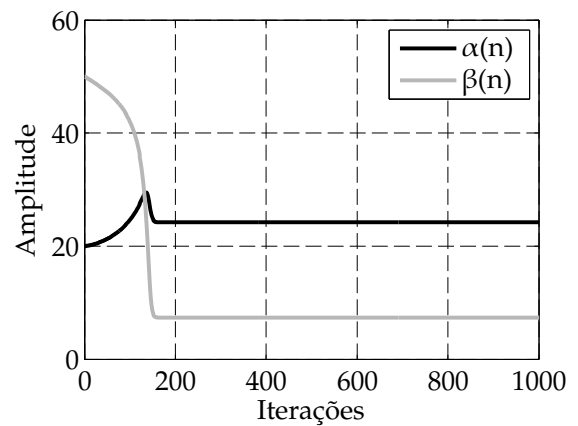


(a) Domínio do tempo

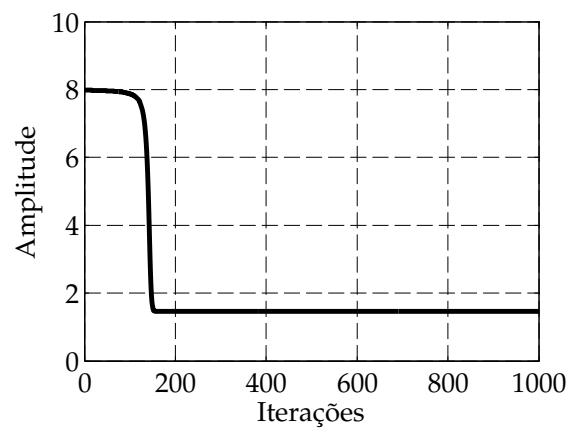


(b) Domínio da frequência

Figura 9: Estimativa do pulso enviado.



(a) Coeficientes adaptativos



(b) Erro

Figura 10: Convergência de coeficientes e erro.

Como espectro da onda direta (Figura 9 (b)) apresenta outros picos de frequência, foi feita uma avaliação da estimativa do pulso com a utilização de três funções simples ao invés de duas. Adicionou-se mais um cosseno com amplitude (A) de 10% da amplitude do primeiro:

$$\hat{x} = [A \cos(2\pi\alpha t) + 0,1A \cos(2\pi\beta t)] e^{-\pi^2\gamma^2 t^2}, \quad (15)$$

na qual o coeficiente A deve ser avaliado da mesma forma como visto para α e β .

Adaptou-se as frequências dos cossenos, α e β , e a abertura da exponencial, γ . O algoritmo adaptativo foi aplicado à onda direta com 1000 iterações e com um coeficiente de convergência $\mu = 0,4$. A comparação entre a onda direta e o pulso estimado é exposta na Figura 11.

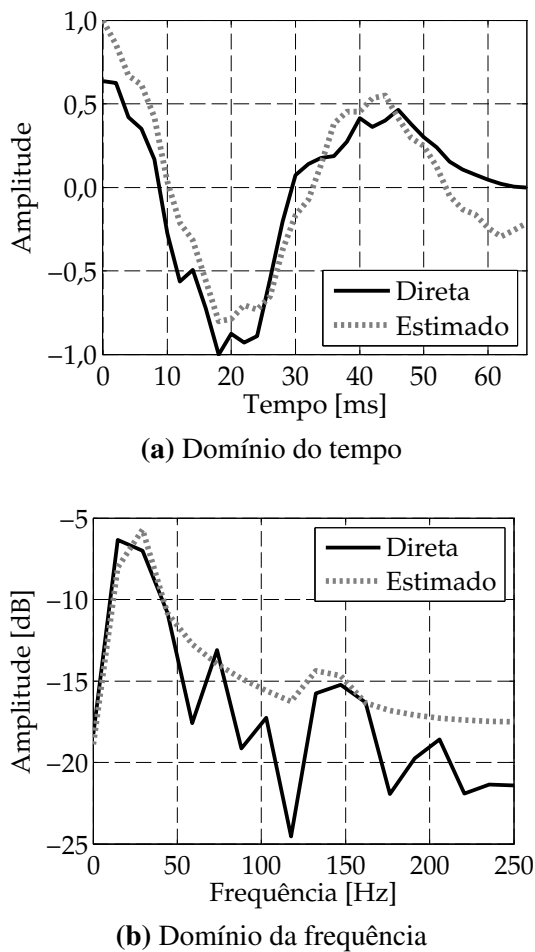
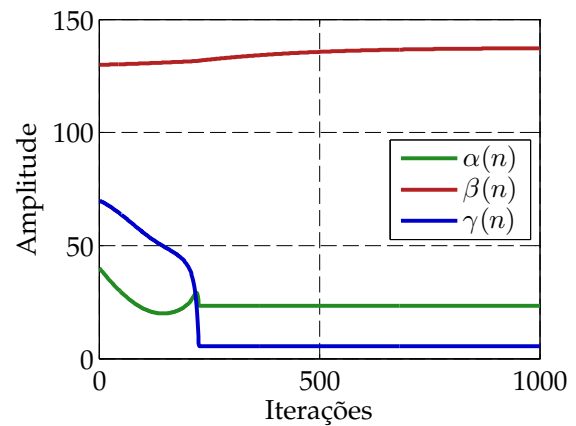


Figura 11: Estimativa do pulso enviado.

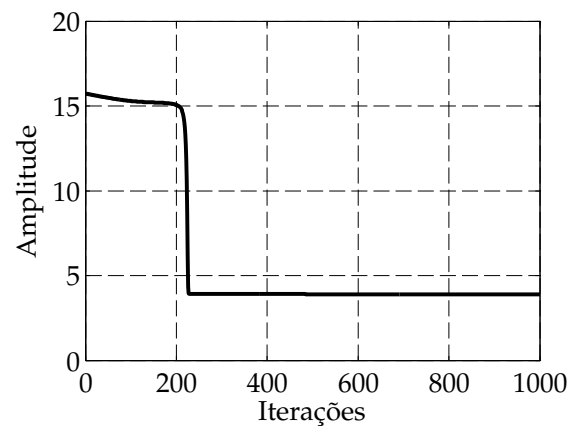
É possível perceber que para esse caso em que uma função simples a mais é utilizada, há maior

proximidade entre pulso estimado e a onda direta, quando comparado ao caso anterior.

Já as curvas para a progressão dos coeficientes e do erro com o número de iterações, estão dispostas na Figura 12. Nessas, se nota que há a convergência após a 200ª iteração, ou seja, o algoritmo se torna um pouco mais lento em relação ao caso anterior.



(a) Coeficientes adaptativos



(b) Erro

Figura 12: Convergência de coeficientes e erro.

Com um aumento na região de 3 s, o resultado para a deconvolução com a utilização do pulso estimado com duas funções simples é exposto na Figura 13, já o resultado para a utilização de três funções simples é exposto na Figura 14. É perceptível que as deconvoluções trazem melhoras na percepção das reflexões.

Algumas feições que não eram visíveis através dos dados não deconvolvidos passam a ser realçadas e ruído é removido. Contudo, nota-se que

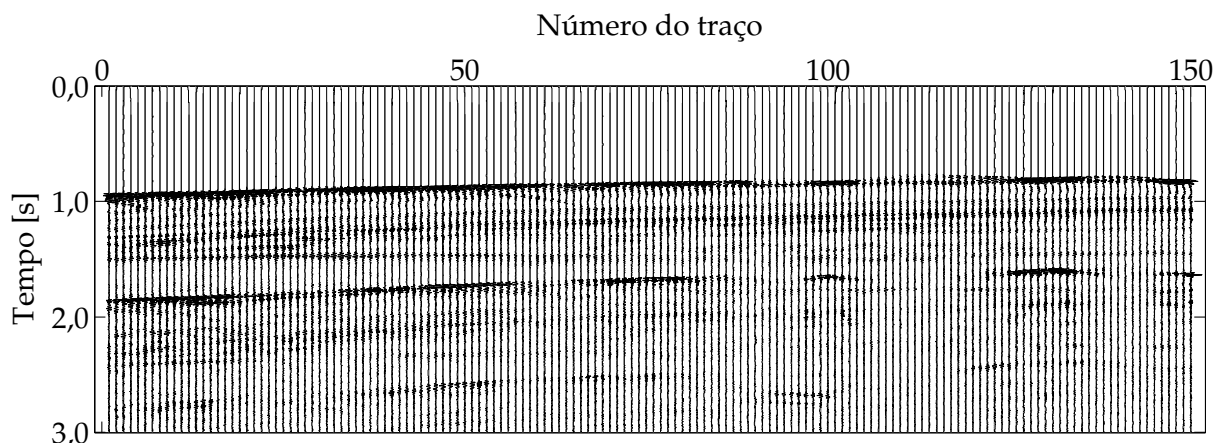


Figura 13: Deconvolução determinística com pulso estimado através da combinação de duas funções.

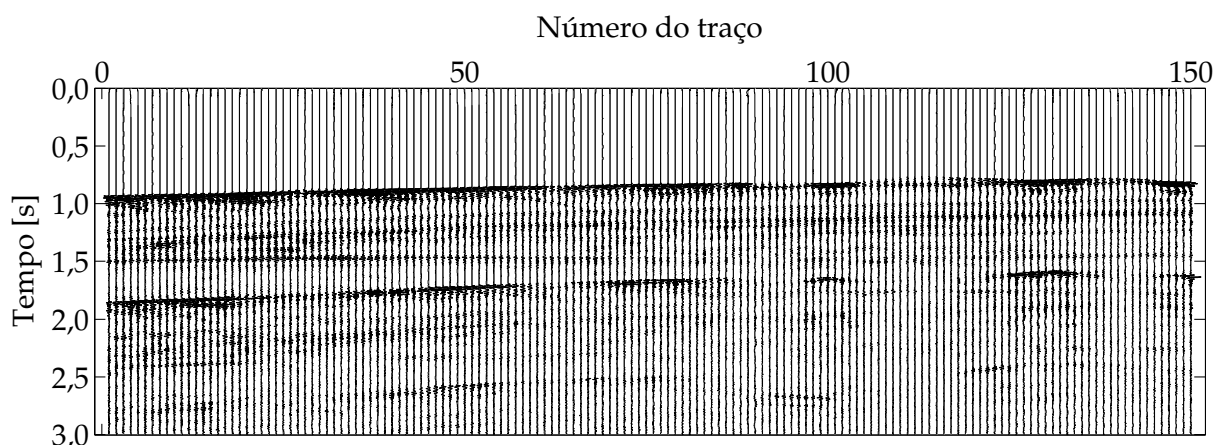


Figura 14: Deconvolução determinística com pulso estimado através da combinação de três funções.

a deconvolução utilizando três funções simples teve um desempenho não tão bom quanto a que utilizou duas funções. Ruído, principalmente abaixo das reflexões principais, começa a aparecer. Esse comportamento pode ser devido ao fato de que a utilização de três coeficientes, ao invés de dois, passou a reconstruir característica do ruído e não apenas do pulso.

Na Figura 15 esse padrão pode ser observado com mais clareza. Um destaque foi dado a uma região ao final dos conjunto de traços brutos, de traços deconvolvidos utilizando duas funções simples e de traços deconvolvidos utilizando três funções simples. Percebe-se que as deconvoluções trazem um realce das reflexões em destaque. Contudo, principalmente observando a feição 1, a utilização de três funções simples acrescentou ruído abaixo das reflexões, causando um efeito borrado. Algumas reflexões,

como a inferior dentro do 6º destaque, as inferiores do 3º destaque e a apontada pelo 2º destaque, só aparecem após a aplicação da deconvolução. Além disso, no 4º destaque, principalmente com a utilização de duas funções, pode-se observar a presença de eventos abaixo da reflexão principal, antes imperceptíveis. Apesar de pouca diferença, é possível notar que a deconvolução traz melhoras à imagem sísmica.

Como análise final, pode-se observar na Figura 16 (a), o resultado para a deconvolução com amortecimento dos traços utilizando a onda direta e na Figura 16 (b) o resultado para a deconvolução dos traços utilizando a técnica probabilística, a deconvolução em impulsos.

É possível perceber, que quando aplicada a dados reais, a deconvolução com amortecimento fazendo uso do pulso estimado através do algo-

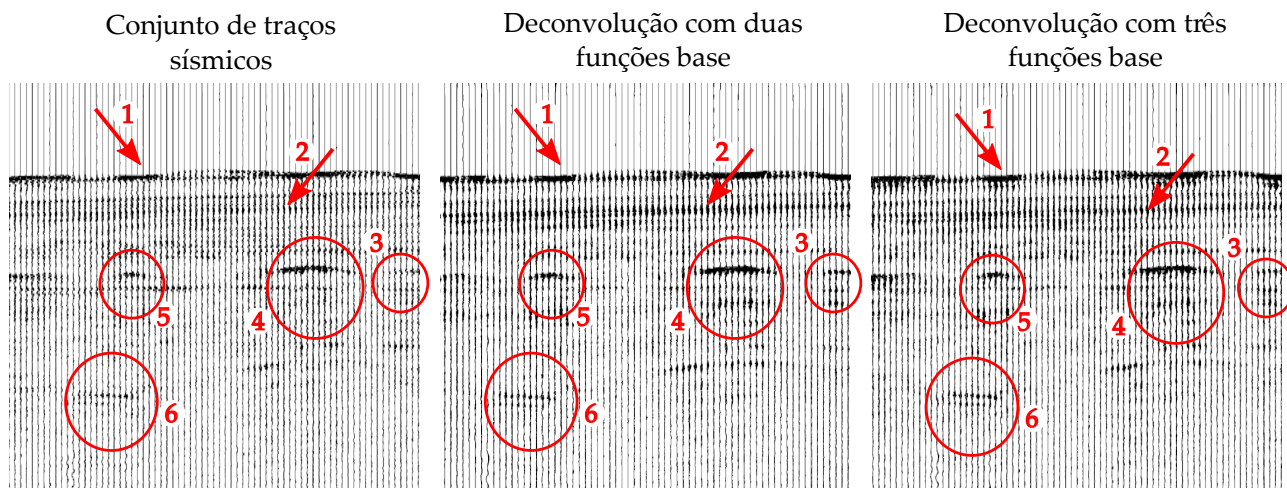
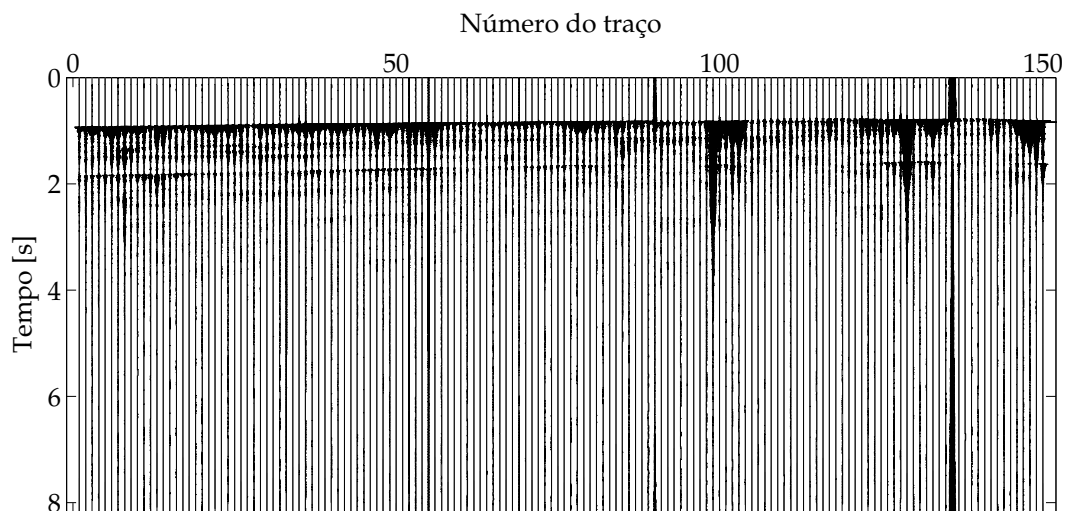
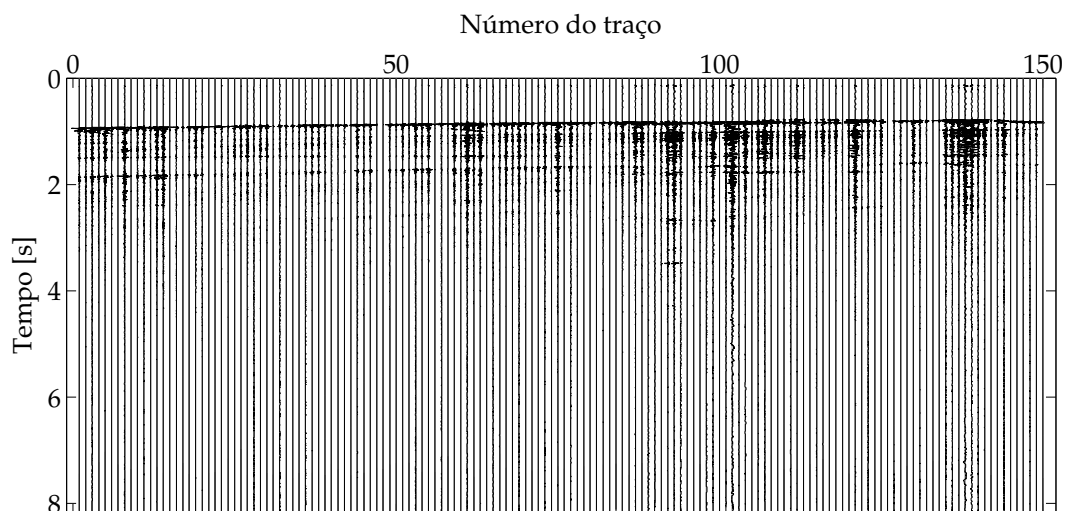


Figura 15: Destaque esquemático de traços brutos, deconvolvidos com duas e com três funções.



(a) Divisão espectral com regularização com a utilização da onda direta.



(b) Deconvolução em impulsos.

Figura 16: Resultados para aplicação de deconvolução probabilística e determinística com onda direta

ritmo proposto se mostra muito mais eficiente do que a deconvolução com amortecimento utilizando a onda direta e do que a deconvolução probabilística. Enquanto a utilização da onda direta aumenta o efeito borrado e acrescenta ruído, dificultando as identificações de feições e a deconvolução em impulsos adiciona ambiguidades e ruído, a deconvolução utilizando o pulso estimado revela feições não visíveis no dado bruto e realça feições já visíveis, melhorando a imagem sísmica. Desta forma, na ausência da informação do pulso enviado pela fonte, a aplicação da estimativa de pulso retorna melhores resultados.

7. CONCLUSÕES

Com o exposto no trabalho pode-se concluir que a técnica de deconvolução que utiliza o pulso enviado pela fonte retorna melhores resultados para a imagem sísmica quando comparada a técnicas probabilísticas. É possível utilizar a onda direta ou um pulso estimado para a realização deste tipo de operação. Todavia, o algoritmo exposto para a recuperação do pulso, estima de forma simples, robusta e eficiente o pulso descartando ruído. Com isso, os resultados da aplicação da deconvolução considerando o pulso estimado foram melhores, inclusive quando feita as comparações com a aplicação a dados reais.

Além disso, adicionalmente, a utilização de funções simples para a recuperação do pulso enviado pela fonte, permite o cálculo de um filtro inverso analítico, capaz de retornar a refletividade do meio de forma simples e direta.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), ao Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina e a Wavetech Soluções Tecnológicas pelo suporte.

REFERÊNCIAS

ARYA, V. Deconvolution of seismic data - an

overview. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, GE-16, p. 95–98, 1978.

AYRES, A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, n. 3, p. 16, 2001.

BACON, M.; SIMM, R.; REDSHAW, T. *3-D seismic interpretation*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.

BARUCH, M. et al. Pulse decomposition analysis of the digital arterial pulse during hemorrhage simulation. *Nonlinear Biomedical Physics*, Springer Nature, v. 5, n. 1, 2011.

BOUSFIELD, M. et al. Deconvolução utilizando filtragem adaptativa com decomposição em funções base. In: *Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina*. [S.l.: s.n.], 2016.

BOUSFIELD, M. M. *Deconvolução de traços sísmicos: análise, aplicação e estimativa de pulso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

BOUSFIELD, M. M. et al. Using base function decomposition in adaptive filter for seismic pulse retrieving. In: *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*. [S.l.: s.n.], 2016.

GURROLA, H.; BAKER, E.; MINSTER, B. Simultaneous time-domain deconvolution with application to the computation of receiver functions. *Geophysical Journal International*, v. 120, p. 537–543, 1995.

IKELLE, L.; ROBERTS, G.; WEGLEIN, A. Source signature estimation based on the removal of first-order multiples. *Geophysics*, v. 62, n. 6, p. 1904–1920, 1997.

JIA, Z. et al. A novel pulse design based on sinusoid gaussian function for UWB communication. In: *2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology*. [S.l.]: (IEEE), 2010.

LAMOUREUX, M.; MARGRAVE, G. *An analytic approach to minimum phase signals*. [S.l.], 2007.

LU, W. et al. Blind wavelet estimation using a zero-lag of the fourth-order statistics. *Journal of geophysics and engineering*, v. 4, p. 24–30, 2007.

MIKAELSEN, M. *Seismic survey Greenland 2013: Underwater sound propagation for South East Greenland offshore seismic survey*. [S.l.], 2013.

MOUSA, W.; AL-SHUHAIL, A. *Processing of Seismic Reflection Data Using MATLAB*. [S.l.]: Morgan & Claypool Publishers, 2011.

PEACOCK, K. L.; TREITEL, S. Predictive deconvolution: Theory and practice. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 34, n. 2, p. 155–169, apr 1969.

ROBINSON, E. Signal processing in geophysics. In: BJØRNØ, L. (Ed.). *Underwater Acoustics and Singal Processing*. [S.l.]: D. Reidel Publishing Company, 1981. (Mathematical and Physical Sciences, v. 66), p. 669–682.

RONDENAY, S. Upper mantle imaging with array recordings of converted and scattered teleseismic waves. *Surveys in Geophysics*, v. 30, p. 377–405, 2009.

SHERIFF, R. What is deconvolution? Adaptado da coluna da AAPG Explorer de 2004 “A Demystifying of Deconvolution”. 2004.

SIPKIN, S.; LERNER-LAM, A. Pulse-shape distortion introduced by broadband deconvolution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 82, p. 238–258, 1992.

WADSWORTH, G. P. et al. Detection of reflection on seismic records by linear operators. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 18, n. 3, p. 539–586, jul 1953.

WARNER, M. Signal processing and inverse theory. 2009.

WENZ, G. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *The journal of the acoustical society of America*, v. 34, n. 12, 1962.

WHITE, R. E.; O'BRIEN, P. N. S. Estimation of the primary seismic pulse. *Geophysical Prospecting*, Wiley-Blackwell, v. 22, n. 4, p. 627–651, dec 1974.

YILMAZ, O. *Seismic data processing*. [S.l.]: SEG Investigations in Geophysics, 1987.

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Análise numérica e experimental da medição da impedância acústica e absorção sonora utilizando a técnica *in situ* com dois microfones

Lobato, L. C.*⁺; Brandão, E.⁺

* Laboratório de Vibrações e Acústica, UFSC, Florianópolis, SC, lucascostalobato@gmail.com

⁺ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, eric.brandao@eac.ufsm.br

Resumo

Impedância acústica e absorção sonora são parâmetros importantes para diversas áreas da Engenharia Acústica, como: Acústica de Salas, Controle de Ruído, Auralização e Eletroacústica. Assim, a medição com precisão e exatidão da impedância acústica de materiais se faz necessária. Neste trabalho, o método de medição *in situ* de absorção sonora e impedância acústica que utiliza dois microfones (Sistema PP) é descrito. Em seguida, dois modelos para dedução da impedância de superfície são apresentados, são eles: modelo PWA e algoritmo q-term. Um modelo utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM - *Finite Element Method*) é proposto e uma análise a partir dele é feita. Através do modelo FEM foi possível demonstrar a convergência do algoritmo q-term para amostras localmente reativas e a divergência do modelo PWA para baixas frequências. Também através do modelo FEM uma análise de amostras finitas de superfícies circulares foi feita. O erro devido às pequenas dimensões da amostra foi identificado, uma estratégia baseada na literatura foi aplicada e uma melhora significativa foi obtida. Uma bancada experimental foi construída e testada. Os resultados experimentais a partir da bancada para uma amostra localmente reativa tiveram boa concordância com o modelo de Delany e Bazley e com os resultados obtidos em Tubo de Impedância, concordando com as previsões feitas a partir do modelo FEM. Erros encontrados nos resultados numéricos também foram encontrados nos resultados experimentais, mostrando que o modelo FEM é uma ferramenta válida para realizar previsões acerca do método de medição *in situ* utilizando Sistema PP. Ao final é apresentada a medição de uma amostra em um ambiente comum, mostrando a boa aplicabilidade da técnica *in situ* utilizando Sistema PP.

Palavras-chave: Medição *in situ*, Absorção Sonora, Impedância acústica, Materiais Porosos.

1. INTRODUÇÃO

A absorção sonora e impedância acústica são grandezas de grande interesse e relevância em várias áreas da Engenharia Acústica. Campos como Acústica de Salas, Controle de Ruído e Eletroacústica possuem em comum a frequente utilização de materiais porosos, sendo esses normalmente caracterizados por sua impedância acústica e coeficientes de absorção sonora.

O estudo e desenvolvimento de métodos para medição da impedância acústica é um tema relativamente antigo. Em 1940, Leo Beranek (1940) publicou um artigo com uma revisão de 9 métodos diferentes de medição de impedância acústica. Ao longo do tempo, todos os métodos

relatados por Beranek em 1940 acabaram se tornando obsoletos, porém, eles serviram como base para métodos que, hoje em dia, são consolidados (BRANDÃO *et al.*, 2015).

Os métodos de medição em Tubo de Impedância e em Câmara Reverberante são frequentemente utilizados na pesquisa e indústria por serem padronizados pelas normas ISO 10534:1998 e ISO 354:2003. Entretanto, ambos os métodos possuem restrições e desvantagens como: ser um método destrutivo do material, medir apenas impedância de superfície sob incidência normal e faixa de frequência limitada (caso do Tubo de Impedância) ou possuir um ambiente rigorosamente controlado, obter resultados apenas em bandas de frequência de oitava

ou 1/3 de oitava e obter apenas absorção sonora por incidência difusa (caso da Câmara Reverberante). Partindo de tais pontos, a técnica *in situ* pode apresentar vantagens em relação a ambos os métodos normatizados.

Dentre as principais vantagens da técnica *in situ* estão o fato de considerar condições reais de aplicação da amostra sendo possível realizar medições de materiais em utilização, ser uma técnica não-destrutiva do material e poder obter a impedância de superfície sob diferentes ângulos de incidência da onda sonora (BRANDÃO *et al.*, 2015). A possibilidade de realizar medições em ambientes comuns torna a técnica *in situ* uma ferramenta poderosa e com apelo comercial.

Os objetivos deste trabalho são:

- Apresentar uma breve descrição sobre o método de medição *in situ* de absorção sonora e impedância acústica a partir da técnica utilizando dois microfones (Sistema PP);
- Realizar uma análise da técnica do Sistema PP a partir de um modelo utilizando o Método dos Elementos Finitos, analisando a exatidão dos algoritmos de dedução do campo acústico, a influência do tamanho e da resistividade ao fluxo das amostras através de comparações ao modelo analítico de Johnson-Champoux-Allard (JOHNSON *et al.*, 1987; CHAMPOUX e ALLARD, 1991);
- Apresentar a bancada construída para realização dos experimentos e validá-la através de comparações com o modelo analítico de Denaly e Bazley (DELANY e BAZLEY, 1970) e medições em Tubo de Impedância.

