

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE
MATERIAIS ABSORVEDORES EM
MULTICAMADAS

Caio Vasconcellos Sabido Gomes

Orientador: Max de Castro Magalhães

Belo Horizonte

2015

G633c Gomes, Caio Vasconcellos Sabido.
Comportamento acústico de materiais absorvedores em multicamadas
[manuscrito] / Caio Vasconcellos Sabido Gomes. – 2015.
xiii, 183 f., enc.: il.

Orientador: Max de Castro Magalhães.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 117-183.

Bibliografia: f. 111-116.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Controle de ruído - Teses.
3. Absorção do som - Teses. 4. Acústica. I. Magalhães, Max de Castro.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 624(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE MATERIAIS
ABSORVEDORES EM MULTICAMADAS"**

Caio Vasconcellos Sabido Gomes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Max de Castro Magalhães
DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros
DEMEC-UFMG

Profª. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli
UNICAMP

Belo Horizonte, 25 de agosto de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, Professor Max, pela suporte, disponibilidade, interesse e dedicação.

Aos meus pais, Silvio e Esther, pelo amor, carinho, incentivo e por acreditarem com convicção em meu trabalho e sempre além daquilo que me considero capaz.

Aos meus irmãos, Diogo e Gabriel, pelo incentivo e apoio em todas as decisões.

Ao Leandro França pela confiança, compreensão, incentivo e por ter sido suporte nos momentos de fraqueza.

À Ares Arquitetura pelo companheirismo, profissionalismo e forte amizade.

À Leila Alvim, fiel companheira de estudos e incentivos para a entrada na pós-graduação, pelas jornadas de trabalho no campus, caronas, almoços e amizade.

Ao Vinnicius Pizzol pelo suporte e estímulo ao longo do curso do mestrado.

À Márcia França pela boa vontade e ajuda com a revisão.

A todos os grandes amigos que foram compreensivos com a minha ausência durante este período.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG pela infraestrutura e concretização desta pesquisa.

Ao órgão de fomento à pesquisa FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos e pelo financiamento da pesquisa.

A todos que de alguma forma fizeram parte desta caminhada o meu muito obrigado.

RESUMO

Problemas que causam a falta de adequação sonora em recintos têm sido uma constante preocupação nos dias de hoje. O incômodo provocado pelo excesso de ruído em ambientes pode ser minimizado através da capacidade de absorção sonora dos materiais que o revestem. Nesta pesquisa, as principais propriedades acústicas dos materiais em multicamadas foram determinadas experimentalmente através do tubo de impedância. O método da matriz de transferência, segundo os métodos teóricos de Delany-Bazley e Allard-Champoux, foram implementado no *software* Matlab. Neste contexto, a formulação do modelo teórico foi aplicada para as combinações de materiais em que os ensaios experimentais foram realizados, de forma a comparar os resultados obtidos. Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: espuma de poliuretano, espuma de polietileno, cortiça e fibra de coco. Foram efetuados 64 ensaios utilizando o tubo de impedância em conformidade com a Norma Internacional ASTM E 1050 – 98 para medição das propriedades acústicas. A análise e interpretação dos resultados experimentais foram capazes de diagnosticar que, em valores globais, para todas as faixas de frequência, as espumas apresentam o melhor desempenho, a espuma de polietileno coeficientes globais baixos com picos aleatórios de maior absorção sonora, a fibra de coco demonstrou resultados relevantes em dupla camada e a cortiça o pior desempenho como material absorvedor. Ensaios realizados em sistemas compostos por multicamadas identificaram a relação da absorção sonora com o aumento da espessura e com o posicionamento de cada material no sistema. O método teórico de Delany-Bazley não representa bem os desempenhos da espuma de polietileno e cortiça, mas representa valores significativos quando em sistemas de duas ou três camadas principalmente com relação ao posicionamento das amostras, o método de Allard-Champoux apresenta resultados similares ao de Delany-Bazley para a maioria dos sistemas em que ele foi aplicado.

Palavras-chave: Absorção Sonora, Sistemas Multicamadas, Método da Matriz de Transferência, Materiais Absorvedores.

ABSTRACT

Nowadays problems that causes a lack of sound adjustment in enclosures has been a constant concern. The discomfort caused by noise in enclosures can be minimized through the sound absorption capacity of the lining materials. In this research, the main acoustic properties of multilayer materials were experimentally determined through the impedance tube. The matrix transfer method, according to the theoretical methods Delany-Bazley and Allard-Champoux, was implemented in Matlab software. In this context, the formulation of the theoretical model was used for the combinations of materials in which the experimental tests were performed, in order to compare the results. The materials used in this research were: polyurethane foam, polystyrene foam, cork and coconut fiber. 64 tests were performed using the impedance tube according to the International Standard ASTM E 1050-98 to measure the acoustic properties. The analysis and interpretation of experimental results has enabled to diagnose that in overall values for all frequency bands, foams have better performance, coconut fiber results sometimes are close to the foams ones and cork has the worst performance as an absorbing material. Tests made on systems composed by multilayer have identified the goals of the increase of thickness and the importance the importance of the variation of the acoustics properties according to the positioning of each material in the system. The theoretical model of Delany-Bazley did not represent the performances of the polyethylene foam and cork, representative values are shown for systems composed by two or three layers, especially relating to the used material and positioning of the samples. The Allard-Champoux method shows results similar to Delany-Bazley for most systems it has been applied.

Keywords: Sound Absorption, Multilayered Systems, Transfer Matrix Method, Absorbing Materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação de um sistema massa-mola-amortecedor.....	24
Figura 2.2 Impedância equivalente de massa, rigidez e amortecimento.....	25
Figura 2.3 Detalhe esquemático dos possíveis posicionamentos dos microfones: microfone 1 pode ser trocado de posição com o microfone 2.....	29
Figura 2.4 Estrutura celular da cortiça vista no plano tangencial (a) e no plano transversal (b).	34
Figura 2.5 Fotomicrografia da fibra de coco obtida através da microscopia eletrônica de varredura.....	35
Figura 2.6 Configuração de colocação da amostra para ensaio: longitudinal (a) e transversal (b).....	37
Figura 3.1 Geometria para o modelo de matriz de transferência de um material absorvedor em multicamada.....	45
Figura 3.2 Configuração do tubo de impedância para Ensaio 1.....	48
Figura 3.3 Configuração do tubo de impedância para Ensaio 2.....	48
Figura 3.4 Segmentações do tubo de impedância.....	49
Figura 3.5 Configuração do tubo de impedância para Ensaio 1 com equipamentos, relacionada à montagem segundo a ASTM E 1050-98.....	50
Figura 3.6 Propriedades do Material 1 – Espuma de poliuretano.....	52
Figura 3.7 Configuração do tubo de impedância para ensaio da resistividade ao fluxo – Ensaio 1. Medições no nível de pressão sonora realizadas antes do posicionamento da amostra e próximo à terminação rígida, pontos 1 e 2 respectivamente.....	54
Figura 3.8 Ensaio composto pelos materiais A, B e C – Nomenclatura dada para a ordem de colocação de materiais no tubo de impedância para ensaio. Sendo A o mais externo e o C o material mais interno ao tubo, encostado na parede rígida.....	59
Figura 4.1 Tubo de Impedância sem amostra, Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.....	64
Figura 4.2 Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 1 e média aritmética das três.....	65
Figura 4.3 Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material1.....	66

