

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FONO-ABSORVENTES DE
MATERIAIS PARA PAINÉIS DE REVESTIMENTO**

Karina Morato Campos Moreira

Belo Horizonte

2009

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FONO-ABSORVENTES DE
MATERIAIS PARA PAINÉIS DE REVESTIMENTO**

Karina Morato Campos Moreira

Belo Horizonte

2009

Karina Morato Campos Moreira

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FONO-ABSORVENTES DE MATERIAIS PARA PAINÉIS DE REVESTIMENTO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Construção Civil

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Materiais Cimentícios

ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar

CO-ORIENTADOR: Prof. Marco Antônio de Mendonça Vecci

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009

KARINA MORATO CAMPOS MOREIRA

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FONO-ABSORVENTES DE MATERIAIS PARA PAINÉIS DE REVESTIMENTO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, ___ de _____ de 2009

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

Banca Examinadora

ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar (DEMC/UFMG)

CO-ORIENTADOR: Prof. M.Sc. Marco Antônio de Mendonça Vecci (DEES/UFMG)

Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros (INMETRO/RJ)

Prof. Dr. Paulo Medeiros Massarani (INMETRO/RJ)

| | |
|-------|---|
| M838a | <p>Moreira, Karina Morato Campos Avaliação de propriedades fono-absorventes de materiais para painéis de revestimento [manuscrito] / Karina Morato Campos Moriera. – 2009. 86 f., enc. : il.</p> <p>Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.</p> <p>Co-orientador: Marco Antônio de Mendonça Vecci.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 84-86.</p> <p>1. Construção civil – Teses. 2. Absorção do som - Teses. 3. Materiais acústicos – Teses. I. Aguilár, Maria Teresa Paulino. II. Vecci, Marco Antônio de Mendonça. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p>CDU: 691 (043)</p> |
|-------|---|

Ficha elaborada pelo Processamento Técnico da EEUFMG

“E assim, depois de muito esperar, num dia como outro qualquer, decidi triunfar...
Decidi não esperar as oportunidades e sim, eu mesmo buscá-las.
Decidi ver cada problema como uma oportunidade de encontrar uma solução.
Decidi ver cada deserto como uma possibilidade de encontrar um oásis.
Decidi ver cada noite como um mistério a resolver.
Decidi ver cada dia como uma nova oportunidade de ser feliz.
Naquele dia descobri que meu único rival não era mais que minhas próprias limitações
e que enfrentá-las era a única e melhor forma de as superar.
E assim aprendi que o melhor triunfo é poder chamar alguém de amigo”.

Adaptado de Walt Disney

AGRADECIMENTO

A Deus por sempre me conduzir em todos os momentos de minha vida, dando-me forças para trilhar meu caminho.

A minha mãe pelo amor incondicional, por incentivar meus sonhos e apoiar-me nos momentos mais difíceis e ao meu pai que mesmo não estando presente, foi exemplo de educador, ensinando-me a crer na importância do conhecimento e a lutar pelos meus objetivos.

A minha família, em especial meus irmãos, pelo carinho, paciência, confiança e por sempre desejarem o meu melhor.

Aos meus queridos professores Maria Teresa e Vecci por acreditarem em meu trabalho e tanto me ensinarem; agradeço as orientações, a dedicação, o incentivo e principalmente a amizade.

Aos meus amigos, em especial a Juliana, que sempre estiveram ao meu lado, agradeço a paciência e o apoio incondicional. A Fabiana, amiga de toda hora, agradeço ao apoio fundamental para a realização deste projeto.

Aos meus colegas e amigos do mestrado, pela amizade construída nestes anos de convivência, pelas trocas de idéias e pela ajuda.

A equipe do LAENA que me recebeu com tanto carinho e me auxiliou nos ensaios de acústica.

A todos do EB que me apoiaram nesta última etapa e me incentivaram na finalização dos trabalhos.

Ao Ricardo e Sílvio, responsáveis pelos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aos funcionários, Isa, Admilson, Gilmar e Ivonete, do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

RESUMO

Foi avaliado neste trabalho o uso de novos materiais para a confecção de painéis absorvedores, tomando-se como referência um modelo de painel em madeira MDF e mantas de lã de vidro revestidas. Estes painéis, cuja confecção é cara e complexa, só podem ser utilizados em ambientes internos devido às características do MDF. Inicialmente foram confeccionados corpos-de-prova de granitina e concreto com adição de fibras. Em função dos resultados preliminares optou-se pelo estudo do comportamento acústico de mini painéis perfurados de concretos com fibras poliméricas e metálicas, e de diferentes sistemas obtidos, associando a este concreto, mantas fono absorvedoras disponíveis no mercado e camada de ar. Após a confecção, os corpos-de-prova de concreto e MDF, associados ou não à manta/ar, foram submetidos a ensaios de absorção acústica utilizando o método do tubo de impedância. Também foram realizados ensaios de flexo-tração em corpos-de-prova de ambos os materiais. Os resultados indicam que o painel perfurado de concreto com adição de fibras poliméricas ou metálicas, é menos resistente à flexo-tração que a amostra de MDF disponível no mercado. No entanto, os valores obtidos viabilizam seu uso como painéis que poderiam ser utilizados em qualquer ambiente. Em termos de performance acústica os resultados indicam o sistema constituído pelo concreto com adição de fibras (polimérica ou metálica), manta Isosound Tecido Cinza e camada de ar como sendo o mais eficaz para absorção de sons graves. Com os resultados obtidos nos ensaios é possível considerar novos acabamentos mais flexíveis como opção aos usualmente empregados. Além disso, o painel de concreto pode ser aplicado em túneis como barreiras acústicas, aumentando sua durabilidade uma vez que possui melhor resistência às intempéries.

Palavras chaves: absorção acústica, aplicação em barreiras, resistência a intempéries.

ABSTRACT

Sustainable architecture demands solutions that prioritize the user's comfort inside of the construction. Noise reduction is an important item to be taken into consideration in the obtaining of this comfort, and it involves much the acoustic isolation and the sound absorption. There are ploughs adds products on market, such acoustic blankets and acoustic panels, which ploughs widely used by architects. However, they don't satisfy all the demands of the market, and many teamsters ploughs of high cost or of not fit esthetically you the projected atmosphere. This becomes worse in marries of materials with absorbing characteristics. Panels of MDF perforated associated you glass wool blankets ploughs lives commonly used when it is wanted the sound to be absorbed, mainly in the low frequencies. However, those panels, whose making is expensive and complex, can only be used in atmospheres due the characteristics of MDF. In this work, the uses of new materials was evaluated will be the making of absorbing panels with MDF wood panel and covered glass wool blankets being taken reference. Initially samples made out of terrazzo and concrete with addition of fibers were made. Taking into consideration the preliminary results, we opted will be the study of the acoustic behavior of mini perforated concrete acoustic panels with polymeric and metallic fibers, and different systems obtained with the association of this concrete you sound-absorbing blankets available in the market and layers of to air. After the making, the concrete material which is being tested and MDF, associated or not you blanket/air were submitted for tests of acoustic absorption using the method of the impedance tube. Bending tests were also performed in samples of both materials. The results indicate that the concrete perforated with addition of polymeric or metallic is less resistant bending than the sample of MDF available in the market. However, they obtained values make possible its uses panels that could be used in any spaces. In terms of acoustic performance, the results indicate the system constituted by the concrete with addition of fibers (polymeric or metallic), Isosound blanket with ash woven and to layer of to air is the most effective will be absorption of bass sounds. With the results obtained in the experiment, it is possible you consider new finishing, lives flexible option used usually.

Key Words: concrete with addition of fibers, acoustic isolation, resistance weather

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | XII |
| LISTA DE TABELAS | XVI |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | XVII |
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1. Objetivos | 17 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 17 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 17 |
| 1.2. Justificativa | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1. Conceitos Básicos | 19 |
| 2.2. Propriedades Acústicas | 26 |
| 2.3. Absorção acústica | 29 |
| 2.4. Materiais acústicos | 32 |
| 2.4.1. Cálculo da absorção acústica do material..... | 41 |
| 2.4.2. Coeficiente de absorção médio de salas | 41 |
| 2.5. Medição do coeficiente de absorção acústica | 41 |
| 2.5.1. Tubo de ondas estacionárias..... | 42 |
| 2.5.2. Câmaras reverberantes..... | 44 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 46 |
| 3.1. Materiais | 46 |
| 3.1.1. Granitina..... | 46 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1.2. | Concreto..... | 47 |
| 3.2. | Métodos | 50 |
| 3.2.1. | Confecção dos corpos-de-prova..... | 50 |
| 3.2.2. | Ensaio de absorção acústica..... | 52 |
| 3.2.3. | Ensaio de flexo-tração | 57 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 60 |
| 4.1. | Ensaio de Absorção Acústica..... | 60 |
| 4.1.1. | Medições preliminares | 61 |
| 4.1.2. | Sistema | 62 |
| 4.1.3. | Sistema x material | 73 |
| 4.1.4. | Tubo de impedância x câmara reverberante..... | 74 |
| 4.2. | Ensaio de Flexo-tração..... | 77 |
| 5. | CONCLUSÕES | 81 |
| 6. | PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS | 83 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA..... | 84 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Zonas de compressão e rarefação (adaptado de METHA, 1999) | 19 |
| Figura 2 - Amplitude da onda sonora (adaptado de SOUZA, 2007) | 20 |
| Figura 3 - Frequências e comprimento de onda (SOUZA, 2007)..... | 21 |
| Figura 4 - Relação entre intensidade de distância da fonte (adaptado de EGAN, 1988) | 24 |
| Figura 5 - Curvas Isofônicas (SOUZA, 2007) | 25 |
| Figura 6 - Reflexão do raio sonoro (SOUZA, 2007) | 26 |
| Figura 7 - Sombra acústica (SOUZA, 2007)..... | 27 |
| Figura 8 - Fenômeno das ondas estacionárias (SOUZA, 2007)..... | 29 |
| Figura 9 - Incidência acústica em um material poroso (GERGES, 2000)..... | 30 |
| Figura 10 - Escritório sem tratamento acústico (adaptado de HARRIS, 1993) | 30 |
| Figura 11 - Escritório com tratamento acústico (adaptado de HARRIS, 1993) | 31 |
| Figura 12 - Estrutura de materiais porosos e fibrosos (adaptado de GERGES, 2000)..... | 33 |
| Figura 13 - Relação de frequência e espessura (adaptado de HARRIS, 1994) | 34 |
| Figura 14 - Variação da amplitude de velocidade da partícula e a sobreposição em um material poroso | 35 |
| Figura 15 - Relação da amplitude de velocidade da partícula pela frequência (adaptado de METHA 1999)..... | 35 |
| Figura 16 - Efeito da camada de ar e a relação do coeficiente de absorção com as frequências. Material utilizado: lã de vidro (adaptado de METHA, 1999) | 36 |
| Figura 17 - Volume absorvedor (adaptado de METHA, 1999) | 37 |
| Figura 18 - Painel perfurado (adaptado de METHA, 1999)..... | 38 |
| Figura 19 - Esquema de furos de chapas perfuradas (adaptado de BISTAFA, 2006) | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 - Variações de montagens dos painéis ressonadores (adaptado de METHA, 1999) | 40 |
| Figura 21 - Exemplo de um tubo de impedância (GERGES, 2000) | 42 |
| Figura 22 - Fibras de aço trefilados | 48 |
| Figura 23 - Fibras Poliméricas | 48 |
| Figura 24 - Fôrma de moldagem (planta) | 49 |
| Figura 25 - Fôrma em MDF desmontável | 49 |
| Figura 26 - CONCRETO/FIBRA METÁLICA E CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA, respectivamente | 51 |
| Figura 27 - MADEIRA/MDF | 51 |
| Figura 28 - Tubo de impedância – LAENA | 52 |
| Figura 29 - Fixação dos discos de concreto no porta-amostras do tubo | 52 |
| Figura 30 - Cortes esquemáticos dos conjuntos ensaiados | 53 |
| Figura 31 - Adaptação das mantas absorvedoras | 54 |
| Figura 32 - Mantas Absorvedoras | 54 |
| Figura 33 - Dimensionamento da amostra | 56 |
| Figura 34 - Diagrama de Larris (FONTE: adaptado de BASCHUK) | 57 |
| Figura 35 - Ensaio de flexo-tração realizado em uma barra do CONCRETO/FIBRA METÁLICA | 58 |
| Figura 36 - Corpo-de-prova do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA | 59 |
| Figura 37 - Corpo-de-prova da MADEIRA/MDF | 59 |
| Figura 38 - Variação do coeficiente com a mudança de posição da manta Glass Fabric no porta-amostra | 61 |
| Figura 39 - Coeficiente de absorção acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 40 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA nas posições 1 e 2..... | 63 |
| Figura 41 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA nas posições 3 e 4 utilizando a manta Glass Fabric | 64 |
| Figura 42 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA nas posições 3 e 4, utilizando a manta Isosound Tecido Cinza | 65 |
| Figura 43 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA..... | 66 |
| Figura 44 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA nas posições 1 e 2..... | 67 |
| Figura 45 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA nas posições 3 E 4, utilizando a manta Glass Fabric | 68 |
| Figura 46 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA nas posições 3 E 4,..... | 69 |
| Figura 47 - Coeficiente de absorção da MADEIRA/MDF nas posições 1 e 3..... | 70 |
| Figura 48 - O coeficiente de absorção das três amostras na posição 1..... | 71 |
| Figura 49 - O coeficiente de absorção das três amostras na posição 3 utilizando a manta Glass Fabric..... | 72 |
| Figura 50 - O coeficiente de absorção das três amostras na posição 3, utilizando a manta Isosound Cinza | 72 |
| Figura 51 - Comparativo da manta Glass Fabric com as amostras na posição 4 utilizando a mesma manta | 73 |
| Figura 52 - Comparativo da manta Isosound Cinza com as amostras na posição 4 utilizando a mesma manta | 74 |
| Figura 53 - Comparação dos coeficientes de absorção da manta Isosound Glass Fibrac, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante com os dados obtidos através do ensaio no tubo de impedância | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 54 - Comparação dos coeficientes de absorção da manta Isosound Cinza, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante com os dados obtidos através do ensaio no tubo de impedância | 76 |
| Figura 55 - Comparação dos coeficientes de absorção da manta Isosound Trisoft, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante com os dados obtidos através do ensaio no tubo de impedância | 76 |
| Figura 56 - Comportamento das amostras no ensaio de flexo-tração | 77 |
| Figura 57 - Ensaio de flexo-tração na barra CONCRETO/FIBRA METÁLICA | 78 |
| Figura 58 - Ensaio de flexo-tração da barra CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA..... | 79 |
| Figura 59 - Ensaio de flexo-tração para barra MADEIRA/MDF | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Comprimento de ondas por faixa de frequência | 22 |
| Tabela 2 - Ábaco para adição em decibels | 25 |
| Tabela 3 - Tabelas de Mantas | 50 |
| Tabela 4 - Valores normalizados das frequências dos centros e das extremidades das 1/3 de oitavas | 60 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO – International Organization for Standardization

NBR – Norma Brasileira

1. INTRODUÇÃO

A Acústica tem se tornado um tema cada vez mais pertinente na atual conjuntura de nossa sociedade e no meio ao qual ela está inserida. Mesmo que ao longo da história, considerações sobre acústica tenham sido tratadas - como em diversos teatros gregos -, a importância que este assunto assume hoje se justifica no aumento considerável de fontes de ruídos, nas técnicas que proporcionam pesquisas voltadas para a solução destes problemas e no desenvolvimento de novos materiais com características amenizadoras.

Pensar em acústica na idade antiga era introduzir conceitos básicos de distribuição do som, garantindo à platéia condições de audibilidade. Acompanhando a evolução da arquitetura, a acústica foi se modificando conforme os novos espaços surgidos e suas utilizações; novos fenômenos passaram a ser conhecidos e trabalhados acusticamente. Somente a partir do século XX pode-se observar maior preocupação científica, como o trabalho de Wallace C. Sabine. Seus estudos relacionaram volume, materiais e tempo de reverberação dos ambientes e serviram de impulso para novas pesquisas relacionadas ao tema.

O tratamento de aspectos ligados à acústica arquitetônica é um instrumento valioso para se alcançar a qualidade dos ambientes construídos. Desta forma, países desenvolvidos têm investido cada vez mais em pesquisas nesta área a fim de buscar soluções técnicas que sejam compatíveis com as exigências da indústria da construção civil. No Brasil, estas pesquisas encontram-se ainda pouco desenvolvidas. No entanto, pode-se observar um aumento no interesse por parte das instituições de ensino e de pesquisa e mesmo das empresas privadas para alcançarem melhorias neste segmento.

É fundamental que as edificações, bem como os ambientes externos, tenham um tratamento acústico adequado, evitando-se assim efeitos psico-fisiológicos tais como estresses, hipertensão, distúrbios auditivos, entre outros, desenvolvidos pelos indivíduos expostos aos ruídos intermitentes e ou constantes por períodos prolongados.

O estudo do desempenho acústico nas edificações é uma forma de possibilitar e viabilizar que o sistema construtivo atenda às exigências de conforto necessárias à salubridade dos usuários. Assim, arquitetura e engenharia assumem importante papel, ao analisar e propor

novas soluções no que diz respeito à qualidade final de seu produto, de forma a reduzir o ruído no interior das edificações para níveis aceitáveis.

De forma isolada, podemos considerar a absorção sonora como parte essencial no processo de tratamento acústico. Por meio dela, podemos minimizar a reverberação do som dentro dos espaços e melhorar sua performance. Segundo a norma brasileira – NBR 12179, cada tipo de ambiente tem um parâmetro estabelecido para o valor do tempo de reverberação de acordo com sua função e com as atividades ali desenvolvidas.

Assim, “para que possamos tratar de forma devida cada espaço, precisamos entender o som e sua forma de propagação, bem como as características do local onde ele é incidido, amenizando os efeitos colaterais e assegurando uma qualidade de audição desejável.” (SOUZA, 2007)

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a capacidade de absorção acústica de painéis confeccionados com granitina ou com concreto com adição de fibras.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a. Estudar as propriedades acústicas dos materiais e analisar suas características absorvedoras, bem como, a possibilidade de aplicação em revestimentos de paredes internas e externas com custos reduzidos e baixo impacto ambiental;
- b. Desenvolver um protótipo de revestimento acústico absorvedor para uso interno e ou externo em edificações, com características acústicas específicas;
- c. Avaliar o desempenho acústico do revestimento proposto, através de ensaios em tubos de impedância e comparar os resultados obtidos com as dos materiais existentes no mercado;
- d. Avaliar a resistência mecânica do mesmo, por meio de ensaios de resistência à flexo-tração e analisar os resultados com as definições da bibliografia específica;

1.2. Justificativa

A multiplicidade de usos e funções que hoje se incorporam aos espaços, bem como a grande oferta de materiais e tecnologias disponíveis, impactou na arquitetura criando ambientes diversos e inovadores. Não somente em quesitos de arquitetura, assiste-se também a um aumento considerável de fontes de ruídos em todo e qualquer espaço, tornando nossas cidades mais barulhentas, com índices anteriormente não experimentados. Sujeito a tudo isto, o indivíduo se vê cercado por excesso de barulho nos grandes centros urbanos. Segundo SOUZA, o ruído é um dos sincronizadores ou perturbadores do ritmo do sono mais importante. Distúrbios do ritmo do sono produzem sérios efeitos na saúde mental. Para oferecer melhor qualidade de vida aos seus usuários, tornou-se indispensável à arquitetura e à engenharia, repensar suas construções do ponto de vista acústico e adaptar-se às inovações.

A preocupação com a qualidade de vida da população deve ser foco desta pesquisa. Viabilizar maneiras de amenizar problemas acústicos, aliando tecnologia, baixo custo e sustentabilidade, é fundamental para o desenvolvimento do projeto. Embora existam no mercado produtos capazes de absorver o som de forma efetiva, o custo e a mão de obra especializada os tornam restritos a uma pequena parcela da população, com maior poder aquisitivo. A grande maioria é de produtos fabricados por empresas estrangeiras, importados por revendedores. Contudo, devemos considerar que nossos sistemas construtivos têm características peculiares e nem tudo que é usado nos demais países pode ser aqui utilizado da mesma forma. Questões referentes à disponibilidade local de materiais também devem ser tratadas, pois gerariam custos adicionais com transporte de matéria prima.

Assim, a possibilidade de se ter um revestimento acústico nacional que atenda ao mercado da construção civil, torna-se muito pertinente. O aproveitamento de técnicas e materiais já consagrados, como por exemplo, o concreto, pode disponibilizar um produto final com custo menor, o que o torna mais acessível à população. Com isso, abre-se caminho para investimentos nesta área, visando através de novas técnicas construtivas, produtos ecologicamente corretos para garantir uma arquitetura mais limpa e, principalmente, sustentável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Conceitos Básicos

O som, de maneira geral, origina-se na vibração de um objeto e é capaz de provocar a vibração de partículas do meio. O som percebido pelo ouvido humano tem como meio de propagação o ar, podendo, contudo, atravessar superfícies. Assim, considera-se que estas superfícies sejam também um meio vibrante, mesmo que as vibrações sejam pequenas oscilações.