1.1 Breve revisão teórica sobre impedância acústica e absorção sonora

A impedância acústica é dada como a razão entre a pressão sonora e velocidade de partícula em uma dada direção sendo ambas em um

mesmo ponto no espaço (FAHY F.J.; WALKER, J., 1998), como mostra a equação a seguir

$$\tilde{Z}_{Ac} = \frac{\tilde{P}}{\tilde{U}}, \quad (1)$$

em que \tilde{P} é a pressão sonora complexa e \tilde{U} é a velocidade de partícula complexa em uma dada direção.

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora, a grandeza de interesse é a impedância de superfície, que representa a impedância acústica na interface entre dois meios. Como descrito em detalhes por Brandão (2016), considerando uma camada de material sobre uma superfície rígida, como ilustrado pela Figura 1, a impedância de superfície é dada como

$$\tilde{Z}_s = -j \frac{\rho_1 c_1}{\cos(\theta_t)} \cot(d_1 k_1 \cos(\theta_t)), \quad (2)$$

sendo que ρ_1 é a densidade complexa, c_1 a velocidade de propagação complexa da onda, θ_t o índice de refração da onda incidida, k_1 o número de onda e d_1 a espessura da amostra (MAREZE, 2013).

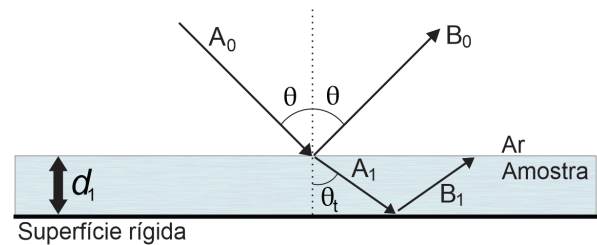


Figura 1: Ilustração de camada de material sobre superfície rígida e sob a incidência de uma onda sonora com amplitude A_0 que reflete com amplitude B_0 , refrata com um ângulo θ_t e amplitude A_1 .

O coeficiente de reflexão de um material quantifica o quanto da energia sonora incidida sobre ele é refletida. O coeficiente de absorção sonora α , por sua vez, indica o quanto de energia sonora incidida em uma amostra é dissipada por ela. Ambas grandezas são dependentes da impedância de superfície do material \tilde{Z}_s e suas equações são dadas por

$$R = \frac{\tilde{Z}_s \cos(\theta) - \rho_0 c_0}{\tilde{Z}_s \cos(\theta) + \rho_0 c_0} \quad (3)$$

e

$$\alpha = 1 - |R^2|, \quad (4)$$

sendo θ o ângulo de incidência da onda em relação ao vetor normal à superfície, ρ_0 e c_0 a densidade e velocidade de propagação da onda no ar, respectivamente.

2. O MÉTODO IN SITU UTILIZANDO DOIS MICROFONES

No trabalho de Brandão *et al.* (2015) os autores apresentam uma larga revisão sobre os métodos de medição *in situ* de absorção sonora e impedância acústica dividindo-os em duas grandes classes: métodos de separação temporal e métodos baseados em modelos de campo acústico.

Os métodos de separação temporal, introduzido nos trabalhos de Garai (1993) e Mommertz (1995), tem o objetivo de separar a onda sonora incidente de sua reflexão através de medições de pressão sonora próximas à superfície de uma amostra. Tendo as informações de onda incidente e onda refletida separadamente, é possível calcular o coeficiente de reflexão da superfície a partir de sua definição (como descrito na Seção 1.1). Os métodos baseados em modelos de campo acústico, por sua vez, utilizam formulações matemáticas que descrevem o campo acústico sobre uma superfície com impedância \tilde{Z}_s , relacionando tal impedância com grandezas mensuráveis como pressão sonora e/ou velocidade de partícula. Assim, realizando medições dessas grandezas próximas à superfície de uma amostra, é possível estimar sua impedância de superfície Z_s utilizando tais formulações matemáticas.

No presente trabalho será utilizada a técnica do Sistema PP. Essa técnica se encaixa na classe de métodos *in situ* baseados em modelos de campo acústico. O método foi introduzido por Allard e Sieben (1984), em que os autores apresentaram como calcular uma impedância de superfície a partir da medição da pressão sonora feita por dois microfones. Li e Hodgson (1997) apresentaram uma alternativa para calcular a impedância de superfície a partir da FRF entre dois microfones. Esses novos cálculos propo-

tos por Li e Hodgson vieram a ser chamados de modelo PWA (*Plane Wave Approximation*), e sua formulação será apresentada na Seção 2.1.1.

A técnica do Sistema PP consiste em posicionar dois microfones paralelamente sobre uma superfície que deseja-se medir, onde z_1 é a altura do microfone 1 e z_2 é a altura do microfone dois. Posiciona-se uma fonte sonora com uma altura h_s à uma distância horizontal r dos microfones, como mostra a Figura 2. A FRF de interesse, que é a função utilizada para estimar a impedância de superfície desejada, é a razão entre as pressões medidas pelos dois microfones, dada como

$$H_m = \frac{p_{m1}}{p_{m2}}, \quad (5)$$

sendo p_{m1} o espectro da pressão sonora medida pelo microfone 1 e p_{m2} o espectro da pressão sonora medida pelo microfone 2.

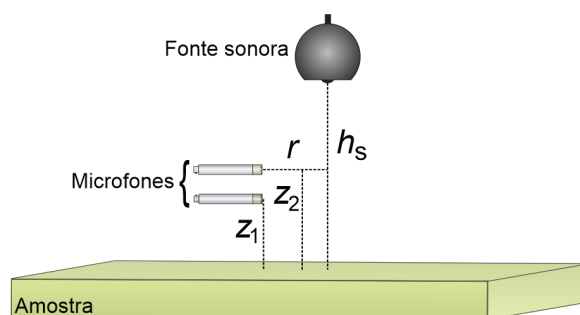


Figura 2: Disposição do Sistema PP sobre uma superfície que deseja-se medir.

2.1 Modelos de campo acústico para cálculo da impedância de superfície

Como mostrado na seção anterior, a utilização do Sistema PP consiste em obter dois pontos de pressão sonora sobre a amostra, sendo necessária a utilização de algum modelo de campo acústico para estimar a impedância de superfície da amostra medida. Neste trabalho são utilizados dois modelos: modelo PWA e algoritmo q-term.

2.1.1 Modelo PWA (Plane Wave Approximation)

O modelo PWA considera em sua formulação a incidência de ondas esféricas que refletem de maneira especular sobre uma superfície com coeficiente de reflexão R_{PWA} . Tal consideração torna o modelo menos exato, porém menos complexo e menos computacionalmente custoso.

Para o cálculo de R_{PWA} é usada como dado de entrada a FRF H_m , como mostrado a seguir

$$R_{PWA} = \frac{\frac{e^{-jk_0|r_{11}|}}{|r_{11}|} - H_m \frac{e^{-jk_0|r_{21}|}}{|r_{21}|}}{H_m \frac{e^{-jk_0|r_{22}|}}{|r_{22}|} - \frac{e^{-jk_0|r_{12}|}}{|r_{12}|}}, \quad (6)$$

sendo $|r_{11}| = \sqrt{r^2 + (h_s - z_1)^2}$, $|r_{12}| = \sqrt{r^2 + (h_s + z_1)^2}$, $|r_{21}| = \sqrt{r^2 + (h_s - z_2)^2}$ e $|r_{22}| = \sqrt{r^2 + (h_s + z_2)^2}$. A partir de R_{PWA} é possível calcular a impedância de superfície $Z_{s,PWA}$ estimada pelo modelo PWA (BRANDÃO, 2011), sendo

$$Z_{s,PWA} = \frac{1 + R_{PWA}}{1 - R_{PWA}} \frac{\sqrt{r^2 + h_s^2}}{h_s} \frac{jk_0 \sqrt{r^2 + h_s^2}}{1 + jk_0 \sqrt{r^2 + h_s^2}}. \quad (7)$$

2.1.2 Modelo q-term

Di e Gilbert (1993) propuseram uma equação para prever a pressão sonora acima uma amostra localmente reativa sobre superfície rígida com impedância de superfície Z_s , dada por.

$$p = \frac{e^{-jk_0|\vec{r}_1|}}{|\vec{r}_1|} + \frac{e^{-jk_0|\vec{r}_2|}}{|\vec{r}_2|} - 2k_0\beta \int_0^\infty e^{-k_0\beta q} \frac{e^{-jk_0\sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}}}{\sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}} dq, \quad (8)$$

em que k_0 é o número de onda do ar e h_r é a altura do ponto receptor em relação a superfície de admitância β . Essa equação é baseada no posicionamento relativo entre fonte e receptor, como pode ser vista na Figura 3, e descreve a

pressão sonora em função das posições relativas da fonte, receptor e superfície da amostra e também da admitância $\beta = \rho_0 c_0 / \tilde{Z}_s$ da amostra.

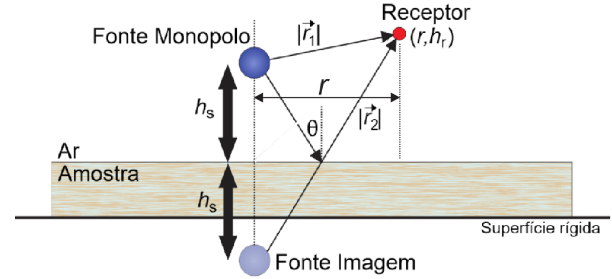


Figura 3: Ilustração de uma fonte monopolo e sua “fonte imagem” e um receptor acima de uma amostra que está sobre superfície rígida.

A Eq. 8 possui uma certa complexidade pois não é possível invertê-la analiticamente para obter \tilde{Z}_s em função da pressão sonora p . Assim, baseado no trabalho de Di e Gilbert, Alvares e Jacobsen (2008) propuseram um algoritmo iterativo, que mais tarde veio a ser chamado de algoritmo q-term no trabalho de Brandão (2011), para solução de tal modelo. Como q-term é um algoritmo iterativo, ele necessita de uma estimativa inicial $Z_{inicial}$ para poder convergir para algum valor. Além disso, também são dados de entrada do algoritmo, no caso do Sistema PP, a FRF H_m e as posições relativas h_s , r , z_1 e z_2 (ver Figura 2). A sequência lógica do algoritmo pode ser dada da seguinte forma:

1. $Z_{inicial}$ é informado ao algoritmo. Neste trabalho Z_{PWA} será utilizado como estimativa inicial;
2. A partir de $Z_{inicial}$ são calculados dois pontos de pressão com alturas z_1 e z_2 e, logo após, uma FRF H_{mc} é calculada;
3. A FRF H_{mc} é subtraída do valor medido H_m . Se $|H_m - H_{mc}|$ for menor que uma tolerância ξ definida previamente, $Z_{inicial}$ é a impedância de superfície da amostra e o algoritmo é encerrado. Caso contrário, uma nova estimativa é calculada pelo método da secante e os passos 1 e 2 são repetidos até a tolerância ser satisfeita ou o número máximo de iterações seja alcançado.

a partir dos modelos PWA e q-term. Como mencionado na Seção 2.1.2, o modelo q-term considera uma superfície localmente reativa. Um comportamento localmente reativo tende a acontecer em amostras com altos índices de refração. E como pode ser concluído através do trabalho de Delany e Bazley (1970), altas resistividades ao fluxo resultam em altos índices de refração. Isso justifica o erro do algoritmo q-term já que, a princípio, a resistividade ao fluxo da amostra não é alta o suficiente para apresentar um comportamento localmente reativo. Em baixas frequências é necessário um índice de refração maior para que a superfície seja considerada localmente reativa. Isso explica o porque em baixas frequências o erro para amostras não-localmente reativas é maior. Esse resultado corrobora com o trabalho de Brandão *et al.* (2012).

O modelo PWA apresenta valores negativos de coeficiente de absorção em baixa frequência, algo que não possui sentido físico. Porém, isso acontece porque nessa faixa de frequência a aproximação feita pelo modelo em sua formulação matemática, de que a onda esférica reflete como uma onda plana, não é válida.

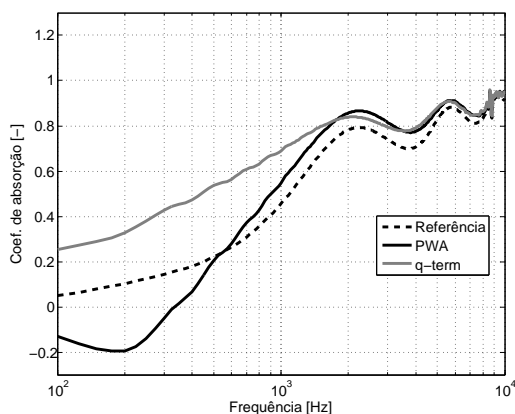


Figura 6: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 5000 \text{ Nsm}^{-4}$ de superfície infinita.

A Figura 7 apresenta o resultado de uma simulação semelhante ao resultado apresentado pela Figura 6, porém nesta, com uma amostra de resistividade ao fluxo $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$, 10 vezes maior do que a anterior. Neste caso, o erro do modelo PWA persiste, já que a mudança de re-

sistividade ao fluxo em nada muda a limitação do modelo. Porém, o algoritmo q-term apresenta um resultado substancialmente diferente. A diferença entre a resposta através do q-term e a referência que no caso anterior chegava à 0,25, neste caso tende à 0,00. O aumento da resistividade ao fluxo faz com que a amostra tenha um comportamento localmente reativo, explicando o sucesso do algoritmo q-term. Isso também demonstra que apesar do modelo PWA apresentar resultados erráticos em baixa frequência, ele é uma boa estimativa inicial para o algoritmo q-term, algo bastante importante para garantir a convergência do algoritmo.

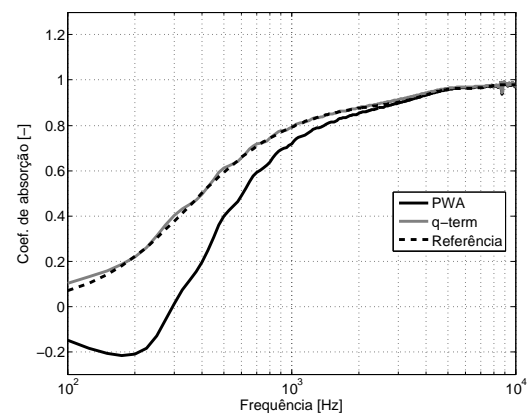


Figura 7: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$ de superfície infinita.

3.3 Influência do tamanho da amostra

Até então, foram analisadas apenas amostras idealmente infinitas. Entretanto na prática toda e qualquer amostra possui uma dimensão finita. O objetivo desta seção é analisar a influência do tamanho finito de uma amostra de superfície circular e aplicar uma estratégia para a redução do erro devido a influência do tamanho da amostra. As condições de contorno aplicadas são ilustradas pela Figura 8.

Considerando uma resistividade ao fluxo $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$, foram simuladas amostras circulares de três diferentes raios: 60 cm, 40 cm e 20 cm. A Figura 9 apresenta o coeficiente de absorção das três amostras de tamanhos diferentes calculado com o algoritmo q-term. Para a amostra de raio 20 cm, até 600 Hz

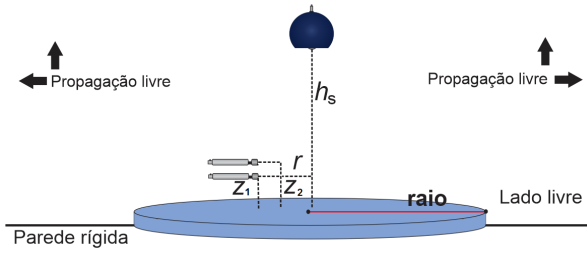


Figura 8: Ilustração das condições de contorno consideradas para simular amostras finitas.

o erro fica em torno de 0,1, em relação a referência. Acima de 600 Hz o resultado oscila consideravelmente, causando um erro de até 0,3 em aproximadamente 2000 Hz. O erro mais proeminente acontece na frequência de 8675 Hz, onde metade do comprimento de onda é aproximadamente 2 cm, exatamente a distância entre os pontos de pressão captados sobre a amostra. Esse erro causado pela distância entre os dois pontos de pressão sonora captados é evidenciado com a diminuição do tamanho da amostra.

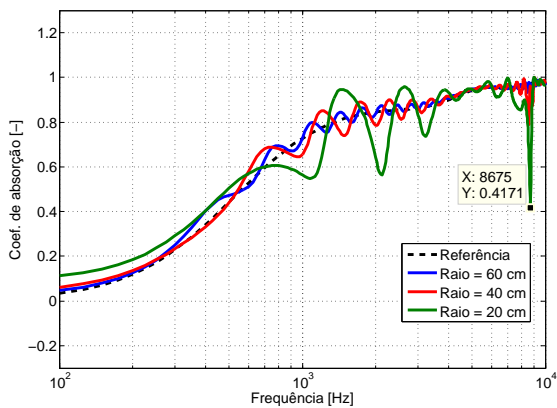


Figura 9: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$ de três diferentes tamanhos.

Brandão *et al.* (2010) e Hirosawa *et al.* (2009) propuseram estratégias para diminuir o erro devido ao tamanho finito da amostra. Ambos obtiveram resultados satisfatórios para amostras de superfícies retangulares. Baseados nas estratégias utilizadas por Brandão e Hirosawa, a estratégia aqui aplicada consiste em variar a distância horizontal r entre fonte e sensores, mantendo a fonte sonora no centro geométrico da superfície da amostra.

A Figura 10 apresenta o coeficiente de absorção da amostra de raio 20 cm presente na Figura 9, porém, desta vez, para quatro diferentes valores da distância horizontal r .

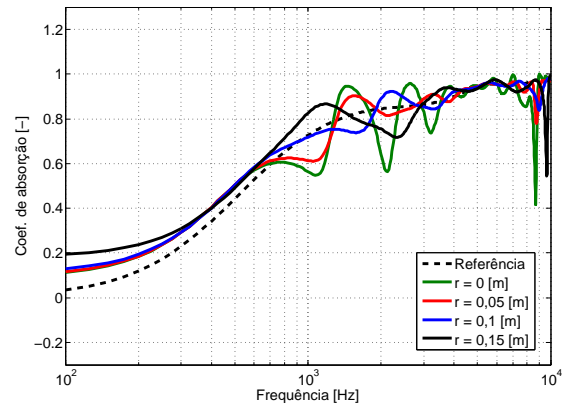


Figura 10: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$ e raio 20 cm medido com quatro diferentes valores da distância horizontal r .

A estratégia de variar a distância r , utilizada na literatura em amostra de superfície quadrada, também funciona para amostra de superfície circular. Entre as distâncias $r = 0 \text{ m}$, $r = 0,05 \text{ m}$, $r = 0,1 \text{ m}$ e $r = 0,15 \text{ m}$, a que apresentou o melhor resultado é a distância $r = 0,1 \text{ m}$. Com $r = 0 \text{ m}$, em 2000 Hz chegou à 0,25, com $r = 0,1 \text{ m}$, por sua vez, o erro foi reduzido à menos de 0,05.

Ter um valor de r diferente de zero significa ter uma incidência oblíqua. Para $h_s = 0,3 \text{ m}$, $z_1 = 0,01 \text{ m}$ e $z_2 = 0,03 \text{ m}$, um valor de $r = 0,1 \text{ m}$ é igual a um ângulo de incidência $\theta = 20^\circ$ em relação ao vetor normal à superfície da amostra. O cálculo do ângulo de incidência é feito a partir da distância horizontal r e da distância entre a fonte e o ponto médio entre os microfones, e pode ser calculado como

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r}{h_s - \frac{(z_1 + z_2)}{2}} \right). \quad (9)$$

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos de medição com Sistema PP, foram utilizados os seguintes equipamentos: computador, placa de aquisição de sinais, amplificador de potência, fonte sonora e dois microfones de 1/2". Primeiramente o sinal de excitação, ainda digital, é gerado no computador e enviado ao conversor digital-analógico. O conversor envia o sinal analógico (elétrico) para ao amplificador, onde será configurada a potência do sinal que será enviado à fonte sonora. Do amplificador, o sinal elétrico é enviado à fonte sonora, que radiará a energia sonora. Os sensores próximos à amostra captam a energia sonora radiada pela fonte e a enviam em termos de sinal elétrico à placa de aquisição de sinais, onde o sinal será convertido de analógico para digital. A placa de aquisição de sinais envia o sinal, em formato digital, ao computador, onde é gravado e analisado. A cadeia de medição é ilustrada pela Figura 11.

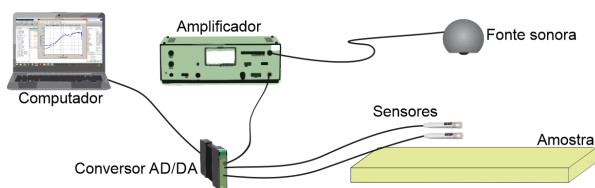


Figura 11: Ilustração das condições de contorno consideradas para simular amostras finitas.

Para a realização dos experimentos, uma série de aparatos foram construídos para sustentação dos microfones e da fonte sonora, de modo a ter um controle preciso do posicionamento relativo entre ambos. A Figura 12 mostra o sistema de sustentação construído e a Figura 13 detalha os ajustes possíveis das distâncias h_s , r , z_1 e z_2 .

Foram selecionadas duas amostras diferentes para realização dos experimentos, denominadas Amostra 1 e Amostra 2. Ambas amostras tiveram sua resistividade ao fluxo medida através da norma ISO 9053:1991 e também seu coeficiente de absorção em Tubo de Impedância utilizando a norma ISO 10534:1998. A partir do dado de resistividade ao fluxo, é possível



Figura 12: Foto da estrutura de sustentação da fonte sonora e microfones.



Figura 13: Detalhe dos ajustes das distâncias h_s , r , z_1 e z_2 .

através do modelo de Delany e Bazley calcular o coeficiente de absorção dos materiais. Sendo assim, tem-se duas referências para os resultados experimentais: modelo analítico de Delany e Bazley (chamado de referência nas legendas dos gráficos) e o método normalizado do Tubo de Impedância.

Para validação da técnica do Sistema PP as me-

dições foram realizadas dentro de uma Câmara Reverberante apenas para garantir uma boa relação sinal-ruído. Posteriormente foram realizadas também medições em ambientes factíveis para analisar a aplicabilidade do método. Antes da realização dos experimentos, os microfones foram calibrados seguindo os procedimentos descritos no Apêndice 5.1.

4.1 Validação da técnica do Sistema PP

A Figura 14 apresenta o coeficiente de absorção da Amostra 1, que possui resistividade ao fluxo $\sigma = 6900 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões $0,05 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$, medido com Sistema PP e calculado com os modelos PWA e q-term. A configuração do Sistema PP foi $h_s = 0,3 \text{ m}$, $r = 0,1 \text{ m}$, $z_1 = 0,01 \text{ m}$ e $z_2 = 0,025$.

Assim como nas simulações, os modelos PWA e q-term convergiram para referência (modelo de Delany e Bazley) em alta frequência, porém falharam em baixas frequências pelos mesmos motivos descritos na Seção 3.2, visto que a Amostra 1 possui baixa resistividade ao fluxo. O que é, de certa forma, satisfatório já que os resultados previstos em simulação foram confirmados experimentalmente.

O decaimento brusco no coeficiente de absorção devido ao espaçamento dos microfones encontrado nas simulações também é verificado nos experimentos. O decaimento no coeficiente de absorção chega ao seu máximo em 11800 Hz . Essa é a frequência cujo meio comprimento de onda vale aproximadamente $0,015 \text{ m}$, a mesma distância que separa os microfones.

O resultado obtido em Tubo de Impedância apresentou uma diferença em relação ao modelo de Delany e Bazley (DELANY e BAZLEY, 1970). Tal discordância ocorreu devido a dificuldade de moldar a amostra para ser inserida no tubo, pois ao ser introduzida nele, a Amostra 1 acabou sendo comprimida, tendo sua espessura reduzida.

A Figura 15 apresenta o coeficiente de absorção da Amostra 2, que possui resistividade ao fluxo

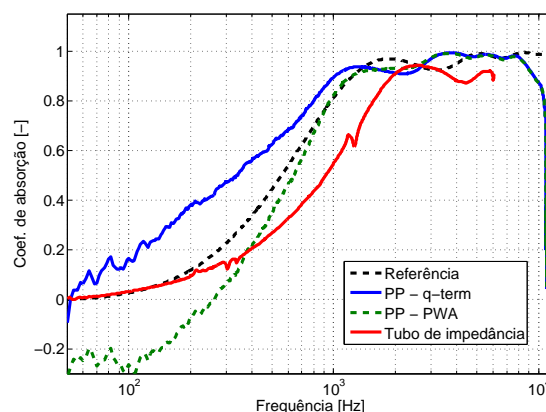


Figura 14: Coef. de abs. α da Amostra 1 com $\sigma = 6900 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões $0,05 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$.

$\sigma = 54700 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões $0,02 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$, medido com Sistema PP e calculado com os modelos PWA e q-term. A configuração do Sistema PP foi $h_s = 0,3 \text{ m}$, $r = 0,1 \text{ m}$, $z_1 = 0,01 \text{ m}$ e $z_2 = 0,025$.

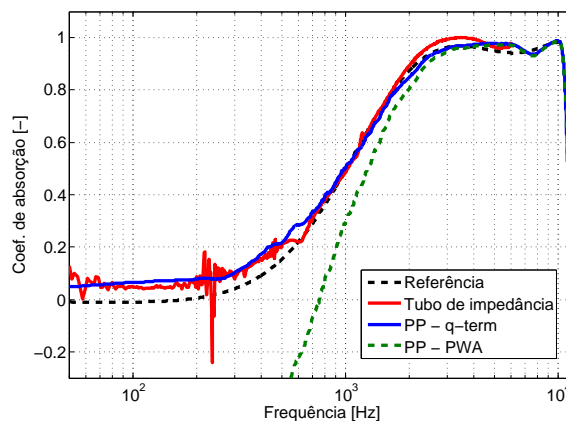


Figura 15: Coef. de abs. α da Amostra 2 com $\sigma = 54700 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões $0,02 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$.

Para a Amostra 2 (ver Figura 16), o algoritmo q-term apresentou um ótimo desempenho, tendo um erro desprezível em relação ao modelo analítico e ao tubo de impedância. Como a Amostra 2 possui alta resistividade ao fluxo, assumi-la como localmente reativa é uma consideração válida. O modelo PWA, por sua vez, convergiu apenas em altas frequências, apresentando coe-

ficiente de absorção negativo em baixa frequência, como previsto pelos resultados numéricos.

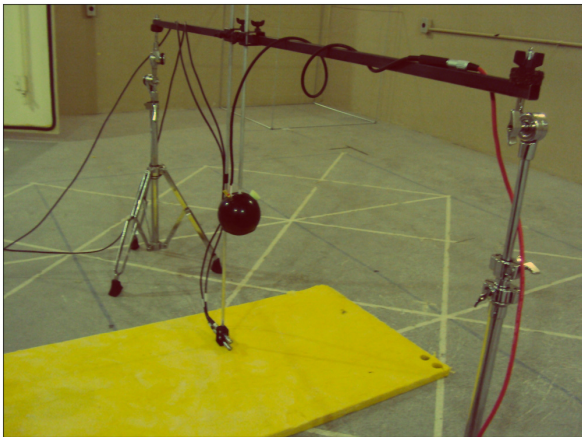


Figura 16: Foto da medição da Amostra 2 utilizando Sistema PP realizada dentro de uma câmara reverberante.