Figura 4.4 Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 2 e média aritmética das três.....	67
Figura 4.5 Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 2.....	68
Figura 4.6 Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 3 e média aritmética das três.....	68
Figura 4.7 Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 3.....	69
Figura 4.8 Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 4 e média aritmética das três.....	70
Figura 4.9 Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 4.....	70
Figura 4.10 Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 5 e a média aritmética entre das três.....	71
Figura 4.11 Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 4.....	72
Figura 4.12 Impedância Superficial Normalizada para o Material 1 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).....	73
Figura 4.13 Impedância Superficial Normalizada para o Material 4 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).....	73
Figura 4.14 Impedância Superficial Normalizada para o Material 5 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).....	74
Figura 4.15 Impedância Superficial Normalizada para o Material 2 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).....	74
Figura 4.16 Impedância Superficial Normalizada para o Material 3 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).....	75
Figura 4.17 Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 1.....	76
Figura 4.18 Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 1.....	77
Figura 4.19 Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 2.....	78
Figura 4.20 Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 2.....	79
Figura 4.21 Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 3.....	80
Figura 4.22 Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 3.....	80
Figura 4.23 Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 4.....	81

Figura 4.24 Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 4.....	82
Figura 4.25 Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 5.....	82
Figura 4.26 Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 5.....	83
Figura 4.27 Dupla camada composta por duas amostras do Material 1, aumento de espessura do sistema.	84
Figura 4.28 Dupla camada composta por duas amostras do Material 2, aumento de espessura do sistema.	85
Figura 4.29 Dupla camada composta por duas amostras do Material 3, aumento de espessura do sistema.	86
Figura 4.30 Dupla camada composta por duas amostras do Material 4, aumento de espessura do sistema.	87
Figura 4.31 Dupla camada composta por duas amostras do Material 5, aumento de espessura do sistema.	87
Figura 4.32 Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 2.....	89
Figura 4.33 Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 3.....	90
Figura 4.34 Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 4.....	91
Figura 4.35 Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 5.....	92
Figura 4.36 Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 2 e 3....	92
Figura 4.37 Materiais 1 e 1 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	93
Figura 4.38 Materiais 1 e 1 – Impedância Superficial Normalizada teórica.....	94
Figura 4.39 Materiais 1 e 2 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	94
Figura 4.40 Materiais 1 e 2 – Impedância Superficial Normalizada teórica.....	95
Figura 4.41 Materiais 2 e 1 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	95
Figura 4.42 Materiais 2 e 1 – Impedância Superficial Normalizada teórica.....	96
Figura 4.43 Materiais 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	96
Figura 4.44 Materiais 1 e 5 – Impedância Superficial Normalizada teórica.....	97
Figura 4.45 Materiais 5 e 1 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	97
Figura 4.46 Materiais 5 e 1 – Impedância Superficial Normalizada teórica.....	98
Figura 4.47 Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com a camada mais externa representada pela Material 1.....	100

Figura 4.48 Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com camada mais externa preenchida pela Material 2.....	100
Figura 4.49 Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com camada mais externa preenchida pela Material 3.....	101
Figura 4.50 Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com camada mais externa preenchida pela Material 5.....	101
Figura 4.51 Materiais 1, 2 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	102
Figura 4.52 Materiais 1, 2 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	103
Figura 4.53 Materiais 1, 3 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	103
Figura 4.54 Materiais 5 e 1 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	104
Figura 4.55 Materiais 2, 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	104
Figura 4.56 Materiais 2, 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	105
Figura 4.57 Materiais 3, 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	105
Figura 4.58 Materiais 3, 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Relação de Potência da voz humana com alguns instrumentos.....	9
Tabela 2.2 Relação entre Pressão Sonora, Intensidade e Nível Sonoro.....	10
Tabela 2.3 Resistividade ao Fluxo típica de materiais acústicos.....	16
Tabela 2.4 Resistividade ao Fluxo de Superfícies.....	16
Tabela 2.5 Porosidade típica por tipo de material.....	17
Tabela 2.6 Valores para Comprimentos Característicos.....	19
Tabela 2.7 Valores para Tortuosidade.....	20
Tabela 2.8 Coeficientes de Absorção Sonora para a Lã de Vidro.....	33
Tabela 2.9 Coeficientes de Absorção Sonora para a Espuma Acústica SONEX.....	33
Tabela 2.10 Coeficiente de Redução Sonora (NRC) para Placa de Cortiça Cork do Brasil.....	34
Tabela 2.11 Propriedades da Fibra de Coco.....	36
Tabela 2.12 Relação Material – Coeficiente de Absorção.....	37
Tabela 2.13 Descrição de configuração dos sistemas utilizados nos testes experimentais.....	38
Tabela 2.14 Coeficiente de Absorção Sonora para materiais sustentáveis.....	39
Tabela 3.1 Propriedades do Material 1 – Espuma de Poliuretano.....	51
Tabela 3.2 Propriedades do Material 2 – Espuma de Polietileno.....	52
Tabela 3.3 Propriedades do Material 3 – Cortiça.....	52
Tabela 3.4 Propriedades do Material 4 – Espuma de Poliuretano.....	52
Tabela 3.5 Propriedades do Material 5 – Fibra de Coco.....	53
Tabela 3.6 Representação gráfica dos materiais para entendimento da composição de camadas dos sistemas de multicamadas.....	58
Tabela 3.7 Descritivo de ensaios para a Etapa 1 – Caracterização dos materiais.....	59
Tabela 3.8 Descritivo de ensaios para a Etapa 2 – Sistemas de 2 camadas.....	60
Tabela 3.9 Descritivo de ensaios para a Etapa 3 – Sistemas de 3 camadas.....	61
Tabela 4.1 Ensaio 1 – Valores para Resistividade ao Fluxo.....	63
Tabela 4.2 Picos de absorção sonora para as três amostras do Material 2.....	66
Tabela 4.3 Propriedades para Espuma de Poliuretano.....	76
Tabela 4.4 Propriedades para a Fibra de Coco.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

- α coeficiente de absorção sonora
- ε porosidade
- Λ comprimento característico viscoso
- Λ' comprimento característico térmico
- σ resistividade ao fluxo
- ω velocidade angular
- dB** escala decibel
- f frequência
- I** Intensidade sonora
- K_e módulo de elasticidade
- k** número de onda
- k_s tortuosidade
- r_n resistivo
- T_{60} tempo de reverberação
- W** potência sonora
- x_n reativo
- Z** impedância acústica
- z_c impedância característica
- z_s impedância superficial