A partir de alterações provocadas na pressão atmosférica, pode-se verificar a propagação das vibrações sonoras ou ondas sonoras. Ao vibrar, as partículas do ar formam sucessivas zonas de rarefação e compressão, impelindo na partícula vizinha o mesmo movimento e resultando na propagação sonora. Pode-se dizer que as partículas vibram em torno de seu centro de equilíbrio, transmitindo a energia acústica até se extinguir a flutuação da pressão sonora (figura 1). Não haverá deslocamento da partícula se o meio não estiver em movimento.

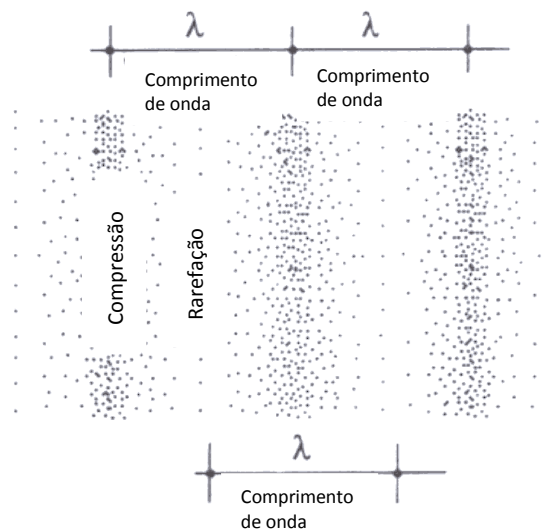


Figura 1 - Zonas de compressão e rarefação (adaptado de METHA, 1999)

O deslocamento máximo da partícula em relação ao seu centro de equilíbrio é chamado de amplitude e (figura 2), o número de vezes que ela se desloca completando um ciclo de rarefação e compressão por um intervalo de tempo, é denominado de frequência e é medida em Hertz (Hz).

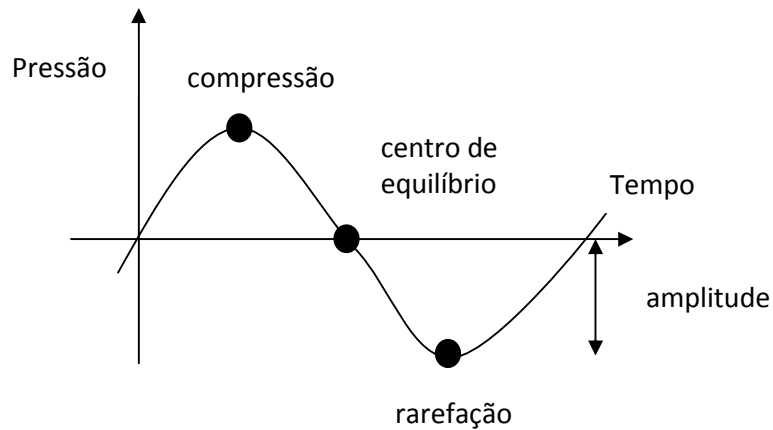


Figura 2 - Amplitude da onda sonora (adaptado de SOUZA, 2007)

Quando uma fonte sonora emite um som com uma única frequência, este som é chamado de tom puro. Entretanto, as fontes sonoras normalmente emitem sons mais complexos, com várias frequências. Os sons de frequências mais altas são chamados de agudos e possuem grande número de oscilações. Já os sons de frequências mais baixas ou graves, possuem menor número de oscilações temporais. Quanto maior o número de oscilações, maior é a frequência do som. Segundo SOUZA (2007), o ouvido humano consegue perceber sons com frequências que variam de 20 a 20.000 Hz. Abaixo de 20 Hz as frequências são chamadas de infrasônicas e acima de 20.000 Hz são conhecidas como frequências ultrasônicas.

O que chamamos popularmente de “aumentar o som” equivale a aumentar o volume sonoro, ou seja, a amplitude da onda, e não tem relação com a frequência em que o som é emitido.

O ciclo completo de vibração, determinado pela distância entre duas vibrações sucessivas, é chamado de comprimento de onda (METHA, 1999) e calculado pela Equação 1:

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

Onde:

λ - Comprimento de onda;

c - Velocidade de propagação do som (cerca de 344m/s à temperatura de 20°C);

f - Frequência.

Relativamente, quanto maior o comprimento de onda, menor é a frequência e, quanto maior o número de vezes que se completa um ciclo em determinado intervalo de tempo, menor a distância entre esses ciclos, como demonstrado na figura 3. (SOUZA, 2007)

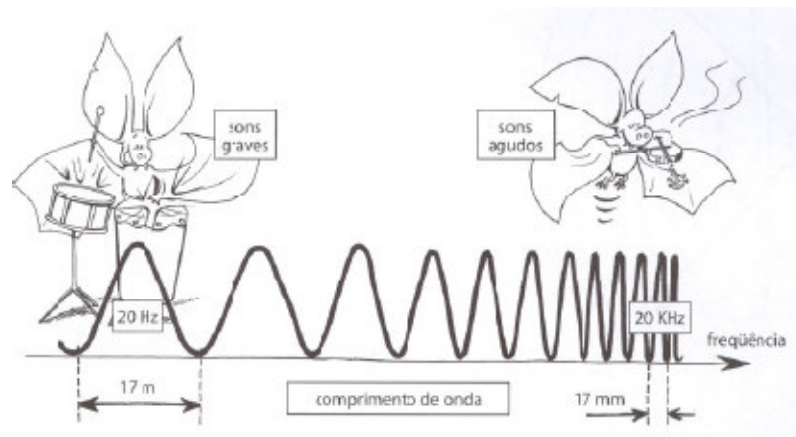


Figura 3 - Frequências e comprimento de onda (SOUZA, 2007)

Dentro das faixas de frequências percebidas pelo ouvido humano, o comprimento de onda varia de 17mm a 17m. Para facilitar os cálculos, uma vez que existem infinitas frequências audíveis, usualmente dividi-se estas em 8 bandas de frequências e em cada uma delas avalia-se as propriedades dos materiais. A tabela abaixo mostra as bandas de frequência e os seus respectivos comprimentos de ondas:

Tabela 1 - Comprimento de ondas por faixa de frequência

| Frequência (Hz) | Comprimento de Onda (m) |
|----------------------------|------------------------------------|
| 63 | 5,46 |
| 125 | 2,75 |
| 250 | 1,38 |
| 500 | 0,69 |
| 1000 | 0,34 |
| 2000 | 0,17 |
| 4000 | 0,09 |
| 8000 | 0,04 |

Pelo comprimento de onda pode-se caracterizar o comportamento acústico dos materiais e definir as características do ambiente que se pretende edificar. Pois, de acordo com o comprimento de onda, as frequências podem sofrer ou não interferências quando encontram uma superfície ou obstáculos. No caso de ondas de maior comprimento, sons graves, não são substancialmente alterados quando atingem obstáculos. Já as ondas de menor comprimento ou sons agudos podem ser barradas facilmente por estes obstáculos.

O som emitido por uma fonte sonora pode ser irradiado com mais energia em uma direção do que em outras. Observando a voz humana, percebe-se que as médias e baixas frequências são distribuídas uniformemente em ângulos mais abertos do que as altas frequências, que se concentram no eixo longitudinal da fonte. (SOUZA, 2007)

Considerando uma fonte sonora emitindo um campo livre, sem interferências de superfícies, este som propaga-se de modo esférico, como uma pedra lançada em um lago, ondas concêntricas geradas com o contato da pedra com a água. Este mesmo efeito é percebido quando uma fonte sonora emite um determinado som, à medida que as ondas se afastam do ponto inicial, ou seja, da pedra, tornam-se menos evidentes e perdem energia. Em relação ao som, isto também pode ser percebido. À medida que se afasta da fonte, a área de distribuição da energia sonora aumenta à medida que se afasta da fonte e a energia (W/m^2) diminui. (METHA, 1999)

Considerando a potência necessária a uma fonte para produzir um som, verificamos valores bem pequenos, que se aproximam de 10^{-12} W. Assim, no momento da percepção do som

pelo ouvido humano, a flutuação (compressão-rarefação) da pressão do ar também é muito pequena, $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$. Este valor é a menor flutuação de pressão percebida pelo ouvido humano como som.

SOUZA, 2007 diz que a faixa de pressão que provoca a sensação auditiva é larga, pois enquanto o limiar de audição corresponde a $0,00002 \text{ N/m}^2$, o limiar da dor é considerado como 200 N/m^2 . Na prática, além dessa escala ser de difícil manuseio, a percepção que o ouvido apresenta para a pressão sonora ou para a intensidade sonora corresponde a uma resposta não-linear, ou seja, dobrando seu valor, o ouvido não irá perceber o som como sendo duas vezes mais intenso.

Para o estudo de pressão e intensidade sonora utiliza-se o decibel (dB), substituindo a ampla escala que o ouvido humano é capaz de perceber, pela escala logarítmica, que se assemelha mais às variações de pressão e intensidade identificáveis.

Para o cálculo de conversão, utilizamos o fator de referência 10^{-12} W/m^2 , que é o menor valor da intensidade mínima audível e corresponde a 0 dB. Assim, temos em decibels o Nível de Pressão Sonora (NPS) e o Nível de Intensidade Sonora (NIS), calculados através das equações 2 e 3:

$$NIS = 10 \log I/I_0 \text{ (dB)} \quad (2)$$

Onde:

NIS – Nível de intensidade sonora;

I – Intensidade sonora em W/m^2 ;

I_0 – Intensidade sonora de referência (10^{-12} W/m^2).

$$NPS = 20 \log P/P_0 \text{ (dB)} \quad (3)$$

Onde:

NPS – Nível de pressão sonora;

P – Pressão sonora em Pa;

P_0 – Pressão sonora de referência (10^{-12} Pa).

Considerando a propagação esférica do som, pode-se dizer que a intensidade sonora é a potência em Watts dividida pela área da esfera. Assim:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (4)$$

Onde:

I – Intensidade;

W – Potência;

r – Raio da circunferência.

À medida que se afasta da fonte sonora, a intensidade diminui proporcionalmente, de tal forma que dobrando a distância ou raio da fonte ao receptor, a intensidade diminuirá 6 dB, seguindo a Lei do Quadrado. (METHA, 1999) Veja figura abaixo:

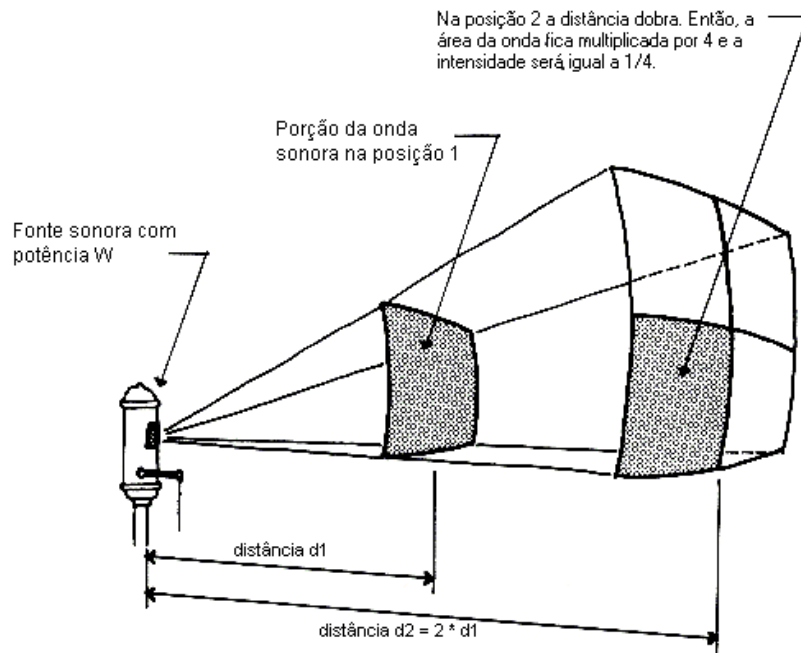


Figura 4 - Relação entre intensidade de distância da fonte (adaptado de EGAN, 1988)

As operações básicas com os valores em decibels não podem ser efetuadas diretamente, pois se trata de uma escala logarítmica. Desta maneira, para somar fontes sonoras com

níveis de intensidade diferentes, deve-se converter estes valores para intensidades e somá-los ou subtraí-los diretamente. Após a operação desejada, convertem-se novamente os valores para decibels. Outra forma de calculo é através de ábacos, mas nesta opção, os valores obtidos serão aproximados.

Assim, pode-se seguir a tabela abaixo para efetuar a soma ou subtração em decibels:

Tabela 2 - Ábaco para adição em decibels

| Diferença de níveis de intensidade entre duas fontes sonoras (dB) | Decibels que devem ser adicionados ao maior valor de nível de intensidade das fontes |
|---|--|
| 0 ou 1 | 3 |
| 2 a 4 | 2 |
| 5 a 9 | 1 |
| 10 ou mais | 0 |

Ainda é importante ressaltar que, embora exista o efeito de mascaramento entre fontes sonoras de níveis de intensidade distintas, o ouvido humano tem a capacidade de perceber de forma diferenciada as diversas frequências. Sendo assim, geralmente sons de frequências baixas produzem maior mascaramento que sons de frequências altas. As curvas isofônicas mostram a resposta subjetiva que o ouvido tem para as faixas de frequências, conforme a figura 5.

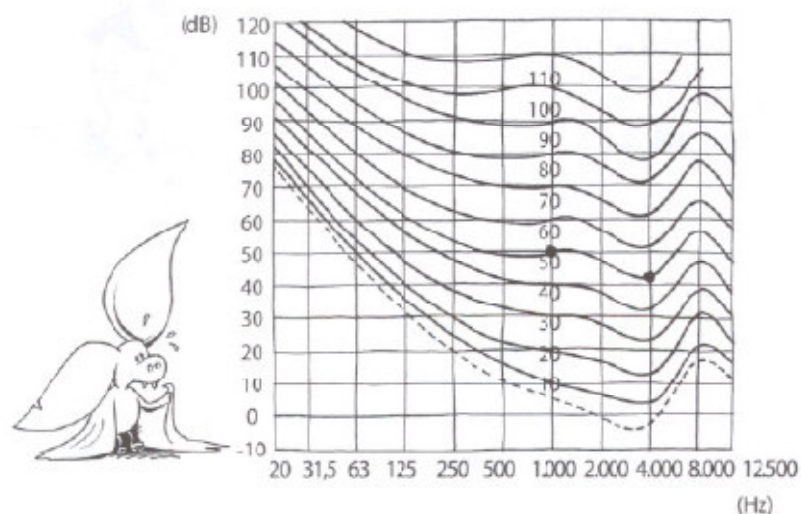


Figura 5 - Curvas Isofônicas (SOUZA, 2007)

2.2. Propriedades Acústicas

Ao criar espaços, o arquiteto trabalha com a forma e o volume, criando ambientes diversos. A escolha por uma determinada forma influencia consideravelmente o comportamento acústico do ambiente construído. Através do conhecimento das propriedades acústicas dos materiais o arquiteto pode trabalhar tais espaços de forma adequada ao uso a que se propõe, visando resultados que atendam as demandas do projeto e as questões de conforto acústico.

Pode-se considerar o comportamento do som semelhante ao comportamento da luz, cuja decomposição ocorre em parcelas. O som que se percebe é resultado do som direto, que sai da fonte sonora e chega aos ouvidos humanos sem sofrer desvio, e do som refletido, que incide sobre uma superfície e sofre a partir deste momento, influência em suas características (figura 6). Assim, conforme Souza (2007) define, *“o raio sonoro refletido tem seu ângulo em relação à superfície igual ao de incidência, como se sua origem fosse sua imagem em um espelho. Para que ocorra a reflexão é necessário que o espelho acústico tenha sua superfície maior que o comprimento de onda do som emitido.”*

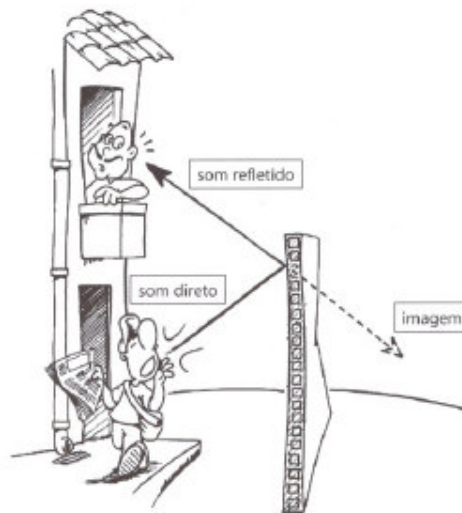


Figura 6 - Reflexão do raio sonoro (SOUZA, 2007)

A partir do momento em que o som incide sobre uma superfície, observar-se que os sons agudos apresentam comprimentos de ondas menores e sofrem mais reflexões que os sons

graves. Imediatamente após a incidência na superfície refletora, forma-se o que chamamos de sombra acústica ou difração, uma área onde não se ouve o som emitido. No caso dos sons graves, como o comprimento de onda é maior e a frequência menor, o som ultrapassa a superfície de reflexão e se propaga além dela (figura 7).

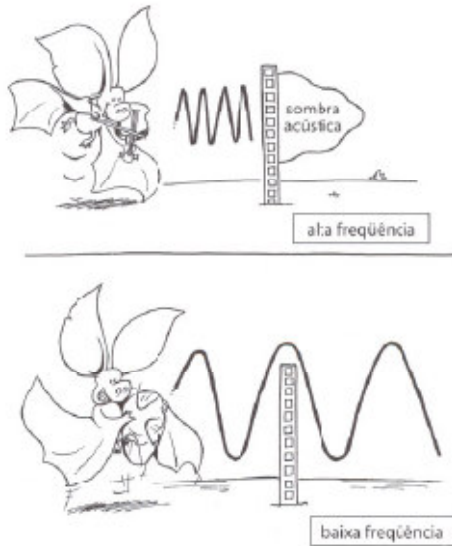


Figura 7 - Sombra acústica (SOUZA, 2007)

Trabalhar bem com as características do som (comprimento e frequência), de forma a aumentar a intensidade e a homogeneidade no ambiente projetado, é um recurso que permitirá ao arquiteto melhorias na distribuição acústica.

O som que incide em uma superfície tem sua energia dividida em energia refletida, energia transmitida e energia absorvida. A diminuição destas energias, assim como o aumento da distância da fonte sonora, é responsável por uma queda na intensidade do som. Outro fator que interfere diretamente na intensidade é a superfície do material, quanto mais poroso este for, maior será a absorção de energia e menor a intensidade de propagação. Assim, a cada reflexão sofrida pelo raio sonoro, tem-se uma perda de energia devido à absorção, que está diretamente relacionada com o material da superfície em questão e com o número de reflexões.

Comparando um ambiente mobiliado e o mesmo ambiente vazio, percebe-se uma grande diferença em seu comportamento acústico. No primeiro caso o som será absorvido pelos

móveis e pelos adornos presentes no ambiente, diminuindo o número de reflexões. Em contrapartida, quando o mesmo se encontrar vazio, as reflexões aumentarão e o som permanecerá mais tempo no ar.

Este intervalo de tempo em que o som permanece no ar interfere na qualidade do ambiente projetado. Desta maneira, em um espaço fechado, o som incidente sofre inúmeras reflexões, de tal forma que, mesmo tendo cessado a fonte, ainda poderá ser percebido dentro do ambiente como um prolongamento, sua extinção não ocorre de forma imediata, mas sim após um determinado intervalo de tempo. Quando se percebe, em um ambiente, uma queda de 60 dB no nível sonoro durante um intervalo de tempo, tem-se o tempo de reverberação do ambiente. Em virtude de seu volume e da composição de seus materiais, cada ambiente terá seu próprio tempo de reverberação. Em auditórios, a presença da platéia torna o espaço mais absorvedor, por isso, no cálculo do tempo de reverberação ideal para esta funcionalidade, deve-se considerar tal aspecto. Outra característica que interfere diretamente na distribuição do som dentro de um ambiente é o formato das superfícies. Superfícies côncavas concentram as reflexões sonoras em um mesmo ponto, enquanto que as superfícies convexas tendem a difundi-las.

O som que chega ao receptor é o somatório do som direto e dos sons refletidos. Se a distância percorrida pelo raio direto e o raio refletido estiver entre 11 a 22m, isto implicará em um intervalo de tempo de chegada entre eles maior que 1/30 de segundo. Consequentemente o ouvido humano passará a distinguir estes sons separadamente, efeito conhecido como eco. (SOUZA, 2007) Outro fenômeno acústico que deve ser observado é o das ondas estacionárias. Superfícies paralelas podem provocar nas ondas, cujo comprimento é menor que a distância entre estas superfícies, um prolongamento no tempo de reverberação. Neste caso, ocorre uma superposição das ondas refletidas que se deslocam em direções contrárias, gerando distorções. Nas regiões em que fases de compressão e rarefação são contrárias, o som percebido é nulo. Em contrapartida, regiões em que as fases de compressão ou rarefação coincidem, tem-se um efeito somatório que torna o som mais intenso (figura 8). Assim, pequenos deslocamentos do receptor, dentro deste tipo de ambiente, são suficientes para expor áreas onde a intensidade sonora é anulada ou áreas nas quais ela pode ser duplicada.