4.2 Aplicação prática

A Amostra 2 com dimensões 0,02 m x 0,6 m x 0,6 m foi medida em um ambiente comum. A medição feita no ambiente ambiente, denominada “*in situ*”, foi realizada em uma sala de escritório de pequeno porte. A amostra foi posicionada sobre o chão e o processo de medição foi realizado assim como feito previamente dentro da câmara reverberante. A medição realizada no ambiente *in situ* foi comparada a medição realizada em câmara reverberante utilizando a mesma amostra e mesma configuração de medição, que foi: $h_s = 0,3$ m, $r = 0$ m, $z_1 = 0,01$ m e $z_2 = 0,025$ m. A Figura 17 apresenta o coeficiente de absorção da Amostra 2 medida em câmara reverberante e *in situ*. A medição *in situ* superestimar o coeficiente de absorção em 0,05 em relação a medição em câmara reverberante até a frequência de 1 kHz. Após 1 kHz ambas medições convergiram para referência. A superestimativa do coeficiente de absorção pode ser devido à uma incerteza de medição associada à erros experimentais no posicionamento da fonte e sensores (BRANDÃO, 2011). Em outras palavras, a diferença encontrada entre as medições não necessariamente se deve ao fato de terem sido realizadas em ambientes diferentes, já que, segundo Brandão (2011), os métodos *in situ* são vulneráveis a incertezas de medição.

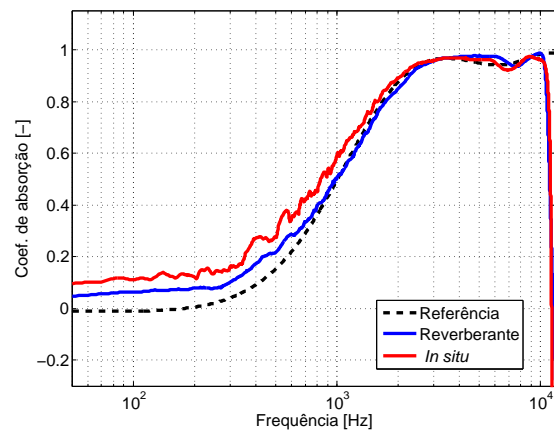


Figura 17: Coef. de abs. α da Amostra 2 com $\sigma = 54700 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões 0,02 m x 0,8 m x 0,6 m medido *in situ*.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o referencial teórico utilizado no método de medição *in situ* utilizando o Sistema PP. Através de simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos foi possível identificar que o modelo PWA, apesar de ser um modelo aproximado e apresentar falhas em baixas frequências, é uma boa estimativa inicial para o algoritmo q-term. O algoritmo q-term, por sua vez, apresentou ótimos resultados para amostras localmente reativas. O erro para amostras finitas de superfície circular também foi verificado numericamente e para reduzir tal erro, foi visto que a estratégia utilizada na literatura para amostras retangulares também se aplica no caso de amostras circulares.

Duas amostras com resistividades ao fluxo diferentes tiveram seus coeficientes de absorção medidos e comparados ao modelo analítico de Delany e Bazley e resultados obtidos no Tubo de Impedância. As previsões feitas através da análise numérica foram comprovadas experimentalmente.

5.1 Vantagens e desvantagens

A técnica *in situ* tem como principais vantagens ser um método não destrutivo do material e que leva em conta suas condições reais de aplicação. Assim, a medição pode ser feita em materiais já

aplicados e também em materiais para os quais a medição utilizando outros métodos seria inviável, como: absorvedores de membrana, asfalto, cadeiras, materiais porosos já aplicados, etc.

A desvantagem do método é que o mesmo possui um pós-processamento complexo e computacionalmente custoso. A implementação dos algoritmos que deduzem o campo acústico, principalmente algoritmos como o *q-term*, que considera a reflexão da frente de onda esférica, não é uma tarefa fácil. O método também é suscetível a incertezas associadas ao posicionamento relativo entre fonte, receptores e amostra, ficando evidente através do resultado apresentado pela Figura 17.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao FIPE (Fundo de Incentivo à Pesquisa) pelo suporte financeiro, à Universidade Federal de Santa Maria e à Universidade Federal de Santa Catarina pelas estruturas oferecidas para realização das tarefas envolvidas no trabalho.

APÊNDICE

Na prática, os transdutores possuem, um em relação ao outro, desvios de magnitude e fase que são inerentes à fabricação. Então, para se obter a FRF com maior exatidão é necessário realizar uma calibração relativa entre os transdutores. O processo de calibração, apresentado por Champoux, Nicolas e Allard (1998) consiste em posicionar ambos microfones sobre uma superfície rígida, com os diafragmas um de frente ao outro à 1 mm de distância, como mostra a Figura 18. Com a fonte sonora sobre os transdutores, alimenta-se a mesma com um sinal que varra a faixa de frequência de interesse. Assim, a função resposta em frequência p_{m1}/p_{m2} entre os dois transdutores será chamada de H_{cal} . A mesma será multiplicada pelas medições próximas à amostra, com a intenção de diminuir erros associados a diferença de magnitude e fase entre os microfones. Experimentalmente, a FRF H_m será

$$H_m = \left(\frac{p_{m1}}{p_{m2}} \right) H_{cal}^{-1}. \quad (10)$$



Figura 18: Foto da calibração relativa entre os microfones.

REFERÊNCIAS

- ALLARD J. F.; SIEBEN, B. Measurements of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyzer. **Journal of Acoustical Society of America**, 1984.
- ALVARES, F.; JACOBSEN, D. An iterative method for determining the surface impedance of acoustic materials in situ. **Internoise**, 2008
- BERANEK, L. Precision measurement of acoustic impedance. **Journal of Acoustical Society of America**, 1940.
- BRANDÃO, E. **Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica**. Tese de doutorado. UFSC, 2011.
- BRANDÃO, E. **Acústica de Salas: Projeto Modelagem**. [S.l.]: Blucher, 2016. ISBN 9788521210061.

BRANDÃO E.; LENZI, A.; PAUL, S. A review of the in situ impedance and sound absorption measurement techniques. **Acta Acustica unitedwith Acustica**, 2015.

BRANDÃO, E.; LENZI, A.; FULCO, E.; TIJS, E. Error estimation due to sample size effects of in situ surface impedance measurements. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2010.

BRANDÃO, E.; MAREZE, P. H.; SILVA, A. R. Impedance measurement of non-locally reactive samples and the influence of the assumption of local reaction. **Journal of Acoustic Society of America**, 2012.

CHAMPOUX, J.; NICOLAS, Y.; ALLARD, J. F. Measurement of acoustic impedance in a free field at low frequencies. **Journal of Sound and Vibration**, 1988.

CHAMPOUX, J.; ALLARD, J. F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media, **J. Appl. Phys.** 70, 1991, pp. 1975-1979.

DELANY M. E.; BAZLEY E. N., Acoustical properties of fibrous absorbent materials, **Applied Acoustics** 3, 1970, pp. 105-116

DI X.; GILBERT, K. An exact laplace transform formulation for a point source above a ground surface. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1993.

FAHY F.J.; WALKER, J. **Fundamentals of Noiseand Vibration**: Spoon, 1998.

GARAI, M. Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: The reflection method using periodic pseudo random sequences of maximum length. **Applied Acoustics**, 1993.

HIROSAWA, K.; TAKASHIMA, K.; NAKAGAWA, H.; KON, M.; YAMAMOTO, A. Comparison of three measurement techniques for the normal absorption coefficient of sound absorbing materials in the free field. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2009.

HIROSAWA, K.; TAKASHIMA, K.; NAKAGAWA, H.; KON, M.; YAMAMOTO, A. Comparison of three measurement techniques of normal absorption coefficients in free field method using boundary element method. **SAPEM**, 2008.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 10534**: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tube. 1998.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 354**: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 9053**: Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of air-flow resistance. 1991.

JOHNSON D. L.; KOPLIK J.; DASHEN R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, **J. Fluid Mech.** 176, 1987, pp. 379-402

LI, J. F.; HODGSON, M. Use of pseudo-random sequences and a single microphone to measure surface impedance at oblique incidence. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1997.

MAREZE, P. H. **Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida**. Tese de doutorado, UFSC, 2013.

MOMMERTZ, E. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1995.

TOMIKU, R.; OTSURU, T.; DIN, N. B. C. Ensemble averaged surface normal impedance of material using an in-situ technique: Preliminary study using boundary element method. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2012.

Análise de um novo material polimérico para uso em tubo de descarga de compressores herméticos

Martins, P. V. R.*; Lenzi, A.†

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

† Laboratório de Vibrações e Acústica, UFSC, Florianópolis, SC, arcanjo.lenzi@ufsc.br

Resumo

Este trabalho foca na determinação das propriedades de um novo material polimérico para ser usado em tubo de descarga de compressores herméticos. Portanto, o módulo de elasticidade e fator de perda foram determinados experimentalmente. O módulo de elasticidade foi obtido através do método de ajuste de modelo e o fator de perda através da banda de meia potência. O ajuste de modelo baseou-se na frequência natural de uma viga engastada-livre segundo a teoria de Timoshenko. Também, detalhou-se a forma de como os experimentos foram executados para obter as curvas de resposta em frequência das amostras poliméricas. Observou-se que o material possui pouca variação do módulo de elasticidade com a frequência, com valores médios próximos a 0,7 GPa. Obteve-se um fator de perda constante, com valor em torno de 0,03. Depois, estas propriedades foram usadas como parâmetros de entrada para um modelo de elementos finitos, que permitiu calcular o fluxo de potência vibratória do tubo feito com o novo material. Finalmente, estes resultados foram comparados com o fluxo de energia de um tubo de descarga típico, feito com aço cobreado. Verificou-se uma atenuação média de aproximadamente 16 dB na faixa de frequência até 5 kHz, com o novo material.

Palavras-chave: fluxo de potência, compressor, tubo de descarga, polimérico.

LISTA DE SÍMBOLOS

E = módulo de Young, Pa

F_i = força complexa no ponto "i", N

f_n = frequência natural, Hz

G = módulo de cisalhamento, Pa

$I = 2^\circ$ momento de inércia, m⁴

L = comprimento da viga, m

M_i = momento complexo no ponto "i", N.m

n = ordem do modo de vibração

r = raio interno da seção transversal, m

R = raio externo da seção transversal, m

S = área da seção transversal, m²

\dot{u}_i = velocidade complexa no ponto "i", m/s

W_i = potência no ponto "i", W

Símbolos Gregos

Δf_n = banda de meia potência, Hz

η = fator de perda (2ξ), adimensional

$\dot{\theta}$ = velocidade angular complexa no ponto "i", rad/s

κ' = coeficiente de cisalhamento, adimensional

ν = coeficiente de Poisson, adimensional

ρ = densidade, kg/m³

ω_n = frequência angular natural, rad/s

Sub-escritos

i = ponto de medição

x, y e z = direção de medição

1. INTRODUÇÃO

O compressor hermético alternativo possui um motor elétrico e uma unidade compressora montada no mesmo eixo, instalados dentro de uma carcaça feita de aço cobreado composta por uma base e uma tampa soldadas hermeticamente. O comportamento dinâmico do conjunto "motor-unidade compressora", quando em condições de operação, excita a carcaça através de caminhos típicos de propagação, como as molas que atuam como suspensão do conjunto, e o tubo de descarga que conduz o gás a alta pressão para o sistema de refrigeração. Esta é uma descrição básica dos mecanismos de produção e transmissão de potência vibratória de um compressor (HENKLEIN, 2006).

A unidade compressora consiste numa estrutura de fixação denominada "bloco" sobre a qual todo o sistema de motor, biela, manivela e pistão são montados. Esta composição possui efeitos de desbalanceamento característicos que geram uma quantidade considerável de vibração. Desta vibração, parte é transmitida para a carcaça através dos caminhos de propagação, e parte é perdida através de amortecimento inerente dos materiais. Toda energia de vibração transmitida pelos mecanismos está sujeita a tornar-se ruído ao excitar uma estrutura com alta eficiência de radiação, como é o caso da carcaça e das paredes do dispositivo de refrigeração ao qual o compressor está acoplado. Portanto, buscar diminuir a transmissão de energia dos mecanismos de propagação é uma técnica eficaz para diminuir o ruído do conjunto. O tubo de descarga, por sua vez, é particularmente importante por suas características peculiares, como ser capaz de suportar pressões de até 13 bar e temperaturas da ordem de 120°C (SILVA, 2004).

Portanto, deseja-se reduzir a potência total que se propaga através do tubo de descarga utilizando um material diferente do aço cobreado (tipicamente chamado de "Bundy"). Um ótimo candidato, e também objeto do estudo deste trabalho, é um material polimérico baseado em politetrafluoretileno. Este possui alto amortecimento viscoso e histerético, adequado para reduzir níveis de energia vibratória.

Este trabalho foi motivado pela possibilidade de melhorar compressores usados em sistemas de refrigeração, para alcançar níveis mais baixos de ruído radiado, melhorando a experiência de consumidores que adquirem produtos com essas características.

2. MODELOS UTILIZADOS

O trabalho lida com um tipo diferente de material, portanto é necessário garantir que as propriedades mecânicas usadas nas simulações numéricas sejam representativas. Portanto, o artigo baseia-se em duas formulações principais para determinar as propriedades mecânicas do polímero: a teoria de vigas de Timoshenko para

ajustar o módulo de elasticidade, e o método da banda de meia potência para determinar o fator de perda. Depois, calcula-se o fluxo de potência vibratória para respostas de tubos de descarga feitos com o aço cobreado e material polimérico. Estes resultados são comparados para analisar o desempenho do polímero do ponto de vista vibratório.

2.1 Teoria de viga de Timoshenko

Na teoria de vigas de Timoshenko, em que consideram-se os efeitos de inércia rotatória e deformação por cisalhamento, as frequências naturais para uma configuração engastada-livre de um movimento vibratório transversal (Figura 1) são dadas por:

$$\omega_n = \frac{\pi^2 (n - \frac{1}{2})^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \dots \left[1 - \frac{1}{2} \frac{I\pi^2 (n - \frac{1}{2})^2}{SL^2} \left(1 + \frac{E}{\kappa'G} \right) \right], \quad (1)$$

no qual n é a ordem do modo de vibração, L é o comprimento total da viga, E é o módulo de elasticidade, I é o momento de inércia de área, ρ é a massa por unidade de volume, S é a área da seção transversal, e o módulo de cisalhamento G é dado por $E/2(\nu + 1)$ e κ' é o coeficiente de cisalhamento efetivo (TIMOSHENKO; YOUNG; WEAVER, 1974).

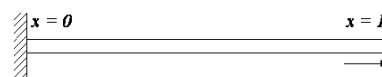


Figura 1: Esquema de uma viga engastada-livre.

Para esta aplicação, o coeficiente de cisalhamento efetivo κ' foi usado para uma seção tubular, e pode ser escrito na forma:

$$\kappa' = \frac{6(r^2 + R^2)(1 + \nu)^2}{D}, \quad (2)$$

com D dado na forma

$$D = 7r^4 + 34r^2 + R^4 + \dots \\ v(12r^4 + 48r^2 + R^2 + 12R^4) + \dots \quad (3) \\ v^2(4r^4 + 16r^2 + R^2 + 4R^4)$$

sendo que r é o raio interno do tubo, R o raio externo e v o coeficiente de Poisson. Então, a Equação 1 foi usada para ajustar o módulo de elasticidade E , com relação às frequências naturais obtidas através das curvas experimentais.

2.2 Método da banda de meia potência

O método usado para determinação do fator de perda η foi o da banda de meia potência, que analisa regiões dos picos de ressonância em funções resposta em frequência experimentais. O método consiste em encontrar as frequências na banda de 3dB abaixo do pico (metade da potência de ressonância), e calcular a razão entre estas frequências e a frequência natural:

$$\eta(f) = 2\xi = \frac{\Delta f_n}{f_n}, \quad (4)$$

no qual Δf_n é a banda de meia potência do n -ésimo modo de vibração e f_n é a frequência central, ou de ressonância, deste mesmo modo (OLMOS; ROESSET, 2010).

Optou-se por usar o fator de perda na forma de $\eta = 2\xi$ para que fosse mais fácil utilizar no software comercial ANSYS nas análises seguintes.

Utilizou-se um critério próprio de avaliação para as funções resposta em frequência experimentais, cuja função coerência deveria ser maior que 70%.

2.3 Fluxo de potência vibratória

O fluxo de potência vibratória representa a quantidade de trabalho realizada ou energia inserida no sistema mecânico, importante para comparar diferentes mecanismos de propagação entre componentes do sistema. Esta seção é baseada nos trabalhos de (GOUVEIA, 2003), (BAARS, 1996) e (STAUB, 2013).

Considera-se uma excitação harmônica na forma de força aplicada num ponto "i" de um

sistema mecânico, dada por F_i , que causa uma velocidade instantânea \dot{u}_i no mesmo ponto. Essa excitação transmite uma potência W_i que pode ser escrita como:

$$W_i = \frac{1}{2} \text{Re}\{F_i \dot{u}_i^*\}, \quad (5)$$

sendo que o operador $()^*$ representa o complexo conjugado.

De maneira similar, se a excitação é dada por um momento M_i , e a resposta em função de velocidade angular $\dot{\theta}_i$, então a potência W_i é dada por:

$$W_i = \frac{1}{2} \text{Re}\{M_i \dot{\theta}_i^*\}. \quad (6)$$

Sabe-se que os carregamentos são divididos em forças e momentos nas direções x, y e z, de forma que a potência total do ponto "i" é dada por:

$$W_i = \frac{1}{2} [\text{Re}\{F_{xi} \dot{u}_{xi}^*\} + \text{Re}\{F_{yi} \dot{u}_{yi}^*\} + \dots \\ + \text{Re}\{M_{zi} \dot{\theta}_{zi}^*\}] \quad (7)$$

A Equação 7 será usada posteriormente para calcular o fluxo de potência vibratória da unidade compressora até a carcaça através do tubo de descarga, com forças e velocidades obtidas através do método de elementos finitos usando uma análise harmônica. O ponto de interesse é a interseção entre o tubo e a carcaça, onde forças, momentos e velocidades linear e angular serão calculadas apenas em nós e elementos comuns aos dois componentes.

3. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.1 Descrição do experimento

As funções resposta em frequência obtidas experimentalmente são usadas para determinar o módulo de elasticidade E a partir das frequências de ressonância, e o fator de perda η a partir da banda de meia potência, enquanto outras

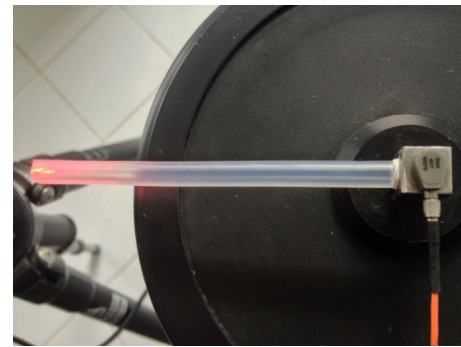
propriedades mecânicas são obtidas da literatura, sendo o coeficiente de Poisson $\nu = 0,45$, densidade $\rho = 2175 \text{ kg/m}^3$ e módulo de cisalhamento calculado a partir de $G = E/2(\nu + 1)$. Os corpos de prova são tubulares, com comprimentos de 85,65 mm e 139,51 mm, ambos com 6 mm de diâmetro externo e espessura de parede de 1,5 mm (Figura 2).



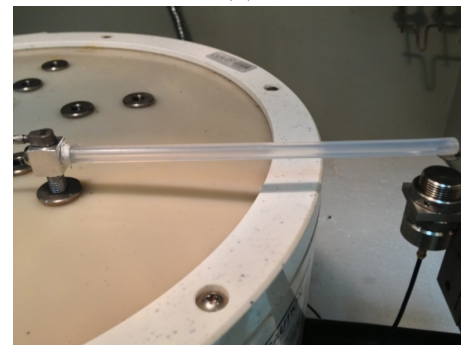
Figura 2: Corpos de prova e detalhe da peça de fixação

Inicialmente, os corpos de prova foram testados à temperatura ambiente (cerca de 23°C) e depois foram submetidos a uma variação controlada de temperatura, de 0°C a 50°C , com passos de 5°C . Sem variação da temperatura, a faixa de frequência medida foi de 10 Hz a 5000 Hz com uma resolução digital de aproximadamente 0,78 Hz. Já nos testes com variação de temperatura, a faixa foi de 10 Hz a 2000 Hz com resolução de aprox. 0,31 Hz, devido às limitações do transdutor. A Figura 3(a) mostra a montagem do experimento à temperatura ambiente, e (b) com variação de temperatura.

À temperatura ambiente, os corpos de prova foram excitados com ruído branco por um excitador eletromecânico. A vibração na extremidade excitada, cuja peça de fixação é acoplada ao excitador, foi medida usando um acelerômetro (B&K 4517, massa de 5 g) como sinal de referência, e a resposta na extremidade livre foi obtida com um vibrômetro a laser (Ometron VH-1000-D). Com variação da temperatura, por causa do diâmetro do excitador e da limitação da instrumentação, apenas o corpo de prova com 139,51 mm de comprimento foi medido. O mesmo acelerômetro foi utilizado como referência, porém, na extremidade livre foi utilizado um transdutor magnético (B&K Type MM 0002) ao invés do vibrômetro laser (Figura 3(b)).



(a)



(b)

Figura 3: Montagem dos experimentos para medir funções resposta em frequência: (a) a temperatura ambiente, (b) com variação de temperatura.

Depois, com os espectros de resposta e referência, pode-se obter as funções de resposta em frequência. Por se tratar de uma estrutura simples, os resultados mostram-se na forma de picos bem espaçados, adequados para serem usados nos métodos de determinação das propriedades citados anteriormente.

3.2 Resultados à temperatura ambiente

As medições de resposta em frequência para cada corpo de prova foram repetidas pelo menos três vezes para verificar repetibilidade e consistência dos resultados.

Resultados para módulo de elasticidade e fator de perda são mostrados nas Figuras 4 e 5 respectivamente. Valores de fator de perda obtidos para todos os modos considerados coerentes oscilam entre 0,025 e 0,031. Nota-se um comportamento levemente crescente com a frequência. Entretanto, essa variação é tão pequena que

pode ser desprezada.

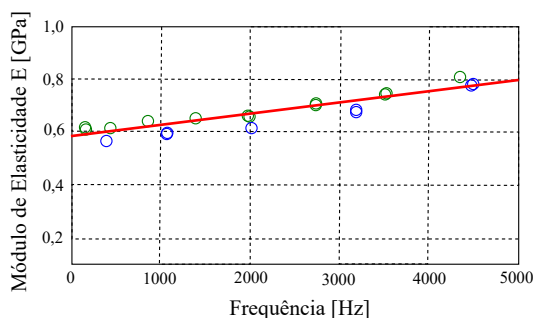


Figura 4: Módulos de elasticidade E ajustados modo-a-modo através da teoria de vigas Timoshenko. Corpos de prova de 139,51 mm de comprimento em verde e 86,65 mm em azul. Linha média (vermelha) obtida através de regressão linear.

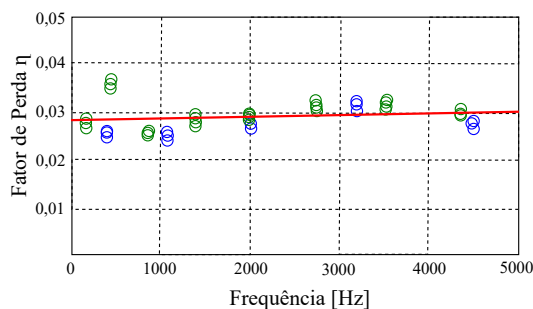


Figura 5: Fatores de perda η obtidos por meio do método de banda de meia potência. Corpos de prova de 139,51 mm de comprimento em verde e 86,65 mm em azul. Linha média (vermelha) obtida através de regressão linear.

3.3 Propriedades mecânicas com variação da temperatura

Utilizando a mesma metodologia para a determinação das propriedades mecânicas descritas anteriormente, porém agora com a montagem do experimento dentro de uma câmara térmica, pôde-se obter o módulo de elasticidade E e o fator de perda η como funções de temperatura. Entretanto, para frequências acima de 2000 Hz a coerência mostrou-se abaixo do critério de avaliação, *i.e.*, estava abaixo de 70% por causa

das novas limitações de montagem com o transdutor magnético. Outra pequena diferença da simulação anterior também foi a adição de um pequeno disco de metal, com massa desprezável, acoplado à extremidade livre do tubo para que o transdutor magnético pudesse capturar a vibração da estrutura (Figura 3(b)).

Em todas as funções resposta em frequência foram observados pelo menos quatro modos de flexão bem definidos, permitindo criar um gráfico de dispersão com 200 pontos para o módulo de elasticidade e fator de perda. Depois, uma média dos módulos de elasticidade de cada modo foi calculada para gerar o gráfico da Figura 6:

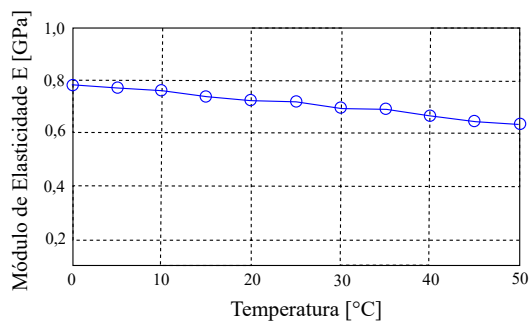


Figura 6: Variação média do módulo de elasticidade E em função da temperatura.

Os resultados de fator de perda não são mostrados aqui por sua variação em função da temperatura ser muito pequena. Os valores permaneceram entre 0,025 e 0,030, portanto nas simulações a seguir considerou-se um fator de perda constante com a temperatura com amplitude de 0,030.

4. ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA VIBRACIONAL

A metodologia desta seção baseou-se no software comercial ANSYS v.13 para auxiliar nas simulações de elementos finitos, para obter valores de esforços e deslocamentos na interseção tubo-carcaça. Estes valores foram usados na Equação 7 apresentada na Seção 2.3. Foram utilizadas geometrias típicas da carcaça de um compressor hermético e tubo de descarga,

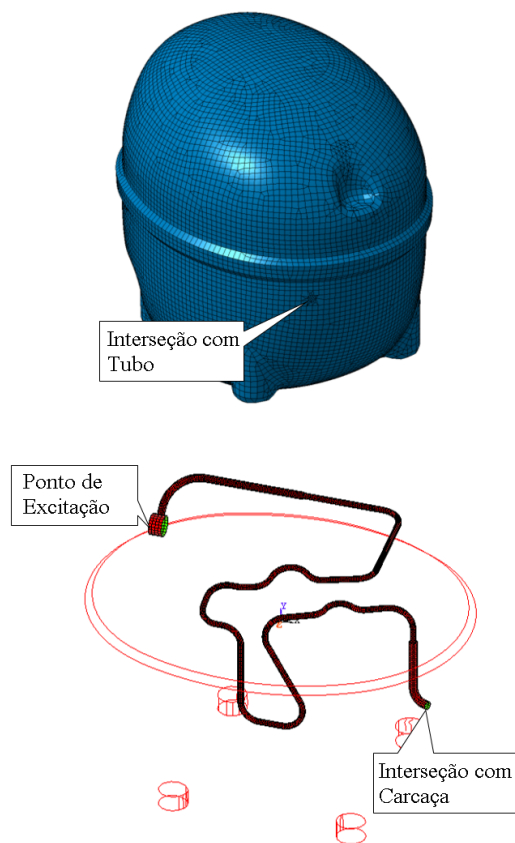


Figura 7: Modelos de elementos finitos da carcaça de um compressor típico e do tubo de descarga.

cuja malha foi feita com elementos tipo casca (SHELL181 na biblioteca do software), composto por 4 nós principais e 6 graus de liberdade por nó, com translações em x, y e z e rotações também nas três direções (ANSYS, INC., 2009).