SUMÁRIO

1 Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais e Relevância do Tema.....	1
1.2 Objetivos Gerais.....	3
1.3 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Contribuições do Trabalho.....	4
1.5 Organização do Trabalho.....	4
2 Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 Conceitos Básicos.....	6
2.1.1 Som e Onda Sonora.....	6
2.1.2 Intensidade Sonora.....	7
2.1.3 Potência Sonora.....	8
2.1.4 Escala Decibel.....	9
2.1.5 Frequência.....	10
2.1.6 Frequência Angular e Número de Onda.....	11
2.1.7 Coeficiente de Absorção Sonora.....	12
2.1.8 Tempo de Reverberação.....	13
2.1.9 Resistividade ao Fluxo.....	14
2.1.10 Porosidade.....	17
2.1.11 Comprimentos Característicos.....	18
2.1.12 Tortuosidade ou Fator Estrutural.....	19
2.1.13 Densidade Efetiva.....	21
2.1.14 Módulo de Elasticidade.....	21
2.1.15 Impedância Acústica.....	22
2.2 ASTM E 1050 – 98 (2006)	26
2.2.1 Dispositivo.....	27
2.2.2 Faixa de Frequência de Operação.....	27
2.2.3 Microfones.....	28
2.2.4 Amostra.....	28
2.2.5 Procedimento.....	28

2.2.6 Escolha do Método.....	31
2.3 Materiais Acústicos Absorvedores.....	32
2.3.1 Lã de Vidro.....	32
2.3.2 Lã de Rocha.....	33
2.3.3 Espumas Acústicas.....	33
2.4 Materiais Acústicos não Convencionais.....	34
2.4.1 Cortiça.....	34
2.4.2 Fibra de Coco.....	35
2.5 Trabalhos Relevantes na Área.....	35
3. Metodologia.....	42
3.1 Objeto de Estudo.....	42
3.2 Método Teórico.....	42
3.2.1 Predição da Impedância Característica.....	42
3.2.2 Método da Matriz de Transferência.....	45
3.3 Método Experimental.....	47
3.3.1 Equipamentos.....	47
3.3.2 Escolha dos Materiais.....	50
3.3.3 Amostras.....	50
3.3.4 Propriedades dos Materiais Utilizados.....	51
3.3.5 Ensaio 1.....	53
3.3.6 Ensaio 2.....	55
4 Resultados e Discussões.....	62
4.1 Resistividade ao Fluxo.....	62
4.2 Sistemas de Única Camada.....	64
4.2.1 Caracterização do Tubo de Impedância Vazio.....	64
4.2.2 Coeficiente de Absorção Sonora.....	65
4.2.3 Impedância Superficial Normalizada – Resistivo e Reativo.....	72
4.2.4 Implementação dos Métodos Teóricos.....	75
4.3 Sistemas de Duas Camadas.....	83
4.3.1 Aumento de Espessura.....	84
4.3.2 Análise de Comportamento do Desempenho Devido ao Posicionamento dos Materiais que o Compõem os Sistemas.....	88
4.3.3 Implementação dos Métodos Teóricos.....	93

4.4 Sistemas de três camadas	98
4.4.1 Análise Geral do Comportamento do Desempenho dos Sistemas Testados.....	98
4.4.2 Implementação de Delany-Bazley.....	102
5 Conclusões	107
Referência Bibliográfica	111
Apêndices	117
Apêndice A – Caracterização dos Materiais	117
Apêndice B Sistemas Compostos por Duas Camadas	133
Apêndice C Sistemas Compostos por Três Camadas	159

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais e Relevância do Tema

A acústica mostra seu valor projetual desde a antiguidade, com os teatros ao ar livre dos gregos e romanos e apresenta um importante momento na acústica arquitetônica com a sua evolução, destacada pelos teatros renascentistas, que se desenvolveram em ambientes fechados, em que a grande reflexão sonora promovida pelas superfícies e pelos revestimentos necessita ser compensada pela absorção sonora (SOUZA, ALMEIDA E BRAGANÇA, 2012).

A acústica de construções é aquela destinada a impedir que a entrada de sons indesejáveis externos interfiram em um ambiente, e está diretamente relacionada com o isolamento, função da massa da divisória. Uma vez estando o ambiente isolado, o enfoque é o seu conforto interno, principalmente no que se diz respeito à inteligibilidade do ouvinte. Desta forma, a acústica de ambientes está diretamente relacionada à absorção sonora e aos materiais absorvedores que o revestem (NEPOMUCENO, 1994).

O valor da acústica de ambientes foi comprovado no século XX a partir do estudo de Wallace C. Sabine, que correlacionou o volume, os materiais e o tempo de reverberação dos ambientes. Assim, os problemas acústicos passaram a ser tratados com maior embasamento científico (SOUZA, ALMEIDA E BRAGANÇA, 2012).

A partir do advento da tecnologia e, juntamente, com o surgimento das cidades e da urbanização contínua, a poluição sonora é agravada, causada pela geração de ruídos,

que lesionam fisiologicamente e psicologicamente a saúde, a segurança e o bem estar das pessoas, estando expostas a um diversificado conjunto de fontes sonoras (DUARTE, 2005).

O ruído pode ser definido como qualquer som indesejável a um determinado tipo de atividade de interesse, a partir do momento em que ele interfere na fluência de uma determinada atividade (BISTAFA, 2006). O ruído é um parâmetro bastante relativo e abstrato, afinal um som que possa ser desagradável para alguns pode não ser para outros (OLIVEIRA, 2014).

Os incômodos estão presentes no dia-a-dia das pessoas que residem em cidades, o ruído circunda 24 horas por dia, e é uma das principais causas de deterioração da qualidade de vida nos grandes centros urbanos (BISTAFA, 2006).

Segundo Cavanaugh (1999), entre os problemas que envolvem a falta de adequação da absorção sonora de um recinto, podem-se destacar: a restrição da inteligibilidade em salas de aula; a dificuldade de concentração em ambientes de estudo; a insônia em um dormitório e a dificuldade de compreensão da comunicação oral em uma sala de estar. As consequências do ruído para a saúde humana são diversas, elas podem conduzir o ser humano ao nervosismo, fadiga mental, frustração e prejuízo na produtividade (PIMENTEL-SOUZA, 2005).

O controle do ruído em um ambiente é em parte, devido à capacidade de absorção sonora dos materiais que o revestem. Essa capacidade é indicada pela perda de energia sonora no material, dependente de algumas propriedades físicas como estrutura, densidade, entre outros (GERGES, 2000).

Os materiais utilizados corriqueiramente no tratamento acústico de ambientes são: a lã de vidro, a lã de rocha e as espumas de poliuretano (BISTAFA, 2006). Esses materiais utilizados habitualmente e em larga escala possuem seus desempenhos como materiais absorvedores muito bem conhecidos (GERGES, 2000).