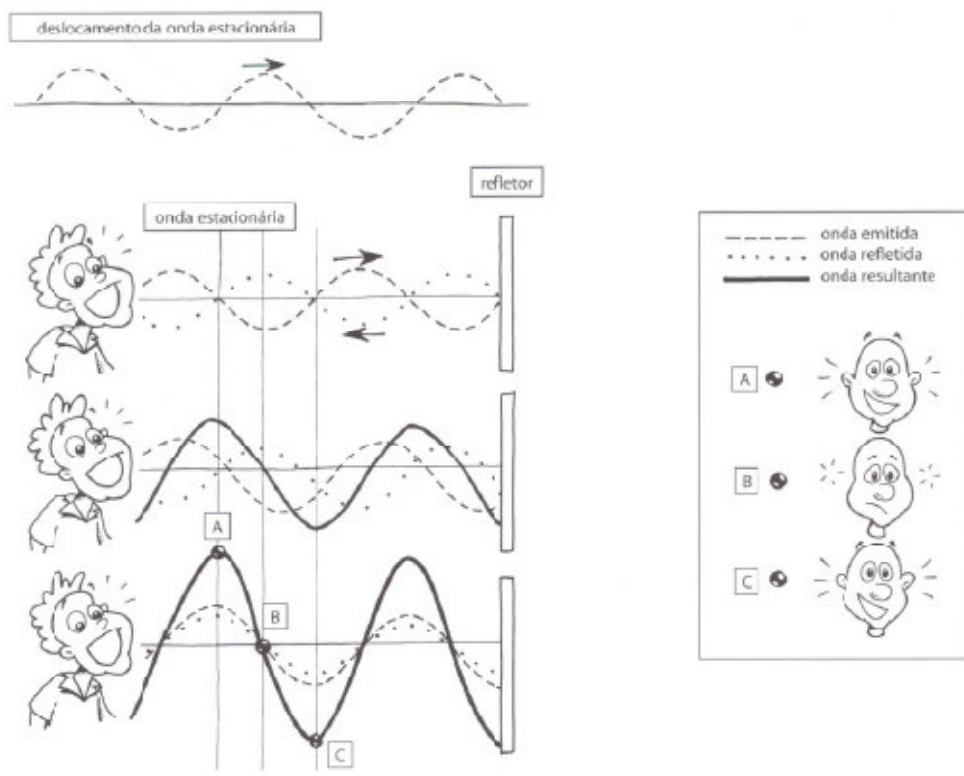


Figura 8 - Fenômeno das ondas estacionárias (SOUZA, 2007)

2.3. Absorção acústica

A existência de um ruído exige um controle direto sobre sua fonte, com o uso de equipamentos e máquinas mais silenciosas. Entretanto, este controle direto nem sempre é possível, seja por questões técnicas ou econômicas. Assim, torna-se importante viabilizar outros meios de controle para evitar os excessos de ruídos, como por exemplo, o emprego de materiais absorvedores e o controle no tempo de reverberação.

A capacidade da superfície em dividir a energia do som em três partes permite que, de acordo com a escolha dos materiais empregados na absorção de uma dessas partes de energia, o nível sonoro do ambiente possa ser reduzido (conforme observado na figura 9).

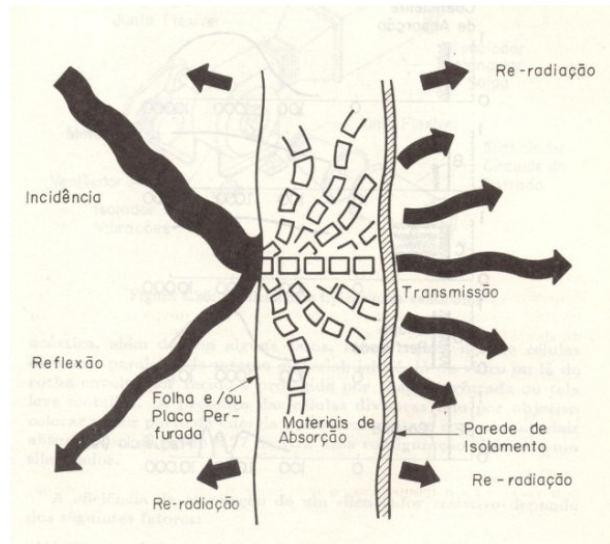


Figura 9 - Incidência acústica em um material poroso (GERGES, 2000)

Para exemplificar, considera-se o exemplo de um escritório sem tratamento acústico adequado. Nesta circunstância, além do som direto, proveniente do computador em que trabalha, a pessoa ouve o som desta mesma fonte, refletido pelo teto, pelo piso, pelas paredes e pelo mobiliário que ali se encontra. Uma pessoa posicionada mais próxima ao equipamento ouvirá o som com maior amplitude. Ao inserir neste mesmo contexto materiais com capacidade absorvedora, observa-se a redução de parte do som refletido, diminuindo o nível de ruído aos usuários do espaço. (ver figura 10 e 11).

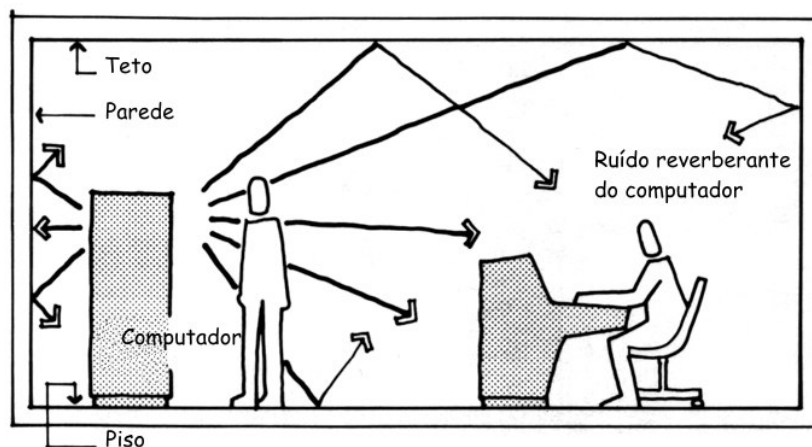


Figura 10 - Escritório sem tratamento acústico (adaptado de HARRIS, 1993)

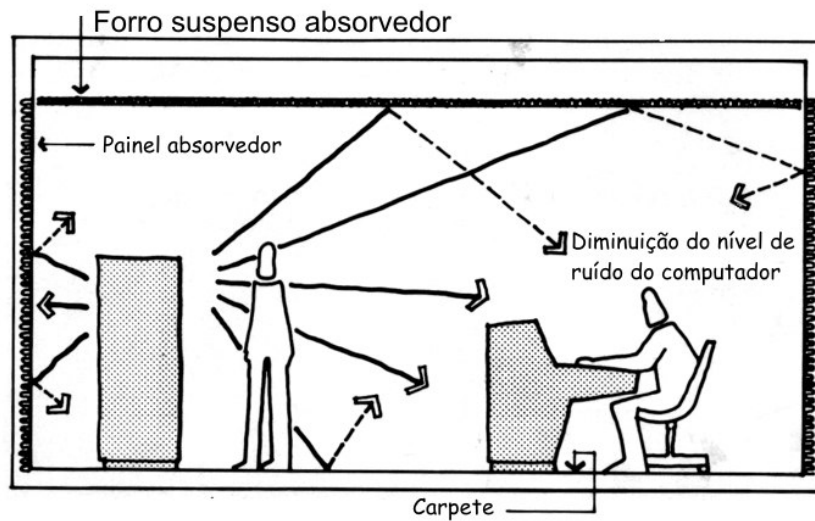


Figura 11 - Escritório com tratamento acústico (adaptado de HARRIS, 1993)

Para avaliar a eficácia de um material quanto à absorção sonora, utiliza-se o coeficiente de absorção acústica (α), que pode ser definido pela razão entre a energia acústica absorvida W_a e a energia acústica incidente W_i .

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (5)$$

O mesmo coeficiente também pode ser calculado em função da intensidade sonora. Neste caso, a fórmula pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\alpha = \frac{I_{absorvida}}{I_{incidente}} = \frac{I_{incidente} - I_{refletida}}{I_{incidente}} = 1 - \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \quad (6)$$

Onde:

$I_{absorvida}$ - Intensidade sonora absorvida, (resultado da energia absorvida por unidade de tempo, ou seja, potência sonora; dividida pela área de superfície);

$I_{refletida}$ - Intensidade sonora refletida;

$I_{incidente}$ - Intensidade sonora incidente.

Para a parcela refletida, tem o coeficiente de reflexão acústica (ρ), definido como:

$$\rho = \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \quad (7)$$

E por último, a parcela que é reirradiada pela superfície ou parcela de transmissão sonora, que tem o coeficiente de transmissão acústica (τ) igual a:

$$\tau = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} \quad (8)$$

No caso de superfícies totalmente absorventes, deve-se considerar $\alpha = 1$ e $\rho = 0$; quando as superfícies são totalmente reflexivas, os índices são $\alpha = 0$ e $\rho = 1$.

O coeficiente de absorção do material varia de acordo com o ângulo de incidência do som, ou seja, com o ângulo no qual o som incide sobre a superfície do material. Como na maioria dos espaços o som incidente forma diversos ângulos em proporções quase iguais, torna-se mais interessante a utilização de um coeficiente de absorção de incidência aleatório, no qual seu cálculo considere uma média entre todos esses ângulos de incidência. Este coeficiente passou a ser chamado também de coeficiente de absorção (α) do material. Variando com a frequência do som, assim como o anterior. Em relação a objetos arquitetônicos, utiliza-se para o cálculo do coeficiente, bandas de faixas de oitavas ou banda estreita, que são valores de seis faixas de oitavas de frequências que variam de 125Hz a 4kHz, obtidos através de ensaios em câmaras reverberantes ou em tubos de impedância.

Quando há a necessidade de priorizar a fala humana no espaço, trabalha-se ainda com um coeficiente mais específico, chamado de coeficiente de redução de ruídos (NRC). Trata-se de um valor médio dos coeficientes de absorção dos materiais que abrange as faixas de frequências de 250Hz a 2000Hz, ou seja, as 4 faixas que concentram a energia sonora do discurso humano. (METHA, 1999)

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (9)$$

2.4. Materiais acústicos

A absorção acústica por meio de materiais absorvedores porosos ou fibrosos (elásticos) também é conhecida como mecanismo resistivo. No caso destes tipos de materiais, a energia sonora é dissipada por atrito, através do movimento das moléculas de ar no seu interior, durante a passagem da onda acústica. (BISTAFA, 2006). Ainda segundo o mesmo autor, um material considerado como bom absorvente de som deve respirar, ou seja,

permitir que as moléculas do ar penetrem e se movimentem no seu interior. Tecidos com trama muito estreita, que não permitem ao ar atravessá-los (por exemplo, encerados de algodão), são ineficazes, assim como aqueles que apresentam trama muito esparsa, que permitem enxergar através deles (gaze, por exemplo).

Quase todo material cuja superfície é porosa pode ser considerado um absorvente poroso. A porosidade do material se deve à composição fibrosa ou aos vácuos entre os grânulos ou partículas do material (METHA, 1999). Lãs de vidro e painéis de madeira são os mais utilizados. Neste caso, a onda sonora entra pelos poros absorvedores e faz com que o ar nos vácuos do material vibre para frente e para trás. Enquanto o ar vibra nos vácuos, o atrito entre as partículas de ar e as paredes converte a energia vibracional em calor. Para que ocorra o atrito é necessário que os espaços vazios do material sejam interconectados e contínuos, de modo que o ar possa se mover para frente e para trás no interior do material. Desta forma, os materiais com poros abertos são melhores absorvedores, como no caso da lã de vidro, do poliuretano e do poliéster, todos com espaços de ar interconectados (figura 12). Já as espumas de poliestireno, usadas para isolamento térmico, são pobres em termos de absorção, pois possuem os poros fechados, ou seja, os espaços de ar existentes no material são desconectados.

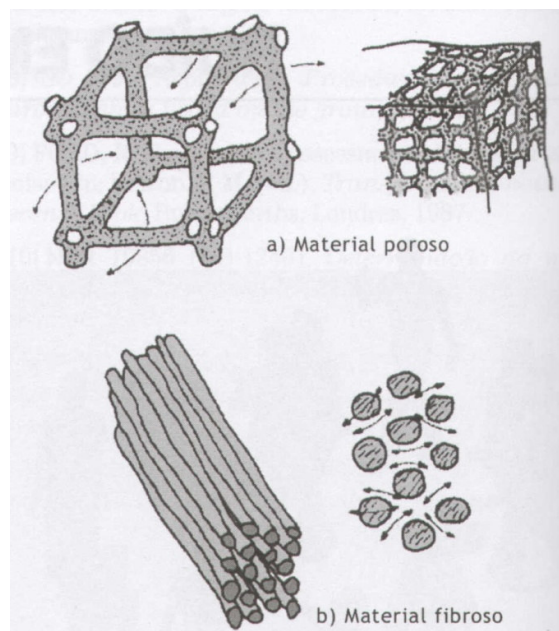


Figura 12 - Estrutura de materiais porosos e fibrosos (adaptado de GERGES, 2000)

As vantagens para a utilização de espumas estão na leveza deste tipo de material e na facilidade de modular permitida por suas formas, o que amplia o leque de aplicação do produto. Em contrapartida, as espumas são materiais combustíveis que emitem gases tóxicos durante sua queima, limitando sua aplicabilidade.

Outro fator que interfere na absorção acústica é a resistência do material ao fluxo de ar, ou seja, o grau de dificuldade com que o ar passa pelo material. Esta resistência depende da densidade do material e, caso este seja poroso, dependerá também do diâmetro da fibra. De forma geral, quanto maior a densidade e o diâmetro das fibras, maior a resistência ao fluxo. E, conseqüentemente, o valor de α será baixo. Se ocorrer o contrário, a passagem do ar pelo material tornar-se-á limitada e mais uma vez o valor de α será baixo. Assim, há um valor ideal para a resistência tornar o valor de α mais elevado. Como a propriedade de absorção de um material poroso depende do ar que passa por ele, podemos revestir alguns materiais (lã de vidro, lã de rocha, por exemplo) com uma membrana de acabamento que não tenha grande resistência ao fluxo de ar e não seja completamente unida ao material absorvente, pois, neste caso, o material em questão passaria a refletir o som, principalmente em situações de altas frequências, ao invés de absorvê-lo. Outro aspecto a considerar é a espessura do material, quanto mais espesso maior a absorção. (figura 13)

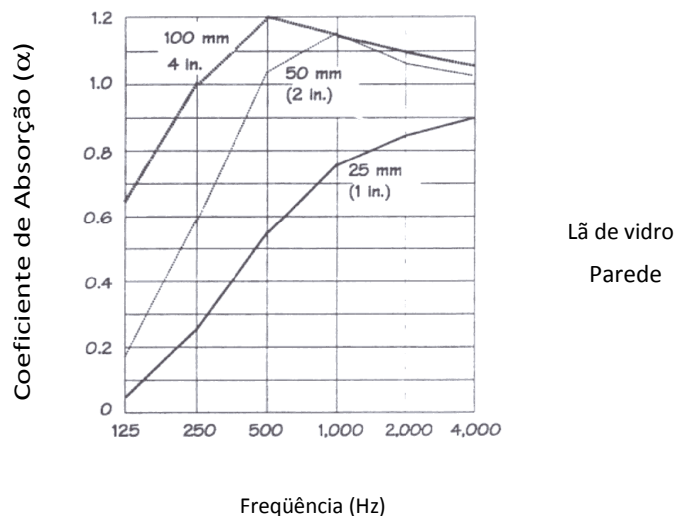


Figura 13 - Relação de frequência e espessura (adaptado de HARRIS, 1994)

Se a espessura do material for pequena, a velocidade máxima da partícula ocorre fora do material e o valor de α torna-se menor (figura 14.a). Por outro lado, se a espessura do

material for grande, a velocidade máxima da partícula ocorre dentro do material, aumentando assim o valor de α (figura 14.b).

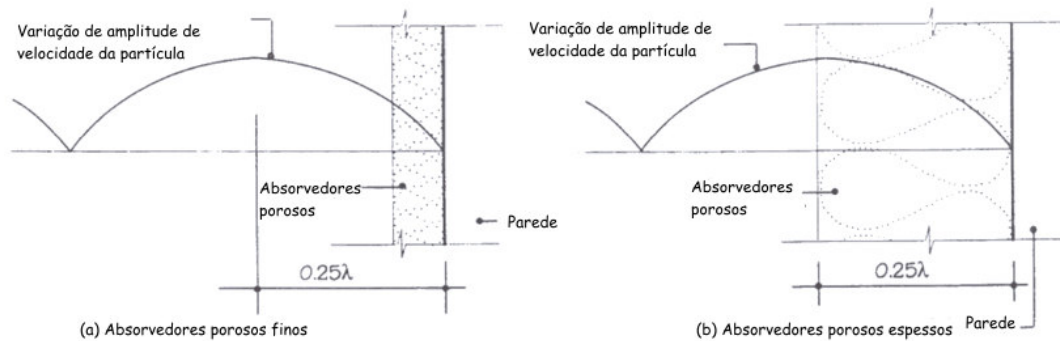


Figura 14 - Variação da amplitude de velocidade da partícula e a sobreposição em um material poroso (adaptado de METHA, 1999)

Observando as figuras 14.a e 14.b, em sons graves o α é menor, pois a espessura do material é pequena para atingir o valor de $\frac{1}{4}\lambda$. No caso de sons agudos, esse valor máximo de amplitude de partícula ocorre dentro do material (figura 15) e α passa a ser maior. Em outras palavras, para absorver uma determinada frequência utilizamos espessura do material específica, conforme o comprimento de onda desta mesma frequência.

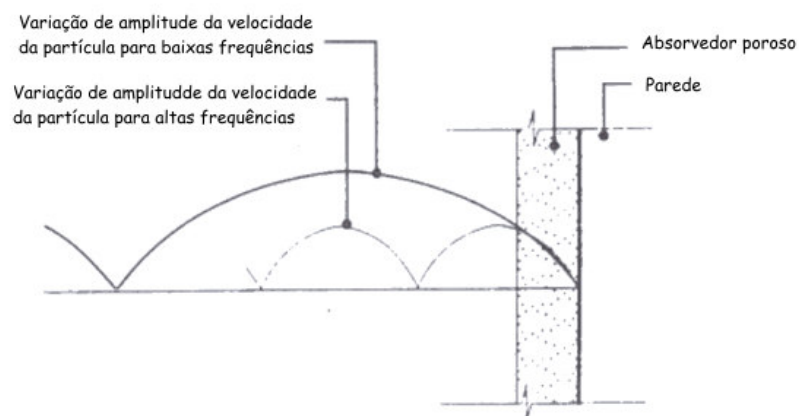


Figura 15 - Relação da amplitude de velocidade da partícula pela frequência (adaptado de METHA 1999)

O valor de α varia de 0 a 1, sendo que o material terá coeficiente diferente para sons graves, médios e agudos. Contudo, em alguns casos, o coeficiente excede este valor. Essa aparente

anomalia é decorrente da difração do som nas bordas e pelo procedimento do teste de medição utilizado. Quando α for maior que 1,0 significa que a energia absorvida é maior que a que chega ao material. Desta forma, é conveniente reduzir para 1,0. (METHA, 1999)

Se o material absorvente for afastado da parede ou teto, por uma camada de ar, a relação de absorção x frequência passa a ser similar à utilização de um material mais espesso, pois, a camada de ar aumenta a absorção do som em frequências mais baixas. A 1000 Hz a diferença é insignificante (figura 16), mas nas frequências mais altas, a diminuição nos valores por meio da presença da camada de ar, coincidirá com o maior valor de amplitude da partícula.

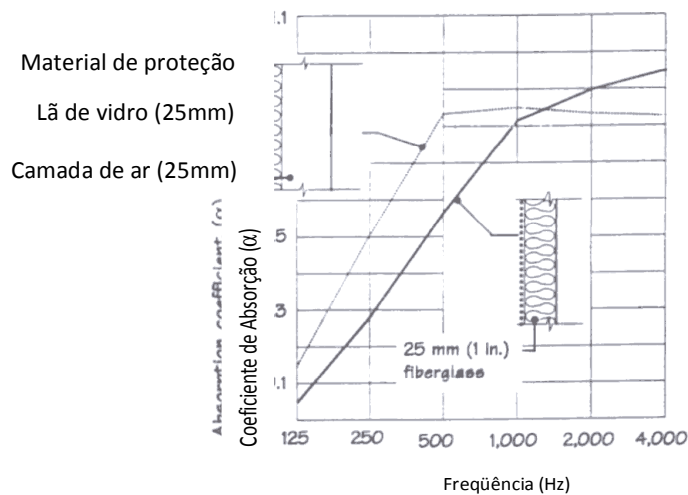


Figura 16 - Efeito da camada de ar e a relação do coeficiente de absorção com as frequências. Material utilizado: lã de vidro (adaptado de METHA, 1999)

Os materiais porosos como lã de vidro e lã de rocha são usados geralmente em divisórias baixas de escritório e como painéis de parede ou forros acústicos. Para dar acabamento, utiliza-se um material, como madeira, impedindo o contato direto com o material absorvedor.