As simulações consistiram numa análise harmônica, resolvendo a equação $-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K] = [F]$ para cada frequência ω , de 10 Hz até 5000 Hz. O tubo foi excitado com deslocamento unitário em todas as 3 translações simultaneamente, no ponto de excitação (Figura 7), e foi aplicada uma pressão interna hidrostática de 13 bar. Então, as respostas de força e deslocamento foram lidas do ponto de interseção tubo-carcaça, e os deslocamentos foram derivados em velocidades para calcular os fluxos de potência.

As propriedades mecânicas e geométricas (es-

pessura) do tubo utilizadas nestas simulações foram as mesmas mostradas anteriormente para o material polimérico como: módulo de elasticidade dependente da frequência $E(\omega)$, variando entre 0,6 a 0,8 GPa, o fator de perda constante de $\eta = 0,03$, densidade $\rho = 2175 \text{ kg/m}^3$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,45$ e espessura de 1,5 mm. Depois, os resultados foram comparados com o tubo típico, feito de aço cobreado, cujas propriedades são um módulo constante $E = 195 \text{ GPa}$, $\eta = 0,01$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0,3$ e espessura de 0,52 mm. Ambos os resultados podem ser observados na Figura 8.

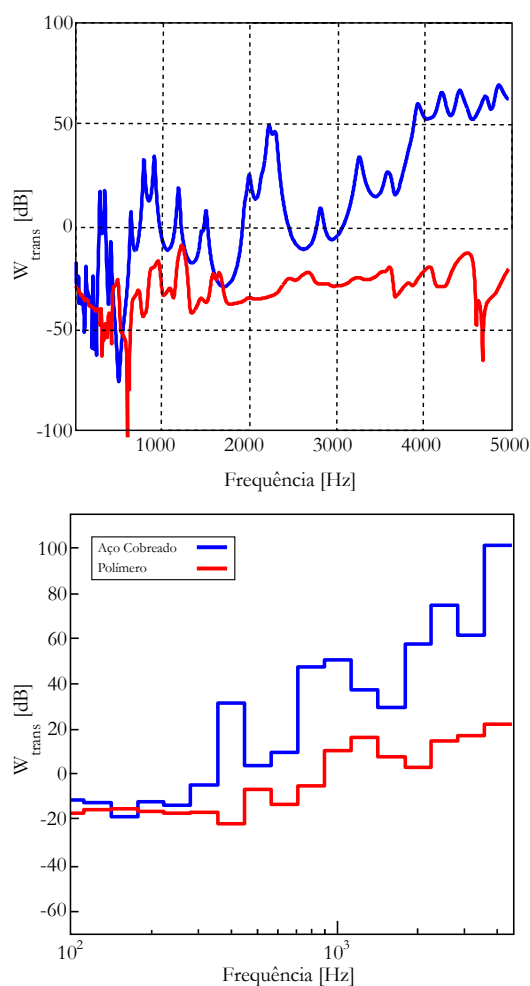


Figura 8: Fluxo de potência para tubos de descarga feitos com aço cobreado (bundy) e material polimérico com pressão interna de 13 bar, em banda estreita (sup.) e em banda de terço de oitava (inf.).

Observando a Figura 8, percebe-se uma região

de alta atenuação do fluxo de energia ao usar um material polimérico. Também nota-se que nas altas frequências, próximas às ressonâncias da carcaça (acima de 3000 Hz), há a maior atenuação por conta da mudança do material. Nas baixas frequências (abaixo de 1500 Hz), percebe-se um acúmulo de picos em ambos os casos de materiais, e certa similaridade entre as frequências nas quais estes picos ocorrem, porém as amplitudes do polímero mostram-se sempre mais baixas que a do metal conforme esperado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou o uso de material polimérico na confecção de um tubo de descarga para um compressor hermético típico. O módulo de elasticidade deste novo material foi determinado usando corpos de prova poliméricos em formato tubular com comprimentos de 139,51 mm e 86,65 mm, 6 mm de diâmetro externo e 1,5 mm de espessura, ajustando um modelo de viga Timoshenko, numa faixa de frequência de 10 Hz a 5000 Hz à temperatura ambiente, e 10 Hz a 2000 Hz com variação controlada de temperatura. Foram encontrados valores médios em torno de 0,7 GPa, entretanto foram usados valores em função da temperatura nas simulações. O fator de perda não variou de forma significativa, com média igual a 0,03.

Concluiu-se que o polímero reduziu a potência total transmitida, numa média de toda a faixa de frequência analisada, em aproximadamente 16 dB em relação ao metal. Entretanto, é recomendável levar em consideração outros componentes do compressor em função de verificar se as baixas frequências onde ocorrem os picos do tubo polimérico estão suficientemente distantes de outras regiões modais, para que não ocorram ressonâncias internas ou interferências nos mecanismos de transmissão de potência.

A redução do fluxo de energia pelo novo material é ainda mais interessante se analisada utilizando-se as curvas de percepção aurál. Como este trabalho foi motivado pelo conforto, saber que o sistema auditivo humano é mais sensível a frequências próximas de 3000 Hz (Fi-

gura 9), então o tubo polimérico torna-se um excelente candidato para baixar níveis de ruído.

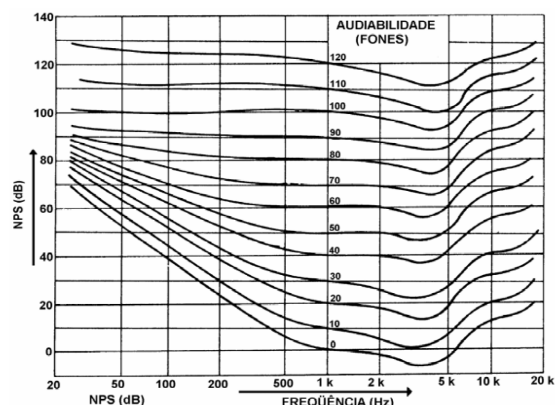


Figura 9: Curvas de percepção aurál isofônica do sistema auditivo humano (RODRIGUES; CALIXTO, 2004).

Em relação à caracterização do material, sugere-se em trabalhos futuros, a verificação de valores de coeficiente de Poisson e densidade do polímero, pois estes dados foram obtidos da literatura e suas confirmações seriam interessantes para corroborar os resultados.

Recomenda-se também, a análise de novas geometrias para o tubo de descarga feito de polímero, visto que as propriedades mecânicas deste material abrem uma nova perspectiva de como se dispor dentro do compressor. A utilização de algoritmos de otimização seria de enorme ajuda neste aspecto.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, INC. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. 12.1 ed.. ed. Canonsburg, 2009.
- BAARS, E. *Fluxo de Potência Vibratória em Componentes Estruturais tipo Barras e Vigas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- GOUVEIA, V. L. *Fluxo de Energia Vibratória Através da Base de Fixação de Máquinas para a Estrutura de Plataformas Offshore*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

HENKLEIN, P. *Análise de Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos durante o Transitório*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Santa Catarina, 2006.

OLMOS, B. A.; ROESSET, J. M. Evaluation of the half-power bandwidth method to estimate damping in systems without real modes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010.

RODRIGUES, C. G.; CALIXTO, W. P. Poluição sonora. Trabalho não publicado sobre Poluição Sonora, Universidade Católica de Goiás, concluído em 2004. 2004.

SILVA, A. R. *Minimização do Fluxo de Potência Através do Tubo de Descarga de Compressores Herméticos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

STAUB, D. *Análise do Fluxo de Energia Vibratória entre Componentes Estruturais Típicos de uma Plataforma de Extração de Petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

TIMOSHENKO, S. P.; YOUNG, D. H.; WEAVER, W. J. *Vibration Problems in Engineering*. 4th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1974.

Validação de realidade virtual acústica via testes de articulação em salas ruidosas e reverberantes

Melo, V. S. G.^{1*}; Lima, P. G.^{2*}; Santos, T. C.^{3*}; Tenenbaum, R. A.^{4*}

* Laboratório de Instrumentação em Dinâmica, Acústica e Vibrações – LIDAV, IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, RJ,

¹vivasgmelo@gmail.com, ²pamelaguereirolima@hotmail.com, ³thatyvthardihood@gmail.com, ⁴ratenenbaum@gmail.com

Resumo

Um dos principais desafios em validar aurilizações está em encontrar parâmetros objetivos para medir sua qualidade. Neste trabalho, aurilizações modeladas computacionalmente são validadas por meio de testes de articulação. Convolvendo as respostas impulsivas biauriculares (BIRs), geradas pelo código computacional de simulação de acústica de salas RAIOS com o sinal anecoico que contém uma lista de cem monossílabos, a aurilização é gerada e índices de articulação virtuais podem ser computados. Por outro lado, o teste de articulação realizado na sala fornece o índice de articulação real. Ambos os índices são a média de monossílabos anotados corretamente pelos voluntários, convertida em valores percentuais. São realizados testes de articulação em duas salas. Na primeira delas, são geradas aurilizações em três diferentes situações: apenas com ruído de fundo, com ruído rosa de 60 dB e 65 dB adicionados. O objetivo é validar a métrica em salas com distintos níveis de ruído. A segunda é o teatro de um colégio que é extremamente reverberante, visando avaliar a influência da reverberação na inteligibilidade da palavra. Quando os índices de articulação reais e virtuais são comparados, um erro menor que 5% é encontrado. As conclusões são que as aurilizações foram bem-sucedidas e que índices de articulação são métricas confiáveis para validar aurilizações.

Palavras-chave: Aurilização, realidade virtual acústica, testes de articulação, simulação acústica de salas, validação de aurilização.

1. INTRODUÇÃO

A realidade virtual acústica é um campo de pesquisa relativamente novo que permite simular o comportamento acústico de um ambiente utilizando modelagem computacional. Esse processo permite ao usuário uma interação com o ambiente virtual, reproduzindo a sensação de estar virtualmente presente nele, além de fornecer parâmetros que caracterizem o espaço acusticamente.

O projeto acústico torna-se uma medida de grande importância, uma vez que poupa o gasto da construção da sala desejada, pois permite o conhecimento da acústica de um ambiente antes mesmo de sua construção. Esse conhecimento não se restringe apenas aos parâmetros de qualidade acústica — como T_{30} , C_{80} , e D_{50} , entre vários outros (BERANEK, 1996) — mas também a

parâmetros subjetivos como o conforto auditivo e a inteligibilidade da palavra.

É possível também gerar e reproduzir um som audível com as características da sala utilizando dados medidos, simulados ou sintetizados através de uma técnica chamada aurilização (VORLANDER, 2008). Com esse procedimento, consegue-se simular numericamente como as ondas sonoras se comportam no ambiente e também a percepção humana desse som, como se o ouvinte estivesse inserido naquele ambiente. Avaliar uma aurilização, no entanto, exige parâmetros subjetivos.

Uma metodologia para validar aurilizações é proposta neste trabalho: utilizar índices de articulação (IA) como parâmetro objetivo para avaliar a qualidade de uma aurilização, pois estes se mostraram mais confiáveis do que índices de transmissão da fala (ITF) para

avaliar a inteligibilidade da palavra (TENENBAUM *et al.*, 2013). De maneira resumida, os IA são uma métrica utilizada para avaliar a inteligibilidade da palavra em salas.

Técnicas de avaliação de inteligibilidade comparando IAs obtidos de forma real e virtual são encontradas na literatura (PENG, 2005; YANG and HODGSON, 2007 e HODGSON *et al.*, 2008), Nesses trabalhos, a modelagem é feita utilizando software comerciais, ao passo que neste trabalho as simulações são conduzidas utilizando o código proprietário RAIOS.

Uma lista com cem monossílabos gravados em sala anecoica, a fim de suprimir a influência do ambiente de gravação, é utilizada nos testes de articulação (TA). Essa lista é emitida para voluntários, distribuídos na sala a ser avaliada, encarregados de anotar os monossílabos. A porcentagem média de palavras compreendidas corretamente define o IA da sala.

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de IA que serão melhor explicados em suas respectivas seções: os IA reais e os IA virtuais. Os IA reais correspondem aos resultados obtidos a partir da emissão dos monossílabos na sala real, enquanto os IA virtuais são obtidos a partir de simulação computacional e posteriormente aplicados, via fones de ouvido equalizados, às mesmas pessoas.

Duas salas distintas foram ensaiadas, sendo uma sala de aula do Instituto Politécnico, Campus regional da UERJ em nova Friburgo, e o teatro de um antigo colégio na mesma cidade. Na primeira sala foram obtidos os IAs reais e virtuais para três níveis de ruído, sendo eles: o próprio ruído de fundo da sala; um ruído rosa considerado baixo (NPS de 60 dB a 1 m da fonte); e um ruído rosa considerado alto (NPS de 65 dB a 1 m da fonte). No teatro foram obtidos apenas os IAs reais e virtuais com o ruído de fundo naturalmente presente na sala. O objetivo do ensaio no teatro é avaliar a influência da reverberação na

inteligibilidade tanto a partir do IA real quanto o IA virtual.

A comparação dos resultados obtidos permite afirmar que os índices de articulação são métricas confiáveis para a validação de aurilizações, uma vez que foram obtidos erros menores que 5% (cinco por cento) entre os IA reais e os virtuais.

2. METODOLOGIA

A metodologia geral adotada neste trabalho segue os passos descritos em MELO *et al.*, 2014.

2.1 Testes de articulação reais

Os testes de articulação reais foram conduzidos em uma sala de aula do Instituto Politécnico, campus da UERJ, e no teatro do Colégio Anchieta (CA), ambos localizados em Nova Friburgo. Nesses testes, listas com cem monossílabos gravadas em câmara anecoica foram emitidas por um orador artificial, ver Fig. 1. A utilização do orador oferece duas vantagens. Em primeiro lugar, o nível sonoro das listas de palavras pode ser mantido constante durante todo o teste. Por outro lado, a leitura labial – que prejudicaria a avaliação de inteligibilidade – fica inviável com o uso do equipamento.



Figura 1: Orador artificial utilizado nos testes de articulação.

Fonte: Os autores.

Na sala do IPRJ, havia cerca de 40 estudantes universitários voluntários que anotavam os monossílabos ouvidos em formulários próprios. Já no teatro do colégio Anchieta, mostrado na Fig. 2, havia também cerca de 40 voluntários distribuídos no espaço de maneira razoavelmente uniforme. Os voluntários presentes no teatro foram alunos do terceiro ano do ensino médio do próprio colégio. Pode-se observar na figura a cabeça artificial que foi utilizada para a gravação de todos os sinais, inclusive o ruído de fundo.

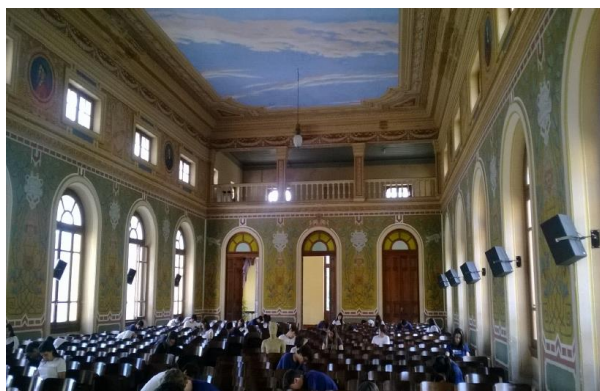


Figura 2: Testes de articulação real realizados no teatro do colégio Anchieta

Fonte: Os autores.

Na sala de aula do IPRJ, a emissão das listas foi realizada com nível sonoro (L_{eq}) de 75 dB a 1 m de distância do orador, em três situações distintas, como já mencionado. A primeira delas foi apenas sob a influência do ruído de fundo da sala. A segunda foi sob a influência de ruído baixo, onde um gerador de sinais ligado a uma caixa de som amplificada emitia ruído rosa em nível sonoro (L_{eq}), a 1 m de distância do centro da caixa, de 60 dB. A terceira sob a influência de ruído alto, onde o mesmo gerador de sinais ligado a uma caixa de som amplificada emitia ruído rosa em nível de 65 dB. O IA foi estimado em cada situação (ruído de fundo e com introdução de ruído rosa baixo e alto).

No teatro houve apenas a emissão das listas com o ruído de fundo próprio do ambiente. Como essa sala é altamente reverberante — o T_{30} global medido foi de 3,80 s —, esse ambiente foi considerado ideal para se

analisar a influência da reverberação da sala na inteligibilidade da palavra, bem como o seu efeito na auralização da mesma.

É importante salientar que na correção das listas de monossílabos, foi considerada a possibilidade de expressar o mesmo som (o fonema) utilizando diferentes grafias, incluindo regionalismos e estrangeirismos como indicam as palavras entre parênteses na Tabela 1. Isso se deve ao fato de que o interesse, no caso, é exclusivamente verificar se o fonema foi devidamente compreendido.

Tabela 1: Gabarito de uma das listas contendo 100 monossílabos e algumas variantes de grafia.

| | | | |
|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| 1. Lar | 26. Bar | 51. Véu | 76. Dor |
| 2. Foi | 27. Caos | 52. Seis | 77. Lei |
| 3. Bis | 28. Fui | 53. Mím | 78. Rir |
| 4. Gim (Jim) | 29. Gel | 54. Cru | 79. Gás |
| 5. Num | 30. Luz | 55. Boi | 80. Lho |
| 6. Pum | 31. Mês | 56. Jaz (Jaiz) | 81. Seu |
| 7. Ir | 32. Plá | 57. Tão | 82. Tá |
| 8. Mãe | 33. Cãs (Cães) | 58. Som | 83. Vi |
| 9. Teu | 34. Run | 59. Meu | 84. Clô |
| 10. Juz | 35. Vil | 60. Há (a, ah) | 85. Quem |
| 11. Faz (Faiz) | 36. Rei | 61. Nau (Now) | 86. Sal |
| 12. Bom | 37. Qual | 62. Xis | 87. Fã |
| 13. Grau | 38. Giz | 63. Hei | 88. Oi |
| 14. Pois | 39. Flor | 64. Dois | 89. Teus |
| 15. Sem | 40. Lhe | 65. Fá | 90. Voz |
| 16. Chão | 41. Eu | 66. Ou | 91. Pai |
| 17. Deus | 42. Mor | 67. Chá | 92. Mil |
| 18. Mar | 43. Fins | 68. Noz (Nóis) | 93. Cruz |
| 19. Triz | 44. Ló | 69. Dom | 94. Cai |
| 20. Vai | 45. Pra | 70. Pé | 95. Leo (Léu) |
| 21. Par | 46. Uns | 71. Gil | 96. Diz |
| 22. Mel | 47. Dar | 72. Que | 97. Trai |
| 23. Li | 48. Sul | 73. Fiz | 98. Mó |
| 24. Pau | 49. Frei | 74. Uns | 99. Cós |
| 25. Cor | 50. Quis (Kiss) | 75. Grão | 100. Ar |

Fonte: Os autores.

2.2 Testes de articulação virtuais

O objetivo da modelagem computacional das salas em estudo é obter as respostas impulsivas biauriculares (BIRs) para uma mesma posição de interesse realizada também nos testes de articulação reais. Nas BIRs estão impressas não somente as características da sala, mas também as da audição humana, pois

carrega o modelo das HRTFs (funções de transferência associadas à cabeça humana).

A simulação foi realizada com o código computacional RAIOS 6.10 (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*) atualmente desenvolvido no Laboratório de Instrumentação em Dinâmica, Acústica e Vibrações – LIDAV, do IPRJ, UERJ. O código RAIOS fornece as respostas impulsivas mono e biauriculares para os pontos selecionados dentro da sala simulada, bem como os principais parâmetros acústicos do ambiente, de acordo com a ISO 3382. A sala de aula do IPRJ, modelada no código RAIOS, pode ser vista na Fig. 3.

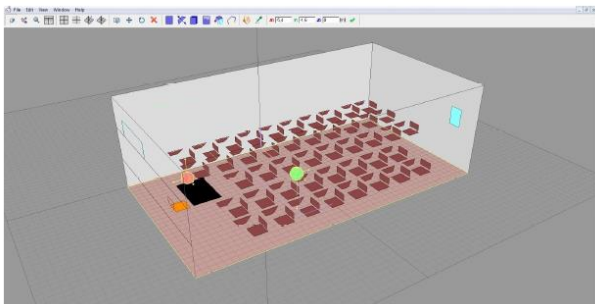


Figura 3: Sala de aula do IPRJ modelada no código computacional RAIOS.

Fonte: Os autores.

A modelagem consiste em um método híbrido que envolve o método de traçado de raios para o cálculo das reflexões especulares e o método de transição de energia para o cálculo de reflexões difusas (TENENBAUM *et al.*, 2007a e 2007b). Em seguida, calcula-se a influência do corpo humano na percepção acústica do indivíduo no ambiente, ou seja, modela as HRTFs que no domínio do tempo correspondem às HRIRs (respostas impulsivas associadas à cabeça humana), para então, a partir da resposta impulsiva (RI) monoauricular, obtida no RAIOS, calcular as BIRs por meio de redes neurais artificiais (HARAZKI *et al.*, 2009 e NARANJO *et al.*, 2013). Em seguida, é realizada a convolução das listas anecoicas com as BIRs obtidas pelo código RAIOS. Essa convolução é realizada no software *Monkey Forest* (MÜLLER, 2008). É necessário ainda acrescentar ao sinal obtido numericamente os diferentes ruídos

presentes no ambiente simulado. Estes são gravados com uma cabeça artificial nas salas vazias.

Para a sala de aula do IPRJ, foi feita a convolução das BIRs com a lista de monossílabos com: a adição do ruído de fundo gravado na sala; a adição de ruído rosa baixo; e do ruído rosa alto, gerando assim três diferentes aurilizações para avaliar a interferência do ruído na inteligibilidade da palavra no ambiente. Já no teatro, foi realizada a convolução da lista de monossílabos com as BIRs geradas pelo código RAIOS e a adição do ruído de fundo gravado no ambiente avaliado.

Finalmente, foram feitos os testes de articulação virtuais no ambiente do LIDAV, como mostra a Fig. 4. As listas convoluídas foram emitidas, por meio de fones de ouvidos equalizados, para voluntários incumbidos da tarefa de escrever os monossílabos que ouviam, computando-se, em seguida, o índice de articulação correspondente.



Figura 4: Execução dos testes de articulação virtuais no ambiente do LIDAV. Quatro fones de ouvido emitem simultaneamente o mesmo sinal aos ouvintes.

Fonte: Os autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os resultados comparativos entre os índices de articulação (IAs) reais e virtuais relativos à sala do IPRJ.

A Tabela 2 mostra os resultados comparativos para a sala com seu ruído de fundo; a Tabela 3 indica os resultados comparativos para a sala

com ruído rosa baixo; e a Tabela 4 indica os resultados comparativos para a sala com ruído rosa alto. A diferença apontada corresponde ao valor percentual do IA real menos o IA virtual.

Tabela 2: Comparação entre os IAs reais e virtuais para a sala de aula do IPRJ com seu ruído de fundo.

| Lista | IA real (%) | IA virtual (%) | Diferença (%) |
|---------|-------------|----------------|---------------|
| Lista 1 | 95.2 | 91.1 | 4.1 |
| Lista 2 | 97.3 | 92.4 | 4.9 |
| Média | 96.2 | 91.7 | 4.5 |

Fonte: Os autores.

Tabela 3: Comparação entre os IAs reais e virtuais para a sala de aula do IPRJ com ruído rosa baixo.

| Lista | IA Real (%) | IA virtual (%) | Diferença (%) |
|---------|-------------|----------------|---------------|
| Lista 1 | 72.7 | 68.2 | 4.5 |
| Lista 2 | 72.6 | 70.3 | 2.3 |
| Média | 72.6 | 69.2 | 3.4 |

Fonte: Os autores.

Tabela 4: Comparação entre os IAs reais e virtuais para a sala de aula do IPRJ com ruído rosa alto.

| Lista | IA Real (%) | IA virtual (%) | Diferença (%) |
|---------|-------------|----------------|---------------|
| Lista 1 | 66.2 | 62.9 | 3.3 |
| Lista 2 | 64.3 | 61.5 | 2.8 |
| Média | 65.2 | 62.2 | 3.0 |

Fonte: Os autores.

Como se depreende das Tabelas 2, 3 e 4, tanto os IAs reais como virtuais pioraram com o aumento do nível de ruído presente na sala. Contudo, na média das duas listas de monossílabos, as diferenças médias foram de 4,5% (ruído de fundo), 3,4% (ruído rosa baixo) e 3,0% (ruído rosa alto), ou seja, sempre valores inferiores a 5%. Portanto, como os resultados oriundos da aurilização — IAs virtuais — mostram-se compatíveis com os reais, as tabelas também indicam que a realidade virtual acústica gerada pelo código computacional RAIOS é fidedigna. Pode-se notar uma diferença considerável na inteligibilidade da palavra na sala depois da

inserção de ruído, confirmando Müller (2005). Os índices de articulação reais que consideraram apenas o ruído de fundo da sala foram sempre maiores que 90%, enquanto os que consideraram ruído rosa baixo ficaram em torno de 72% e os com ruído alto tiveram resultados em torno de 65%. Assim, nota-se uma queda de até 25% no entendimento médio do ouvinte da palavra emitida pelo orador, com a adição de ruído, podendo-se afirmar que este é um fator muito relevante na avaliação da inteligibilidade da palavra em uma sala (SANTOS, 2016).

Já para o teatro do Colégio Anchieta, buscando avaliar a interferência da reverberação na inteligibilidade da sala, têm-se os índices de articulação reais e virtuais obtidos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Comparação entre os IAs reais e virtuais para o teatro, altamente reverberante.

| Lista | IA Real (%) | IA virtual (%) | Diferença (%) |
|---------|-------------|----------------|---------------|
| Lista 1 | 73.6 | 72.0 | 1.6 |
| Lista 2 | 78.8 | 74.9 | 3.9 |
| Média | 76.2 | 73.5 | 2.7 |

Fonte: Os autores.

A dispersão (diferença) média entre os índices reais e virtuais está na faixa de 2,7% indicando a consistência nos resultados. Pode-se notar que a inteligibilidade no teatro, com IA real médio de 76.2%, é comparável à da sala de aula com ruído baixo, apresentando IA de 72.6%. Uma comparação entre todos os IAs médios obtidos no trabalho é apresentada na Fig. 5.

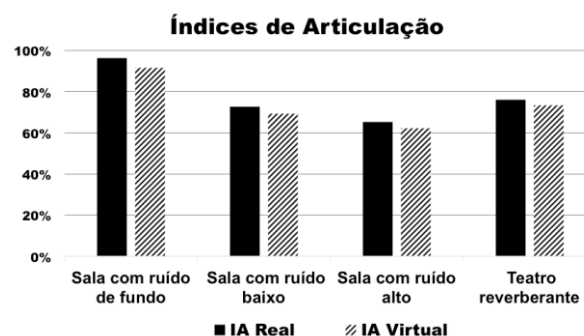


Figura 5: Resultados comparativos para os IA das salas testadas.

Fonte: Os autores.

Analisando as tabelas e o gráfico aqui apresentados, pode ser confirmado que os índices de articulação reais foram sempre um pouco maiores que os virtuais. Isso pode ter ocorrido porque nos testes de articulação reais as pessoas mais próximas ao orador tendem a ouvir melhor, se comparadas às que se posicionaram mais distantes dele. Portanto, o IA real é de fato uma média espacial da inteligibilidade. Já no IA virtual, não é feita essa média espacial, sendo gerada uma aurilização para um ponto intermediário, que pode ter uma inteligibilidade pior do que a média espacial. De todo modo, esse é um aspecto a ser melhor investigado.