Apesar dos materiais usuais terem seus desempenhos satisfatórios, muitos materiais novos já estão disponíveis e são comercializados para o controle de ruído. Entre eles,

os materiais naturais, os reciclados, os mistos ou em multicamadas, sendo que as propriedades físicas de muitos deles ainda não foram caracterizadas e não são tão conhecidas (ASDRUBALI, SCHIAVONI E HOROSHENKOV, 2012).

Wang e Geng (2007) destacam a importância da realização de medições das propriedades acústicas de materiais novos e de sistemas em multicamadas e, além disso, afirmam que ainda durante a fase de desenvolvimento destes produtos os seus desempenhos devam ser previstos e calculados. A crescente necessidade da predição do comportamento de materiais absorvedores, aliada à eficiência e rapidez do desenvolvimento de novos produtos, tem crescido o número de trabalhos publicados abordando modelagens matemáticas de sistemas multicamadas (BALVEDI, 1998).

Existem na literatura poucos trabalhos que demonstrem o potencial do desempenho acústico de materiais considerados naturais ou inovadores (MAFRA, SOEIRO E ALVES, 2005; OLDHAM, EGAN E COOKSON, 2011; FOULADI, AYUB E NOR, 2011; ASDRUBALI, SCHIAVONI E HOROSHENKOV, 2012) ou de sistemas em multicamadas (WANG E GENG, 2007; SILVA, MAGALHÃES E GUMIERI, 2010; AYUB, NOR, FOULADI, ZULKIFLI, AMIN, 2012). É interessante ainda salientar a ausência de estudos que mostrem a atuação de materiais naturais em conjunto com materiais convencionais.

Com base nos relatos acima citados, a proposta para este trabalho incorpora a caracterização de sistemas utilizando combinações de materiais em multicamadas. Esta caracterização foi feita através de simulações matemáticas por meio do método da matriz de transferência e posterior validação dos resultados através de ensaios experimentais em tubo de impedância.

1.2 Objetivos Gerais

Avaliar o comportamento acústico de materiais porosos quando em sistemas de multicamadas através do desenvolvimento e implementação de modelos teóricos e ensaios experimentais.

1.3 Objetivos Específicos

- Ensaiar em tubo de impedância sistemas de absorção compostos por materiais em multicamadas para obtenção dos respectivos coeficientes de absorção sonora e impedância acústica;
- Implementar e calcular o coeficiente de absorção sonora e impedância acústica no *software* Matlab para o modelo macroscópico Delany-Bazley em sistemas de multicamadas;
- Implementar e calcular o coeficiente de absorção sonora e impedância acústica no *software* Matlab para o modelo microscópico Allard-Champoux em sistemas de multicamadas;
- Analisar os resultados de forma a fazer comparações entre os resultados obtidos pelos métodos teóricos e ensaios experimentais.

1.4 Contribuições do trabalho

Sabendo que os materiais absorvedores são fundamentais para uma adequada acústica de salas e que a inadequada capacidade absorvedora do recinto pode trazer problemas de inteligibilidade, o conhecimento das propriedades acústicas, do desempenho de sistemas de multicamadas e da predição de alguns sistemas poderá contribuir com a adequação da especificação de materiais de forma a otimizar as propriedades absorvedoras de sistemas em multicamadas.

1.5 Organização do trabalho

Para facilitar a leitura e entendimento do trabalho, ele foi dividido em capítulos, conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1: contextualização do tema e relevância do trabalho, explana os objetivos e suas justificativas, assim como as contribuições do mesmo.
- Capítulo 2: apresenta a revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos de acústica, parâmetros acústicos utilizados e normas, bem como a abordagem que tem sido dada aos temas de absorção sonora, impedância acústica, sistemas em multicamadas. Apresenta ainda os materiais acústicos comumente

empregados na construção civil e os não-convencionais, além da abordagem de estudos atuais e relevantes na área.

- Capítulo 3: procedimento metodológico adotado na pesquisa para atender aos objetivos propostos, contemplando a descrição dos métodos teóricos de Delany-Bazley e Allard-Champoux, e os devidos procedimentos para os ensaios experimentais de obtenção da resistividade ao fluxo, impedância acústica e coeficiente de absorção sonora.
- Capítulo 4: apresenta os resultados dos coeficientes de absorção sonora e da impedância acústica, descreve a princípio a caracterização do material individualmente, seguido de materiais em sistemas compostos por duas camadas e posteriormente por sistemas compostos por três camadas. É comparado os ensaios de absorção sonora com os métodos teóricos para predição da absorção, em sistemas compostos de materiais de uma a três camadas. Representa uma análise crítica advinda dos capítulos anteriores, com discussões sobre o conteúdo gerado e comparações com outras pesquisas.
- Capítulo 5: relata as conclusões do trabalho.
- Referências bibliográficas: livros, artigos, dissertações, teses e normas utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.
- Apêndices: apresentação do banco de dados gerado na pesquisa composto por todos os ensaios realizados.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados os trabalhos científicos que constituíram a fundamentação teórica do estudo. Para sua melhor compreensão, ele é subdividido em:

- 2.1 Conceitos Básicos;
- 2.2 Normas de Interesse;
- 2.2 Materiais Acústicos Absorvedores;
- 2.3 Materiais Acústicos Não Convencionais; e
- 2.4 Trabalhos Relevantes na Área.

2.1 Conceitos Básicos

2.1.1 Som e Onda Sonora

Egan (1988) define o som como a presença de uma vibração, ou perturbação, em um meio elástico que retorna ao seu estado normal depois que a força é removida. Bistafa (2006) descreve o som como uma variação de pressão ambiente dentro da faixa audível do ser humano, entre $2 \times 10^{-5} Pa$ e $60 Pa$.

Silva (2005) argumenta que é necessário um meio de propagação provido de inércia e de elasticidade para que o homem possa captar e identificar o som. A energia sonora se propaga rapidamente, pode viajar longas distâncias e produz mudanças extremamente pequenas na pressão atmosférica (EGAN, 1988). Esta variação gerada na pressão atmosférica permite que as vibrações sonoras sejam propagadas (SOUZA, ALMEIDA E BRAGANÇA, 2012).

Um corpo, ao sofrer um estímulo, gera um deslocamento de uma camada de ar produzindo regiões de alta densidade, compressão e baixa densidade, rarefação. A sucessão dessas zonas comprimidas e rarefeitas é chamada de movimento ondulatório, responsável pela propagação da onda sonora (SILVA, 2005). Segundo Carvalho (1967) a propagação da onda sonora apresenta perdas de energia em seu percurso, ao encontrar um obstáculo, por exemplo, parte de sua energia é refletida, outra parte absorvida e/ou transmitida, voltando, desta forma, com energia inferior àquela produzida na fonte.

2.1.2 Intensidade Sonora

A intensidade sonora (I) pode ser descrita como a quantidade média (em unidade de tempo) de energia sonora que se desloca por uma área unitária normal à direção de propagação da onda (GERGES, 2000). Como energia em unidade de tempo é potência (watts), a unidade de intensidade sonora é o Watt por metro quadrado (W/m^2) (BISTAFA, 2006).