Outra classe de absorvedores são os Volumes Absorvedores ou também conhecidos como cavidade absorvedora, cavidade ressonante e, o mais comum, ressonadores de Helmholtz. Este tipo de absorvedor consiste em um volume com uma abertura, conhecida como garganta e são similares a frascos abertos, nos quais o volume de ar dentro do frasco pode

entrar e sair através desta abertura. (METHA, 1999) Quando uma onda sonora entra no frasco aberto, a massa de ar que fica próximo à garganta oscila de forma similar ao conjunto de massa-mola. O ar próximo à garganta agirá como massa e o ar dentro do frasco como mola. (Figura17)



Figura 17 - Volume absorvedor (adaptado de METHA, 1999)

Próximo à garganta, o ar oscila perdendo energia pelo atrito provocado no encontro com as paredes neste espaço. Esta oscilação trabalha na frequência ressonante do frasco, o que implica que o α fornecido pelo frasco é máximo para essa frequência. Normalmente a frequência ressonante do frasco encontra-se nas baixas frequências e pode ser dado pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{4V}{Sv} \quad (10)$$

Onde:

S – Área da seção transversal da garganta;

v – Volume da garganta;

V – Volume do corpo do frasco.

Todas as dimensões são dadas em milímetros.

O volume absorvedor mais utilizado é o bloco acústico que consiste em um bloco de concreto com dois entalhes longos e estreitos em uma de suas faces. Este entalhe funciona como a garganta e o espaço interno do bloco como o interior do frasco. Para que o sistema funcione, a parte superior ou inferior do bloco deve ser fechada. A frequência ressonante do bloco acústico dependerá do seu volume (v) e da superfície da área do entalhe (S), que pode mudar de oitava, variando a largura do entalhe ou a altura do seu perfil.

No caso de um painel, quando este é perfurado e instalado a certa distância da parede rígida, ele passa a funcionar como um conjunto de pequenos ressonadores, onde cada furo comporta-se como a garganta do frasco e a camada de ar atrás do painel, como o corpo do frasco. Geralmente de uso isolado, é muito utilizado como proteção para um material absorvedor poroso, melhorando ainda mais o coeficiente de absorção nas baixas frequências. Entretanto, nas altas frequências o painel perfurado acaba diminuindo a eficácia do absorvedor poroso, devido à redução de sua transparência acústica nestas frequências. (Figura 18).

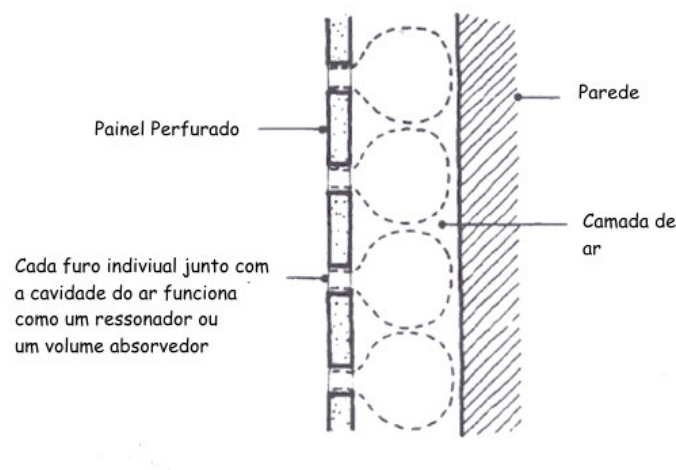


Figura 18 - Painel perfurado (adaptado de METHA, 1999)

A frequência ressonante do painel irá depender da quantidade de furos. Se a área aberta das perfurações for maior que 20% da área do mesmo, o material absorvedor irá determinar a absorção acústica do conjunto. Entretanto, se esta área for menor que 20% da área do painel ocorrerá um pico na curva de absorção acústica do conjunto. A frequência resultante pode ser calculada pela equação seguinte:

$$f_{\text{pico}} = \frac{c}{2\pi} \left\{ \frac{\frac{P}{100}}{L \left[t + 0,85d \left(1 - \frac{0,22d}{q} \right) \right]} \right\}^{1/2} \quad (11)$$

Onde:

P – Porcentagem da área aberta do painel;

c – Velocidade do som no ar;

L – Profundidade da cavidade mais a espessura do material absorvente;

t – Espessura do painel;

d – Diâmetro das perfurações;

q – Espaçamento entre furos.

Segundo BISTAFA, 2006, para que a equação acima forneça melhor previsão, com menor índice de erro, é necessário que satisfaça a condição de $fL/c < 0,1$. Também será necessário, no momento em que a cavidade for totalmente preenchida pelo material absorvente e L corresponder à espessura do material, corrigir a velocidade do som, na fórmula, pela expressão $0,85c$. A Figura 19 mostra as variações nas disposições dos furos de um painel e consequentes alterações na relação de P , d e q .

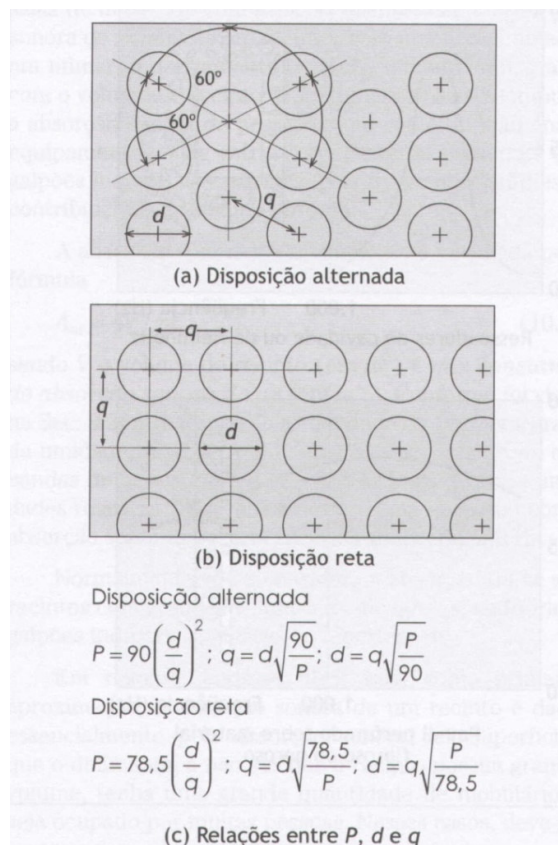


Figura 19 - Esquema de furos de chapas perfuradas (adaptado de BISTAFA, 2006)

As condições de montagem do painel interferem diretamente no coeficiente. Para não influenciar nos resultados, deve-se medir o coeficiente de materiais diferentes, visando

comparações de desempenho entre um e outro. É importante que a montagem dos painéis seja feita sob as mesmas condições. A figura 19 mostra algumas possibilidades de montagens, segundo a norma ASTM 795.

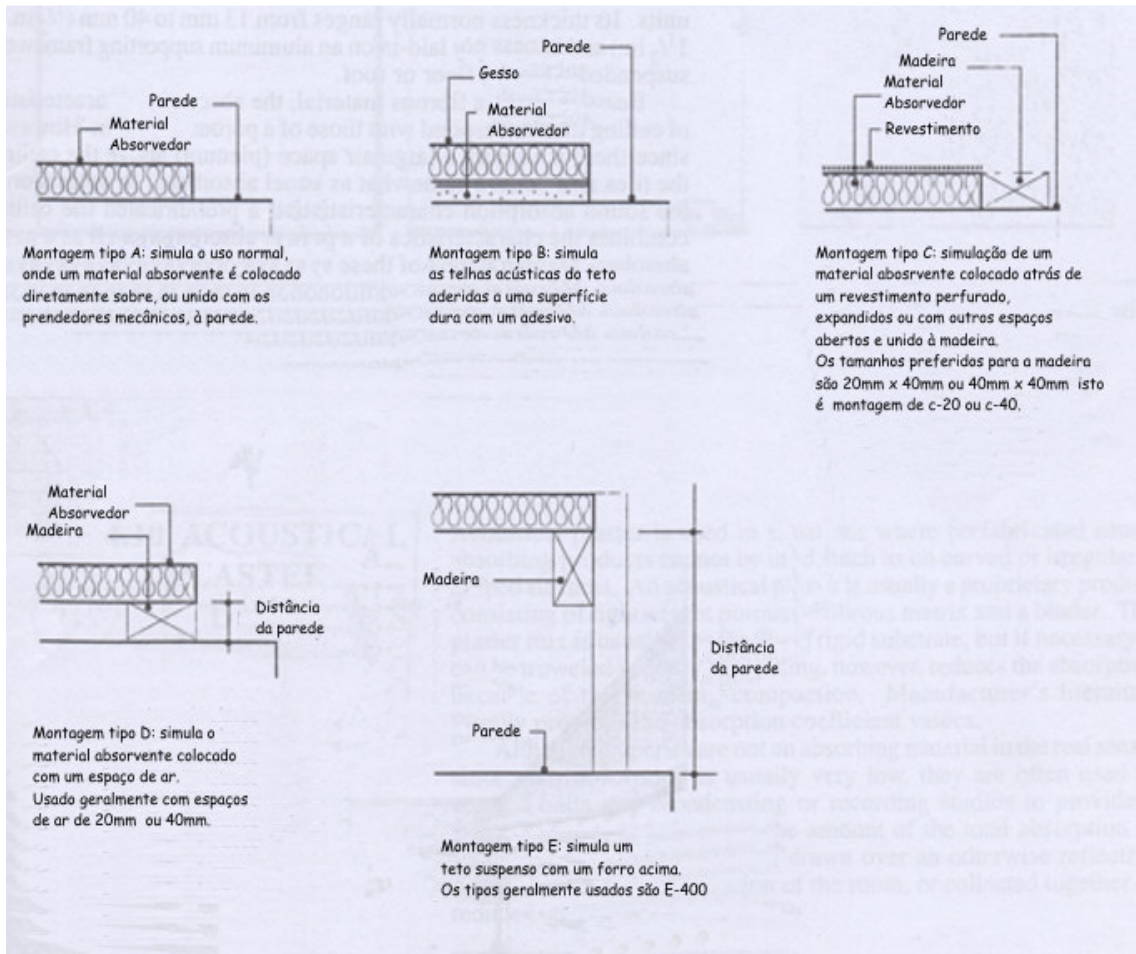


Figura 20 - Variações de montagens dos painéis ressonadores (adaptado de METHA, 1999)

Dentre os esquemas da figura 20, o Tipo E é utilizado para forros, onde a profundidade é de 400mm. Segundo METHA, 1999 não é necessária uma profundidade maior, pois as propriedades de absorção acústica não sofrem alteração para dimensões superiores. Em toda e qualquer situação que se utilizar o α é importante especificar as condições de montagem como pode ser exemplificado na figura 20.

2.4.1. Cálculo da absorção acústica do material

O produto da área do material absorvedor (S) pelo seu coeficiente de absorção (α) é chamado de área equivalente de absorção sonora. Assim, tem-se:

$$A = S\alpha \quad (12)$$

A unidade de absorção (A) é chamada de Sabine, em homenagem a Wallace Clement Sabine (1868-1919). A área do material é dada em ft^2 ou m^2 e o coeficiente é adimensional. Quando não vier especificada a unidade, considera-se como ft^2 . Quando estiver em m^2 é chamada de sabine métrico. Um sabine métrico equivale a 10,76 ft sabine.

Em um ambiente com vários materiais empregados, a absorção acústica é definida pela soma do produto dessas áreas e de seus respectivos coeficientes:

$$\Sigma A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + S_4\alpha_4 + \dots \quad (13)$$

Onde, $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$ são as áreas de superfície do ambiente com material absorvedor e $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \dots$ são os coeficientes de absorção respectivos.

2.4.2. Coeficiente de absorção médio de salas

O coeficiente de absorção médio de um espaço (α_{av}) é definido através da divisão do total de absorção de um espaço pela soma da sua área total, calculado pela equação abaixo:

$$\alpha_{av} = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + S_4\alpha_4 + \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots} = \frac{\Sigma A}{\Sigma S} \quad (14)$$

2.5. Medição do coeficiente de absorção acústica

Para medir o coeficiente de absorção acústica de materiais existem dois métodos mais utilizados, o da câmara de reverberação e o do tubo de ondas estacionárias.

2.5.1. Tubo de ondas estacionárias

O método de medição do coeficiente de absorção por meio do tubo de ondas estacionárias, ou tubo de impedância, consiste na utilização de um tubo no qual se coloca, em uma de suas extremidades, um alto-falante enquanto a outra abriga a amostra do material a ser medido, hermeticamente fechado por uma tampa (figura21).

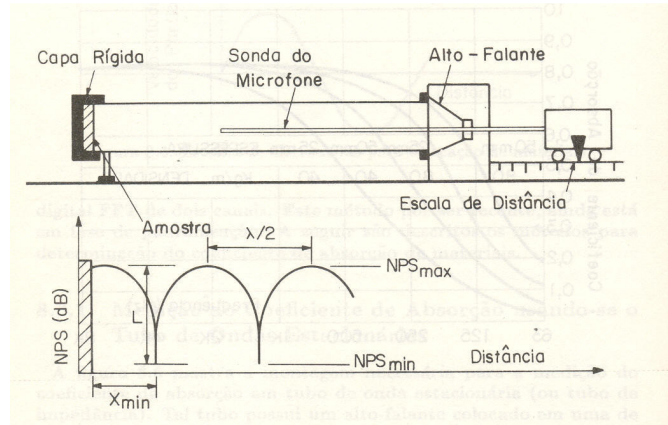


Figura 21 - Exemplo de um tubo de impedância (GERGES, 2000)

O alto-falante é conectado a um gerador de sinais senoidais e a um amplificador de modo a produzir dentro do tubo uma onda estacionária. Um microfone ou sonda de microfone, inserido na extremidade do tubo, capta a pressão acústica da onda estacionária. O fato de poder percorrer toda a extensão do tubo de impedância permite a leitura do nível de pressão acústica através do sinal amplificado do microfone, permitindo também variar a distância entre a amostra e o ponto de medida da leitura.

No tubo de impedância, existem somente ondas planas excitadas por tons puros que estão abaixo da frequência de corte. Esta pode ser obtida utilizando-se a equação:

$$f_c = \frac{1,84c}{\pi d} \quad (15)$$

Onde:

c – Velocidade do som em metros por segundo;

d – Diâmetro do tubo em metros.

O campo sonoro existente no tubo de impedância é composto de duas ondas planas, sendo uma incidente e outra refletida. A relação matemática entre as pressões acústicas destas ondas é a seguinte:

$$P = P_i + P_r = A_1 \cos(\omega t - kx) + B_1 \cos(\omega t + kx) \quad (16)$$

Onde:

P – Pressão acústica total;

ω – Frequência circular em rad/s;

t – Tempo decorrido;

x – Distância entre o microfone e a amostra (negativa);

k – Número de onda ($k = \omega/c = 2\pi f/c$).

No caso do coeficiente de absorção acústica para incidência normal (α_n), este pode ser escrito sob diversas formas. Por exemplo:

$$\alpha_n = \frac{I_a}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i} \quad (17)$$

Onde:

I_a – Intensidade acústica absorvida;

I_i – Intensidade incidente;

I_r – Intensidade refletida.

Podemos perceber que a intensidade acústica (I) é proporcional à amplitude quadrática da pressão da onda.

A norma ISO10534-2(1998) fornece os procedimentos sobre a medição de α_n no tubo de impedância.

A validade de α_n , determinada no tubo de impedância, tem as seguintes restrições:

1. Ondas incidentes normais (90°) à superfície da amostra.

2. Excitação acústica com frequências puras (não com bandas de frequências)
3. Frequências de até 100Hz a 1000Hz para amostra de 10cm de diâmetro e frequências de 1300 a 6300Hz para amostra com 3 cm de diâmetro, havendo, todavia, a possibilidade de uma amostra pequena não ser representativa. O tubo de impedância é limitado a determinadas faixas de frequências, pois o cálculo do dimensionamento do tubo considera a metade do comprimento de onda, assim para frequências em que o comprimento é grande, torna-se inviável a construção do tubo.

As amostras de placas perfuradas, assim como materiais com espessuras variáveis, espaços de ar ou mesmo os efeitos da superfície isolante, podem ser facilmente avaliados por esse método.

As vantagens do tubo de impedância consistem no baixo custo aliado à simplicidade e rapidez dos preparativos e procedimentos, e à necessidade de poucos equipamentos. Entretanto, para caso geral de tratamento acústico e na aplicação de material absorvente no controle de ruído em bandas de frequências, o coeficiente de absorção passa a depender muito do ângulo de incidência. As medidas devem ser feitas em câmaras reverberantes para simular casos reais. No caso de incidência aleatória, existe ainda a possibilidade de se corrigir os valores de α_n .

2.5.2. Câmaras reverberantes

Este método consiste em determinar o coeficiente de absorção acústica em câmaras que são chamadas reverberantes. Dentro desta câmara, forma-se um campo sonoro difuso, o que significa que a energia sonora é uniformemente distribuída no seu interior. Os procedimentos são normalizados pela ASTM-C423 ou ISO 354. Neste caso, mede-se o tempo de decaimento do nível de pressão acústica na câmara com e sem amostra de material absorvente. Para este método, a área mínima de uma amostra deve ser de 10m² a 12m².

Para a câmara vazia, o tempo de reverberação (T_1) é dado pela equação de Sabine:

$$T_1 = \frac{0,161 V}{A} \quad (18)$$

Onde:

A – Área de absorção total em m²;

V – Volume da câmara em m³.

Podemos ainda considerar que $A = S\alpha$, onde S é a área total da câmara e α é o coeficiente de absorção acústica médio das paredes da câmara.

Para a câmara reverberante que tem uma área (S_1) coberta por material absorvente, o novo tempo de reverberação (T_2) é dado pela seguinte fórmula:

$$T_2 = \frac{0,161 V}{A + S_1 (\alpha_1 - \alpha)} \quad (19)$$

Onde:

α_1 – Coeficiente de absorção do material de uma área S_1 .

Substituindo o termo A das duas equações acima, tem-se uma equação para determinar o coeficiente de absorção do material aplicado.

As medições podem ser feitas em bandas de oitavas ou 1/3 oitavas. Os tempos de reverberação irão depender da difusão do campo sonoro e da localização da amostra na câmara. Deste modo, é possível a ocorrência de resultados diferentes obtidos de ensaios da mesma amostra em câmaras diferentes. Também é possível obter $\alpha > 1$, devido às variações estatísticas dos parâmetros: campo sonoro na câmara, posição da amostra, posição dos microfones e fontes. Nestes casos, o α é considerado 1.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, foram desenvolvidos dois tipos de materiais com propriedades acústicas absorvedoras e com dimensões similares aos existentes no mercado atual. Tendo o concreto como matéria prima, uma amostra recebeu a adição de fibras metálicas e outra, fibras poliméricas. Após a confecção destes materiais, foram realizados ensaios de flexo-tração, para medir a tenacidade do concreto, e ensaios de absorção acústica, a fim de obter o coeficiente de absorção em cada amostra.

3.1. Materiais

A princípio, dois tipos de materiais, a granitina e o concreto, foram usados na expectativa de desenvolver painéis absorvedores. No entanto, as amostras obtidas com a base de concreto, mostraram-se mais apropriadas para desenvolver os ensaios.

3.1.1. Granitina

Os primeiros painéis trabalhados foram feitos à base de granitina com adição de quatro materiais diferentes para solidarização. A escolha da granitina como material de base foi consequência da facilidade e da grande quantidade disponível no mercado, uma vez que é obtida do resíduo do mármore utilizado na construção civil. Além disso, poderia ser utilizada como acabamento aumentando as variações de cores e texturas. Assim, com o objetivo de desenvolver um material absorvedor com característica porosa que atendesse às exigências de custo/benefício, funcionalidade e aplicabilidade optou-se inicialmente por esse material.

Todas as amostras foram testadas em 100g de granitina branca, variando a porcentagem e o tipo do material utilizado para a união. As misturas foram feitas em moldes metálicos e compactados até assumirem aspecto homogêneo, com período de secagem de um dia, em temperatura ambiente.

Dentre os materiais escolhidos para teste, primeiramente utilizou-se a goma arábica, na quantidade de 10g. O produto obtido resultou em um material poroso, porém solúvel em água e de frágil ruptura. Este mesmo resultado foi observado com a cola branca, também utilizada na mesma proporção.