Como pode ser visto a partir da análise das tabelas apresentadas, os resultados obtidos nos testes de articulação virtuais foram razoavelmente próximos aos reais, com diferenças percentuais menores que 5%. Cumpre notar, contudo, que a maior diferença encontrada entre os IAs para duas listas distintas na mesma sala — o teatro do Colégio Anchieta — foi de 5,2% (78,8 – 73,6), correspondendo, portanto à mesma faixa de incerteza.

4. CONCLUSÕES

De acordo com a proposição teórica descrita neste trabalho, pode-se concluir que a utilização de redes neurais artificiais (RNAs) em realidade virtual acústica é promissora. Os resultados dos testes de articulação das salas testadas demonstram que redes neurais bem treinadas são capazes de modelar de forma bastante precisa as funções de transferência associadas à cabeça humana (NARANJO et al., 2013).

Foram feitas avaliações da inteligibilidade da palavra em quatro cenários com condições acústicas distintas. Foi possível observar que a sala de aula do IPRJ é relativamente boa para a compreensão da palavra — em sua condição natural de ruído de fundo — como é esperado para um ambiente acadêmico. Já no caso do teatro do Colégio Anchieta, foi

constatado que este possui inteligibilidade prejudicada devido à sua alta reverberação.

É importante salientar que os experimentos na sala de aula do IPRJ foram realizados em períodos de pouco movimento na universidade. Este cuidado foi tomado porque as salas apresentam isolamento acústico precário, embora possuindo razoável acústica interna.

Em publicações anteriores (MELO et al., 2014 e TENENBAUM et al. 2015), a metodologia de avaliação de realidade virtual acústica via índices de articulação havia sido realizada, porém para salas sem entraves acústicos, ou seja, nem muito reverberantes nem muito ruidosas. Nesses casos, foi verificado que os índices de articulação reais e virtuais eram próximos, também dentro de uma faixa de incerteza inferior a 5%. Neste trabalho, o que foi verificado é que o mesmo sucede tanto para salas reverberantes quanto para salas ruidosas.

Os próximos passos para o processo de validação de realidade virtual acústica devem consistir na realização de testes de articulação virtuais com a inserção de diferentes níveis de ruído para um número maior de salas.

Como é sabido, a audição humana varia com a idade na fase de crescimento (FELS, 2008) e as regiões em frequência de máxima acuidade auditiva dependem da anatomia da cabeça. Desse modo, outra extensão importante deste projeto, seria a modelagem, via RNAs, das funções de transferência associadas à cabeça infantil. Assim, poder-se-ia comparar os testes de articulação provenientes das aurilizações geradas através dessas funções de transferência com os testes de articulação reais realizados por Melo (2012) em salas de ensino fundamental de algumas escolas públicas de Nova Friburgo e Cordeiro, no estado do Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS

- BERANEK, L. **Concert and Opera Halls: How They Sound**. Acoustical Society of America, Woodbury, 1996.
- FELS, J. **From children to adults: How binaural cues and ear canal impedances grow**. Ph.D. Thesis, Institut für Technische Akustik, Aachen University, Germany, 2008.
- ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382**: Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to others acoustical parameters, 1997.
- HARAZKI, Z.; IANCHIS, D.; TIPONUT, T. Generation of the head related transfer functions using artificial neuronal networks. 13th WSEAS International Conference on Circuits, 114–118, 2009.
- HODGSON, M.; YORK, N.; YANG, W. and BLISS, M. Comparison of predicted, measured and auralized sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using CATT-Acoustic and Odeon. **Acta Acustics united with Acustics**, 94(6), 883–890, 2008.
- MELO, V.S.G. **Avaliação de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental a partir de respostas impulsivas biauriculares obtidas com cabeça artificial de dimensões infantis**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- MELO, V.S.G.; TENENBAUM, R.A.; NARANJO, J.F.L. A New Approach to Validate Computer Modeling auralizations by Using Articulation Indexes. **Acústica e Vibrações**, V. 46, 1–8, 2014.
- MÜLLER, S. Medir o STI. **Anais do seminário de música, ciência e tecnologia**, 2, São Paulo, 2005.
- MÜLLER, S. **Monkey Forest User Manual**. Aachen, Germany, Audio & Acoustics Consulting, 2008.
- NARANJO, J.F.L.; TENENBAUM, R.A.; TORRES, J.C.B. Acoustic quality parameters used for error evaluation of neural networks modeling for HRIRs applied to escape training in blind conditions. **Int. Rev. Chem. Eng.**, V. 5(6), 394–399, 2013.
- PENG, J. Feasibility of subjective speech intelligibility assessment based on auralization. **Applied Acoustics**, 66, 591–601, 2005.
- SANTOS, T.C. **Validação de realidade virtual acústica via testes de articulação com ruído**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – UERJ, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016.
- SANTOS, L.R. **Validação de realidade virtual acústica via testes de articulação**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – UERJ, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2015.
- TENENBAUM, R.A.; CAMILO, T.S.; TORRES, J.C.B. and GERGES, S.N.Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 1 – Theoretical and numerical aspects. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, V. 29(2), 211–221, 2007a.
- TENENBAUM, R.A.; CAMILO, T.S.; TORRES, J.C.B. and STUTZ, L.T. Hybrid Method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 – Validation of the computational code RAIOS 3. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, V. 29(2), 222–231, 2007b.
- TENENBAUM, R.A.; MELO, V.S.G. and MUSAFIR, R.E. Intelligibility assessment in elementary school classrooms from binaural room impulse responses measured with a childlike dummy head. **Applied Acoustics**, Vol. 74, 1436–1447, 2013.
- TENENBAUM, R.A.; MELO, V.S.G. and NARANJO, J.F.L. Virtual reality: A new approach to validate computer modeling auralizations by using articulation indexes. In: Cipresso, P. and Serino, S. **Virtual Reality: Technologies, Medical Applications and Challenges**, Nova Publishers, New York, 2015.
- VORLANDER, M. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. Springer, Berlin, 2008.
- YANG, W.; HODGSON, M. Validation of the auralization technique: Comparative speech intelligibility tests in real virtual classrooms. **Acta Acustica united with Acustica**, 93(6), 991–999, 2007.

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Uso da lã de PET para a absorção sonora e o isolamento acústico

Klippel Filho, S. *; Labres, H. S. *; Pacheco, F. *; Christ, R. *; Pires, J. R. *;
Heissler, R. F. *+; Oliveira, M. F. *+

*Instituto Tecnológico de Desempenho e Construção Civil – itt Performance, Unisinos, São Leopoldo, RS,
{sergioklip, hlabres, fernandapache, rchrist, josianerp, mariaon}@unisinos.br

+Mestrado Profissional em Arquitetura e Urbanismo – MPArqUrb, Unisinos, São Leopoldo, RS

Resumo

O aumento da procura por soluções para se atingir o desempenho acústico em edificações é uma necessidade crescente na construção civil brasileira, com uma demanda por ensaios de caracterização de novos materiais, muitos deles, confeccionados a partir de resíduos, com vistas ao atendimento de questões ambientais, com a redução de materiais encaminhados a aterros sanitários. Neste contexto, o uso de materiais fibrosos fabricados com resíduos poliméricos pode atender às demandas específicas no uso para o isolamento e o condicionamento acústico de ambientes internos. Este artigo objetiva apresentar a caracterização da lã de PET quanto ao isolamento acústico ao som aéreo, isolamento ao som de impacto e para a absorção sonora, a partir de testes em laboratório, com variações de espessura e de densidade do material. Os ensaios para determinação do índice de redução sonora foram realizados conforme os procedimentos da norma ISO 10140: 2010, com a lã de PET utilizada no preenchimento de dois tipos de divisórias drywall. O isolamento ao som de impacto foi determinado para o material antes e após a compressão durante a vida útil do piso, a partir de modelos teóricos da norma ISO 12354: 2017, tendo como base ensaios em laboratório de rigidez dinâmica, conforme a norma ISO 9052-1: 1989, e de fluência à compressão, de acordo com os procedimentos da norma ISO 20392:2007. Para as estimativas de isolamento ao som de impacto foi considerado o uso da lã na forma de camada elástica de pisos flutuantes. Os procedimentos da norma ISO 354:2003 foram utilizados na determinação do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante. Os resultados indicam que o material apresenta potencial de uso no isolamento e no condicionamento acústico de ambientes, destacando-se que: o aumento na densidade dos materiais não aumenta consideravelmente o isolamento ao som aéreo em sistemas drywall; após 10 anos de uso em pisos flutuantes o material com maior densidade terá mantido o desempenho acústico inicial; a capacidade de absorção sonora dos materiais utilizados neste estudo está diretamente relacionada com sua densidade.

Palavras-chave: Isolamento ao som aéreo, isolamento ao som de impacto, absorção sonora, rigidez dinâmica, fluência à compressão, resíduo polimérico.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente construído vem sofrendo um gradual aumento na quantidade de fontes sonoras, devido à crescente disponibilidade de equipamentos de áudio mais potentes e o aumento da mecanização, mesmo nos ambientes residenciais. Mesmo as fontes sonoras utilizadas no ambiente doméstico podem afetar a saúde mental e física das pessoas, dependendo da atividade realizada e da quantidade de ruído gerado, exigindo

melhores condições acústicas dos ambientes (HANSEN, 2005; HONG, 2007).

Sabe-se que o conforto acústico em um edifício está diretamente relacionado às propriedades de isolamento acústico dos sistemas construtivos, que atuam na perda de transmissão do som gerado tanto externa como internamente ao edifício. O som originado de instrumentos, equipamentos, conversas e qualquer outra fonte comum de som, necessitam do uso de materiais adequados para

garantir os requisitos de conforto aos usuários (MAEKAWA et al., 2011; GUILLEN, 2008).

Os materiais que possam atenuar o efeito negativo do ruído excessivo nas pessoas estão presentes em temas de diversas pesquisas, com o intuito de se verificar o potencial de materiais com espessura reduzida, mais leves e de baixo custo, atuando no controle de ruídos através do isolamento acústico e da absorção sonora. Isso exige o desenvolvimento composições de materiais para atender a essa necessidade e contribuir para o uso de sistemas mais eficientes. Além disso, no atual contexto, no desenvolvimento dessas composições também deve ser considerado o impacto ambiental da matéria-prima utilizada para a sua fabricação, bem como o seu desempenho como um todo (HONG, 2007; HUANG, 2013; ASDRUBALI, 2012; TUTIKIAN et al., 2017).

Um dos materiais indicados para atender o controle do ruído tanto pelo isolamento, como pela absorção sonora é o material do tipo fibroso, como aqueles compostos por resíduos poliméricos de tereftalato de polietileno (PET), utilizados amplamente na indústria de embalagens, principalmente em garrafas de plástico. Esses materiais têm como características serem resistentes, hipoalergênicos e inofensivos para a saúde do operador em sua instalação, ao contrário das lãs de rocha e vidro que liberam partículas no ar. Estes ainda podem ser lavados e têm o apelo de ser um material reciclado. (HUANG, 2013; ARENAS; CROQUER, 2010; LOU et al., 2008; REY, 2011).

Devido às suas propriedades físicas, além do baixo custo de industrialização, a produção dos produtos de PET apresentou um aumento expressivo nos últimos anos e, atualmente, é um dos poliésteres mais produzidos no mundo, utilizado principalmente na fabricação de embalagens de alimentos (30%), filmes (5 %) e fibras têxteis (65%). No entanto, apesar do aumento na produção e no uso deste material, seus métodos de reciclagem e de descarte ainda não são totalmente eficientes, deixando uma parte significativa do material desperdiçado em condições de armazenamento ruins ou

levado para aterros sanitários (UYCIEC, 2016; MACDONALD, 2002; PACHECO; HEMAIS, 1999).

Nesse sentido, o desenvolvimento de novas soluções para o aproveitamento dos resíduos deste material constitui uma forma de se contribuir para a redução do impacto dos resíduos poliméricos no meio ambiente. Os materiais confeccionados a partir de resíduos de PET podem ter sua aplicação como preenchimento de divisórias, em camadas resilientes de pisos flutuantes e em revestimentos de superfícies internas, desde que tenham um potencial considerável para tratar salas requisitos de conforto acústico (REY, 2011; SIMÕES et al., 2014).

Os dispositivos utilizados para o condicionamento acústicos apresentam coeficientes de absorção sonora variáveis, conforme o tipo de dispositivo a ser utilizado. Brandão (2016) classifica esses dispositivos em três tipos básicos. Os materiais porosos, ou fibrosos, apresentam maior eficiência em altas frequências; os dispositivos confeccionados com chapas perfuradas têm maior absorção nas médias frequências e; os absorvedores de membrana são mais eficientes nas baixas frequências. O autor complementa ainda que com o aumento da espessura, os materiais porosos podem aumentar sua absorção nas baixas frequências, mas a maior absorção sempre será nas altas frequências.

O isolamento ao som aéreo pode ser alcançado com base em dois princípios: na massa do sistema ou na utilização do sistema massa-mola-massa. Conforme Egan (2014), o sistema massa-mola-massa utilizado nas divisórias leves, do tipo drywall, funciona a partir de duas placas rígidas separadas por uma cavidade a ser preenchida com material para absorção da parcela do som transmitido. O autor ressalta ainda que nas divisórias leves, formadas por chapas duplas, o isolamento acústico pode ser mais eficiente a partir do aumento da capacidade de amortecimento do material de amortecimento e/ou do aumento da rigidez das placas de seu fechamento.

Os sistemas de pisos apresentam maior diversidade na combinação dos materiais que podem constituir as camadas de um sistema de piso e as estimativas de isolamento ao som de impacto podem apresentar algumas complexidades, decorrentes da caracterização dos materiais utilizados nessas camadas (ZUCHETTO et al., 2016). A principal característica que define a eficiência de um material resiliente é a rigidez dinâmica, que apresenta correlação com a capacidade de redução do som de impacto de um sistema de piso flutuante (HOPKINS, 2012). Para um mesmo material a rigidez dinâmica é inversamente proporcional à espessura, sendo que os valores até 10 MN/m³ são encontrados em materiais caracterizados como eficientes na utilização em bases elásticas (CRIPPS; FOVARGUE, 2004). No entanto, por estarem submetidos a cargas acidentais ao longo de toda a sua vida útil, as camadas resilientes sofrem deformações e consequentes reduções na sua espessura inicial, o que pode comprometer sua eficiência no amortecimento das vibrações (ZUCHETTO et al., 2016).

Devido ao aumento no interesse de usar este material de resíduos pelos fabricantes, este trabalho objetiva avaliar o desempenho da lã composta por resíduos de PET, no isolamento acústico quando usado como preenchimento em sistemas de drywall, na absorção sonora e no isolamento de som de impacto quando usado camadas resilientes de pisos flutuantes.

2. MÉTODO

Para obter os resultados da caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de laboratório no itt Performance da Unisinos em São Leopoldo, Brasil - seguindo, para cada análise, os métodos de procedimento descritos a seguir.

2.1 Materiais e amostras

As amostras foram compostas por diferentes composições de lãs de PET, como mostra a Tabela 1, com variações na espessura e na densidade. Na escolha dessas variações foram considerados o potencial de aplicação final do material e a relação entre o processo de fabricação e o custo do material. Para os ensaios de isolamento acústico ao som aéreo, as amostras foram instaladas na forma de preenchimento interno em um sistema de construção a seco composto por estrutura metálica e fechamento com placas de gesso acartonado de 12,5 mm e placa OSB, com densidades variando entre 0,35 e 1,50 kg / m².

Nos ensaios para a determinação do isolamento sonoro ao de impacto não houve variação na espessura do material, pois os sistemas de pisos com variações em sua espessura acabam por influenciar no pé-direto dos ambientes internos. As variações nesse ensaio foram na densidade das amostras.

Tabela 1: Características das amostras utilizadas em cada tipo de ensaio

| Denominação | Isolamento ao som aéreo | | | | Isolamento ao som de impacto | | | | Absorção sonora | | | |
|--|-------------------------|------|------|-----|------------------------------|------|------|------|-----------------|------|------|-----|
| | R1 | R2 | R3 | R4 | I1 | I2 | I3 | I4 | A1 | A2 | A3 | A4 |
| Densidade superficial (kg/m ²) | 0,35 | 1,50 | 1,50 | 1,0 | 0,18 | 0,22 | 0,24 | 0,32 | 0,35 | 1,50 | 1,50 | 1,0 |
| Espessura (mm) | 50 | 50 | 75 | 100 | 10 | 10 | 10 | 10 | 50 | 50 | 75 | 100 |

Para a determinação da absorção sonora, utilizaram-se as mesmas variações de espessura e de densidade do ensaio de isolamento ao som aéreo. As condições específicas de cada ensaio estão descritas a seguir.

2.2 Isolamento ao som aéreo R_w

Os testes realizados para obter o índice de redução sonora (R_w) das amostras foram realizados em laboratório, onde as amostras foram construídas em escala real, com área de 10,8 m², em um pórtico de concreto armado e depois transportadas para uma instalação em conformidade com os requisitos presentes no ISO 10140-5: 2010 (ISO, 2010a).

A Figura 1 mostra as etapas de construção da amostra, com a estrutura, o preenchimento de lã e fechamento final com placa de gesso acartonado.



(a)



(b)



(c)

Figura 1: Etapas de construção de amostras, com instalação da estrutura metálica (a), preenchimento com a lã de PET (b) e o fechamento final com placa de gesso acartonado (c).

Para determinar o R_w de cada amostra, o ensaio seguiu os procedimentos descritos nas normas ISO 10140-2: 2010 (ISO, 2010b) e ISO 10140-4: 2010 (ISO, 2010c), com as medições dos níveis de pressão sonora em bandas de um terço de oitava de 100 a 5000 Hz. Os níveis de pressão sonora nas salas de emissão e de recepção foram medidos em dez posições diferentes, durante o período de dez segundos, a partir da geração do ruído rosa.

Os equipamentos utilizados nas medições foram da Bruel & Kjaer, sendo eles: analisador de som 2270 com microfone 4189, fonte sonora Omnipower 4292-L, calibrador sonoro 4231 e amplificador de potência 2734.

O tempo de reverberação foi medido de acordo com os requisitos da norma ISO 3382-2: 2008 (ISO, 2008).

O índice de redução sonora R foi calculado para cada banda de frequência analisada e, em seguida, os valores únicos ponderados foram obtidos a partir dos procedimentos da norma ISO 717-1: 2013 (ISO, 2013).

2.3 Absorção sonora

Os ensaios para a obtenção dos coeficientes de absorção sonora (α_s) foram realizados em laboratório, em uma reverberante com volume de 200 m³, com 25 difusores convexas, conforme os requisitos apresentados na norma ISO 354: 2003 (ISO, 2003). As amostras foram testadas com a montagem do Tipo A, sendo

posicionadas diretamente no chão da sala, em uma área de 10 m², seguindo uma relação de largura para comprimento de 0,6 (Figura 2). As juntas entre as peças foram seladas com fita adesiva, seguindo as prescrições normativas para evitar a absorção nas bordas laterais das peças.



Figura 2: Montagem da amostra para os ensaios de determinação do coeficiente de absorção sonora

O tempo de reverberação foi obtido pelo método interrompido, em 12 posições distintas, com 3 decaimentos por posição, em bandas de frequências de um terço de oitava de 100 a 5.000 Hz. Os equipamentos utilizados foram da Bruel & Kjaer, sendo eles: analisador sonoro 2270 com microfone 4189, fonte sonora Omnipower 4292-L, calibrador sonoro 4231 e amplificador de potência 2734.

Além dos coeficientes de absorção sonora para cada banda de terço de oitava, calculou-se também o coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) pelo método descrito na ISO 11654: 1997 (ISO, 1997), que compara os valores de cálculo com uma curva de referência.

2.4 Estimativa do isolamento ao som de impacto

O isolamento ao som de impacto foi estimado a partir das duas principais características dos materiais resilientes utilizados como camada elástica em sistemas de piso flutuante: a rigidez dinâmica e a fluência à compressão. Os

métodos para obter esses parâmetros para as amostras são mencionados a seguir.

2.4.1 Rigidez dinâmica

A rigidez dinâmica das amostras foi obtida a partir da sua frequência de ressonância, conforme prescrito na norma ISO 9052-1: 1989 (ISO, 1989) e, em seguida, o isolamento acústico ao som de impacto foi estimado pela ISO 12354-2: 2017 (ISO, 2017).

Para a determinação da frequência de ressonância, a amostra foi colocada entre uma placa de carga de 200 kg/m² e uma placa de base, na qual foi exercida uma vibração vertical feita por shaker ETS Solution, modelo L315M. Foram utilizados dois acelerômetros da Dytran, modelo 3035B2 (Figura 3), um acelerômetro colocado na placa de base e o outro na placa de carga, para a obtenção da transmissibilidade vibracional. A amplitude da excitação adotada foi constante, 0,5 mm, com a utilização de um sinal senoidal. Esses testes foram realizados nas amostras antes e após os 122 dias de compressão.

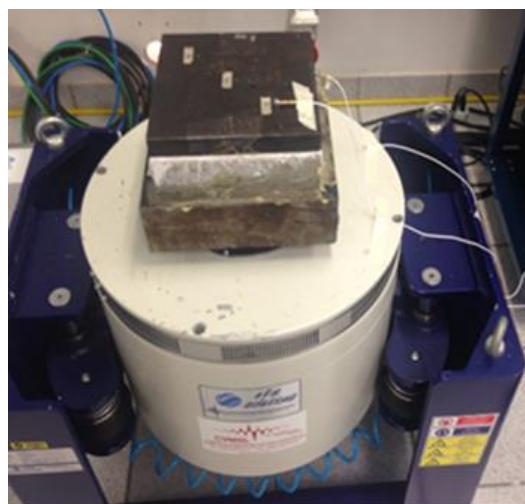


Figura 3: Equipamento utilizado nos ensaios para a obtenção da frequência de ressonância das amostras

A rigidez dinâmica foi utilizada para a estimativa da redução no isolamento do som de impacto, conforme a Eq. 1, fornecido pela ISO 12354-2: 2017 (ISO, 2017):

$$\Delta L = 30 \log \frac{f}{f_0} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Sendo que: f é a frequência, em Hz; f_0 é a frequência de ressonância do sistema, in Hz.

Para obter a frequência de ressonância de um sistema de piso flutuante, a norma fornece outra equação:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Sendo que: s' é a rigidez dinâmica do material resiliente, em MN/m³; m' é a massa da placa de carga, em kg/m².

2.4.2 Fluência à compressão

Os testes de fluência à compressão foram realizados com a finalidade de se verificar a influência das cargas aplicadas nas amostras ao longo do tempo de uso de um sistema de piso e forma feitos de acordo com ISO 20392: 2007 (ISO, 2007). Os testes consistiram na aplicação de cargas de 4 e 8 kg (Fig. 4) em amostras de 20 x 20 cm. A norma prescreve que a deformação deve ser verificada com um relógio comparador em determinados períodos de tempo. As medidas foram feitas no mesmo lugar para todas as amostras, em uma sala com temperatura controlada, com as amostras posicionadas acima de uma base robusta para evitar interferências relacionadas à dilatação do material, bem como à vibrações externas. Os testes foram realizados durante 122 dias para todas as amostras e os resultados foram extrapolados em 30 vezes, conforme indicado na norma ISO 20392 (ISO, 2007). Esse procedimento permite a avaliação do desempenho das amostras em uma condição de carregamento lento, ao longo do tempo de vida útil do sistema de piso.



Figura 4: Ensaio de fluência à compressão com carregamentos de 4 e 8 kg aplicados nas amostras de 20x20

3. RESULTADOS

3.1 Isolamento ao som aéreo

Os índices de redução sonora por bandas de frequências, bem como o valor ponderado para cada uma das amostras em sistemas de vedação vertical com fechamento em gesso acartonado, são mostrados na Fig. 5.

A partir dos resultados é possível observar que as amostras têm um comportamento semelhante nas bandas de frequências analisadas, com perfil gráfico ascendente até a banda de 500 Hz e decaimentos nas bandas de frequências de 1.250 Hz e entre 2.500 e 3.150 Hz. A amostra R1 apresenta menores valores de isolamento acústico nas baixas e médias bandas de frequências, com resultado menor de R_w , quando comparado às outras três amostras. O resultado menor pode estar relacionado à menor densidade da lã de PET. Nas bandas de frequências mais baixas, nota-se que a perda de transmissão sonora aumenta em função do aumento da espessura de lã, mas essas diferenças não foram significativas, e as amostras R2, R3 e R4 tiveram o mesmo resultado de R_w .

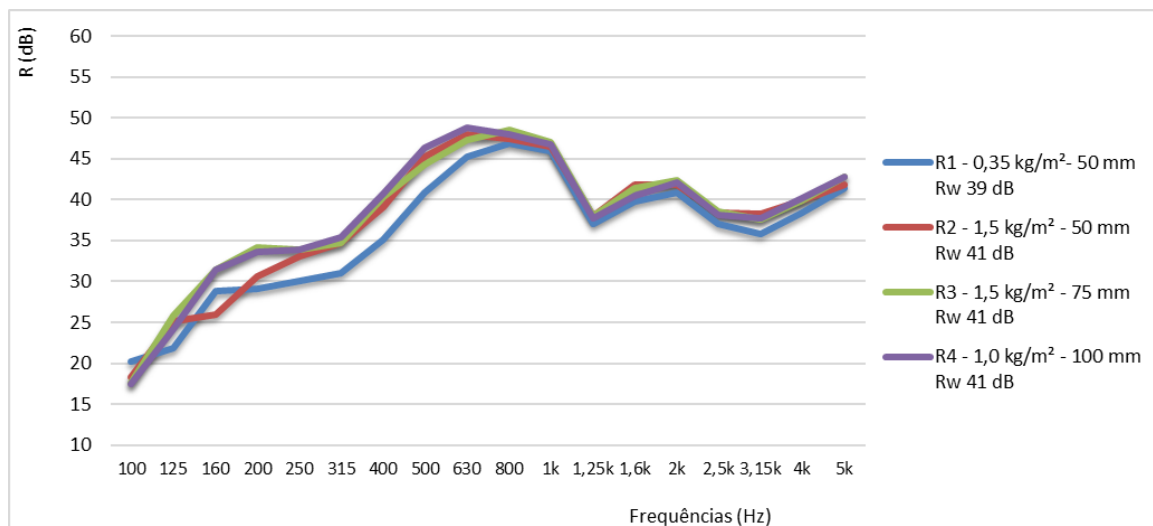


Figura 5: Redução sonora das quatro amostras

Para a verificação da influência do aumento da massa e da rigidez no isolamento acústico do sistema, foi escolhida a amostra R3, com preenchimento com lã de PET com densidade de 1,5 kg / m² e espessura de 75 mm. Para esta escolha, conforme indicação do fabricante, foram analisados o processo de fabricação e o custo, considerando-se a facilidade e a quantidade de matéria-prima necessária versus o desempenho da composição determinada. Desta forma, ficou definida uma quinta amostra, na qual foi adicionada uma placa em OSB de 11,1 mm em cada lado da parede. É

possível comparar os resultados das duas amostras na Fig. 6, na qual pode-se verificar uma diferença significativa no comportamento da parede confeccionada com a adição das placas em OSB.

O aumento de isolamento proporcionado pela adição das placas de OSB é fundamentado na relação entre aumento da massa superficial e da rigidez do conjunto de fechamentos cujo sistema atende o comportamento do tipo massa-mola-massa.