Segundo o autor, as ondas esféricas progressivas, para uma distância r da esfera pulsante, apresentam a intensidade dada por:

$$I_r = \frac{(A/r^2)}{2\rho c} [W/m^2] \quad (2.1)$$

sendo (A/r^2) a amplitude da pressão sonora à distância r (m) e (ρc) [$kg/(m^2.s)$] a impedância acústica característica do meio de propagação, ρ a densidade do meio de propagação (kg/m^3) e c a velocidade de propagação da onda no material (m/s).

Quando se refere ao valor eficaz da pressão sonora, a equação é descrita por:

$$I_r = \frac{p_e^2}{\rho c} [W/m^2] \quad (2.2)$$

em que p_{eficaz} é o valor eficaz da pressão sonora (N/m^2) à distância r da esfera pulsante (m) e (ρc) é a impedância acústica característica do meio de propagação (BISTAFA, 2006).

2.1.3 Potência Sonora

A potência sonora é uma característica exclusiva da fonte sonora e não depende do meio, sendo medida em Watts (BISTAFA, 2006). As unidades de intensidade sonora são potência por unidade de área e, em uma onda esférica, ao multiplicar-se a intensidade sonora à distância r da esfera pulsante pela área da superfície esférica que a envolve nesta distância ($4\pi r^2$), tem-se a potência sonora (W) que está sendo irradiada pela esfera pulsante (BISTAFA, 2006):

$$W = I_r 4\pi r^2 \text{ [W]} \quad (2.3)$$

As equações 2.2 e 2.3 mostram que a relação entre intensidade, potência e pressão sonora para ondas esféricas progressivas é:

$$I_r = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p_{eficaz}^2}{\rho c} \quad (2.4)$$

Já a equação 2.4 mostra que para uma fonte irradiando a potência sonora (W), a intensidade sonora e o quadrado do valor eficaz da pressão sonora são inversamente proporcionais ao quadrado da distância, o que é conhecido com *Lei do inverso do quadrado da distância* (BISTAFA, 2006).

Na Tabela 2.1 são apresentados alguns valores comparativos de potência sonora para instrumentos e a voz humana.

Tabela 2.1 Relação de Potência da voz humana com alguns instrumentos (SILVA, 2005).

Potência Sonora Média	Quantidade em Watts
Voz de mulher	0,002
Voz de homem	0,004
Clarineta	0,05
Piano	0,27
Trombone	6,00
Tambor (surdo)	25,00
Orquestra	70,00
Automóvel a 70km/h	100,00
Avião a jato	10.000,00

2.1.4 Escala Decibel

O decibel (dB) é dado por uma escala logarítmica que facilita a expressão de números de ordem de grandeza muito variável, dados pela escala linear absoluta (N/m^2). Ao mesmo tempo, o ouvido humano é capaz de responder a uma larga faixa de frequência, que compreende do limiar da audição ao limiar da dor. Por esses motivos é adotada a escala decibel quando se refere à intensidade sonora que abarca o ouvido humano, ela apresenta uma melhor correlação com a audibilidade humana (GERGES, 2000).

O nível de intensidade sonora é dado por:

$$NIS = 10 \log \frac{I}{I_0} [dB] \quad (2.5)$$

onde I é a intensidade (W/m^2), I_0 é a intensidade de referência ($10^{-12}W/m^2$), correspondente à intensidade de um tom de 1.000Hz.

O resultado encontrado na equação 2.5 é expresso em dB NIS, ou seja, nível de intensidade sonora. A intensidade sonora é proporcional ao quadrado da pressão sonora, desta forma, o nível de pressão sonora é dado por:

$$NPS = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) [dB] \quad (2.6)$$

em que P é a pressão sonora (N/m^2) e P_0 é a pressão sonora de referência igual a 2×10^{-5} (N/m^2), limiar da audição em 1.000Hz.

Assim sendo, o resultado dado pela equação 2.6 é em dB NPS, isto é, nível de pressão sonora. Na tabela 2.2 pode ser compreendida a relação entre pressão sonora, intensidade e nível sonoro.

Tabela 2.2 Relação entre Pressão Sonora, Intensidade e Nível Sonoro. (OLIVEIRA, 2014)

Pressão Sonora (μPa)	Intensidade Sonora ($10^{-12} W/m^2$)	Nível Sonoro (dB)
200000000	100.000.000.000.000	140
	10.000.000.000.000	130
20000000	1.000.000.000.000	120
	100.000.000.000	110
2000000	10.000.000.000	100
	1.000.000.000	90
200000	100.000.000	80
	10.000.000	70
20000	1.000.000	60
	100.000	50
2000	10.000	40
	1.000	30
200	100	20
	10	1
20	1	0

2.1.5 Frequência

Na curva de variação de pressão ambiente por tempo, o intervalo de tempo para transcorrer um ciclo completo é denominado período (T). O sistema auditivo detecta o som quando a variação da pressão ambiente for cíclica, com o período compreendido entre $50ms$ e $50\mu s$ e a amplitude (A) for maior que o limiar da audibilidade (BISTAFA, 2006).

Em acústica é comum trabalhar com a frequência (f), que é o inverso do período:

$$f = \frac{1}{T} [Hz] \quad (2.7)$$

Nosso sistema auditivo é capaz de detectar frequências entre 20Hz e 20kHz (faixa de áudio), sendo a primeira um som grave e a segunda um som agudo. Abaixo de 20Hz são os infra-sons e acima de 20kHz os ultra-sons (BISTAFA, 2006).

A velocidade de propagação da onda sonora no ar, velocidade do som (c), à temperatura de 20° é de 343m/s . A distância, em metros, para que um ciclo inteiro se complete na curva de pressão sonora por distância é denominado comprimento de onda (λ) (FAHY, 2000). A frequência pode, assim, ser representada:

$$f = \frac{c}{\lambda} [\text{Hz}] \quad (2.8)$$

2.1.6 Frequência Angular e Número de Onda

Enquanto a frequência angular (ω) é igual ao número de períodos por segundo ($1/T$) multiplicado por 2π (KINSLER, 2000):

$$\omega = 2\pi f [\text{rad/s}] \quad (2.9)$$

Segundo Kinsler (2000), o número de onda (k) é o número de comprimento de onda por metro ($1/\lambda$) multiplicado por 2π :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} [\text{rad/m}] \quad (2.10)$$

A relação entre o parâmetro que caracteriza o comportamento temporal de uma onda sonora (ω) e o parâmetro que caracteriza o comportamento espacial (k) é dada por (KINSLER, 2000):

$$k = \frac{\omega}{c} [\text{m}^{-1}] \quad (2.11)$$

2.1.7 Coeficiente de Absorção Sonora

A capacidade de uma superfície em absorver o som é dada pelo coeficiente de absorção sonora (α):

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (2.12)$$

onde $I_{\text{absorvida}}$ é a intensidade sonora absorvida (W/m^2) e $I_{\text{incidente}}$ é a intensidade sonora do som incidente (W/m^2), portanto α é adimensional.