No caso da resina acrílica, trabalhou-se com duas amostras de proporção variada, uma com 13,3g e outra com 21g. Em ambos os casos não houve solidarização entre as partículas da granitina.

Para a fibra de vidro, foram utilizadas amostras com 52g, 13,3g e 8g e verificou-se a necessidade de adicionar catalizador para acelerar o processo de união, na proporção de 15, 5 e 3 gotas, respectivamente. Todas as três amostras apresentaram aspecto brilhante e impermeável, ou seja, sem porosidade.

Por fim, testou-se uma “pasta” caseira, utilizada atualmente no mercado para revestir fachadas, que é composta por partículas de quartzo e foi fornecida pela empresa Face Color. Com este material foram feitas 03 amostras que variaram sua quantidade na composição em 15g, 25g e 10g para 1g, 1,65g e 2,5 g de água, respectivamente. De modo geral, estas foram as amostras que apresentaram os melhores resultados, pois resultaram em aspectos mais homogêneos e plásticos.

Como nenhuma das amostras obtidas foi suficientemente produtiva e, visando um processo de execução mais simplificado, com custos menores, escolheu-se trabalhar com o concreto moldado em painéis perfurados, com a pretensão de uso em paredes internas e externas.

3.1.2. Concreto

Para a execução dos painéis perfurados, foi utilizado o cimento Portland CP-II E32 (produto comum no mercado de Belo Horizonte), na proporção de 100g de cimento para 300g de areia, sendo, 100% de areia média beneficiada (material quartzoso, extraído da região metropolitana de Belo Horizonte), para 160g de água. Definida, desta forma a pasta, trabalhou-se com dois tipos diferentes de concreto.

Na primeira amostra, que vamos chamar de CONCRETO/FIBRA METÁLICA, foram introduzidas fibras de aço produzidas a partir de fios de aço trefilados semelhantes a grampos (figura 22), cerca de 15,7g ou 7,9% do peso final da amostra. Estas fibras foram utilizadas para torná-las mais tenaz, favorecendo o manuseio e transporte do produto final.



Figura 22 - Fibras de aço trefilados

A outra amostra, chamada de CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA, recebeu em sua composição fibras poliméricas (figura 23), cerca de 8,5g ou 4,6% do peso da amostra, com o mesmo objetivo de aumentar da resistência mecânica do concreto.



Figura 23 - Fibras Poliméricas

Para efeitos de comparação, uma placa de MDF 15mm de espessura, material facilmente encontrado no mercado, e moldada com as mesmas dimensões e distribuição de furos em sua área, também foi testada e será identificada neste trabalho como amostra MADEIRA/MDF.

Inicialmente a modelagem dos painéis foi realizada através da confecção de uma fôrma de madeira MDF com pinos de 10mm espaçados com a mesma distância entre si, conforme figuras 24.

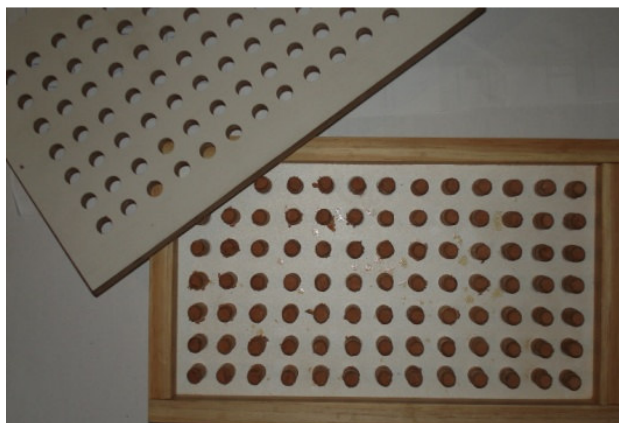


Figura 24 - Fôrma de moldagem (planta)

No entanto, para adaptar a amostra ao ensaio no tubo de impedância, houve a necessidade de utilizar uma fôrma redonda, sendo mantidas as mesmas proporções da fôrma anterior. Devido à dificuldade para desenformar a primeira amostra, optou-se por outra, também confeccionada com madeira MDF que fosse desmontável (figura 25).



Figura 25 - Fôrma em MDF desmontável

Tanto nos ensaios com a CONCRETO/FIBRA METÁLICA, quanto nos ensaios com a CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA e a MADEIRA/MDF, foram testadas três tipos diferentes de mantas fono absorvedoras para observar qual o comportamento destas quando conjugadas com as amostras. Entre as mantas utilizadas, duas amostras foram fornecidas pela empresa Isover e uma pela empresa Trisoft.

Na tabela 3 são apresentados os valores de densidade e espessuras das mantas.

Tabela 3 - Tabelas de Mantas

| Mantas Absorvedoras (Isover/Trisoft) | | |
|---|---------------------|-----------|
| Tipos de Mantas | Densidade | Espessura |
| ISO SOUND (tecido cinza) | 40Kg/m ³ | 50mm |
| ISO SOUND Glass Fabric | 40Kg/m ³ | 50mm |
| Isosound Trisoft | 80Kg/m ³ | 40mm |

FONTE: catálogos ISOVER e TRISOFT

3.2. Métodos

O processo experimental consistiu na elaboração da composição e na confecção dos corpos-de-prova. Para isto foi necessária a execução de fôrmas em madeira, com dimensões retangulares e circulares. Estabelecidos os materiais e as composições com as mantas, iniciaram-se os ensaios de absorção acústica e de resistência mecânica.

Conforme as especificações do equipamento do Laena (Laboratórios de Ensaios Acústicos – INMETRO/RJ) definiu-se a medida do corpo-de-prova com 100mm de diâmetro e 15mm de espessura. Os furos seguiram o mesmo padrão de placas de madeira MDF existente no mercado atual, ou seja, com 10mm de diâmetro e espaçamento igual entre si, para estabelecer parâmetros de comparação dos resultados.

3.2.1. Confecção dos corpos-de-prova

A partir da definição do traço do concreto foram misturados manualmente areia e cimento até ficarem com aspecto homogêneo. Logo após, acrescentou-se água de forma lenta e gradual, dissolvendo a mistura, até que apresentasse uma boa consistência. Terminada esta fase, a mistura foi dividida em duas partes iguais, e em seguida, uma parte recebeu em sua composição aço trefilado (definindo o CONCRETO/FIBRA METÁLICA) e a outra, fibras poliméricas (CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA). Estas amostras, após a moldagem manual, seguiram para uma mesa vibratória para garantir a solidificação do material e eliminação de bolhas de ar da composição. Todos os procedimentos seguiram as prescrições estabelecidas pelo ensaio mecânico.

Todo o processo de cura ocorreu ao ar livre. Após os três primeiros dias de secagem, as fôrmas foram retiradas, processo facilitado pelo sistema desmontável das tampas e laterais, para reduzir o tempo de cura. Somente após sete dias, realizou-se a desmoldagem final (Figuras 26, 27).

O peso final das amostras foi de 197,90g para o CONCRETO/FIBRA METÁLICA e 185,90G para o CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA.



Figura 26 - CONCRETO/FIBRA METÁLICA E CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA, respectivamente

A terceira amostra, MADEIRA/MDF, facilmente encontrada no mercado, precisou apenas de ser adaptada às medidas para os testes de absorção acústica. Seu peso final foi de 66,90g.

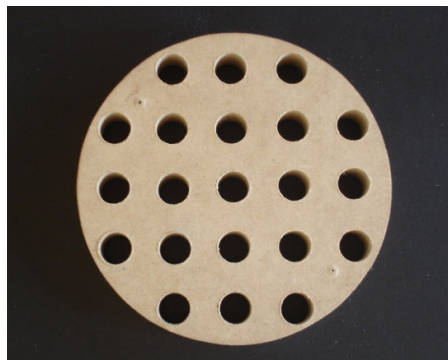


Figura 27 - MADEIRA/MDF

3.2.2. Ensaio de absorção acústica

A determinação do coeficiente de absorção por meio do ensaio no tubo de impedância (figura 28) foi realizada no Laboratório do INMETRO do Rio de Janeiro, seguindo as especificações da norma ISO 10534-2(1998), com as amostras de CONCRETO/FIBRA METÁLICA, CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA E MADEIRA/MDF. Os coeficientes de absorção foram medidos nas frequências de 100 a 1000Hz conforme a limitação das dimensões do tubo.

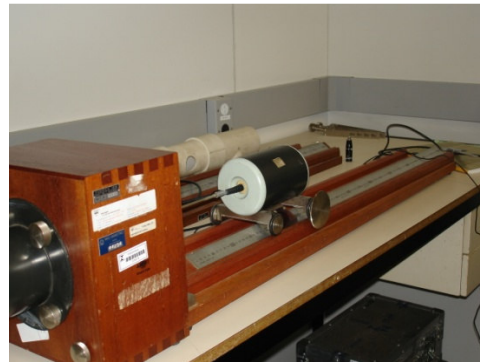


Figura 28 - Tubo de impedância – LAENA

Visando testar diferentes conjuntos absorvedores as amostras foram locadas no porta-amostra do tubo (figura 29) em quatro colocações distintas.



Figura 29 - Fixação dos discos de concreto no porta-amostras do tubo

As amostras foram fixadas ao tubo por meio de massa de modelagem que também serviram de acabamento das frestas existentes e foram testadas de forma igual em cada uma das composições abaixo especificadas:

- composição 1: disco de concreto - (figura 30(a));
- composição 2: disco de concreto + camada de ar (espessura=30mm) – (figura 30(b));
- composição 3: discos de concreto + manta absorvedora- (figura 30(c));
- composição 4: disco de concreto + camada de ar (espessura=31mm) + manta absorvedora -(figura 30(d)).

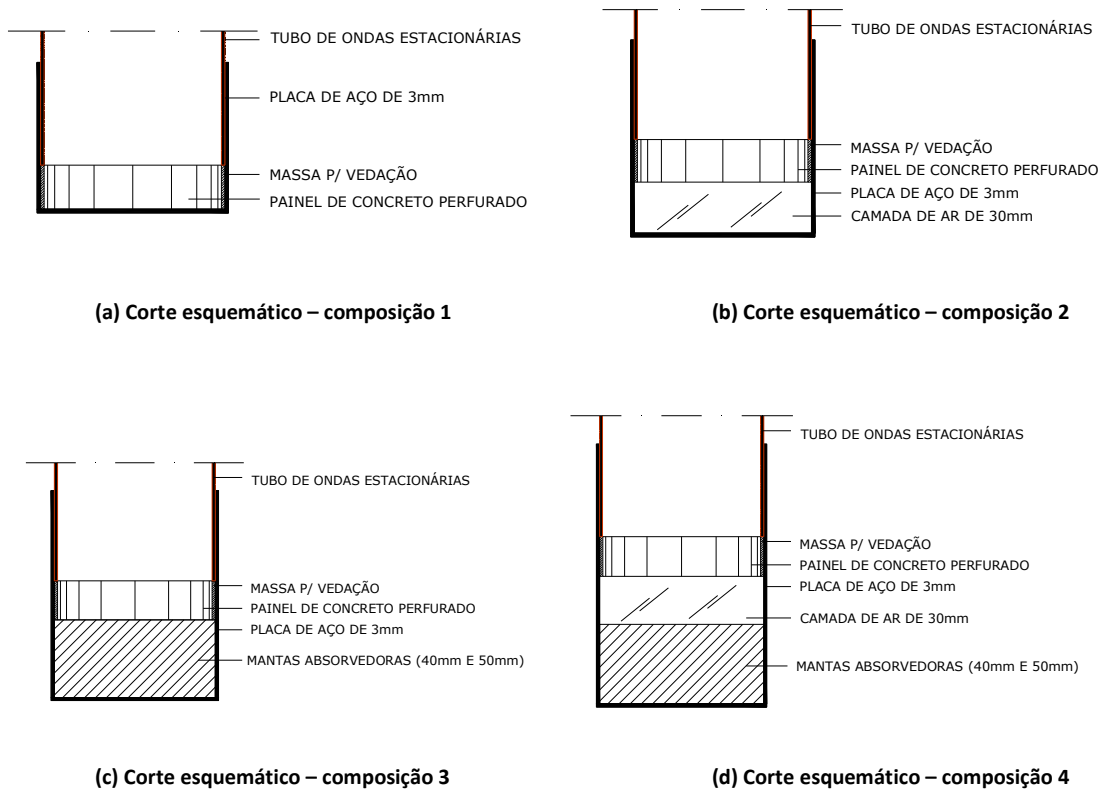
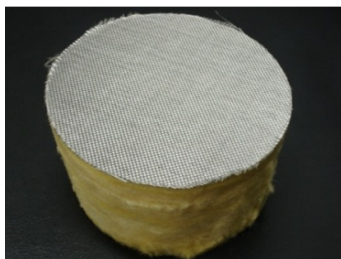


Figura 30 - Cortes esquemáticos dos conjuntos ensaiados

Além disso, no caso das composições 3 e 4 variou-se também os tipos de manta (Isosound Glass, Isosound Cinza e Trisoft), que foram adaptadas ao diâmetro interno do tubo. (Figuras 31 e 32)



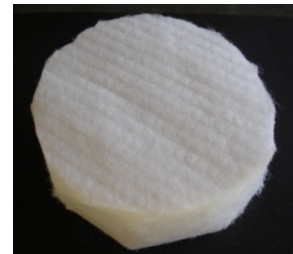
Figura 31 - Adaptação das mantas absorvedoras



(a) Isosound Cinza



(b) Isosound Glass Fabric



(c) Trisoft

Figura 32 - Mantas Absorvedoras

Os dados obtidos foram tratados através de análise computacional e de software específico, desenvolvido pelo próprio INMETRO/RJ, e foram convertidos em tabelas para análise dos resultados.

O cálculo da frequência para o valor do maior coeficiente de absorção de um material, valor da frequência de ressonância, é determinado através da equação abaixo. (BASCHUK)

$$Fre = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (20)$$

Onde:

c - Velocidade do som (cm/seg);

S – Seção do gargalo (cm²);

L – Profundidade do gargalo (cm);

V – Volume da cavidade (cm³).

Considerando que a condutividade é diretamente proporcional à seção do gargalo e inversamente proporcional à sua profundidade, assumi-se que:

$$C = \frac{S}{L} \quad (21)$$

Substituindo em:

$$F_{re} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{V}} \quad (22)$$

Temos:

$$F_{re} = 5400 \sqrt{\frac{C}{V}} \quad (23)$$

Onde:

C – Condutividade,

V – Volume do recinto (cm³).

Para o ressonador simples, com gargalo circular, temos a profundidade (L) calculada pela equação:

$$C = \frac{S}{L+0,8D} \quad (24)$$

Onde:

S – Seção do gargalo (cm²);

L – Profundidade do gargalo (cm);

D – Diâmetro do gargalo (cm).

Assim, utilizando o método acima descrito, para o painel com 1,5 cm de espessura, diâmetro do furo de 1cm, espaçamento entre os furos também de 1cm (figura 33), e considerando a camada de ar de 3cm, tem-se o valor da $F_{re} = 1257\text{Hz}$.

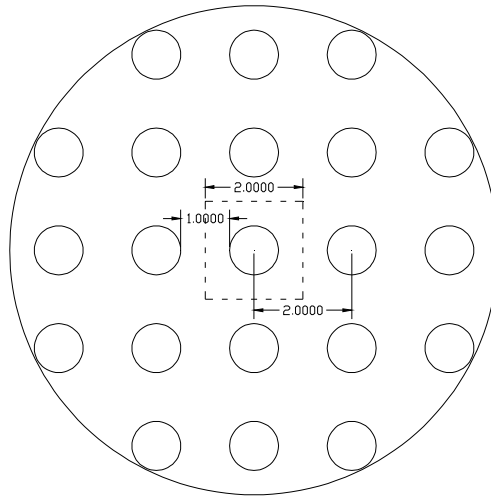


Figura 33 - Dimensionamento da amostra

Com a aplicação do material fono absorvente, ou seja, de uma manta absorvedora, a frequência de ressonância tende a ser menor. Isto também ocorre quando aumentamos a espessura da camada de ar.

Pode-se ainda calcular a frequência de ressonância pelo método do diagrama de Larris. Neste caso, utiliza-se um diagrama em que o valor da espessura do material é ligado ao valor de P , que se une ao valor da espessura da câmara de ar. P corresponde à área total de furos sobre a área total do painel em porcentagem. Através do diagrama de Larris (figura 34) a frequência de ressonância calculada foi de 1000Hz.

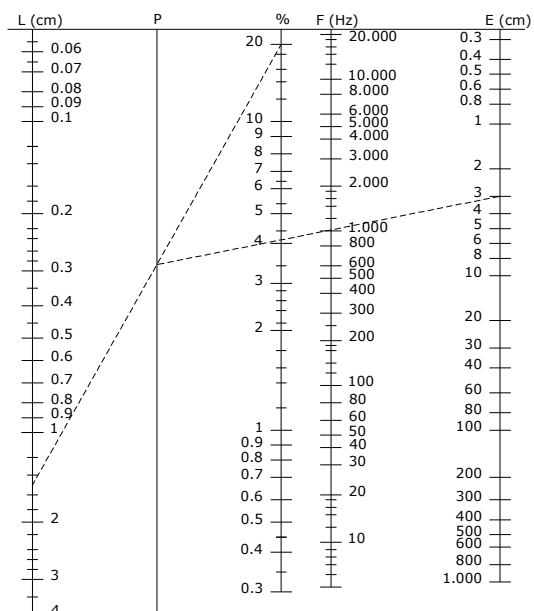


Figura 34 - Diagrama de Larris (FONTE: adaptado de BASCHUK)

3.2.3. Ensaio de flexo-tração

Os testes de flexo-tração foram realizados no laboratório do Curso de Engenharia de Construção Civil (UFMG), segundo procedimentos usuais do laboratório, uma vez que o corpo-de-prova não possuía as dimensões prescritas nas normas internacionais.

Para determinar as cargas de ruptura dos materiais, aplicou-se carregamento em três pontos de cada amostra, através de uma máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5582. (Figura 35)

Como o objetivo do trabalho é o desenvolvimento de painéis, faz-se necessário que os mesmos tenham uma resistência à flexão maior, para que possam ser utilizados.

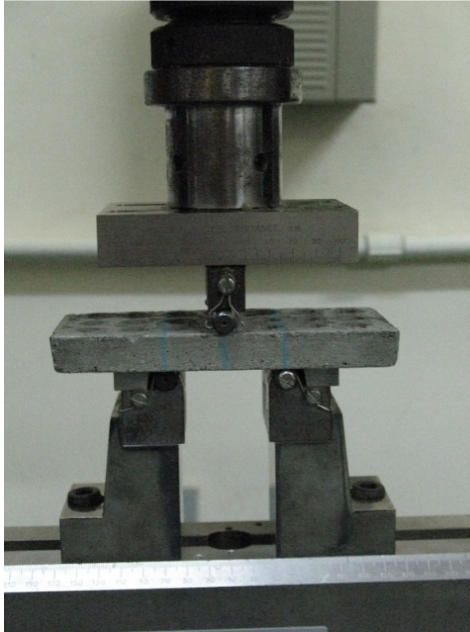


Figura 35 - Ensaio de flexo-tração realizado em uma barra do CONCRETO/FIBRA METÁLICA

Com os dados obtidos calculamos a tensão de ruptura, através da equação:

$$R = PL/bd^2 \quad (25)$$

Onde:

R – Módulo de ruptura;

P – Carga máxima indicada;

L – Comprimento do vão;

b – Largura;

d – Altura do corpo de prova.

Utilizou-se corpos-de-prova retangulares, com cerca de 60mm x 150mm de lado e 15mm de espessura para as amostras CONCRETO/FIBRA METÁLICA e MADEIRA/MDF. Para a amostra CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA usou-se corpo-de-prova quadrado de 60mm mantendo a mesma espessura (figura 36), sendo que, no caso das amostras de concreto, os ensaios aconteceram na idade entre 28 a 90 dias.



Figura 36 - Corpo-de-prova do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA

Na figura 37, mostra-se o ensaio realizado com a MADEIRA/MDF, com o intuito de relacionar as possíveis diferenças entre os materiais trabalhados.



Figura 37 - Corpo-de-prova da MADEIRA/MDF

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados a seguir os resultados dos ensaios de absorção acústica e de flexotração.

Nos dados de absorção acústica, os resultados mostram o valor obtido em cada medição para os três tipos de amostras e suas combinações, ou posições. Após esta primeira análise, faremos uma comparação entre as amostras visando estabelecer parâmetros de desempenho, tomando como base a MADEIRA/MDF existente no mercado.

4.1. Ensaio de Absorção Acústica

Baseado nas convenções para apresentação de dados do coeficiente de absorção acústica, todos os gráficos apresentarão os valores em terças de oitavas. Por meio do ensaio, obtivemos o coeficiente em todas as frequências de 100 a 1001Hz. Desta forma, para relacionarmos estes valores em terças de oitavas, tomamos o valor do coeficiente na própria frequência da terça de oitava ou na frequência mais próxima. Os gráficos também apresentam os resultados através da média aritmética das frequências de corte nos limites inferiores e superiores das 1/3 de oitavas (tabela 4).