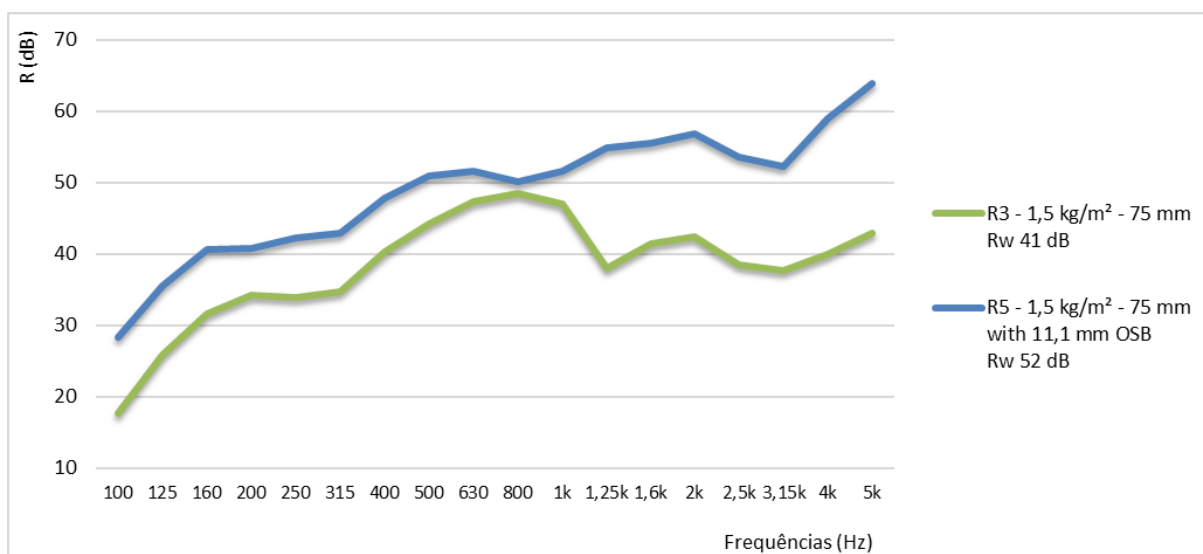


Figura 6: Comparação entre amostras com gesso acartonado (R3) e com gesso acartonado e chapas em OSB (R5)

O resultado do quinto teste confirmou que o uso de duas camadas diferentes de materiais

altera a frequência crítica do sistema, bem como melhora o isolamento em todas as

bandas analisadas, resultando em aumento de 11 dB no índice de redução de som ponderado. Analisando o espectro dos sistemas, o comportamento de ambos é semelhante até a banda de frequências de 800 Hz, mas a frequência crítica foi deslocada de 1.250 para 3.150 Hz com a adição das placas OSB.

3.2 Absorção sonora

Os coeficientes de absorção sonora obtidos para cada amostra nos testes na câmara reverberante indicam que o material tem um comportamento satisfatório dependendo da densidade e da espessura. Analisando o gráfico mostrado na Fig. 7, pode-se verificar que a densidade tem uma grande influência no desempenho geral do material, bem como a sua

espessura. As amostras, excluindo-se a A1, têm uma maior absorção sonora nas bandas de médias e altas frequências, com o comportamento típico de materiais porosos conforme indicado por Brandão (2016). Destaca-se que a amostra A3 apresentou maior valor ponderado ($\alpha_w = 0,8$), com a maioria dos valores por bandas de terços de oitava acima das demais amostras estudadas. A amostra A1, com menor densidade e espessura de 50 mm, apresentou maior absorção na banda de frequências de 800 Hz, com um decaimento na absorção tanto nas bandas de frequências maiores como nas abaixo desses 800 Hz, apresentando um comportamento semelhante à um absorvedor de membrana. Os decaimentos acima da banda de 800 Hz foram responsáveis pelo baixo valor ponderado ($\alpha = 0,45$).

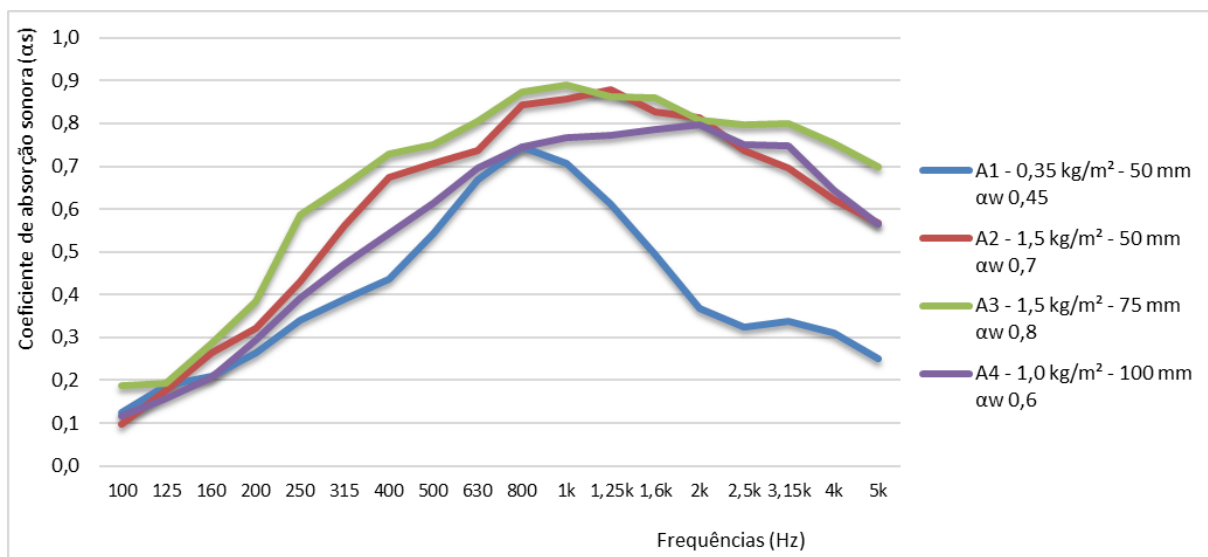


Figura 7: Coeficientes de absorção sonora das quatro amostras

3.3 Estimativa do isolamento ao som de impacto

A Tabela 2 mostra os resultados da rigidez dinâmica, bem como a deformação estimada dos materiais sob carga após 10 anos, obtida a partir da extrapolação dos valores medidos de fluência à compressão. As espessuras das amostras foram medidas antes e depois dos 122 dias de carregamento. Com os resultados estimados de compressão, é possível verificar

se a densidade do material fibroso tem influência na deformação.

A deformação estimada após 10 anos de uso dos materiais sob carga mostrou variações de 11 a 39%. As amostras I3 e I4, com maior densidade, como esperado, mostraram as deformações menores, enquanto que nas amostras I1 e I2, com menor densidade, as deformações foram maiores. Neste caso, pode-se observar que a deformação sofre uma dependência na densidade, mesmo que as

composições tenham a mesma espessura da fibra. Ressalta-se que quanto maior for a densidade, menor será a deformação durante o tempo de uso do material como a camada resiliente de um piso flutuante sob carga permanente.

Após os 122 dias do teste de compressão, a rigidez dinâmica foi calculada como função da frequência de ressonância das mesmas amostras após o carregamento. Para todas as

amostras, os valores de rigidez dinâmica aumentaram quando comparadas com as mesmas do teste de compressão. O aumento da rigidez dinâmica foi de aproximadamente 18% para a amostra I3 e 94% na amostra I4. Além da diferença na modificação da rigidez dinâmica, os valores estimados podem ser adequados, pois são menores que 10 MN / m³, que é o valor máximo para materiais utilizados como camadas resilientes em pisos flutuantes de acordo com Cripps e Fovargue (2004).

Tabela 2: Rigidez dinâmica (s') das amostras antes e depois do carregamento

| Amostra | s' antes da compressão (MN/m ³) | Deformação estimada para 10 anos (mm) | s' depois da compressão (MN/m ³) |
|---------|---|---------------------------------------|--|
| I1 | 2,5 | 3,9 | 4,3 |
| I2 | 1,7 | 3,8 | 3,3 |
| I3 | 2,0 | 1,5 | 3,2 |
| I4 | 2,2 | 1,1 | 2,6 |

O isolamento acústico ao som de impacto (ΔL) estimado pela rigidez dinâmica das amostras deste estudo está indicado na Fig. 8. As diferenças nos valores de rigidez dinâmica após os 122 dias sob carga permanente indicaram perdas inferiores a 1 dB em todas as amostras, sendo que, na amostra I4, com maior densidade, a redução estimada na capacidade

de isolamento ao som de impacto é muito baixa, com 0,2 dB. Pode-se indicar que após 10 anos de uso, sob uma carga de 200 kg/m² em um sistema de piso flutuante espera-se uma perda na eficiência no isolamento ao som de impacto de, no máximo 1 dB nos materiais testados.

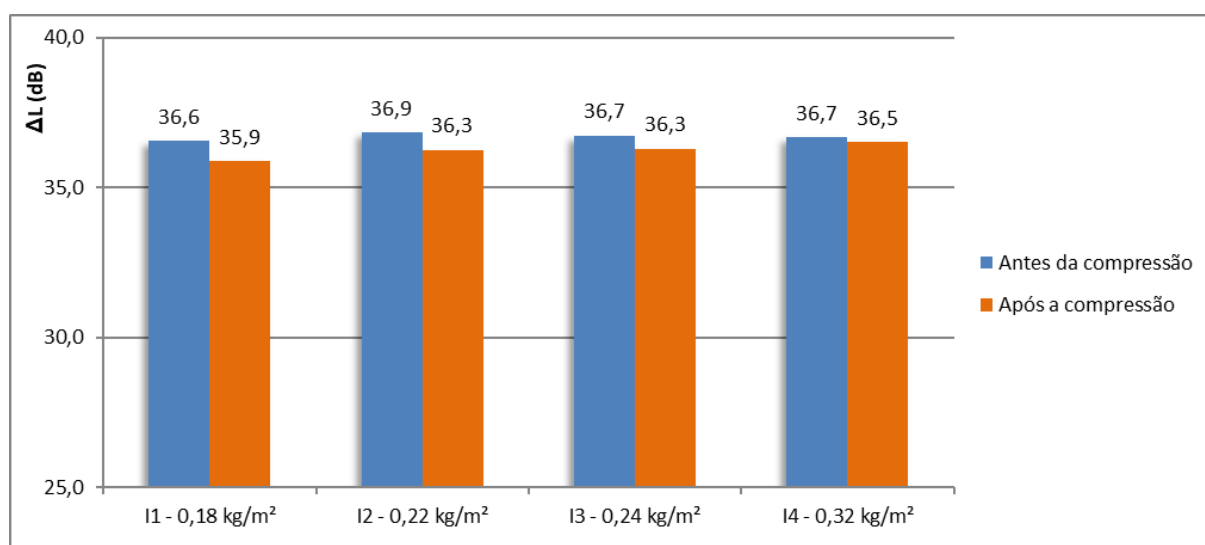


Figura 8: Estimativa da redução do isolamento ao som de impacto antes e após o carregamento

4. Considerações finais

Devido ao aumento recente do uso de produtos poliméricos reciclados na construção civil, são verificados problemas causados pelas formas de depositar e/ou de se reutilizar este material. Neste contexto, novas utilizações foram propostas para a utilização dos resíduos de PET na forma de materiais fibrosos ou lãs, com indicações de uso para o isolamento e o condicionamento acústico de ambientes, a partir de novas composições, com propostas de substituição de materiais atualmente disponíveis no mercado.

Neste estudo, os materiais testados apresentaram variações de densidade e de espessura, para a caracterização de seu comportamento para o isolamento ao som aéreo, absorção sonora e isolamento ao som de impacto.

Resumidamente, em relação ao uso da lã de PET, pode-se indicar que:

- o aumento na densidade dos materiais utilizados como preenchimento em sistemas de vedação vertical do tipo drywall não aumenta consideravelmente o isolamento ao som aéreo;
- as estimativas após 10 anos de uso da lã de PET como camada elástica de pisos flutuantes indicam que no material com maior densidade a deformação será menor, com a consequente manutenção do desempenho acústico ao longo da vida útil do sistema de piso;
- a absorção sonora apresentou valores típicos de materiais fibrosos, com maior absorção nas bandas de médias e altas frequências;
- a capacidade de absorção sonora dos materiais utilizados neste estudos está diretamente relacionada com sua densidade, sendo que, para a densidade superficial de 1,5 kg/m² os valores de α_w foram de 0,7 e 0,8 nas amostras de 50 e de 75 mm, respectivamente;

Este estudo permitiu um desenvolvimento de um produto de acordo com critérios técnicos, fornecidos pela equipe do laboratório, e a

viabilidade de produção, definida pelo fabricante, para a verificação do potencial pouco conhecido no setor da construção civil brasileira. Os testes mostraram que o material tem um comportamento satisfatório para a aplicação em situações que demandem isolamento e/ou condicionamento acústico de ambientes internos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Planalto Têxtil do Brasil pela disponibilidade dos materiais utilizados no trabalho e pela autorização para a publicação dos resultados.

REFERENCES

- ARENAS, J. P.; CROCKER, M. J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound and vibration*, 2010. v. 44, p. 12–17.
- ASDRUBALI, F.; SCHIAVONI, S.; HOROSHENKOV. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*, 2012. v. 19, n. 4, p. 283-311.
- BRANDÃO, E. *Acústica de salas*. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.
- CRIPPS, A; FOVARGUE, J. *Crops in Construction Handbook*. London: CIRIA, 2004. 112 p.
- EGAN, D. *Architectural Acoustics*. New York: McGraw-Hill, 2014.
- GUILLEN, I. *et al.* On the sound insulation of masonry wall façades. *Building and environment*, 2008. v. 43, n. 4, p. 523–529.
- HANSEN, C. *Noise control - from concept to application*. London: Taylor & Francis, 2005.
- HONG, Z. *et al.* A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *Journal of sound and vibration*, 2007. v. 304, n. 1–2, p. 400–406.
- HUANG, C.-H. *et al.* The efficacy of coconut fibers on the sound-absorbing and thermal-

insulating nonwoven composite board. *Fibers and polymers*, 2013. v. 14, n. 8, p. 1378–1385.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12354 – Building acoustics: Estimation of acoustic performance of buildings from the performance elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms. 2017.

_____. ISO 10140 - Acoustics: laboratory measurement of sound insulation of buildings elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment. 2010a.

_____. ISO 10140 - Acoustics: laboratory measurement of sound insulation of buildings elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation. 2010b.

_____. ISO 10140 - Acoustics: laboratory measurement of sound insulation of buildings elements - Part 4: Measurement procedures and requirements. 2010c.

_____. ISO 11654 - Acoustics: Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption. 1997.

_____. ISO 20392 – Thermal-insulating materials: Determination of compressive creep. 2007.

_____. ISO 3382 - Acoustics: Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. 2008.

_____. ISO 354 - Acoustics: Measurement of sound absorption in a reverberant room. 2003.

_____. ISO 717 - Acoustics: Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation. 2013.

_____. ISO 9052 - Acoustics: Determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings. 1989.

LOU, C. W.; CHEN, P.; LIN, J. H. Manufacturing process and property analysis of sound absorption sandwich board.

Advanced materials research, 2008. v. 55–57, p. 393–396.

MACDONALD, W. A. New advances in poly(ethylene terephthalate) polymerization and degradation. *Polymer international*, 2002. v. 51, n. 10, p. 923–930.

MAEKAWA, Z.; RINDEL, J. H.; LORD, P. *Environmental and architectural acoustics*. 2. ed. New York: Spon Press, 2011.

PACHECO, E. B.; HEMAIS, C. A. Mercado para produtos reciclados à base de pet/hdpe/ionômero. *Polímeros: ciência e tecnologia*, 1999. p. 59–64.

REY, R. DEL *et al.* Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico. *Materiales de Construcción*, 2011. v. 61, n. 304, p. 547–558.

SIMÕES, M. F.; OLIVEIRA, B. D.; BECKER, R. R. Isolamento e condicionamento acústico do Auditório Araújo Vianna em Porto Alegre, RS. In: *ENCONTRO SOBRAC*, XXV, p. 336–343, 2014.

TUTIKIAN, B. F.; ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P.; OLIVEIRA, M. F. Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais. *Ambiente Construído*, 2017. v. 17, n. 3, p. 295–306.

UYCIEC – UNIVERSITY OF YORK CENTRE FOR INDUSTRY EDUCATION COLLABORATION. *Polyesters (on line version)*. UK. Last update in 25th August 2016.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; PATRÍCIO, J. V. Influence of the compression conditions in the acoustic performance of resilient layers of floors. In: *22nd International Congress on Acoustics – ICA 2016*. Buenos Aires: Asociación de Acústicos Argentinos, 2016.

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Ferramenta para análise do desempenho acústico das edificações para fins de financiamento imobiliário

Righi, P. C. R.*; Meller, G. +; Paixão, D. X. da ++

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, RS, pcrighi@gmail.com

+ Laboratório de Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, gabrielameller0@gmail.com

++ Grupo de Pesquisa CNPq/UFSM Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, acusticaufsm@yahoo.com.br

Resumo

A necessidade habitacional brasileira é suprida, em grande parte, por meio de obras financiadas por instituições de crédito imobiliário, as quais recebem como garantia o próprio imóvel financiado. As empresas financiadoras analisam os projetos dos empreendimentos, com critérios técnicos próprios, para concessão dos subsídios e do enquadramento nos programas de habitação. Nas análises para concessão de crédito não estão contemplados os parâmetros acústicos das edificações. O presente artigo mostra o desenvolvimento de uma ferramenta, composta por duas planilhas eletrônicas, cuja finalidade é subsidiar as análises técnicas do crédito imobiliário, pelas instituições financiadoras, possibilitando que sejam privilegiados os empreendimentos residenciais com melhor desempenho acústico. O banco de dados, que pode ser complementado pelos usuários, utiliza valores de isolamento acústico determinados em ensaios de laboratório e em campo, os quais representam grande parte dos elementos construtivos empregados no País. Esses valores são oriundos de livros e de trabalhos acadêmicos sobre o tema. A partir do relatório de resultados das planilhas eletrônicas geradas no trabalho, pode ser verificado o atendimento à norma ABNT NBR 15575:13 e o respectivo nível de desempenho acústico (mínimo, intermediário, superior) dos sistemas de paredes de vedação internas e externas, sistemas de pisos e sistemas de coberturas acessíveis das edificações habitacionais. A utilização das planilhas eletrônicas pelos setores de análise de crédito imobiliário para verificação da qualificação dos empreendimentos quanto aos parâmetros acústicos, pode ser um importante instrumento para que os investidores obtenham retorno de seus investimentos e que exista uma melhoria nos índices de satisfação dos consumidores.

Palavras-chave: Isolamento sonoro, desempenho de edificações, financiamento imobiliário.

1. INTRODUÇÃO

A poluição é caracterizada pela degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que, direta ou indiretamente, prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população e/ou lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos. (BRASIL, 1981)

A poluição sonora, embora não se acumule visualmente no ambiente, causa danos ao corpo e à qualidade de vida das pessoas.

O crescimento populacional e a vida em conglomerados elevam, cotidianamente, o ruído nas cidades, em especial, em decorrência do aumento do número de

automóveis, aeronaves e outros meios de transportes.

A gestão do espaço urbano deve contemplar o ambiente sonoro como fator determinante na percepção da qualidade ambiental, por parte do cidadão. Por isso, ela passa pela redução dos níveis sonoros e pela criação de ambientes mais agradáveis.

Em locais onde há dados técnicos disponíveis, como na Europa Ocidental, é possível afirmar que o ruído ambiente ocasiona uma carga de doença classificada como a segunda colocada dentre os fatores ambientais, perdendo somente para a poluição do ar. (WHO, 2011)

Outro fator a ser considerado, decorrente da necessidade de muitas pessoas viverem em espaços reduzidos, ou por questões de segurança pessoal e patrimonial, é a verticalização das construções, a qual tem popularizado as residências multifamiliares. A deficiência no isolamento acústico nesse tipo de edificação, aliada aos hábitos e costumes dos moradores, vem ampliando o número de queixas e desentendimentos entre vizinhos, independente do padrão construtivo da edificação.

Uma parcela significativa das residências brasileiras é decorrente de obras financiadas por instituições de crédito imobiliário. Tais instituições, em geral, recebem como garantia o próprio bem imóvel financiado, por meio de alienação fiduciária. É necessário, para tanto, a análise dos projetos do empreendimento, com critérios técnicos próprios da instituição. É verificada a viabilidade econômica do empreendimento, quanto ao atendimento de parâmetros legais para concessões de subsídios e enquadramento nos programas sociais de habitação.

A Caixa Econômica Federal é a principal instituição financiadora do crédito imobiliário do País. O Selo Casa Azul, por ela instituído, reconhece os projetos de empreendimentos que demonstrem suas contribuições para a redução de impactos ambientais. A avaliação é realizada a partir de critérios vinculados a temas como: qualidade urbana, projeto e conforto, eficiência energética e conservação de recursos naturais. Nesse guia da Caixa não constam critérios acústicos, embora o conforto apareça, com destaque para térmica, ventilação e iluminação. (CAIXA, 2010)

Isso é um reflexo de que, nas planilhas utilizadas para avaliação de concessão de crédito pelas instituições financeiras, o item desempenho acústico inexistente ou é incipiente.

Observa-se, no entanto, que há a preocupação dos agentes financiadores em apoiar habitações que sejam projetadas de forma mais sustentável e com melhor desempenho. Considera-se, por isso, de fundamental

importância a ação de instrumentalizar os técnicos das instituições financiadoras, a fim de que possam incluir a avaliação diferenciada dos investimentos que são capazes de melhorar o desempenho acústico das unidades residenciais financiadas.

É imprescindível lembrar, também, que a norma NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013), que surgiu com o apoio da Caixa Econômica Federal, prevê três níveis diferentes de desempenho acústico para as edificações: mínimo, intermediário e superior, sendo que o nível mínimo é obrigatório.

A referida norma brasileira alterou a relação de consumo no mercado imobiliário, na medida em que estabelece parâmetros a serem atendidos pela edificação e consequentes obrigações do consumidor, do projetista, do construtor, do incorporador e do fabricante de materiais.

De acordo com o Código de Defesa do Consumidor (BRASIL, 1990), os construtores das edificações possuem responsabilidade direta com os produtos colocados no mercado. Há, ainda, a corresponsabilidade dos agentes promotores e financiadores na qualidade final (MITIDIERI FILHO, 1998). Isso destaca a necessidade de auxílio aos técnicos que efetuam as análises para concessão de crédito imobiliário.

Buscou-se, por isso, suprir a falta de ferramentas de baixo custo, rápidas e eficazes, instrumentalizando os órgãos financiadores do mercado imobiliário, a fim de que possam avaliar o conforto acústico previsto para as edificações objeto do financiamento.

O presente artigo apresenta, portanto, um trabalho que teve como objetivo desenvolver uma ferramenta para subsidiar as análises de engenharia das instituições financiadoras de crédito imobiliário, atendendo às premissas de desempenho acústico das edificações, correlacionando-as com os critérios de análise e acompanhamento dos empreendimentos imobiliários. Embora o desenvolvimento

tenha como base uma instituição financeira, a ferramenta é aplicável a outros estabelecimentos. Além disso, a ferramenta pode ser utilizada na simulação prévia do desempenho acústico de qualquer edificação residencial.

2. METODOLOGIA

O estudo realizado classifica-se como de natureza aplicada, abordagem quantitativa, objetivos exploratórios e descritivos, com a adoção de um estudo de caso como procedimento técnico experimental.

As atividades desenvolvidas podem ser divididas em três etapas principais. A primeira constituiu-se da compilação dos índices relativos ao desempenho sonoro de diferentes materiais componentes dos pisos, tetos e paredes dos empreendimentos, a fim de constituírem um banco de dados a ser utilizado no trabalho. A seguir, houve a escolha de uma instituição financeira para fins de adequar-se a ferramenta proposta a um caso prático de utilização das informações a serem geradas. A terceira etapa foi a elaboração de planilhas eletrônicas para simulação do desempenho acústico das edificações, de acordo com suas características construtivas, materiais e sistemas empregados na edificação, comparando com a norma NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013).

2.1 Compilação de dados de níveis sonoros

Foram compilados valores referentes à performance de diferentes materiais componentes dos elementos construtivos utilizados no país para: pisos, tetos, paredes de vedação (entre ambientes ou de fachadas), os quais haviam sido determinados em ensaios de laboratório ou em campo. Para a obtenção desses dados utilizaram-se livros e trabalhos acadêmicos sobre o tema.

Os índices recolhidos foram: Índice de redução sonora ponderado (R_w); Diferença

padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$); Diferença padronizada de nível ponderada a 2m de distância da fachada ($D_{2m,nT,w}$) e Nível sonoro aparente equivalente padronizado ponderado ($L'_{nt,w}$).

As principais fontes de dados compilados da literatura para Índice de Redução Sonora Ponderado (R_w), também conhecido como Classe de Transmissão Sonora (STC), foram: Ferreira Neto (2009), Barry (2005), Losso (2004), Friedrich (2010), Dondé (2008), Mateus (2008), Pinto (2011) e Oliveira (2007). Para o Nível sonoro aparente equivalente padronizado ponderado ($L'_{nt,w}$) ou Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado empregou-se: Ferraz (2009) e Neubauer (2008). No caso da Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{nt,w}$) os dados foram de: Barry (2005), Ferreira Neto (2009), Pinto (2011) e Martins (2009) e para diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros de distância ($D_{2mnt,w}$) utilizou-se Martins (2009).

Esses dados compilados formam o banco de dados inicial utilizado na planilha eletrônica para simulação do desempenho acústico das edificações. Esse banco de dados pode ser atualizado com novas informações, inseridas pelos usuários.

2.2 Adequação da ferramenta proposta a um caso prático

Elegeu-se uma instituição financeira para fins de adequar-se a ferramenta proposta a um caso prático de utilização. A instituição financeira escolhida foi a Caixa Econômica Federal, por ser o principal agente do crédito imobiliário no Brasil. Essa instituição possui *Normativos Internos* para análise e acompanhamento do crédito imobiliário, os quais norteiam as ações das equipes de Engenharia e Arquitetura das Gerências de Desenvolvimento Urbano e Rural.

2.3 Elaboração das planilhas eletrônicas

Para uma maior facilidade de operação, foram criadas duas planilhas eletrônicas de

verificação do desempenho acústico das edificações. A primeira, denominada Planilha A, utiliza resultados de ensaios em laboratório e em campo, tratados, respectivamente, como de isolamento e isolamento. Essas nomenclaturas foram adotadas a partir do estudo de Ferreira Neto (2009, p.28). A Planilha B é referente somente ao isolamento acústico, ou seja, apenas a testes realizados em campo.

As planilhas foram desenvolvidas utilizando o *software* comercial Microsoft Excel, um dos mais conhecidos para a elaboração de planilhas eletrônicas. A escolha deveu-se ao fato do programa ser muito difundido, de fácil operação e de ser utilizado para os laudos de análise da Caixa Econômica Federal.

Cada uma das planilhas é composta por: uma guia de caracterização dos elementos construtivos da edificação (parede de vedação externa, parede de vedação interna, sistema de pisos e sistema de coberturas); uma guia de apresentação do resumo do desempenho acústico da edificação; uma guia com os requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013); e demais guias com bancos de dados de índices do desempenho acústico. Os bancos de dados são alimentados com os valores inicialmente compilados, podendo ser incrementados ou ajustados diretamente pelo usuário.

A operação da planilha é feita por meio da caracterização da edificação na guia correspondente, indicando a localização do empreendimento quanto à classe de ruído, e escolhendo os materiais constitutivos de cada elemento da edificação, sendo eles: a parede de vedação externa, as paredes de vedação interna, o sistema de pisos e o sistema de coberturas.

Para caracterizar cada um dos elementos que compõem os sistemas construtivos, é apresentado o índice ponderado correspondente ao material indicado e realiza-se a verificação do atendimento à norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), informando o nível de atendimento: mínimo, intermediário ou

superior. É, ainda, apresentado esse nível de atendimento em forma de gráfico de coluna para cada um dos elementos.