O coeficiente de absorção sonora varia de acordo com a frequência do som incidente e, é interessante destacar, que geralmente aumenta de acordo com a espessura e a densidade do material (FAHY, 2000).

Define-se como coeficiente de redução sonora (NRC) a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora das bandas de oitava de 250 a 2000Hz.

O controle do ruído em um ambiente é realizado através da capacidade de absorção sonora dos materiais que o revestem. Essa capacidade é indicada pela perda de energia sonora do material e depende de algumas de suas propriedades físicas como sua estrutura, sua densidade, entre outros (GERGES, 2000).

A absorção sonora da superfície de um material é a área de sua superfície ponderada pelo seu coeficiente de absorção sonora e pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$A_{\text{sup}} = \alpha S [m^2 sab] \quad (2.13)$$

onde S é a área da superfície do material.

A absorção sonora das superfícies de um recinto é calculada da pela fórmula:

$$A_{\text{sup recinto}} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i [m^2 sab] \quad (2.14)$$

em que α_i é o coeficiente de absorção sonora da i -ésima superfície com área S_i (m^2) e N é o número de faces existentes no recinto.

Define-se também o coeficiente de absorção sonora médio das superfícies, que é dado por:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{sup\ recinto}}{S_{total}} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (2.15)$$

Segundo Cox e D'Antonio (2009), quando o som se propaga em pequenos espaços, tais como em poros interconectados de materiais absorvedores, a energia é dissipada. Essa energia dissipada é caracterizada pelo coeficiente de absorção sonora. O ar é um fluido viscoso e a energia sonora é dissipada através da fricção com as paredes dos poros.

2.1.8 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação (T_{60}) pode ser definido como o tempo (expresso em segundos) necessário para que o nível de pressão sonora de um ambiente decresça em 60 dB após o desligamento da fonte sonora. Esta definição é baseada nas premissas de que existe uma relação linear entre o nível de pressão sonora e do tempo, e de que o nível de ruído de fundo é desprezível (ISO 354:2003).

Se a área de absorção e o volume do recinto são conhecidos, o tempo de reverberação pode ser calculado a partir da equação (RINDEL, 2001):

$$T_{60} = 6 \cdot \ln(10) \cdot \frac{4V}{cA} \text{ [s]} \quad (2.16)$$

onde V é o volume do recinto (m^3), c a velocidade do som no ar a 20° (343 m/s) e A é a área total de absorção ($m^2 \text{ sab}$), que pode ser calculada segundo a equação 2.14.

Quando todos os dados da sala são indicados, o cálculo do tempo de reverberação definido por Sabine em 1986, é dado por:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A} [s] \quad (2.17)$$

Se temos o coeficiente de absorção médio das superfícies, dado pela equação (2.15), o tempo de reverberação torna-se:

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}} [s] \quad (2.18)$$

onde S é a área total das superfícies do ambiente.

Eyring verificou uma limitação na fórmula de Sabine, que consiste no fato de que, quando o $\alpha_{sab} = 1$, ou seja, a absorção do ambiente é total, o tempo de reverberação não é nulo, propondo a seguinte expressão (BISTAFA E BRADLEY, 2000):

$$T_{60} = \frac{-0,16V}{S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} [s] \quad (2.19)$$

onde S é a área total das superfícies do ambiente.

O tempo de reverberação deve ser adequado ao tipo de atividade do ambiente. Para aqueles que têm como atividade principal o uso da fala, como salas de aula e teatro declamativo, é recomendado que o tempo de reverberação seja curto. Um tempo de reverberação longo proporciona uma maior permanência do som refletido na sala e, conseqüentemente, a interferência no som direto, que prejudica a inteligibilidade da fala nessa tipologia de ambiente (BISTAFA, 2006).

2.1.9 Resistividade ao Fluxo

A resistividade ao fluxo (σ) é uma das características físicas mais importantes de um material poroso em termos de absorção sonora. Ela representa a capacidade de penetração do ar nos poros do material absorvedor quando o fluxo de ar que o atravessa (BERANEK E VÉR, 1992).

Magalhães (2013) acrescenta que a resistividade ao fluxo é uma particularidade crucial para o valor do coeficiente de absorção de um material, além de ser a propriedade que mais varia entre os materiais absorvedores.

Uma fatia do material poroso com espessura d (m) está sujeita a uma velocidade média de fluxo constante U (m/s). Assume-se que esta velocidade é pequena. (COX e D'ANTONIO, 2009) A queda de pressão ΔP é medida em N/m^2 . Desta forma a resistividade ao fluxo é definida como:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{Ud} [N.s/m^4] \text{ ou } [rayls.m^{-1}] \quad (2.20)$$

Existem várias fórmulas para a determinação da resistividade ao fluxo, assim sendo, para as equações 2.21, 2.22, 2.23 e 2.24 são considerados como a o raio da fibra (μm), η a viscosidade do ar ($1,84 \times 10^{-5}$ poiseuille) e ε a porosidade (0 a 1) do material.

Derivada por Bies e Hansen (1980), a resistividade ao fluxo para a fibra de vidro é denominada por:

$$\sigma = 7,95 \times 10^{-10} \left(\frac{\rho_m^{1,53}}{a^2} \right) [N.s/m^4] \text{ ou } [rayls.m^{-1}] \quad (2.21)$$

sendo ρ_m densidade de elasticidade (kg/m^3).

Resultados empíricos considerando materiais composto por fibras paralelas, com todas as fibras tendo o mesmo raio, tem-se a resistividade ao fluxo descrita como (COX e D'ANTONIO, 2009):

$$\sigma = \frac{3,94\eta(1-\varepsilon)^{1,413}[1+27(1-\varepsilon)^3]}{a^2\varepsilon} [N.s/m^4] \text{ ou } [rayls.m^{-1}] \quad (2.22)$$

Ainda segundo Cox e D'Antonio (2009), Mechel apresenta resultados feitos para materiais com um único valor para o raio da fibra, mas com orientação aleatória das mesmas, a resistividade ao fluxo pode ser definida por:

$$\sigma = \frac{4\eta}{a^2} \left[\frac{0,55(1-\varepsilon)^{4/3}}{\varepsilon} + \frac{\sqrt{2}(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon} \right] [N.s/m^4] \text{ ou } [rayls.m^{-1}] \quad (2.23)$$

Garai e Pompoli (2005), baseados na densidade do material e em raios de fibras consideravelmente maiores do que aquelas consideradas nas formulações anteriores, derivaram a seguinte relação empírica:

$$\sigma = \frac{28,3 \times 10^{-9}}{(2a)^2 \rho^{-1,404}} [N.s/m^3] \text{ ou } [rayls.m^{-1}] \quad (2.24)$$

onde ρ é a densidade do material (kg/m^3).

A resistividade ao fluxo de alguns materiais constam na Tabela 2.3 e de algumas superfícies na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 Resistividade ao Fluxo típica de materiais acústicos (COX e D'ANTONIO, 2009).