Tabela 4 - Valores normalizados das frequências dos centros e das extremidades das 1/3 de oitavas

| BANDA DE 1/3 DE OITAVAS | | |
|--------------------------------|----------------|-------------------------|
| Limite inferior (Hz) | Centro (Hz) | Limite superior (Hz) |
| 90 | 100 | 112 |
| 112 | 125 | 141 |
| 141 | 160 | 178 |
| 178 | 200 | 225 |
| 225 | 250 | 282 |
| 282 | 315 | 355 |
| 355 | 400 | 450 |
| 450 | 500 | 560 |
| 560 | 630 | 710 |
| 710 | 800 | 890 |
| 890 | 1000 | 1120 |

Fonte: ANSI S1.11, 1996

4.1.1. Medições preliminares

De forma a verifica-se a margem de erro do tubo de impedância, mediu-se a manta Glass Fabric três vezes. Durante o intervalo de cada medição a manta foi retirada e recolocada no porta-amostras, sendo que, a última medição foi feita com a manta um pouco inclinada. Assim, podemos perceber que apesar de não serem grandes as diferenças nos valores do coeficiente, ele varia com o posicionamento da manta ou de qualquer outra amostra ensaiada (figura 38). Para que possamos ter mais segurança nos resultados, seria necessário que tivéssemos ensaiado cada uma das posições, com a variação das mantas, em um número maior de vezes. Devido à dificuldade de acesso a um equipamento e mesmo a um laboratório de ensaios acústicos e ainda considerando que nosso objetivo é metodológico, podemos trabalhar com os dados obtidos sem a necessidade de mais ensaios.

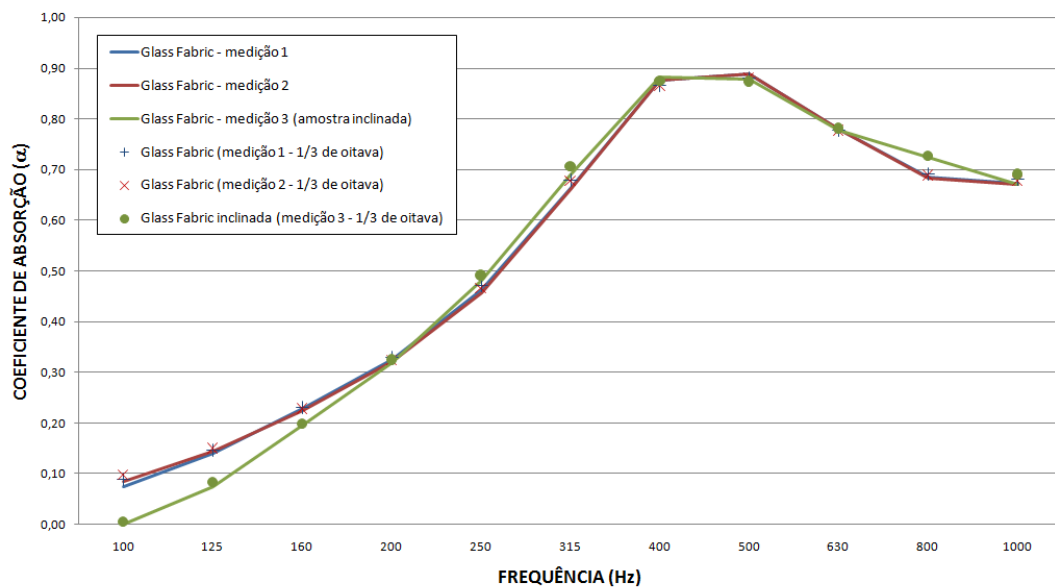


Figura 38 - Variação do coeficiente com a mudança de posição da manta Glass Fabric no porta-amostra

4.1.2. Sistema

4.1.2.1. Concreto com fibra metálica

Na figura 39 são apresentados os dados obtidos para a amostra CONCRETO/FIBRA METÁLICA em todas as posições testadas.

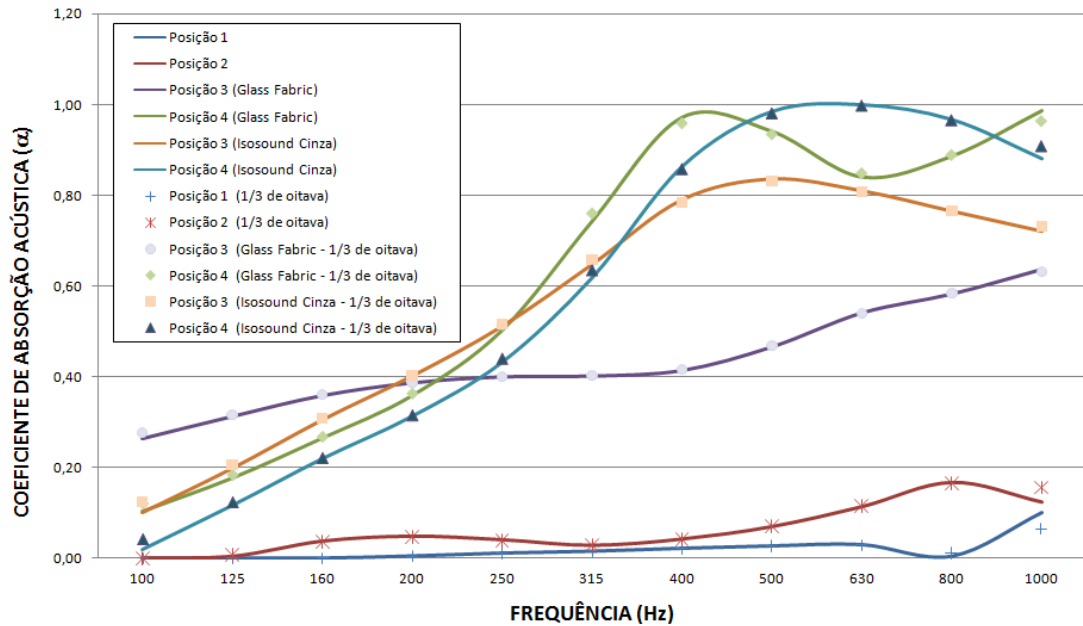


Figura 39 - Coeficiente de absorção acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA

Observa-se que os valores de absorção para a placa na posição 1, ou seja, em que somente está considerado o CONCRETO/FIBRA METÁLICA, os resultados foram os mais baixos do gráfico. Na medida em que se variou a posição e, principalmente quando usou-se a manta, os valores obtidos de α alcançaram valores mais significativos.

De forma a permitir uma análise mais profunda, serão avaliadas com maiores detalhes, as relações ilustradas na figura 39.

De acordo com a figura 40, estabeleceu-se uma comparação do comportamento da amostra na posição 1 – somente amostra – com a posição 2 – amostra acrescida de camada de ar. Em termos de resultados, este acréscimo proporcionou um aumento razoável no coeficiente de absorção nas altas frequências, com um pico na faixa de frequência de 800Hz. Conforme o

cálculo da frequência de ressonância, este pico deveria ser próximo a frequência de 1300Hz. Como o tubo não permitiu medir o coeficiente para frequências acima de 1000Hz, é difícil avaliar se este pico na frequência de 800Hz coincide com a frequência de ressonância.

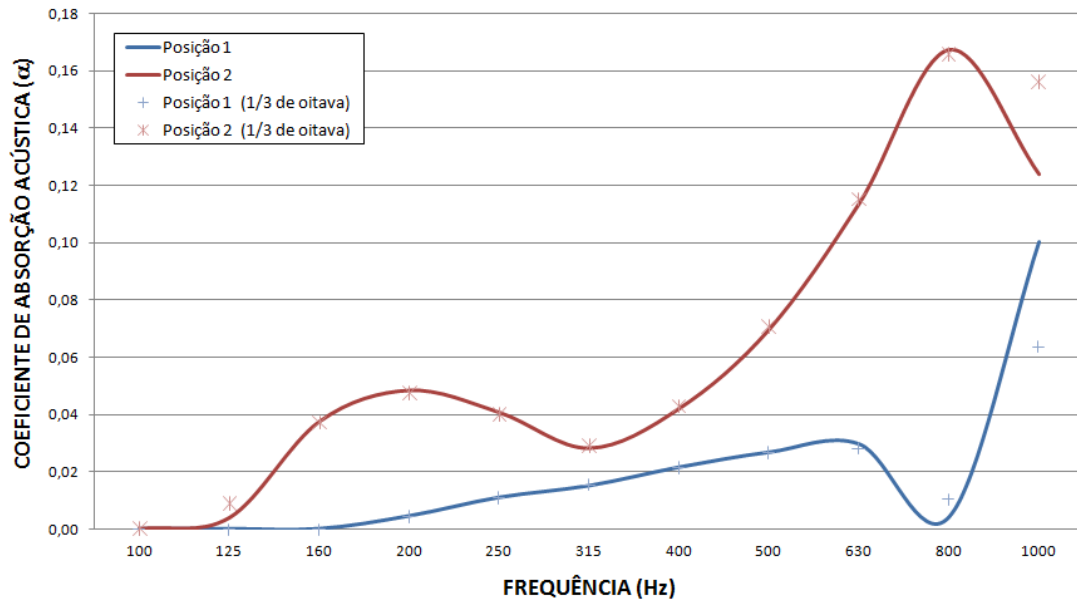


Figura 40 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA nas posições 1 e 2

Em alguns momentos, nas faixas de frequência de 315Hz e 1000Hz, a diferença entre os coeficientes resultantes diminuiu. Mesmo assim, ainda prevalecem melhor, os coeficientes medidos na posição 2.

No gráfico da figura 41 tem-se os resultados da amostra CONCRETO/FIBRA METÁLICA associada à manta Glass Fabric (posição 3) e resultados desta mesma manta acrescida da camada de ar (posição 4). Nele verifica-se que os valores maiores são resultantes na posição 4 para frequências acima de 200Hz. Na faixa de 400Hz a diferença acentua-se ainda mais, o que pode ser observado através do pico na curva desta posição (4).

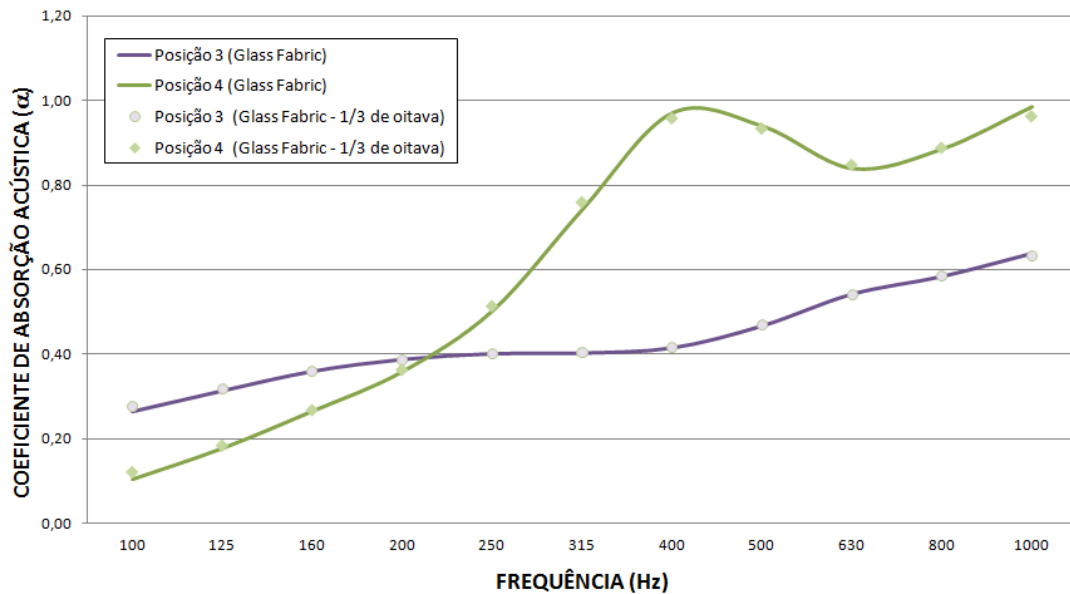


Figura 41 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA nas posições 3 e 4 utilizando a manta Glass Fabric

Sem a presença da camada de ar, os valores nas baixas frequências foram melhores, independente do tipo de manta utilizada.

As relações entre os valores de α nas posições 3 e 4 para a manta Isosound Cinza, estão demonstradas na figura 42.

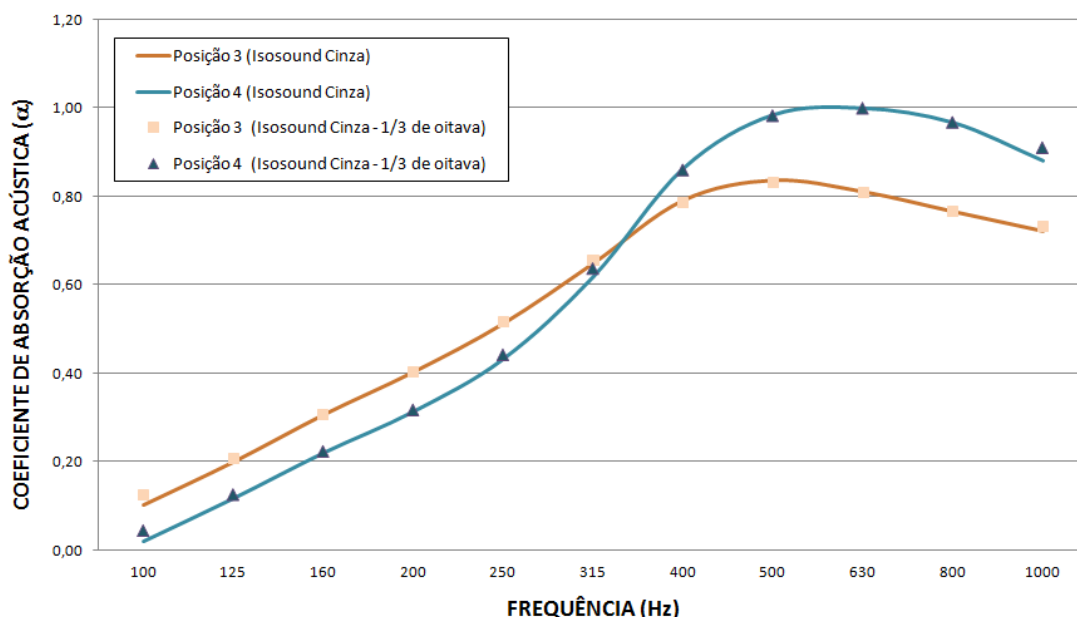


Figura 42 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA METÁLICA nas posições 3 e 4, utilizando a manta Isosound Tecido Cinza

Com a variação da manta, pode-se verificar que as diferenças de resultados entre as posições acontecem de forma reduzida, com curvas de formatos aproximados, sendo que na frequência de 315Hz, o valor do coeficiente chega a se igualar para as duas posições da amostra.

Assim como nos testes com a amostra agregada à manta Glass Fabric, a inserção da camada de ar elevou a absorção acústica na faixa de frequência de 315 a 1000Hz.

4.1.2.2. Concreto com fibra polimérica

Na figura 43 são apresentados os resultados do ensaio de absorção acústica para o concreto com a adição de polímeros em diferentes posições. Comparando-se estes dados com os da figura 40, podemos dizer que os ensaios com o CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA, resultaram em gráficos com valores próximos aos obtidos com o CONCRETO/FIBRA METÁLICA. Em ambas as amostras, o maior valor do coeficiente de absorção ocorreu na frequência de 630Hz na posição 4, quando utilizou-se a manta Isosound Tecido Cinza. Com a utilização da

manta e/ou de uma camada de ar, a frequência de ressonância tende a ser mais baixa do que a encontrada através do diagrama de Larris. Desta forma, os valores do gráfico apresentam-se dentro do esperado.

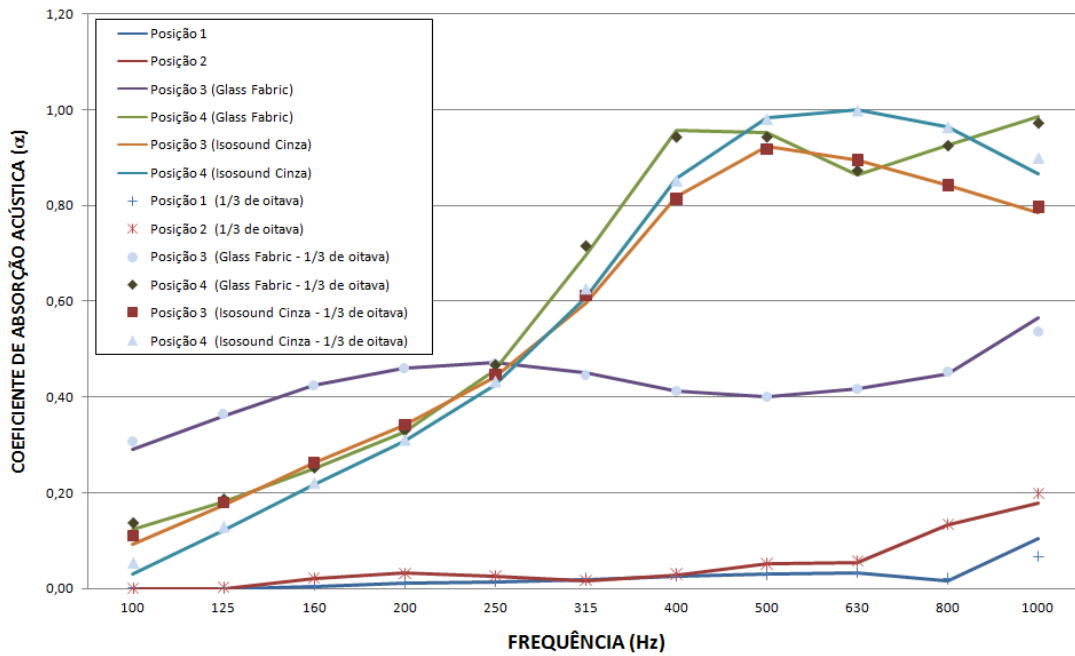


Figura 43 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA

Quando estabelecemos as mesmas comparações do item anterior, podemos notar algumas diferenças entre os gráficos do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA. Assim temos o gráfico de α nas posições 1 e 2. (Figura 44)

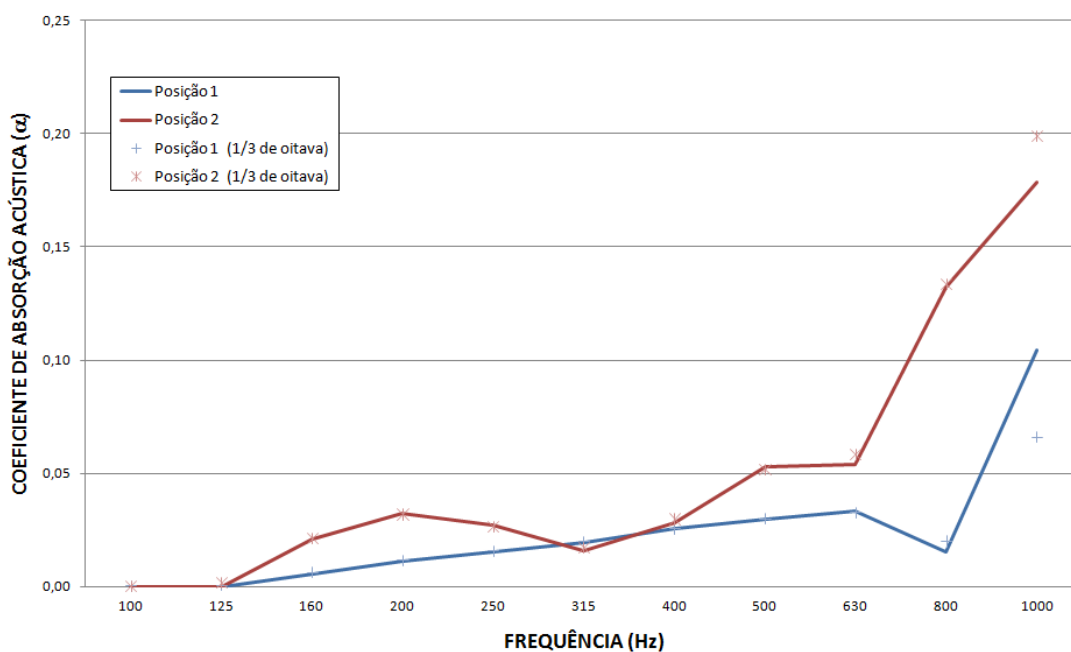


Figura 44 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA nas posições 1 e 2

Assim como nos resultados com o CONCRETO/FIBRA METÁLICA, na faixa de frequência de 315Hz houve uma diminuição da diferença entre os coeficientes. No entanto, a relação dos resultados obtidos inverteu-se da seguinte forma, enquanto a amostra CONCRETO/FIBRA METÁLICA obteve coeficientes de absorção mais elevados na posição 2, os coeficientes da CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA, na mesma posição, demonstraram-se menores. Esta alteração demonstra que, para absorver o som na faixa de frequência de 315 Hz, o acréscimo de camada de ar não favorece os resultados. Nas demais frequências, o valor de α manteve-se maior para os valores obtidos na posição 2.