Após a caracterização de todos os elementos construtivos da edificação na primeira guia da planilha, é apresentado, na segunda guia, um quadro resumo com o nível de atendimento à norma de cada elemento e um gráfico de barras com o percentual de atendimento em cada nível, para todos os sistemas construtivos analisados.

3. OPERAÇÃO DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS

3.1 Planilha A

A Planilha A opera com um banco de dados que utiliza valores resultantes de medições realizadas em laboratório e em campo.

Para as paredes de vedação externas e internas há a verificação por meio de valores de medições em laboratório, as quais determinam o Índice de Redução Sonora Ponderado (R_w). Para os demais componentes da edificação são utilizados somente resultados de medições em campo.

Nas medições de ruídos de impacto em pisos e coberturas adota-se o Nível de Pressão Sonora de Impacto Padrão Ponderado ($L'_{nT,w}$).

Para medições de ruído aéreo em sistemas de pisos é utilizada a Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{nT,w}$) e para medições de ruído aéreo em coberturas é utilizada a Diferença Padronizada de Nível Ponderado a 2 metros de distância ($D_{2m nT,w}$).

A Figura 1 mostra uma das telas resultantes da Planilha A, em sua apresentação completa. Nela aparecem: a localização do empreendimento quanto à classe de ruído, a caracterização e o nível de desempenho obtido para a fachada. As Figuras 2 e 3 detalham cada uma das operações da referida planilha.

| Localização do empreendimento quanto à classe de ruído | | | |
|--|---|--|--|
| Classe de ruído | Localização da habitação | | |
| <input checked="" type="radio"/> Classe de ruído I | Distante de fontes de ruído intenso de quaisquer natureza | | |
| <input type="radio"/> Classe de ruído II | Áreas sujeitas a ruídos não enquadráveis nas Classes I e III | | |
| <input type="radio"/> Classe de ruído III | Sujeita a ruído intenso de meios de transporte e outras naturezas | | |
| 1 FACHADA | | | |
| 1.1 Parede de vedação externa - Fachada | | | |
| | Cod | Descrição do material | R _w (dB) área (m ²) |
| Material | 6 | Tijolo cerâmico maciço, espessura de 100 mm e 25 mm de argamassa em cada face. | 45 20 |
| Material | 133 | Janela maxim-ar de PVC (boa estanqueidade) com vidros duplos 4 e 6 mm - espaçados 12 | 37 8 |
| Material | 1 | - | 0 0 |
| Material | 1 | - | 0 0 |
| | | | Área total: 28 |
| Índice de redução sonora ponderado - R _w | | | 41 |
| Classe de ruído | | | 1 |
| Atendimento à norma | | | ATENDE |
| Nível de desempenho | | | SUPERIOR |

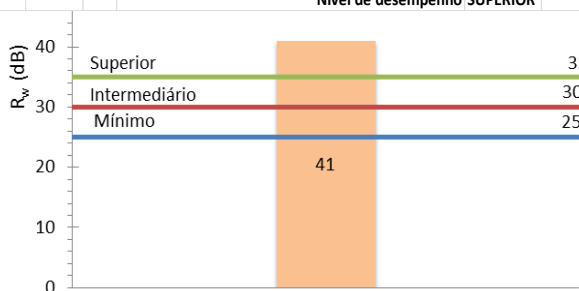


Figura 1: Planilha A – Desempenho acústico da parede de vedação externa - Fachada

Inicialmente, como apresentado na Figura 2, é necessário selecionar a opção correspondente à localização do empreendimento quanto à classe de ruído, conforme estabelecido pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013). Essa seleção é utilizada no estabelecimento dos requisitos de atendimento à norma nos sistemas de fachada e coberturas.

| Localização do empreendimento quanto à classe de ruído | |
|--|---|
| Classe de ruído | Localização da habitação |
| <input checked="" type="radio"/> Classe de ruído I | Distante de fontes de ruído intenso de quaisquer natureza |
| <input type="radio"/> Classe de ruído II | Áreas sujeitas a ruídos não enquadráveis nas Classes I e III |
| <input type="radio"/> Classe de ruído III | Sujeita a ruído intenso de meios de transporte e outras naturezas |

Figura 2: Planilha A – Localização do empreendimento quanto à classe de ruído

Em seguida, para o caso das fachadas, determinam-se os tipos de componentes que caracterizam os elementos constituintes das mesmas, como paredes, janelas etc, que estão cadastrados no banco de dados da planilha.

Após essa seleção, informa-se a área de cada um desses elementos que compõem a fachada. A planilha efetua o cálculo do índice de redução sonora total da fachada, informando o atendimento, ou não, à norma, além de indicar o nível desse atendimento, como mostra a Figura 3.

| Parede de vedação externa - Fachada | | | | |
|---|-----|--|---------------------|------------------------|
| | Cod | Descrição do material | R _w (dB) | Área (m ²) |
| Material 1 | 7 | Tijolo cerâmico maciço, espessura de 100 mm e 25 mm de argamassa em cada face. | 52 | 30 |
| Material 2 | 133 | Janela maxim-ar de PVC (boa estanqueidade) com vidros duplos 4 e 6 mm - espaçados 12 | 37 | 8 |
| Material 3 | 1 | - | 0 | 0 |
| Material 4 | 1 | - | 0 | 0 |
| | | | Área total: | 38 |
| Índice de redução sonora ponderado - R _w | | | 43 | |
| Classe de ruído | | | 1 | |
| Atendimento à norma | | | ATENDE | |
| Nível de desempenho | | | SUPERIOR | |

Figura 03: Planilha A– Escolha dos materiais, determinação do índice ponderado e indicativo do atendimento, ou não, à norma

Em outra operação da planilha, apresenta-se um gráfico de colunas, que mostra o valor do Índice de redução sonora ponderado (R_w) obtido e a sua comparação com os valores determinados pela NBR 15575 (ABNT, 2013), para esse tipo de elemento.

Observa-se que as diferentes classes de ruído, previstas para o local onde se situa o empreendimento, ocasionam mudanças nos requisitos de atendimento à norma. Assim, para um mesmo índice de redução sonora ponderado, podem-se obter diferentes níveis de desempenho, dependendo da localização da edificação, quanto à classe de ruído.

A Figura 4 exemplifica uma fachada com Índice de redução sonora de R_w=43 dB e localizada na classe de ruído I. Consta-se que a mesma atende aos requisitos da NBR 15575 (ABNT, 2013) com desempenho Superior. A simples mudança na classe de ruído, no entanto, altera a classificação quanto ao desempenho acústico, como mostra a Figura 5.

Localização do empreendimento quanto à classe de ruído

| Classe de ruído | Localização da habitação |
|--|---|
| <input checked="" type="radio"/> Classe de ruído I | Distante de fontes de ruído intenso de quaisquer natureza |
| <input type="radio"/> Classe de ruído II | Áreas sujeitas a ruídos não enquadráveis nas Classes I e III |
| <input type="radio"/> Classe de ruído III | Sujeita a ruído intenso de meios de transporte e outras naturezas |

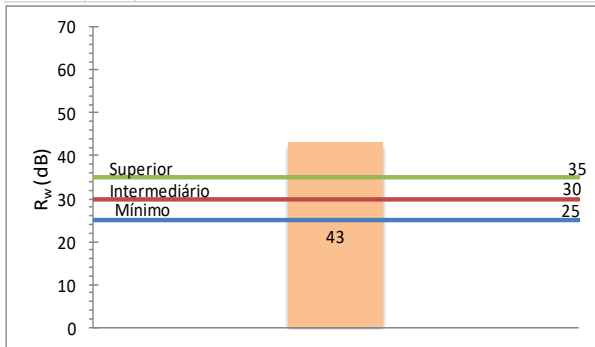


Figura 4: Planilha A–Fachada com $R_w=43$ dB na classe de ruído I - desempenho Superior

Na Figura 5, a mesma fachada caracterizada na Figura 4, com $R_w = 43$ dB, mas localizada na classe de ruído III, atende à norma com desempenho Intermediário.

Localização do empreendimento quanto à classe de ruído

| Classe de ruído | Localização da habitação |
|--|---|
| <input type="radio"/> Classe de ruído I | Distante de fontes de ruído intenso de quaisquer natureza |
| <input type="radio"/> Classe de ruído II | Áreas sujeitas a ruídos não enquadráveis nas Classes I e III |
| <input checked="" type="radio"/> Classe de ruído III | Sujeita a ruído intenso de meios de transporte e outras naturezas |

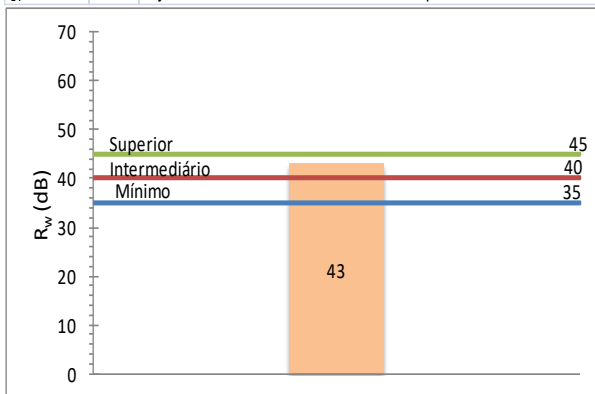


Figura 5: Planilha A–Fachada com $R_w=43$ dB classe de ruído III- desempenho Intermediário

Para as paredes de vedação interna, a Planilha A é operada da mesma forma que para a fachada, como mostrado anteriormente. Isso pode ser observado na Figura 6 e na Figura 7.

A principal diferença, no entanto, é que para as paredes de vedação interna não há influência do nível de atendimento à norma

em função da localização do empreendimento, como se identifica na Figura 6, ao compará-la com a Figura 1. Para fins de operação da planilha, o fator a ser considerado é o tipo (ou finalidade) dos ambientes contíguos à parede em análise. O caso ilustrado na Figura 6, por exemplo, se refere a uma parede de geminação entre unidades habitacionais autônomas, na situação onde não há ambiente dormitório.

| 2 PAREDES DE VEDAÇÃO INTERNA | | | | |
|--|-----|--|--|------------------------|
| Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), nas situações | | | | |
| 2.1 onde não haja ambiente dormitório | | | | |
| | Cod | Descrição do material | R_w (dB) | Área (m ²) |
| Material | 7 | Tijolo cerâmico maciço, espessura de 100 mm e 25 mm de argamassa em cada face. | 52 | 15 |
| Material | 15 | Gesso Acartonado Knauf W111 73/48/600 - 2 x 12,5 GIB-AK - Com lã de vidro | 44 | 5 |
| Material | 1 | | 0 | 0 |
| Material | 1 | | 0 | 0 |
| | | | Área total: | 20 |
| | | | Índice de redução sonora ponderado - R_w | 48 |
| | | | Atendimento à norma | ATENDE |
| | | | Nível de desempenho | MÍNIMO |

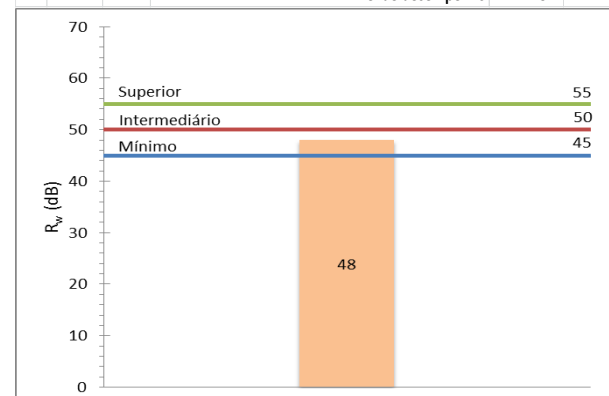


Figura 6: Planilha A – Desempenho acústico vedação interna - desempenho mínimo

A Figura 7, de forma semelhante à Figura 6, mostra a parte da Planilha A que calcula o desempenho acústico de uma parede de vedação interna. Observa-se, como diferença, que a parede, nessa figura, não atende ao desempenho prescrito na NBR 15575 (ABNT, 2013). Nos dois casos apresentados, nas duas figuras citadas, embora os materiais constituintes das paredes sejam semelhantes, o tipo de ambiente contíguo à parede é diferente (dormitório ou não). No primeiro caso não há dormitório e, na Figura 7, a parede divide o dormitório de áreas de uso coletivo.

| Parede cega de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, tais como corredores e escadaria nos pavimentos | | | | |
|--|-----|--|-------------|------------------------|
| | Cod | Descrição | R_w (dB) | Área (m ²) |
| Material 1 | 6 | Tijolo cerâmico maciço, espessura de 100 mm e 25 mm de argamassa em cada face. | 45 | 10 |
| Material 2 | 22 | Gesso Acartonado Placo D 73/48/600 - 1 st 12,5 / 1 st 12,5 - sem lã de vidro | 36 | 10 |
| Material 3 | 1 | - | 0 | 0 |
| Material 4 | 1 | - | 0 | 0 |
| | | | Área total: | 20 |
| Índice de redução sonora ponderado - R_w | | | 38 | |
| Atendimento à norma | | | NÃO ATENDE | |
| Nível de desempenho | | | - | |

Figura 7: Planilha A – Desempenho acústico das paredes de vedação interna com desempenho abaixo do mínimo

A Figura 8 e a Figura 9 apresentam a caracterização de sistemas de pisos e verificação do desempenho quanto ao ruído de impacto. Esse tipo de avaliação é dividido em duas partes: excitação por impacto e aérea.

Na primeira parte, destaca-se a determinação do Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado $L'_{nT,w}$, que é definido com o emprego da máquina de impacto, o qual está exemplificado na Figura 8 e que é decorrente de uma análise diferenciada dos resultados. Na análise desse parâmetro os valores mais adequados, que geram o atendimento à norma, são os menores na escala, ao contrário das performances estudadas anteriormente, para as paredes de vedação externa e interna.

| Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos | | | |
|---|-----|--|------------------|
| | Cod | Descrição | $L'_{nT,w}$ (dB) |
| Material 1 | 26 | Laje concreto 12 cm + polietileno 5 mm + tacos madeira | 62 |
| Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado - $L'_{nT,w}$ (dB) | | | 62 |
| Atendimento à norma | | | ATENDE |
| Nível de desempenho | | | INTERMEDIÁRIO |

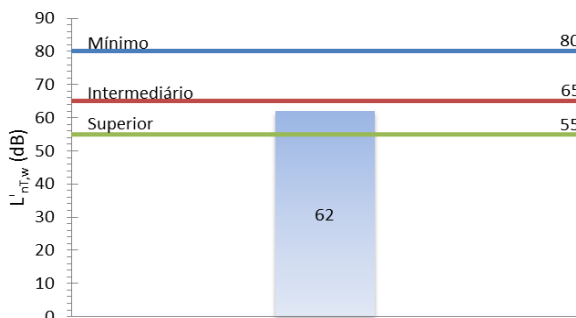


Figura 8: Planilha A – Desempenho do sistema de pisos ao nível de pressão sonora de impacto - $L'_{nT,w}$

A Figura 9 apresenta a caracterização de sistemas de pisos e verificação do desempenho quanto ao ruído aéreo. Os elementos do sistema de pisos, que são analisados quanto ao ruído aéreo por meio da Diferença padronizada de nível ponderada $D_{nT,w}$, seguem o mesmo modo de operação e análise dos elementos anteriores, onde o maior índice ponderado indica melhor nível de desempenho.

| Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas em que um dos recintos seja dormitório | | | |
|--|-----|---|-----------------|
| | Cod | Descrição | $D_{nT,w}$ (dB) |
| Material 1 | 2 | Laje Nervurada - preenchimento tijolos 8 furos - espessura 16 cm - contrapiso 4 cm - porc | 38,9 |
| Diferença padronizada de nível ponderada - $D_{nT,w}$ (dB) | | | 39 |
| Atendimento à norma | | | NÃO ATENDE |
| Nível de desempenho | | | - |

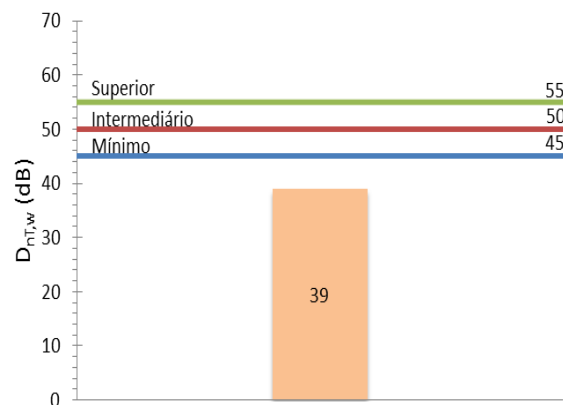


Figura 9: Planilha A – Desempenho acústico sistema de pisos quanto ao ruído aéreo

Da mesma forma que no caso do sistema de pisos, o sistema de coberturas é verificado quanto ao ruído aéreo e ao ruído de impacto.

A principal diferença em relação ao tipo de análise dos pisos é que, no caso das coberturas, o ruído aéreo é avaliado pela Diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros de distância $D_{2m,nT,w}$ e o cálculo do desempenho considera a localização do empreendimento quanto à classe de ruído, conforme Figura 10.

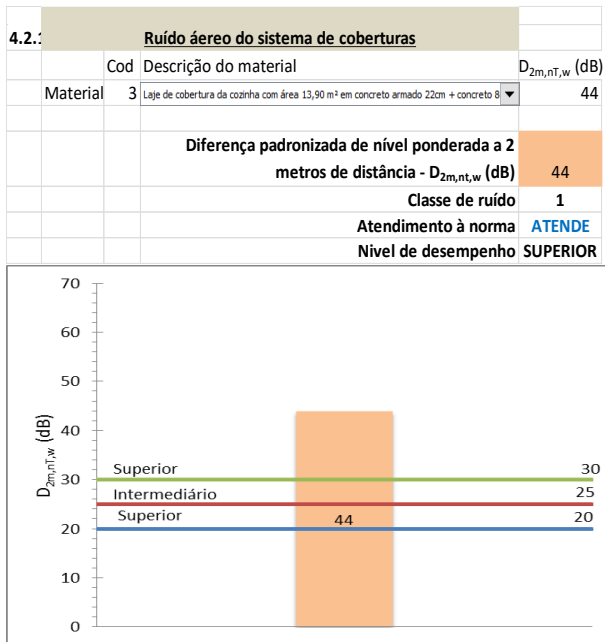


Figura 10: Planilha A – Exemplo de desempenho acústico ao ruído aéreo do sistema de coberturas

A Figura 11 ilustra a avaliação do sistema de cobertura acessível ao uso coletivo, para o ruído de impacto.

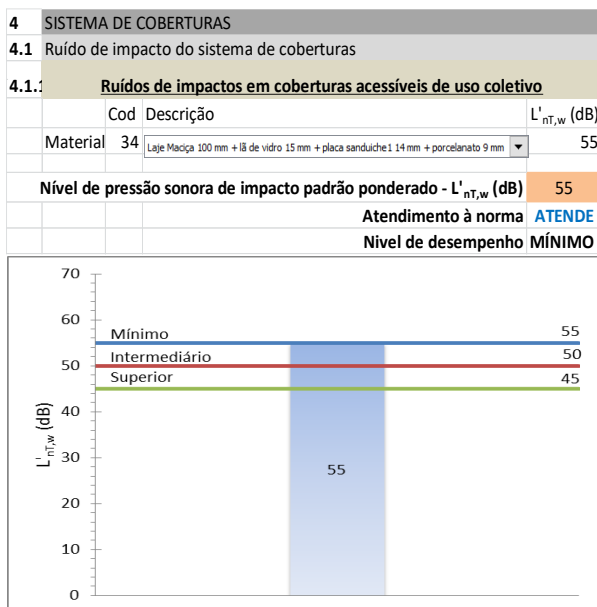


Figura 11: Planilha A – Ruído de impacto em coberturas acessíveis de uso coletivo

Como resultado da caracterização de todos os elementos construtivos da edificação, é apresentado, na guia Resumo da Planilha A, constituído de um quadro resumido para cada elemento e sua condição de atendimento aos

requisitos da norma e respectivo nível de desempenho alcançado. A Figura 12 ilustra o caso de paredes de vedação (parte 01), enquanto a Figura 13 mostra o caso dos pisos (parte 02).

| Ítem | Elemento construtivo | Atendimento à norma | Nível de desempenho |
|------|---|---------------------|---------------------|
| 1 | FACHADA | | |
| 1.1 | Parede de vedação externa - Fachada | ATENDE | SUPERIOR |
| 2 | PAREDES DE VEDAÇÃO INTERNA | | |
| 2.1 | Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de gemação), nas situações onde não haja ambiente dormitório | ATENDE | MÍNIMO |
| 2.2 | Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de gemação), no caso de pelo menos um dos ambientes ser dormitório | ATENDE | MÍNIMO |
| 2.3 | Parede cega de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, tais como corredores e escadaria nos pavimentos | NÃO ATENDE | - |
| 2.4 | Parede cega de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, tais como corredores e escadaria dos pavimentos | ATENDE | SUPERIOR |
| 2.5 | Parede cega entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, tais como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas | ATENDE | MÍNIMO |
| 2.6 | Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo hall | ATENDE | INTERMEDIÁRIO |

Figura 12: Planilha A – Exemplo de quadro resumo do desempenho acústico – parte 01

| 3 SISTEMA DE PISOS | | | |
|--|--|---------------------|---------------------|
| 3.1 Ruído de impacto em sistema de pisos | | | |
| Ítem | Elemento construtivo | Atendimento à norma | Nível de desempenho |
| 3.1.1 | Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos | ATENDE | SUPERIOR |
| 3.1.2 | Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, tais como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas | ATENDE | SUPERIOR |
| 3.2 | Ruído aéreo dos sistemas de pisos entre unidades habitacionais | | |
| 3.2.1 | Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas em que um dos recintos seja dormitório | NÃO ATENDE | - |
| 3.2.2 | Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos, bem como em pavimentos distintos | NÃO ATENDE | - |
| 3.2.3 | Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de uso coletivo, para atividades de lazer e esportivas, tais como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos, bem como em pavimentos distintos | NÃO ATENDE | - |
| 4 | SISTEMA DE COBERTURAS | | |
| 4.1 | Ruído de impacto do sistema de coberturas | | |
| 4.1.1 | Ruídos de impactos em coberturas acessíveis de uso col | ATENDE | MÍNIMO |
| 4.2 | Ruído aéreo do sistema de coberturas | | |
| 4.2.1 | Ruído aéreo do sistema de coberturas | ATENDE | SUPERIOR |

Figura 13: Planilha A – Exemplo de quadro resumo do desempenho acústico – parte 02

A partir do quadro resumo, é apresentado, conforme Figura 14, um gráfico de barras com o percentual de atendimento aos requisitos da norma para cada um dos sistemas construtivos do empreendimento.

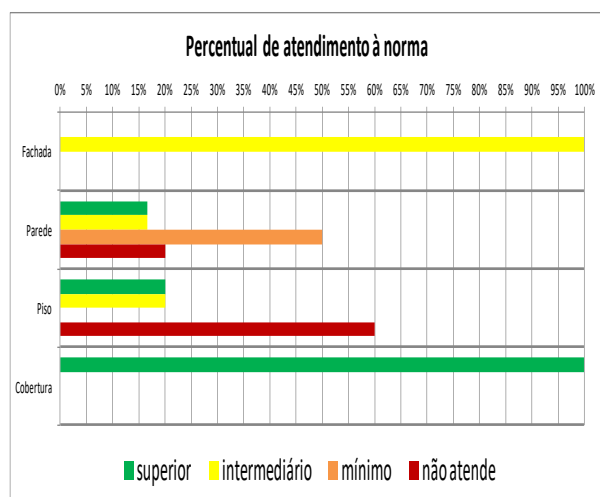


Figura 14: Planilha A– Percentual de atendimento à norma por sistema construtivo

4.2. Planilha de verificação de desempenho acústico - B

A operação da Planilha “B” segue o mesmo procedimento da Planilha A. Na Planilha B, no entanto, são utilizados somente dados de medições realizadas em campo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da ferramenta eletrônica, cujo desenvolvimento foi apresentado no texto, a qual busca viabilizar a verificação da qualificação dos empreendimentos quanto aos parâmetros de conforto acústico, constitui-se num importante instrumento para assegurar o retorno dos investimentos tecnológicos nas edificações e a satisfação dos consumidores.

As planilhas eletrônicas que compõem a ferramenta possibilitam subsídios nas análises técnicas do crédito imobiliário pelas instituições financiadoras. Com ela, os empreendimentos residenciais que apresentam melhor desempenho acústico podem ser

privilegiados, valorizando quem investe nessa melhoria da edificação.

Buscou-se implementar uma operação fácil, ágil e eficiente para os usuários, a fim de que as instituições financiadoras sejam incentivadas a ampliarem as exigências de desempenho acústico nas edificações financiadas.

As planilhas eletrônicas desenvolvidas nesse trabalho podem ter outras aplicações comerciais, servindo de base para uma análise de projetos e/ou edificações já construídas. Executando as medições acústicas e personalizando o banco de dados, é possível verificar a classificação do desempenho acústico de qualquer edificação de acordo com a NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho.

Cumprе ressaltar, em relação ao nível de desempenho acústico, que a execução da edificação, principalmente dos acabamentos e detalhes, pode influenciar substancialmente nos resultados obtidos, prejudicando o isolamento dos compartimentos. Assim, o atendimento dos parâmetros individualmente não garante que o conjunto da edificação será um ambiente plenamente livre de ruídos intrusos ou indesejáveis. O desempenho acústico depende de uma série de fatores, não sendo possível afirmar que não haverá incômodos aos usuários apenas pela análise prévia do ambiente projetado.

O sucesso da aplicação da ferramenta de verificação do desempenho acústico depende da existência de dados confiáveis e da permanente atualização deles. Foi realizada uma detalhada busca de informações e de trabalhos referentes a materiais e componentes de sistemas construtivos utilizados no Brasil. Verificou-se a necessidade da existência de um número maior de pesquisas científicas, para que se obtenham dados específicos para diferentes situações.

O estudo que originou o presente artigo, ao final, sugeriu a criação de um anexo ao Laudo

de Análise de Engenharia da Caixa Econômica Federal, de forma a contemplar o desempenho acústico das habitações e verificar o atendimento à norma brasileira de desempenho em edificações.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- BARRY, Peter J. **Desempenho acústico em edifícios habitacionais**. Seminário Habitação: Desempenho e inovação tecnológica. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT. São Paulo, 26-27 de outubro. 2005. pg 76-83.
- BRASIL. Lei nº 8.078, de 11 de setembro de 1990, **Código de defesa do consumidor**. Dispõe sobre a proteção do consumidor. Disponível em: <[HTTP://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/L8078.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/L8078.htm)>. Acessado em 25 de Julho de 2011.
- BRASIL. Lei 6.938/1981. Dispõe sobre a **Política Nacional do Meio Ambiente**, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <[HTTP://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/L6938.htm)> Acessado em 25 de Julho de 2011.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL - **SELO CASA AZUL - GUIA CAIXA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL: Boas práticas para habitação mais sustentável**- coordenadores JOHN, V. M.; PRADO, R. T. A. São Paulo: Páginas & Letras, 2010.
- DONDÉ, A. C. P. **Análise da isolamento acústica de diferentes tipos de paredes e divisórias comercialmente utilizadas na construção civil**. 2008. 115p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.
- FERRAZ, R. **Atenuação de ruído de impacto em pisos de edificações de pavimentos múltiplos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- FERREIRA NETO, M. de F. **Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais**. 2009. 257 f. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2009.
- FRIEDRICH, A. F. **Avaliação da contribuição do revestimento na isolamento sonora de paredes de alvenaria**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- LOSSO, M.; VIVEIROS, E. **Gesso Acartonado e Isolamento Acústico: Teoria versus prática no Brasil**. In: I CLACS - Conferência Latino Americana de Construção Sustentável, ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, 2004.
- MARTINS, B. F. M. **Avaliação de incomodidade provocada por ruído e vibração de baixa frequência em edifícios de habitação**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 2009.
- MATEUS, D. **Acústica de Edifícios e Controle de Ruído**. Textos de apoio à disciplina “Acústica Aplicada”, DEC-FCTUC, Coimbra, 2008 - disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~pgrpe/conteudos/ARE/Apontamentosdadisciplina.pdf>>. Acessado em 11 de jan. de 2013.
- MITIDIERI FILHO, Claudio Vicente. **Avaliação de desempenho de componentes construtivos inovadores destinados a habitações: proposições à avaliação do desempenho estrutural**. 1998. 256 f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 1998.
- NEUBAUER, P. M. **Estudo Comparativo entre diversos Sistemas de Pisos de Madeira quanto ao Isolamento do ruído de Impacto**. XXII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Belo Horizonte, 2008.
- OLIVEIRA, M. A. **Estudo da Eficiência da duplicação de janelas na melhoria do isolamento acústico destes componentes**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- PINTO, R.B. **Determinação experimental e numérica da Redução sonora aérea em paredes de Alvenaria utilizadas em habitações**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- WHO. World Health Organization. <http://www.euro.who.int/en/what-we-publish/information-for-the-media/sections/latest-press-releases/new-evidence-from-who-on-health-effects-of-traffic-related-noise-in-europe> . Acessado em 29 de ago 2011.