Material	Resistividade ao Fluxo (<i>rayls.m⁻¹</i>)
Fibrosos	2.000 – 200.000
Porosos	2.000 – 40.000

Tabela 2.4 Resistividade ao Fluxo de Superfícies (COX e D'ANTONIO, 2009).

Superfícies	Resistividade ao Fluxo (<i>rayls.m⁻¹</i>)
Neve seca, recém caída	$1 \times 10^4 - 3 \times 10^4$
Gramma	$15 \times 10^4 - 30 \times 10^4$
Silte Arenoso	$80 \times 10^4 - 250 \times 10^4$
Asfalto	$\approx 3 \times 10^7$
Solo Cultivado Seco	$3 \times 10^4 - 3.1 \times 10^5$
Areia Fina	3.1×10^5
Solo Molhado e Compactado	4×10^7
Areia Argilosa	$(420 \pm 17) \times 10^4$

2.1.10 Porosidade

Segundo Cox e D'Antonio (2009) a porosidade (ε) é a fração do volume de ar dentro do material absorvedor, a razão entre o volume total de poros e o volume total ocupado pela estrutura do material. Materiais considerados bons absorvedores apresentam alta porosidade.

Fahy (2000) define a porosidade como:

$$\varepsilon = \frac{u'}{u} \quad (2.25)$$

onde u' é a média transversal da velocidade da partícula (m/s), ou velocidade volumétrica do fluxo por unidade de área transversal, e u é a média da velocidade da partícula no interior dos canais do material (m/s).

Em geral, as espumas acústicas de poliuretano apresentam porosidade elevada e, desta forma, esta propriedade não é um parâmetro imprescindível para definição do desempenho do material para controle do ruído, o valor típico para esta finalidade está entre 0,9 e 0,98 (GIESBRECHT, 2009). Valores de porosidade são apresentados na Tabela 2.5 para alguns tipos de materiais.

Tabela 2.5 Porosidade típica por tipo de material. (COX e D'ANTONIO, 2009)

Material	Porosidade Típica
Lã de Rocha	0,92 – 0,99
Espumas Acústicas	0,95 – 0,995
Feltros	0,83 – 0,95
Placa de Fibra de Madeira	0,65 – 0,80
Placa de lã de Madeira	0,50 – 0,65
Argamassa	0,60 – 0,65
Concreto Polido	0,25 – 0,50
Cascalho	0,25 – 0,45
Filtro de Cerâmica	0,33 – 0,42
Tijolo	0,25 – 0,30
Metal Sinterizado	0,10 – 0,25
Tijolo Refratário	0,15 – 0,35
Arenito	0,02 – 0,06
Mármore	≈0,005

2.1.11 Comprimentos Característicos

O formato dos poros influencia na propagação sonora da onda incidente e, portanto, na absorção. Formatos diferentes apresentam áreas de superfícies diferentes e, desta forma, diferentes efeitos térmicos e viscosos (COX e D'ANTONIO, 2009).

O comprimento característico viscoso (Λ) é uma ponderação da razão entre o volume e a área de superfície dos poros que inclui efeitos de viscosidade. Pode ser calculado para poros de formatos simples, como circulares, quadrados, triangulares ou fendas, através da equação:

$$\Lambda = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{8\eta K_s}{\varepsilon \sigma}} [\mu m] \quad (2.26)$$

onde s é uma constante que varia entre 0,3 e 3, para poros circulares é 1,0, quadrados 1,07, triangulares 1,14 e para fendas 0,78. k_s é a tortuosidade e η a viscosidade do ar (COX e D'ANTONIO, 2009).

Para materiais com estruturas internas mais complexas, faz-se necessária a utilização de um comprimento característico suplementar, denominado comprimento característico térmico (Λ'), que é dado por:

$$\Lambda' = \frac{2V_p}{S_p} [\mu m] \quad (2.27)$$

onde S_p e V_p são a área de superfície e volume dos poros respectivamente. Trata-se da mesma razão usada em Λ porém sem o peso da velocidade microscópica (COX e D'ANTONIO, 2009).

Nata Tabela 2.6 valores de comprimentos característicos viscosos e térmicos são demonstrados por tipo de material.

Tabela 2.6 Valores para Comprimentos Característicos (COX e D'ANTONIO, 2009).

Material	Comprimentos característicos (μm)	
	Λ (viscoso)	Λ' (térnico)
Espuma de melamina	160	290
Espuma de plástico	25 & 230	70 & 690
Poliuretano	200	370
Espuma metálica	20	-
Alumínio poroso	770	-
Lã de vidro	60 – 180	125 – 400
Fibras de Poliéster	50 – 270	100 – 540
Borracha celular	9	15
Feltro	30	60
Contas de vidro (diâmetro 0,1mm)	90	180
Balas de chumbo de 2,1mm	280	490
Balas de chumbo de 4mm	550	830
Cascalho 9mm	190	-

2.1.12 Tortuosidade ou Fator Estrutural

A orientação dos poros em relação ao campo sonoro incidente tem um efeito sobre a propagação do som que representa o parâmetro da tortuosidade (k_s), alguns autores utilizam o termo: fator estrutural (COX e D'ANTONIO, 2009).

Quão mais complexa for a propagação da onda pelo material, maior será a absorção. A complexidade da propagação é representada, em parte, pela facilidade com que o som pode penetrar no material, que é determinada pela tortuosidade (COX e D'ANTONIO, 2009).

Para poros cilíndricos simples, todos alinhados na mesma direção, a tortuosidade (k_s) é simplesmente dada pelo ângulo entre os poros e o som incidente (ψ) (COX e D'ANTONIO, 2009):

$$k_s = \frac{1}{\cos^2(\psi)} \quad (2.28)$$

onde k_s é adimensional.

A formulação empírica para esferas compactadas é dada por (COX e D'ANTONIO, 2009):

$$k_s = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2.29)$$

onde ε é a porosidade do material.

Uma expressão alternativa é: (COX e D'ANTONIO, 2009)

$$k_s = 1 + \frac{1-\varepsilon}{2\varepsilon} \quad (2.30)$$

onde ε é a porosidade do material.