Conforme demonstrado na figura 45, a absorção acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA na posição 3, foi a que sofreu menor variação dentre todas as curvas, apresentando resultados de α entre 0,30 e 0,60. Até a faixa de 250Hz, a posição 3 apresentou melhores coeficientes de absorção do que a posição 4. Acima de 250Hz, a presença da camada de ar alterou a absorção, apresentando coeficientes maiores para a posição 4.

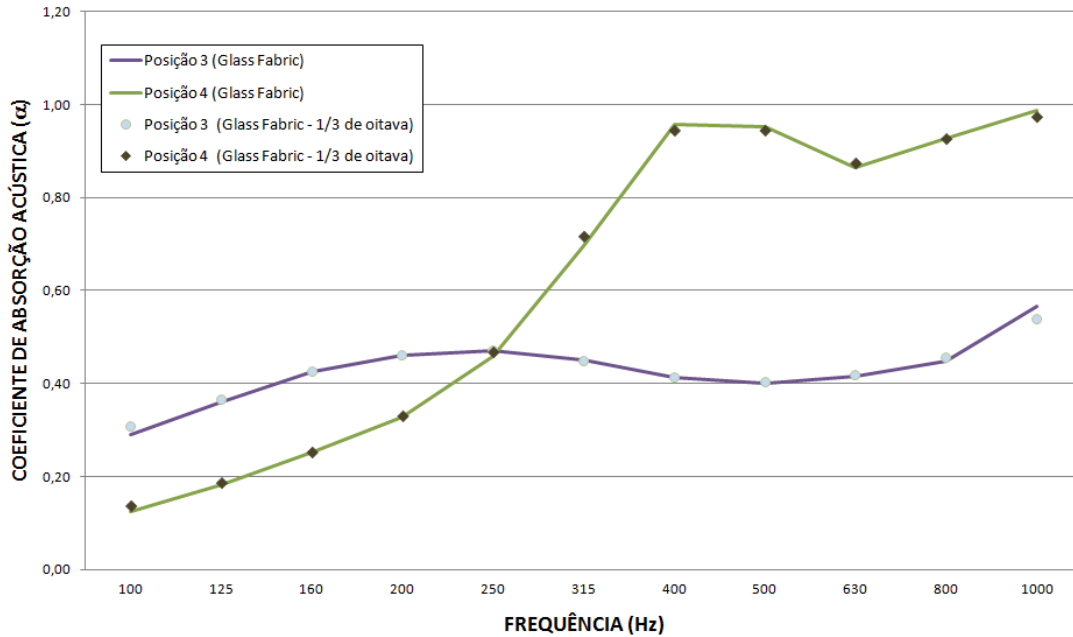


Figura 45 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA nas posições 3 E 4, utilizando a manta Glass Fabric

Como observado no CONCRETO/FIBRA METÁLICA, o CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA apresentou as mesmas características, quando acrescido da manta Isosound Cinza. Próximo à faixa de 250Hz, as duas curvas obtiveram valor igual para o coeficiente de absorção acústica.

Na figura 46, as curvas do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA para as posição 3 e 4 tiveram valores ainda mais próximos do que os obtidos com o CONCRETO/FIBRA METÁLICA. O valor do coeficiente de absorção foi o mesmo na faixa de frequência de 315Hz, onde as curvas se cruzaram.

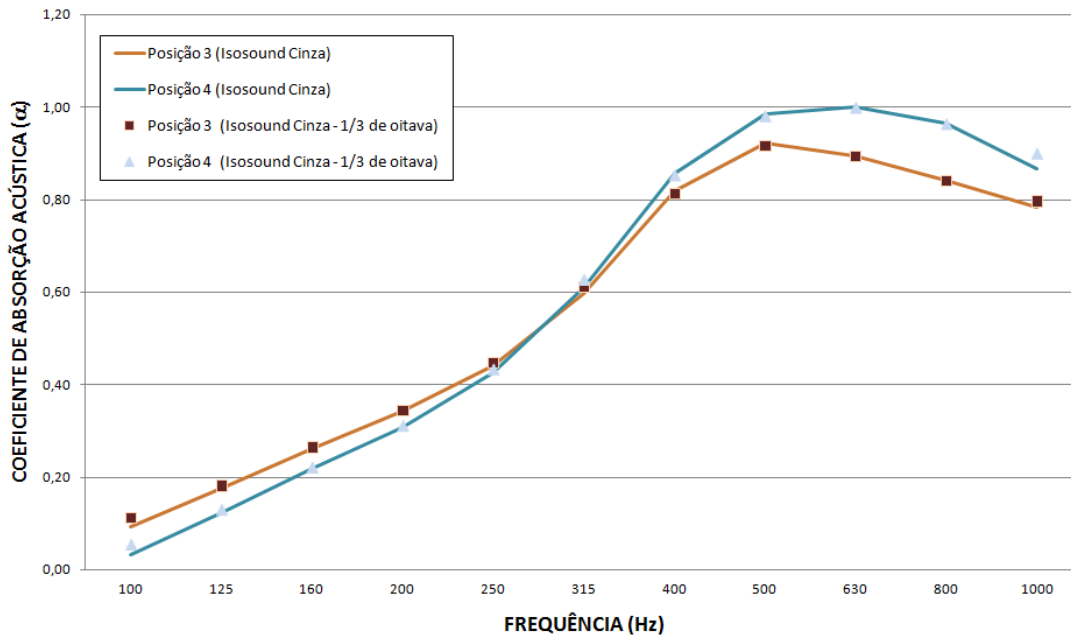


Figura 46 - Coeficiente de Absorção Acústica do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA nas posições 3 E 4, utilizando a manta Isosound Cinza

Em ambas as amostras, na posição 4, utilizando a manta Isosound Cinza, o pico da curva apresentou-se arredondado. Este efeito, segundo o autor BASCHUK, é consequência do acréscimo da manta.

4.1.2.3. Madeira MDF

Nos ensaios da amostra MADEIRA/MDF considerou-se somente duas posições, uma vez que não foi possível o estudo de todas por problemas experimentais.

Analisando a figura 47, na posição 1, o valor de α foi maior na frequência de 1000Hz. No conjunto AMOSTRA + MANTA, os valores do coeficiente de absorção são bem mais significativos, principalmente nas frequências mais altas.

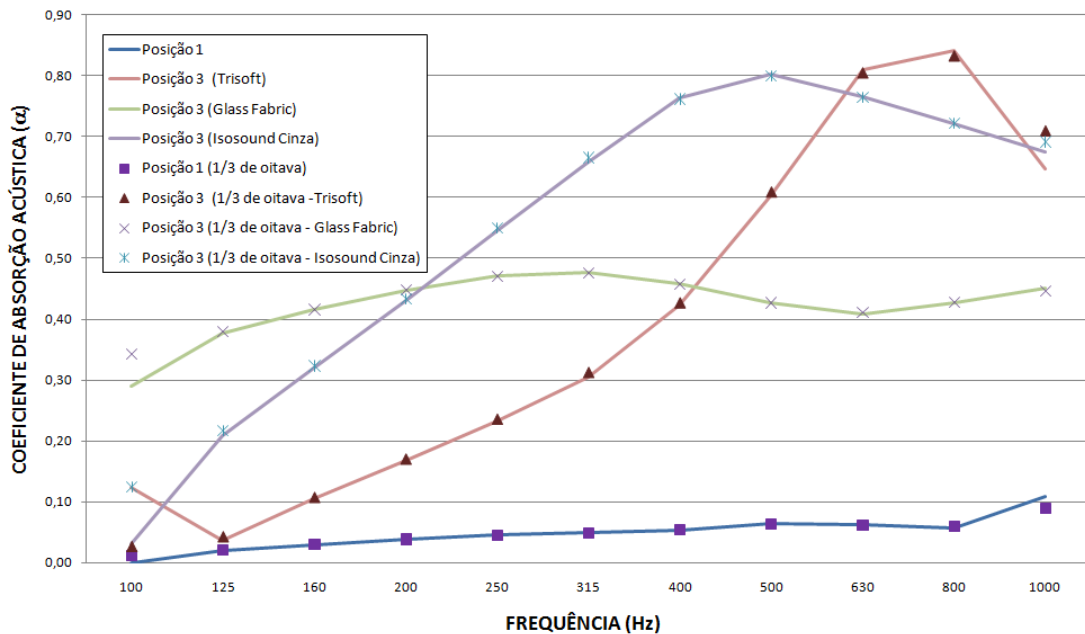


Figura 47 - Coeficiente de absorção da MADEIRA/MDF nas posições 1 e 3

Também neste ensaio foi utilizada a manta Trisoft. Se compararmos os valores das três mantas para baixas frequências, a manta Trisoft apresentou os menores resultados. Contudo, próximo à frequência de 400Hz, obteve desempenho acima da Glass Fabric. Entre as frequências de 600Hz a 980Hz, seu desempenho acústico supera o das demais. E, a 1000Hz, diminuiu seu desempenho, ficando abaixo do valor da manta Isosound Tecido Cinza.

4.1.2.4. Avaliação comparativa

Nas figuras 49, 50 e 51 são apresentados os α de cada uma das amostras, em três posições avaliadas.

Verifica-se que na posição 1 (figura 48), a MADEIRA/MDF obteve os valores de coeficiente de absorção maiores que as demais em praticamente todas as faixas de frequências. De um modo geral, as três curvas possuem o mesmo padrão. Podemos ainda destacar, a pequena variação do coeficiente para as amostras CONCRETO/FIBRA METÁLICA E CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA.

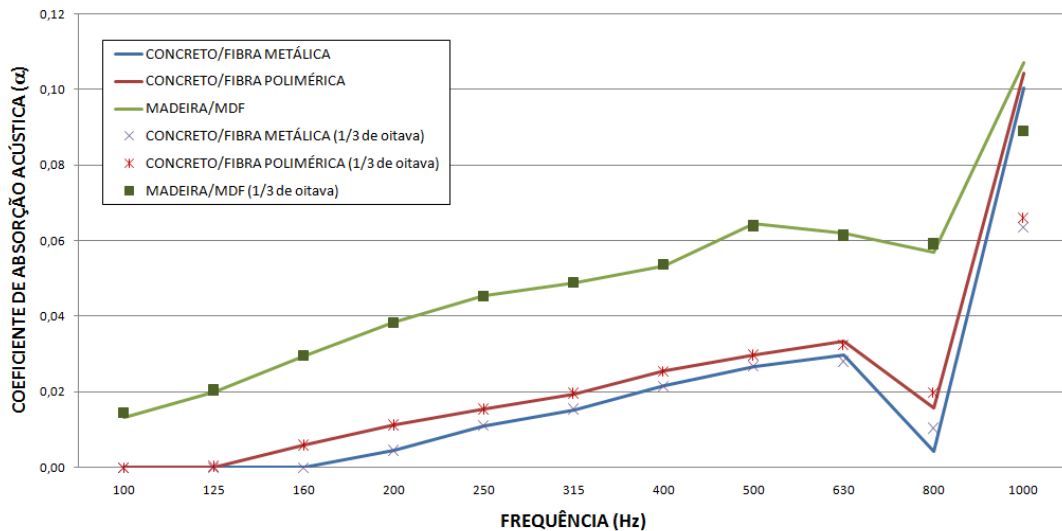


Figura 48 - O coeficiente de absorção das três amostras na posição 1

As curvas das três amostras na posição 3 (figura 49), apresentam valores para o coeficiente de absorção acústica bem variados. Até a frequência de 400Hz, o CONCRETO/FIBRA METÁLICA obteve os menores coeficientes. Acima desta frequência, seus valores ultrapassam os do CONCRETO/FIBRA METÁLICA. Já a comparação do CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA e da MADEIRA/MDF, as curvas variaram pouco, sendo que, entre as frequências 160 a 250Hz e acima de 630Hz, o CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA obteve o melhor desempenho. As curvas das amostras CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA e MDF apresentaram maior semelhança.

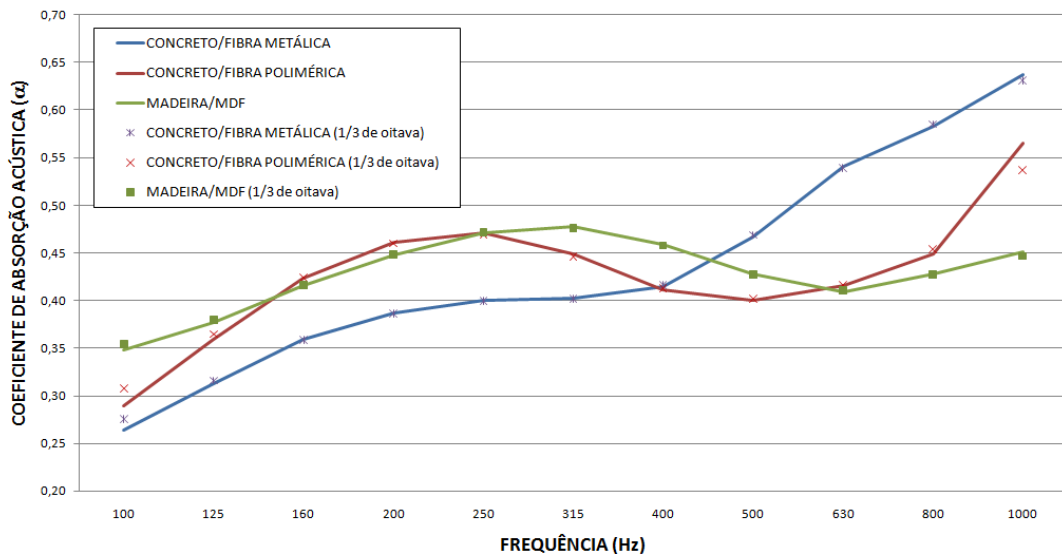


Figura 49 - O coeficiente de absorção das três amostras na posição 3 utilizando a manta Glass Fabric

O gráfico da figura 50 mostra os resultados das três amostras comparadas na posição 3, utilizando-se a manta Isosound Cinza. As curvas que nele registramos apresentam-se mais parecidas, que a situação anterior, com destaque para o CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA, que obteve os melhores coeficientes para as faixas de frequências acima de 400Hz.

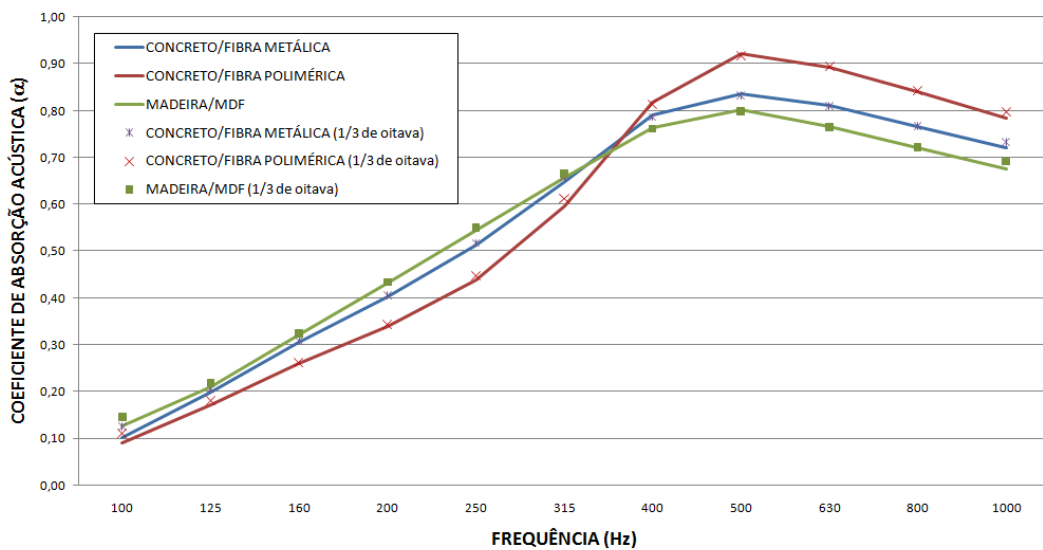


Figura 50 - O coeficiente de absorção das três amostras na posição 3, utilizando a manta Isosound Cinza

4.1.3. Sistema x material

Os valores dos coeficientes de absorção acústica dos concretos na posição 4, dentre todos os coeficientes medidos, foram os que apresentaram maior semelhança com os coeficientes da manta sem a presença de amostra. Assim, as figuras 51 e 52 comparam estes coeficientes, a fim de determinar o efeito do material sobre as mantas.

De acordo com os resultados da figura 51, o desempenho da manta Glass Fabric tornou-se melhor com a utilização de uma das amostras de concreto. Em quase todas as frequências, ambas as amostras associadas à manta, apresentaram valores de coeficiente maior que os da manta utilizada sozinha.

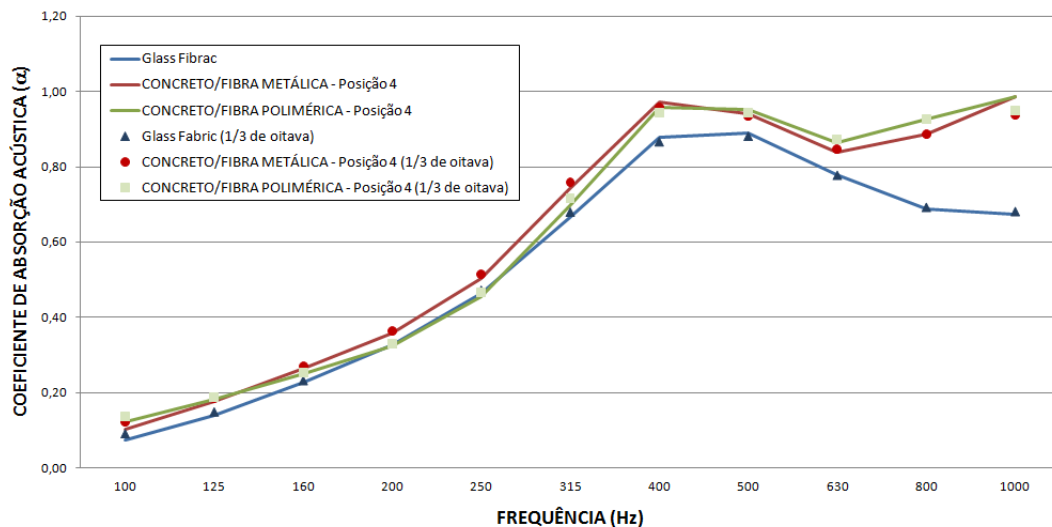


Figura 51 - Comparativo da manta Glass Fabric com as amostras na posição 4 utilizando a mesma manta

À medida que as frequências ficam mais altas, a diferença entre os coeficientes da manta sozinha e do sistema AMOSTRA+MANTA, torna-se mais evidente. Próximo à 1000Hz, os α dos sistemas, ficam próximos de 1, enquanto que a manta sozinha tem o α apenas de 0,7, para a mesma frequência.

Ao utilizar a manta Isosound Tecido cinza (figura 52), podemos perceber que os valores dos coeficientes ficaram mais próximos, mas o desempenho de absorção é melhor no sistema

AMOSTRA+MANTA que apenas da manta. O que pode ser observado uma vez que, para todas as frequências, as amostras apresentaram valores maiores de absorção.

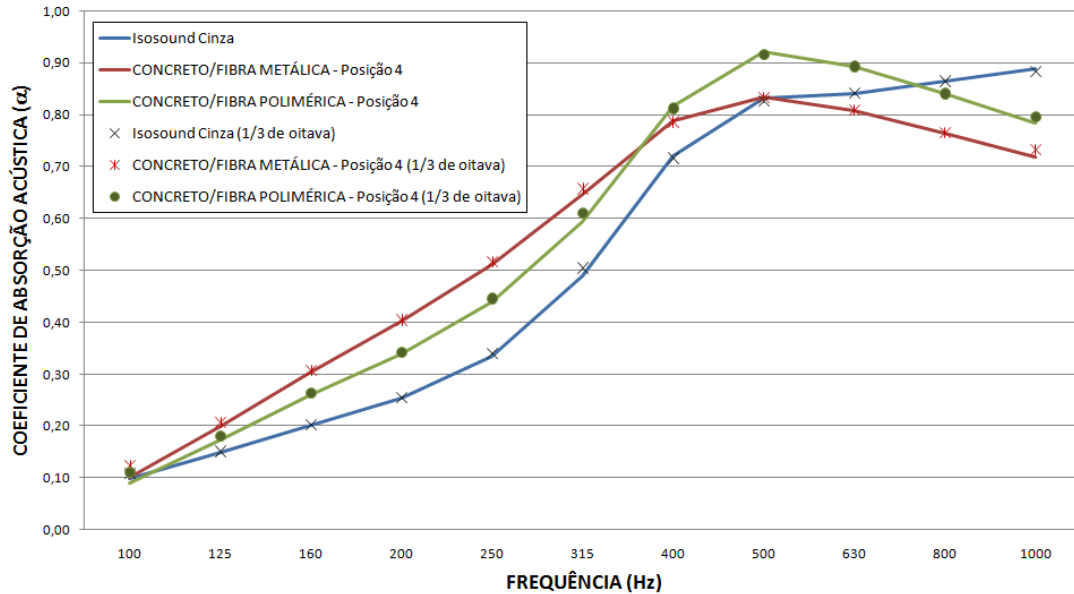


Figura 52 - Comparativo da manta Isosound Cinza com as amostras na posição 4 utilizando a mesma manta

Podemos ainda destacar que, para frequências mais baixas, onde a absorção acústica é mais difícil, a utilização das amostras de concreto melhorou o coeficiente. Até a frequência de 400Hz, o CONCRETO/FIBRA METÁLICA apresentou os melhores resultados mas, a partir desta faixa, foi superado pelo CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICO. Somente acima de 800Hz, que os coeficientes obtidos com o ensaio da manta, ultrapassou o sistema AMOSTRA+MANTA.