XXVIII SOBAC

3, 4 e 5 de outubro de 2018



XXVIII ENCONTRO DA **SOBRAC**

Sociedade Brasileira de Acústica

Porto Alegre - 2018

COMISSÃO ORGANIZADORA



COORDENAÇÃO GERAL:

PROF.ª DR.ª MARIA FERNANDA DE OLIVEIRA
(UNISINOS)



COORDENAÇÃO CIENTÍFICA:

PROF. DR. WILL D'ANDREA
(UFSM)



COORDENAÇÃO DO

CONCURSO ESTUDANTIL CONRADO SILVA:
PROF. DR. MÁRCIO AVELAR
(UTFPR)

REALIZAÇÃO/ORGANIZAÇÃO

APOIO



XXVIII SOBRAC

O **XXVIII Encontro Nacional da SOBRAC** ocorrerá nos dias **3, 4 e 5 de outubro de 2018** em **Porto Alegre, no Campus da Unisinos**, com uma programação de atividades que incluem palestras, minicursos, sessões técnicas e evento sociais.

Os artigos aprovados serão publicados nos anais do evento e terão um *Digital Object Identifier* (DOI), o que garante maior confiabilidade à informação cadastrada e acesso integral ao artigo publicado por outros pesquisadores.

Participe com o envio de resumos. As submissões de resumos serão aceitas até 05 de março.

Acesse: <http://bit.ly/ArtigosSobrac2018>

A programação do evento e status de avaliação dos trabalhos poderão ser acompanhados por um *mobile app* a ser disponibilizado em breve.

Acompanhe as informações atualizadas pela página do Facebook: <https://www.facebook.com/SOBRAC2018/>

DATAS E PROGRAMAÇÃO

| Quarta-feira - 03/10/2018 | | Quinta-feira - 04/10/2018 | | Sexta-feira - 05/10/2018 | |
|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|--|
| Início | Atividade | Início | Atividade | Início | Atividade |
| 08:30 | Minicursos | 08:30 | Minicursos | 08:30 | Minicursos |
| 10:30 | Coffee Break | 10:30 | Coffee Break | 10:30 | Coffee Break |
| 11:00 | PALESTRA 1 | 11:00 | PALESTRA 3 | 11:00 | PALESTRA 5 |
| 12:00 | Almoço | 12:00 | Almoço | 12:00 | Almoço |
| 14:00 | Sessões Técnicas | 14:00 | Sessões Técnicas | 14:00 | Sessões Técnicas |
| 17:00 | Coffee Break | 17:00 | Coffee Break | 17:00 | Coffee Break |
| 17:30 | PALESTRA 2 | 17:30 | PALESTRA 4 | 17:30 | PALESTRA 6 |
| 18:30 | Fim das atividades | 18:30 | Fim das atividades | 18:30 | Encerramento do XXVIII Encontro SOBRAC |
| 20:00 | Coquetel | 20:00 | Jantar | | |

PALESTRANTES CONFIRMADOS



Jorge Patrício
EAA / LNEC



Michael Vorlander
Aachen University



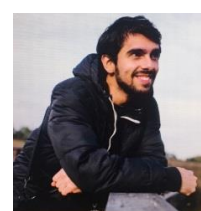
Nara Schmidt
SMAM Porto Alegre



Alicia Giménez
UPV



Helena Cortez
Unisinos



Paulo Marezze
UFSM

I CONCURSO ESTUDANTIL DE ACÚSTICA CONRADO SILVA

No Brasil, a história da acústica conta com alguns pioneiros que se dedicaram ao avanço da ciência e a sua divulgação em diversos níveis. Um destes pioneiros transitou de forma distinta tanto entre músicos, quanto entre os "acústicos": Conrado Silva de Marco. Nascido no Uruguai, exerceu a maior parte de sua vida profissional no Brasil, onde foi professor de acústica e música em várias instituições, entre as quais a Universidade de Brasília, Faculdade Santa Marcelina, Escola de Belas Artes de São Paulo e Universidade do Estado de São Paulo. Seu trabalho é tão importante para arquitetos e engenheiros, quanto para compositores ligados à música eletroacústica.

Apesar de constatar, no Brasil, um significativo avanço em relação ao projeto acústico de edificações nos últimos anos, nos encontramos ainda aquém da consolidação desse aspecto como um tema importante na formação dos arquitetos e engenheiros.

Leo Beranek, um dos cientistas e engenheiros mais importantes da área de acústica dos últimos cem anos, relata em seu livro "Riding with the waves" a tensão, expectativa e o resultado, julgado desastroso, da estreia do Avery Fisher Hall em 1962, sala que abrigaria a Orquestra Filarmônica de Nova Iorque. Tratava-se de uma parcela da comunidade capaz de apreciar música e diferenciar aspectos únicos de um concerto, dentre eles, de forma tão importante quanto a interpretação musical ou a experiência da visão, a Acústica.

INSPIRADOS PELO LEGADO DE CONRADO SILVA, ELEGEMOS COMO TEMA A ELABORAÇÃO DE UM PROJETO PARA UMA SALA DE MÚLTIPLOS PROPÓSITOS.

O concurso é aberto para estudantes de graduação de todo o Brasil, matriculados nos cursos de arquitetura e urbanismo, engenharia acústica, engenharia civil, engenharia elétrica, engenharia mecânica, design, física e demais cursos que tenha a acústica de salas como uma área de conhecimento profissional.

As equipes serão formadas por, no máximo, seis (6) integrantes, sendo até quatro (4) alunos e até dois (2) professores orientadores. Será permitida a participação de equipes com postas por estudantes de diferentes cursos e de no máximo duas universidades/instituições distintas.

A equipe deverá apresentar o ambiente de intervenção, podendo este ser pré-existente ou totalmente novo. O ambiente é de livre escolha da equipe participante, assim como a seleção da área para o projeto, o estilo musical a ser atendido e demais atividades a serem propostas.

No âmbito deste edital, a proposta deverá considerar o volume interno da sala entre 500 m^3 e 1.000 m^3 .

Inscrições até 15 de ABRIL de 2018

Envio do projeto até 15 de AGOSTO de 2018

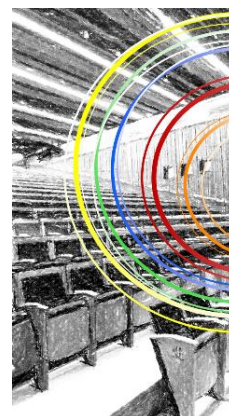
Resultados até 05 de OUTUBRO de 2018

XXVIII ENCONTRO DA
SOBRAC

Sociedade Brasileira de Acústica

3, 4 e 5 de outubro de 2018 | Porto Alegre

I CONCURSO ESTUDANTIL DE ACÚSTICA CONRADO SILVA



XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica | SOBRAC 2018

REGULAMENTO

1. CONTEXTO DO CONCURSO

Apesar de constatar, no Brasil, um significativo avanço em relação ao projeto acústico de edificações nos últimos anos, nos encontramos ainda aquém da consolidação deste aspecto como um tema importante na formação dos arquitetos e engenheiros.

Leo Beranek, um dos cientistas e engenheiros mais importantes da área de acústica dos últimos cem anos, relata em seu livro “Riding with the waves” a tensão, expectativa e o resultado, julgado desastroso, da estreia do Avery Fisher Hall em 1962, sala que abrigaria a Orquestra Filarmônica de Nova Iorque. Tratava-se de uma parcela da comunidade capaz de apreciar música e diferenciar aspectos únicos de um concerto, dentre eles, de forma tão importante quanto a interpretação musical ou a experiência da visão, a Acústica.

Este episódio ilustra a importância do profissional da área para o resultado final. E não devemos nos enganar: situações cotidianas podem ficar comprometidas se a acústica não for adequada à finalidade do uso do espaço, mesmo que de forma não consciente.

No Brasil, a história da acústica conta com alguns pioneiros que se dedicaram ao avanço da ciência e a sua divulgação em diversos níveis. Um destes pioneiros transitou de forma distinta tanto entre músicos, quanto entre os “acústicos”: Conrado Silva de Marco. Nascido no Uruguai, exerceu a maior parte de sua vida profissional no Brasil, onde foi professor de acústica e música em várias instituições, entre as quais a Universidade de Brasília, Faculdades Santa Marcelina, Escola de Belas Artes de São Paulo e Universidade do Estado de São Paulo. Seu trabalho é tão importante para arquitetos e engenheiros, quanto para compositores ligados à música eletroacústica.

Em homenagem a essa importante figura histórica, lançamos aqui o **I Concurso Estudantil de Acústica de Salas Conrado Silva** organizado pela **comissão organizadora** do **XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica**, que ocorre nos dias 03, 04 e 05 de outubro de 2018, no Campus de Porto Alegre da Unisinos.

Inspirados pelo legado de Conrado Silva, elegemos como tema a elaboração de um projeto para uma **sala de múltiplos propósitos**. Acreditamos que assim contribuiremos para consolidar a importância da acústica na comunidade acadêmica, bem como despertar a curiosidade e incentivar a criatividade de estudantes de arquitetura e engenharia na busca por soluções para o problema proposto.

2. PARTICIPANTES

O concurso é aberto para estudantes de graduação de todo o Brasil, matriculados nos cursos de arquitetura e urbanismo, engenharia civil, engenharia acústica, engenharia mecânica e outros que tenham a disciplina de acústica em sua grade curricular.

As equipes deverão ser formadas por alunos e professor(es) tendo, no máximo, seis (6) integrantes, sendo até quatro (4) alunos e até dois (2) professores orientadores. Será permitida a participação de equipes compostas por estudantes de diferentes cursos e de no máximo duas universidades/instituições distintas. Um estudante não pode fazer parte de duas diferentes equipes e apenas uma proposta por equipe poderá ser submetida.

A equipe poderá ter até 2 professores orientadores, que devem obrigatoriamente ser docentes da universidade/instituição dos alunos participantes e deverão se responsabilizar pela equipe, supervisionando e assegurando a conformidade da proposta de acordo com as regras estabelecidas no presente Regulamento e nas normas técnicas aplicáveis. Fica vetada a participação do orientador em mais de uma equipe.

Estarão impedidos de participar deste concurso os membros do Comitê Organizador e da equipe da Comissão Julgadora do concurso.

3. TEMA

O tema do I Concurso Estudantil de Acústica de Salas Conrado Silva De Marco é “Sala para múltiplas funções: música, teatro e palestras”.

O objeto do concurso é uma sala capaz de abrigar várias formas de expressão: apresentações musicais, teatro e palestras.

A proposta para o I Concurso Estudantil de Acústica de Salas Conrado Silva De Marco tem a intenção de promover e difundir a elaboração de soluções para a qualidade acústica de espaços internos, através de projetos que evidenciem soluções na forma, nos materiais e dispositivos para a qualificação acústica de salas.

A equipe deverá apresentar o ambiente de intervenção, podendo este ser pré-existente ou totalmente novo. O ambiente é de livre escolha da equipe participante, assim como a seleção da área para o projeto, o estilo musical a ser atendido e demais atividades a serem propostas. No âmbito deste edital, a proposta deverá considerar o volume interno da sala entre 500 e 1000 m³.

Ressalta-se que o foco deste Concurso é somente a sala para a realização das múltiplas atividades, sem a necessidade de especificação dos ambientes de apoio como, por exemplo, sanitários, circulações, espaços de transição etc.

4. CATEGORIAS

Tendo em vista novas tecnologias disponíveis e, ao mesmo tempo, a consciência de que nem sempre elas são disponíveis a todos, haverá duas categorias:

- “Analógico”;
- “Digital”.

Para se inscrever na categoria “Digital”, a equipe deverá assumir a responsabilidade de produzir amostras sonoras do ambiente projetado, bem como a sua reprodução.

5. NORMAS PARA A APRESENTAÇÃO

FORMATO DE APRESENTAÇÃO (comum às duas categorias)

Os projetos devem conter no máximo 10 pranchas A3 da ABNT (297x420 mm), no sentido paisagem. O formato de envio deverá ser em cópia física e em meio digital gravado em CD-ROM. Os arquivos digitais deverão ser enviados em uma única pasta compactada, com arquivos em extensão PDF. A pasta deve conter uma ficha de inscrição por Instituição, também em extensão PDF. Recomenda-se ainda que:

- Os arquivos não devem incluir qualquer referência que permita identificar a autoria ou a instituição dos participantes da equipe;
- As pranchas devem ser consideradas independentes para fins de apresentação e leitura, ou seja, não deve ser utilizado o recurso de continuidade do desenho de uma prancha para outra para fins de visualização completa do objeto;
- Sugere-se utilizar no mínimo 70% de cada prancha para ilustrar o trabalho produzido (desenhos, imagens etc.).

As equipes deverão atentar para a legibilidade dos textos e desenhos, de modo que a sua perfeita compreensão e avaliação seja possível, além da qualidade de definição do trabalho para eventual impressão futura, a ser realizada à critério da organização.

O trabalho pode incluir fotos desde que essas apresentem a obtenção de direitos para a reprodução.

Cada equipe poderá apresentar somente uma proposta. Trabalhos que utilizam o mesmo objeto de estudo serão desclassificados.

As equipes deverão apresentar:

- as características gerais da sala;
- o Tempo de Reverberação por banda de oitavas, podendo ser obtido por método de ensaio (ISO 3382-2), método de simulação computacional, ou por método de estimativa teórica. Sendo que para a utilização dos métodos de simulação e estimativa, deverão ser apresentados os coeficientes de absorção acústica (e os coeficientes de espalhamento sonoro, quando pertinente) dos materiais de revestimento e acabamento, bem como a área superficial total computada para o cálculo;
- o Tempo de Reverberação ideal para a edificação, utilizando por base referências bibliográficas nacionais e/ou internacionais;
- as normas utilizadas e/ou outras fontes para os parâmetros adotados;
- outros parâmetros relevantes para cada finalidade (relacionados à inteligibilidade da fala ou clareza de frases musicais, por exemplo).

No caso de propostas que contemplem ambientes existentes, também devem ser apresentados comparativos da situação atual e após a correção acústica proposta.

CONTEÚDO GERAL DE ENTREGA (comuns às duas categorias)

Os itens que deverão ter sua entrega física são definidos a seguir (válido para ambas as categorias):

- Caracterização da sala;
- Desenhos técnicos (planta baixa, cortes etc.);
- Memorial descritivo;
- Fotos (para salas pré-existentes);
- Diagramas, esquemas explicativos e/ou gráficos, contendo as relações entre: (a) síntese dos conceitos da proposta, (b) atividades previstas na sala; (c) público alvo e (d) características do ambiente;
- Equipamentos e *softwares* utilizados (se for o caso);
- Método adotado no trabalho;
- Considerações finais; e
- Bibliografia utilizada

Obs: Incluir escalas gráficas e demais elementos descritivos em todos os desenhos, para facilitar a leitura da proposta. As pranchas não deverão ser identificadas com selos.

As propostas devem ser apresentadas em 10 (dez) painéis rígidos (pranchas), numerados, no formato A3 (297x420 mm), sentido paisagem, com espessura máxima de 5 mm e sem qualquer informação que permita identificar a autoria. O envio de quantidade superior ou inferior a 10 painéis e as propostas em desacordo com prazos e formatações indicados neste edital, serão motivo de desclassificação sumária da equipe.

As imagens e as versões das pranchas poderão ser utilizadas posteriormente ao Concurso pela Coordenação do evento para a divulgação e outros fins de edições, desde que preservados seu conteúdo e autoria das propostas.

ITENS DE ENTREGA ADICIONAIS (exclusivos à categoria “Digital”)

A Categoria “Digital” pressupõe a utilização de recursos computacionais, que podem produzir resultados fora do padrão gráfico tradicional. Desta forma, os itens para entrega de trabalhos da Categoria “Digital” também devem contemplar:

- CD-ROM contendo arquivos de áudio e/ou vídeo que representem as diferentes condições acústicas em diferentes localizações na sala virtual.

A qualidade de reprodução dos arquivos de áudio é de responsabilidade da equipe participante.

6. CRONOGRAMA

O cronograma do concurso será conforme segue:

| ETAPAS | RESPONSÁVEL | DATA |
|---|-----------------------|---------------|
| Lançamento do concurso | Comissão organizadora | 31/05/2017 |
| Publicação do edital do concurso | Comissão organizadora | 01/08/2017 |
| Cadastramento das equipes participantes | Equipes participantes | 15/07/2018 |
| Envio das propostas | Equipes participantes | 15/08/2018 |
| Julgamento | Comissão julgadora | 3 a 5/10/2018 |
| Divulgação dos resultados | Comissão organizadora | 05/10/2018 |

7. CADASTRAMENTO E ENVIO DAS PROPOSTAS

As inscrições ocorrerão em duas etapas: cadastramento das equipes e envio das propostas.

Cadastramento

O cadastramento das equipes para a participação no I Concurso Estudantil de Acústica de Salas Conrado Silva De Marco estará disponível até 15 de julho de 2018, mediante declaração simples do interesse da Instituição em participar do presente concurso. A declaração poderá ser feita por um dos orientadores, deverá conter um breve texto referindo o interesse e a quantidade de equipes que participarão do Concurso e enviada para o e-mail sobrac2018@gmail.com.

Envio das propostas

As propostas devem ser enviadas até a data do item 6 em envelope contendo:

- Dez painéis rígidos (para as duas Categorias)
- Ficha de Inscrição por Equipe (para as duas Categorias)
- Comprovante de matrícula dos alunos da equipe no período letivo do segundo semestre de 2018
- CD-ROM com os arquivos dos painéis em PDF (para as duas Categorias)
- CD-ROM com os arquivos de áudio e/ou vídeo (somente para a Categoria “Digital”).

Nota: O não envio do arquivo digital dos painéis constituirá motivo de desclassificação do trabalho.

Os participantes serão responsáveis pelo envio do material de maneira a garantir sua integridade física até a entrega ao destinatário. O comitê organizador do Concurso compromete-se a encaminhar uma notificação quando do recebimento.

Endereço para envio do envelope:

- ★ Unisinos
Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil - itt Performance
A/C Eng. Rafael Heissler
Av. Unisinos, 950
93022-750 – São Leopoldo/RS

8. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

A Comissão Julgadora seguirá os critérios de avaliação estabelecidos neste edital, incluindo:

- Qualidade técnica do projeto e criatividade nas soluções;
- Qualidade e legibilidade da apresentação;
- Coerência na viabilidade técnica da proposta com o conceito adotado;
- Consistência e originalidade da abordagem da proposta.

9. COMISSÃO JULGADORA

A comissão julgadora será formada por três membros, designados quando da realização do evento, sob a supervisão da Coordenação do Concurso. Os membros da Comissão organizadora do I Concurso Estudantil da Acústica de Salas Conrado Silva De Marco e os integrantes das equipes participantes não poderão compor a Comissão Julgadora.

10. PREMIAÇÃO

Todos os participantes das equipes que tiverem suas propostas em conformidade com este edital receberão certificado de participação no I Concurso Estudantil de Acústica de Salas Conrado Silva De Marco.

Os projetos premiados serão os três primeiros colocados em cada categoria e a definição dos prêmios será feita posteriormente, junto aos patrocinadores. Também receberão Menção Honrosa as propostas consideradas de destaque pela Comissão Julgadora.

11. DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das propostas premiadas e demais trabalhos selecionados como Menção Honrosa serão divulgadas na sessão de encerramento do XXVII Encontro da SOBRAC.

12. DISPOSIÇÕES FINAIS

A participação no **I Concurso Estudantil de Acústica de Salas Conrado Silva** implica, por parte dos inscritos, em estrita e integral anuência e aceitação plena deste Edital, das bases do Concurso, em todos os termos e condições, com a expressa renúncia a quaisquer outros direitos eventualmente arguidos, ressalvados aqueles que a Lei lhes confere.

Para que a proposta seja considerada pela Comissão Julgadora, pelo menos um dos integrantes da equipe deve estar inscrito no **XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica**.

Os concorrentes autorizam tacitamente a Comissão Organizadora o direito de exposição, publicação (em meio eletrônico e/ou impresso) e divulgação dos projetos apresentados, assim como dos nomes dos professores responsáveis e/ou equipe do concurso, a qualquer tempo, sem que tal feito implique qualquer forma de remuneração a seus autores.

Os casos omissos no presente Edital serão resolvidos pela coordenação do concurso.

Versão online desse regulamento em http://bit.ly/Concurso_Sobrac2018.

COMISSÃO ORGANIZADORA DO I CONCURSO ESTUDANTIL DE ACÚSTICA DE SALAS CONRADO SILVA DE MARCO

- **Coordenação:**

- Márcio Henrique de Avelar Gomes (UTFPR)

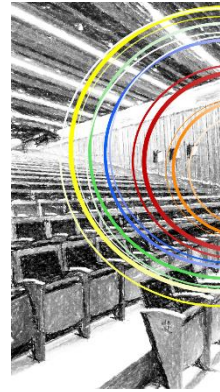
- **Comissão Organizadora:**

- Maria Fernanda de Oliveira (Unisinos)
- William D'Andrea Fonseca (UFSM)
- Dinara Xavier da Paixão (UFSM)
- Rafael Ferreira Heissler (Unisinos)
- Josiane Reschke Pires (Unisinos)
- Bernardo Fonseca Tutikian (Unisinos)
- Fernanda Pacheco (Unisinos)

Links

- Site do evento: <http://bit.ly/Sobrac2018>.
- Submissões de resumos e artigos para o Encontro SOBRAC 2018.
Acesse: <http://bit.ly/ArtigosSobrac2018>.

I CONCURSO ESTUDANTIL DE ACÚSTICA DE SALAS CONRADO SILVA



XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica | SOBRAC 2018

FICHA DE INSCRIÇÃO PARA O I CONCURSO ESTUDANTIL DE ACÚSTICA DE SALAS CONRADO SILVA

Esta ficha de inscrição deve acompanhar o envelope que contém as pranchas do projeto e o CD-ROM.

Campo para uso exclusivo da organização do concurso:

FORMULÁRIO N°: _____ Data de recebimento: _____

Instituição (nome por extenso e sigla):

Curso:

Endereço completo:

Título da proposta:

Categoria:

Analógico Digital

Componentes da Equipe:

Alunos:

Orientador(es):

Declaro que todos os alunos e os professores possuem vínculo regular no Curso.

Responsável pelo Curso:

Cargo:

Data e Assinatura: _____

(Esta página foi deixada intencionalmente em branco.)

Editorial in English

The Editorial Committee of the **Acoustics and Vibration Journal** (*Acústica e Vibrações*) presents Issue No. 49. This edition features seven articles that cover topics related to signal processing applied to system identification techniques and seismic trace deconvolution; numerical and experimental analysis of acoustic impedance and sound absorption measurements; determination of mechanical properties for noise control; acoustic virtual reality; and building acoustics.

The edition starts with a study that addresses aspects such as signal post-processing, filters, active control, and instrumentation. All of these elements are geared towards the implementation of system identification techniques on relatively low-cost AD/DA-DSP platforms such as Arduino. The study employs mathematical optimization tools in conjunction with filtering techniques. The approach is both theoretical and practical, with hardware implementation tested under conditions both with and without headphones. The discussion is insightful and delves into the challenges and limitations of the chosen platforms.

The second article investigates the topic of seismic imaging through post-processing methods, utilizing and discussing aspects of deconvolution between the seismic trace and the pulse emitted by the source. Additionally, a least-squares algorithm is employed alongside an adaptive filter to recover the original signal. The theory is presented in advance, with relevant discussions involving simulated and real data, showcasing the effectiveness of the techniques.

The following article is a study that combines experimental and numerical aspects. The subject is the *in-situ* measurement of acoustic impedance and sound absorption using the two-microphone technique (or P-P probe). Furthermore, a modeling approach is presented for comparative purposes, utilizing the Finite Element Method (FEM). The approaches are put into practice for specific samples/cases, elucidating details and inherent limitations of the methodologies.

The subsequent article proposes a constructive alteration to hermetic compressors (used in refrigeration) capable of significantly contributing to noise reduction in an environment. This is an excellent example of engineering practice, intertwining knowledge from solid mechanics, vibrations, acoustics, and numerical methods applied to noise control at the sound source. The readers will appreciate the use of a Timoshenko beam model applied to experimental parameter extraction, which is subsequently used in the finite-element modeling of the compressor. This modeling aids in assessing the expected reduction in vibrational power of this refrigerator component.

An approach to evaluating the quality of auralization is the focus of the article titled “Validation of acoustic virtual reality via articulation tests in noisy and reverberating rooms”. This work is an evolution of the one presented in our previous edition, now considering situations with both higher reverberation and background noise. The results obtained through tests conducted in two rooms are compared to those derived from computational simulations of these environments.

To conclude the article section, we present two works related to building acoustics. The first presents a characterization of the materials, the main component being PET wool. It evaluates performance in terms of airborne and impact insulation, as well as its coefficient of sound absorption. The long-term maintenance of properties over the years and usage is also evaluated following standardized procedures. Beyond the promising results obtained from the reuse of waste, the clear presentation of procedures based on the most current standards is highlighted.

The second of these articles introduces the creation of a database that provides information on airborne and impact sound insulation for various national construction elements. This is an urgent and essential resource to enhance the efficiency of a designer's work. The database is presented in the form of a spreadsheet that users can populate with experimental data obtained in laboratories and field settings. In addition to facilitating data cataloging, models for estimating insulation in specific situations have been programmed, simplifying the tool's use for preliminary assessments, which can be employed by real estate financing agencies.

We conclude this issue with the introduction of a new feature: the I Conrado Silva Student Contest, the regulations of which can be found in this issue. This initiative aims to enhance visibility and encourage the participation of students from diverse fields in the realm of Acoustics. The contest is part of the activities associated with the XXVIII Sobrac Meeting, scheduled for October 2018 in Porto Alegre, RS, Brazil, an event for which we are pleased to extend an invitation!

The editors of the Acoustics and Vibration Journal — Issue No. 49 — express gratitude to the Sobrac Board of Directors for their support, to the authors, and to the reviewers, whose efforts were indispensable in achieving this publication.

Sincerely,

Prof. Dr. Dinara Xavier da Paixão

Prof. Dr. William D'Andrea Fonseca

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

(AeV Editors)

December 2017.



ISSN 2764-3611, 1983-442X