4.1.4. Tubo de impedância x câmara reverberante

Nas figuras 53, 54 e 55 são apresentados os coeficientes de absorção acústicos obtidos através do ensaio no tubo de impedância e os fornecidos pelos fabricantes das mantas ensaiadas.

Na comparação destes dados, é importante ressaltar que os ensaios feitos pelos fabricantes utilizaram o método da Câmara Reverberante. Isto torna possível a existência de uma

grande diferença entre estes resultados uma vez que o som absorvido em uma câmara reverberante é oriundo de um campo difuso e atinge o material ensaiado por diversos ângulos. No tubo de impedância, este som incide perpendicular ao material, podendo os resultados ser menores.

Das mantas fabricadas pela Isover foram disponibilizados o coeficiente de absorção nas frequências de 125, 250, 500 e 1000Hz. (Figuras 54 e 55)

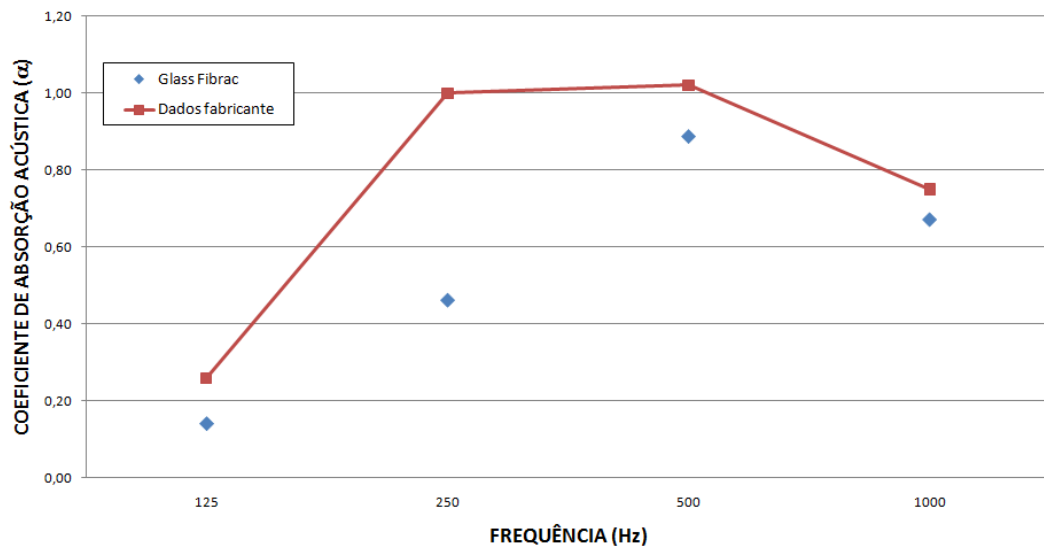


Figura 53 - Comparação dos coeficientes de absorção da manta Isosound Glass Fibrac, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante com os dados obtidos através do ensaio no tubo de impedância

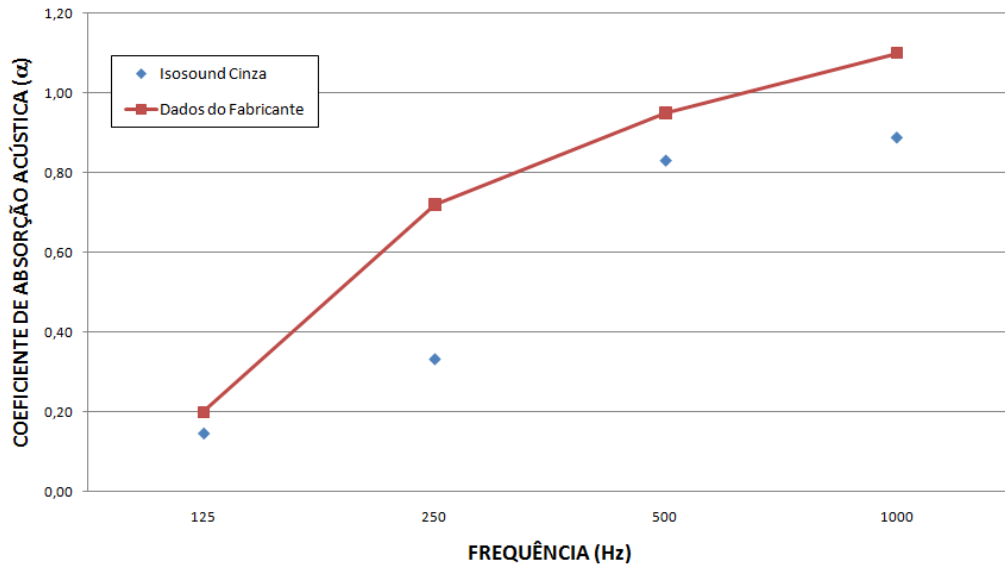


Figura 54 - Comparação dos coeficientes de absorção da manta Isosound Cinza, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante com os dados obtidos através do ensaio no tubo de impedância

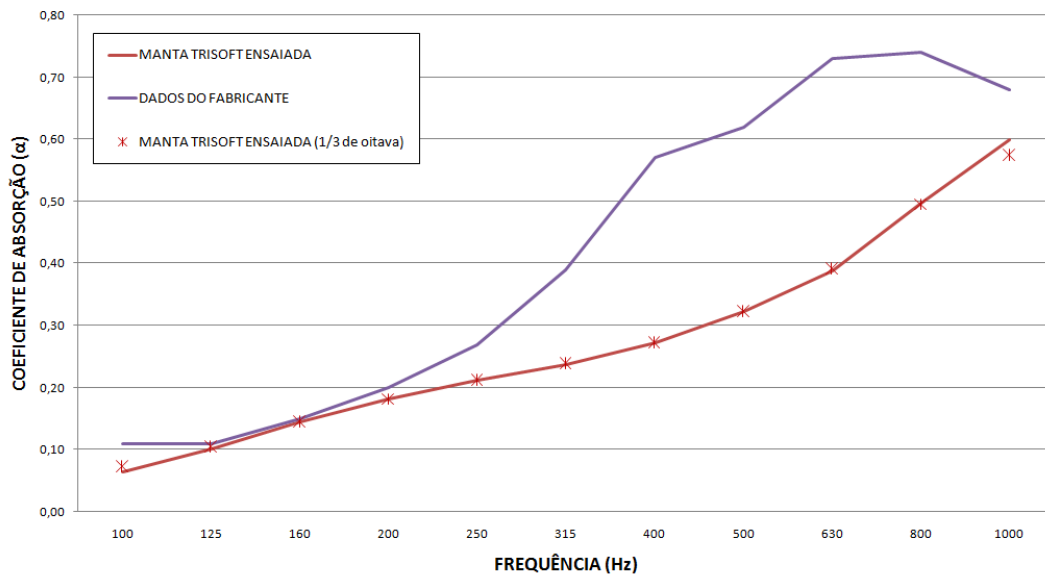


Figura 55 - Comparação dos coeficientes de absorção da manta Isosound Trisoft, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante com os dados obtidos através do ensaio no tubo de impedância

Nos três gráficos, os valores dos coeficientes resultantes do ensaio no tubo de impedância, ficaram bem abaixo dos dados fornecidos pelo fabricante, confirmando a expectativa de que estes valores poderiam ser inferiores.

4.2. Ensaio de Flexo-tração

Os dados obtidos do ensaio são apresentados na figura 56. Ressalta-se que foi realizado apenas um ensaio por amostra e, entre elas, a amostra de CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA apresentou dimensões diferentes das demais, sendo menor no comprimento.

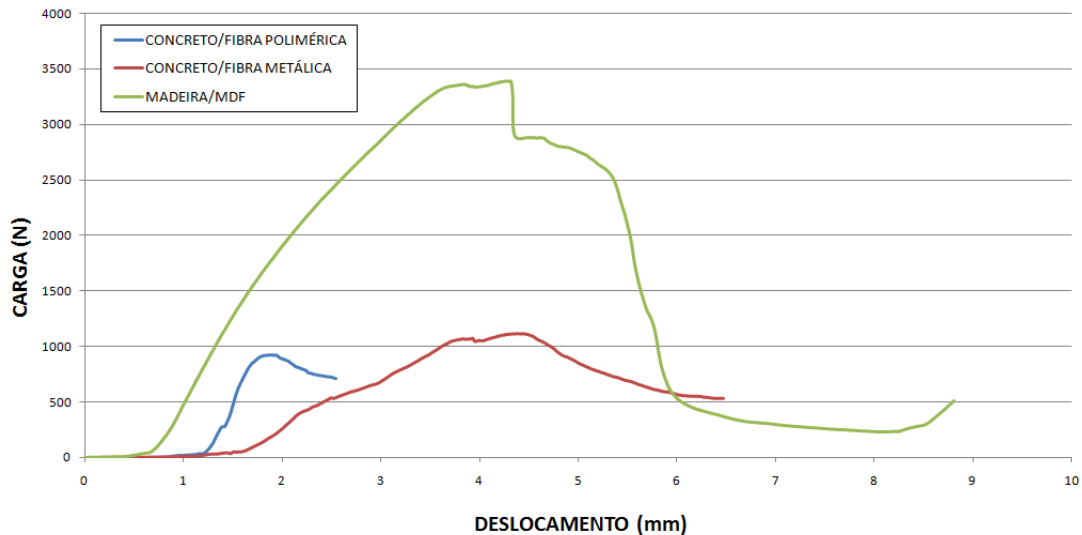


Figura 56 - Comportamento das amostras no ensaio de flexo-tração

As imagens da figura 57 ilustram o comportamento da barra CONCRETO/FIBRA METÁLICA durante e após o término do ensaio de flexo-tração. Verifica-se que, apesar da grande fissuração do concreto, o corpo-de-prova não se separa, comportamento usualmente esperado de compostos cimentícios fabricados com adição adequada de fibras metálicas. A tensão de ruptura foi de 2,59 MPa.



(a) - Detalhe da trinca no início da fissuração



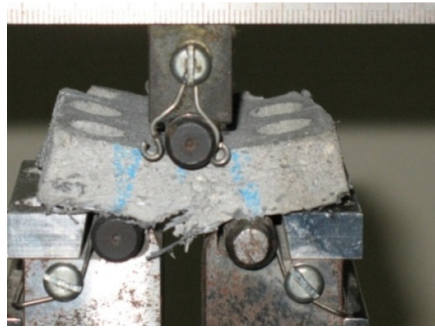
(b) - Barra fissurada ao fim do ensaio



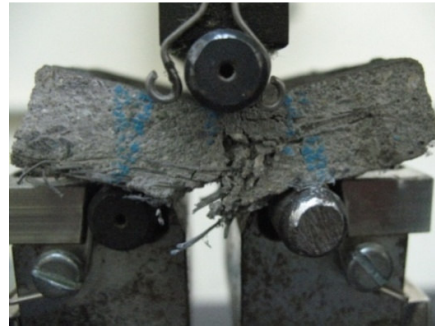
(c) - A barra não se separar com o ensaio

Figura 57 - Ensaio de flexo-tração na barra CONCRETO/FIBRA METÁLICA

No CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA (figura 58) observa-se a ruptura total do corpo-de-prova. Pela figura 58(b) podemos perceber que o rompimento ocorre principalmente devido o arrancamento ou escorregamento da fibra. Este resultado é típico de concreto reforçado com fibras poliméricas, cuja função é apenas evitar trincas de retração. O valor da tensão de ruptura pode ser considerado similar a do concreto com fibras metálicas, lembrando que as dimensões do corpo-de-prova não foram padronizadas. Esta similaridade se deve ao fato de que a resistência a flexo-tração depende apenas da matriz no caso de fibras de baixas resistências, como as utilizadas nesse estudo. (MINDESS,2002). A tensão de ruptura foi de 1,77 MPa.



(a) - Início da fissuração da amostra



(b) - Barra rompida ao fim do ensaio

Figura 58 - Ensaio de flexo-tração da barra CONCRETO/FIBRA POLIMÉRICA

No ensaio de flexo-tração da MADEIRA/MDF a barra rompeu completamente (figura 59). As fibras da madeira são fissuradas até o limite de ruptura, momento em que o corpo-de-prova se divide em dois. O valor da tensão de ruptura do MDF (7,79 MPa) é bem superior ao do concreto. Este resultado está dentro da normalidade uma vez que o MDF é considerado um material com desempenho satisfatório na flexo-tração. (INO, 2007)



(a) - Início da fissuração da amostra



(b) - Rompimento da barra ao fim do ensaio

Figura 59 - Ensaio de flexo-tração para barra MADEIRA/MDF

É importante ressaltar que, embora os mini-painéis de concretos tenham menor resistência à flexão, esta resistência é suficiente para a função de revestimento. Além disto, o concreto apresenta vantagens em relação à madeira. A primeira que podemos citar é quanto ao uso,

sua aplicabilidade não fica restrita apenas em uso interno, podendo ser igualmente utilizado em ambientes externos. Outro fator importante é que o concreto tem maior tempo de vida útil que a MADEIRA/MDF e pode assumir cores diversas, o que é uma característica esteticamente favorável, principalmente por proporcionar versatilidade de uso conforme o ambiente em questão. Além disso, a moldagem de placas de concreto perfuradas é um processo menos dispendioso que o de perfuração de todo um painel de madeira.

5. CONCLUSÕES

Com base nos ensaios de absorção acústica, pode-se concluir que a utilização do método de ensaio do tubo de ondas estacionárias viabilizou a obtenção dos coeficientes de absorção de forma mais rápida e precisa.

Em relação aos resultados, existe pouca diferença do coeficiente de absorção do concreto quando se utiliza fibras metálicas e fibras poliméricas. A camada de ar, bem como a colocação de mantas, demonstra melhoras consideráveis na absorção acústica do sistema.

Comparando-se o desempenho acústico dos materiais testados sem a utilização de mantas absorvedoras, verifica-se que os resultados com a amostra de madeira foram melhores. Contudo, com a inclusão das mantas absorvedoras e da camada de ar, os concretos passaram a ter coeficientes mais altos do que a madeira para as baixas frequências.

A conjugação da amostra de concreto com a manta absorvedora apresentou coeficientes de absorção acústica, nas baixas frequências, maiores do que a manta utilizada sozinha.

Considerando o ensaio de flexo-tração, o corpo-de-prova de concreto com adição de fibras metálicas apresentou grande fissuração, entretanto, não se separou, comportamento usualmente esperado de compostos cimentícios fabricados com adição adequada de fibras metálicas. Pode-se verificar ainda que, os mini-painéis de concreto tiveram resistência à flexão menor que o da madeira MDF, contudo esta resistência é suficiente para a função de revestimento.

A utilização do concreto para revestimento acústico em substituição às placas de madeira em MDF se revelou uma alternativa viável, uma vez que a madeira possui restrições quanto ao seu uso e quanto a suas características estéticas. Além disso, o concreto pode ser trabalhando tanto em relação a sua cor, quanto a sua porosidade. Sua moldagem em painéis é um processo menos dispendioso que o de perfuração de todo um painel de madeira. Por fim os concretos apresentam maior durabilidade que a madeira MDF, principalmente quando empregado em ambientes externos ou como barreiras acústicas.

Juntamente com a manta fono-absorvedora de poliéster reciclado, os concretos apresentaram resultados satisfatórios quanto ao coeficiente de absorção. Sendo uma opção

para utilização como barreiras acústicas em túneis com passagem de veículos. A manta, obtida a partir da reciclagem de garrafas de plástico é um material que tem resistência a intempéries significativamente melhor que as mantas de lã de vidro, viabilizando o emprego do conjunto, concreto mais manta de poliéster.

6. PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS

- Realização de ensaios em câmara reverberante para medir o coeficiente de absorção em um campo difuso.
- Desenvolver processo de fabricação.
- Finalizar o produto de forma a gerar novo painel de revestimento acústico para o mercado, estabelecendo métodos de produção em série de forma viável economicamente.
- Aplicar amostra em uma edificação e medir o desempenho acústico do painel de revestimento em ambientes internos e externos.
- Aplicar amostra do painel de concreto com a manta de poliéster em túneis.
- Variar os painéis em relação à cor e a estética do concreto (liso ou poroso) e avaliar suas características.

7. BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). ANSI S1.11-2004: Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters. 1966.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C423: Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM A795 / A795M - 08 Standard Specification for Black and Hot-Dipped Zinc-Coated (Galvanized) Welded and Seamless Steel Pipe for Fire Protection Use.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738/2003** – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:301.03 - Comissão de Estudo de Ensaio Físicos para Concreto Fresco, Rio de Janeiro, 2003a.
- BASCHUK, Bernardo J.; DI MARCO, Silvia. **Manual de Acústica para Arquitectos**. Buenos Aires: Espacio Editora.
- BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. Vol 1. 5ª Ed Revisada. Rio de Janeiro: LCT - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2005 471p.
- BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. Vol 2. 5ª Ed Revisada. Rio de Janeiro: LCT - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2005 471p.
- BERANEK, Leo L.; VÉR, István L. **Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications**. 2nd ed. Wiley, 2005. 976p. ISBN10 0471449423.
- BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruídos**. Edgard Blucher, 2006. 380p. ISBN8521203764.
- CAVANAUGH, William J.; WILKES, Joseph A. **Architectural Acoustics: Principles and Practice**. Wiley, 1998. 352p. ISBN10 0471306827.

- EGAN, David M. **Architectural acoustics**. New York: McGraw-Hill, 1988. 411p. ISBN 0070191115.
- GERGES, Samir N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2ed. [Florianópolis]: S. N. Y. Gerges, 2000. 600p. ISBN 8590004601X (broch).
- HARRIS, Cyril M. **Handbook of Acoustical Measurements & Noise Control**. American Institute of Physics, 1998. 1049p. ISBN10 1563967740.
- HARRIS, Cyril M. **Noise Control in Buildings: A Guide for Architects and Engineers**. McGraw-Hill, 1993. 416p. ISBN10 0070268876.
- INO, A.; LAVERDE, A. e ROCCOLAHN, F. A. Madeiras para Acabamentos. In ISAIA, G. C. **Materias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. IBRACON, 2007. 2v. ISBN: 9788598576183.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10534**: Acoustics: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 1: Method using standing wave ratio. Genève, Switzerland, 1996. 23p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10534**: Acoustics: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 2: Transfer-function method. Genève, Switzerland, 1998. 21p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 354**: Acoustics: Measurement of sound absorption in a reverberation room. Genève, Switzerland, 2003. 21p.
- KINSLER, Lawrence E et al. **Fundamentals of acoustics**. 4rd ed. New York: John Wiley, c1999. 560p. ISBN 0471847895 (enc.).
- KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. 4rd ed. Taylor & Francis, 2000. 352p. ISBN10 0419245804.
- LONG, Marshall. **Architectural Acoustics (Applications of Modern Acoustics)**. Academic Press, 2005. 872p. ISBN10 0124555519.

- MEHTA, Madan; JOHNSON, J. A.; ROCAFORT, Jorge. **Architectural acoustics : principles and design**. New Jersey: Prentice-Hall, 1999. 446p. ISBN 013793754.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p. ISBN: 85-7266-040-2.
- MINDESS, S.; YOUNG, J.F. e DARWIN, D. **Concrete**. 2nd ed. Prentice Hall. 664p. 2002. ISBN: 0-13-064632-6.
- SCANDIUZZI, L. e ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. Pini, São Paulo, 1986.
- SOUSA, Lea Cristina. L.; ALMEIDA, Manuela G.; BRAGANÇA, Luís. **Beabá da Acústica**. Ediouro, 2007. 147p.
- VÉR, I.; HOLMER, C. **Interaction of Sound Waves with Solid Structures**. New York: McGraw-Hill Book Co, 1971.
- VÉR, I.; BERANEK, L. **Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications, Ch 9 – Interaction of Sound Waves with Solid Structures**. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- <http://www.isover.com.br/isover/default.asp>. Acesso em 06/04/2009.
- http://www.trisoft.com.br/site_portugues/site_nonwovens. Acesso em 06/04/2009.