Valores de tortuosidade por tipo de material são destacados na Tabela 2.7

Tabela 2.7 Valores para Tortuosidade. (COX e D'ANTONIO, 2009)

Material	Tortuosidade
Materiais fibrosos (lã de rocha)	1 – 1,06
Poliéster, fibras de cânhamo	1,01 – 1,05
Espuma plástica	1,06 & 1,70
Espuma melamina	1,01
Espuma de poliuretano	1,08 – 1,41
Espuma metálica	1,27
Alumínio poroso	1,05
Neve (nova)	1,50 – 2,70
Neve (com crosta envelhecida)	4,00
Areia ou solo cultivado	1,27 – 3,32
Materiais granulares	1,10 – 1,80
Cascalho	1,50 – 1,80
Contas de vidro (diâmetro 0,1mm)	1,87
2,1mm de bala de chumbo	1,56 – 1,72
4mm de bala de chumbo	1,46
Amostra de vidro fundido	1,75 – 3,84
Vermiculite	1,80 – 2,46
Perlite	1,17 – 2,22
Espuma de granulado nitrílico	1,49
Asfalto poroso	3,20 – 1,50
Granulado de borracha	1,38 – 1,56
Borracha celular	2,64
Feltro	1,01

2.1.13 Densidade Efetiva

A densidade efetiva (ρ_e) de um material poroso é a densidade do fluido, sendo o fluido o ar, dentro dos poros do material com esqueleto rígido e pode ser definida como (COX E D'ANTONIO, 2009):

$$\rho_e = k_s \rho_0 \left[1 + \frac{\sigma \varepsilon}{j \omega \rho_0 k_s} \sqrt{1 + \frac{4 j k_s^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \varepsilon^2}} \right] \quad (2.31)$$

onde ρ_0 é a densidade do ar, ω é a velocidade angular, k_s é a tortuosidade, σ a resistividade ao fluxo, ε a porosidade, η é a viscosidade do ar e Λ é o comprimento característico.

2.1.14 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade (K_e) de um fluido que percorre os poros de um material, sendo o fluido representado pelo ar, é dado por (ALLARD E CHAMPOUX, 1992):

$$K_e = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8 \eta}{j \Lambda'^2 N_p \omega \rho} \sqrt{1 + \frac{j \rho \omega N_p \Lambda'^2}{16 \eta}} \right)^{-1}} \quad (2.32)$$

onde γ é a razão entre as capacidades caloríficas específicas (= 1,4), P_0 é a pressão atmosférica (= 101.320 Nm^{-2}) e N_p é o número de Prandtl, dado por:

$$N_p = \left(\frac{\delta_v}{\delta_h} \right)^2 \quad (2.33)$$

em que (δ_v) e (δ_h) são as dimensões das camadas viscosa e térmica. A 1 atmosfera e 20°C , o número de Prandtl é por volta de 0,77; A espessura da camada viscosa é dada pela seguinte equação:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2 \eta}{\rho \omega}} \quad (2.34)$$

A espessura da camada térmica é dada por:

$$\delta_h = \sqrt{\frac{2\kappa}{\rho c_p \omega}} \quad (2.35)$$

onde $\kappa = 2,41 \times 10^{-2} \text{ WmK}^{-1}$ é a condutividade térmica do ar e $c_p = 1,01 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ é a capacidade de calor específica do ar sob pressão constante.

2.1.15 Impedância Acústica

A Impedância Acústica (Z) é a razão entre a pressão sonora e a velocidade volumétrica (KINSLER, 2000):

$$Z = \frac{p}{Q} [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3] \quad (2.36)$$

onde p é a pressão acústica (Pa) e Q a velocidade de volume (m^3/s).

Já a impedância acústica específica (z) é a razão da pressão acústica que é associada à velocidade da partícula em um determinado ponto do meio. Configura uma propriedade característica do meio e do tipo de onda que está sendo propagada. É usada para calcular a transmissão de ondas de um meio para o outro e é dada por (KINSLER, 2000):

$$z = \frac{p}{u} [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}] \text{ ou } [\text{rayl}] \quad (2.37)$$

onde u é a velocidade da partícula de fluido (m/s) e p a pressão acústica em um ponto do fluido (Pa).

A impedância acústica normalizada, é dada por:

$$Z_n = \frac{z}{\rho_0 c_0} \quad (2.38)$$

Quando se refere à velocidade de vibração de uma superfície, pode-se definir a impedância acústica superficial (z_s), dada por:

$$z_s = \frac{p}{u_s} [Pa.s/m] \text{ ou } [rayl] \quad (2.39)$$

onde u_s é a velocidade de vibração da superfície do material (m/s) e p a pressão acústica em um determinado ponto do fluido (Pa).

Segundo Fahy (2000) a impedância superficial de um material poroso é uma equação complexa, e pode ser expressa por:

$$z_s = r_n + jx_n [Pa.s/m] \text{ ou } [rayl] \quad (2.40)$$

onde r_n é a parte real, denominada parte resistiva e x_n é a parte imaginária, denominada parte reativa.

Baseado nos estudos de Rosseti Gardonio e Brennan (2005), é possível associar o comportamento de um material poroso como um sistema mecânico massa-mola-amortecedor. A partir deste pressuposto a parte resistiva (r_n) da impedância pode ser relacionada diretamente à dissipação de energia e, desta forma, tem relação direta com o coeficiente de absorção sonora (α) do material. Já a parte reativa (x_n) está associada à influência da massa ou rigidez do sistema.

Pode-se utilizar as equações 2.41 e 2.42 para se descrever o movimento de um sistema discreto massa-mola (RAO, 2008):

$$F = M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx [N] \quad (2.41)$$

onde M é a massa (Kg), C o coeficiente de amortecimento viscoso (Ns/m) e K a constante elástica da mola, \ddot{x} é a aceleração (m/s^2), \dot{x} a velocidade (m/s) e x o deslocamento (m).

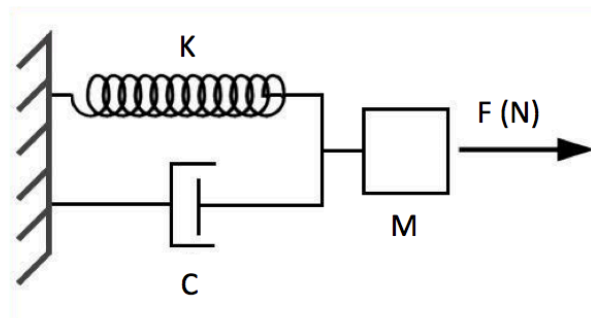


Figura 2.1: Representação de um sistema massa-mola-amortecedor.

$$z_s = \frac{F}{\dot{x}} = C + j \left(\omega M - \frac{K}{\omega} \right) \quad (2.42)$$

onde C é a coeficiente de amortecimento viscoso (Ns/m), M é a massa (Kg) ω é a velocidade angular e K constante elástica da mola (N/m).

Segundo a Equação 2, tem-se que C é a parte real, denominada impedância acústica equivalente de amortecimento, e o restante da equação é a parte imaginária, em que $(j\omega M)$ e $(-j\frac{k}{\omega})$ são, respectivamente, as impedâncias acústicas equivalentes da massa e da rigidez.

A resposta das frequências dessas impedâncias acústicas equivalentes podem ser interpretadas, de acordo com a Figura 2.2 (a). O efeito da massa aumenta proporcionalmente com a frequência, ao passo que o efeito da rigidez decai também proporcionalmente, e o efeito do amortecimento é constante com a frequência (ROSSETTI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

Já na Figura 2.2 (b) é possível identificar que as impedâncias acústicas equivalentes da massa acústica e rigidez são complexas com fases de, respectivamente, $+90^\circ$ e -90° , enquanto a impedância do amortecimento é real e positiva. (ROSSETTI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

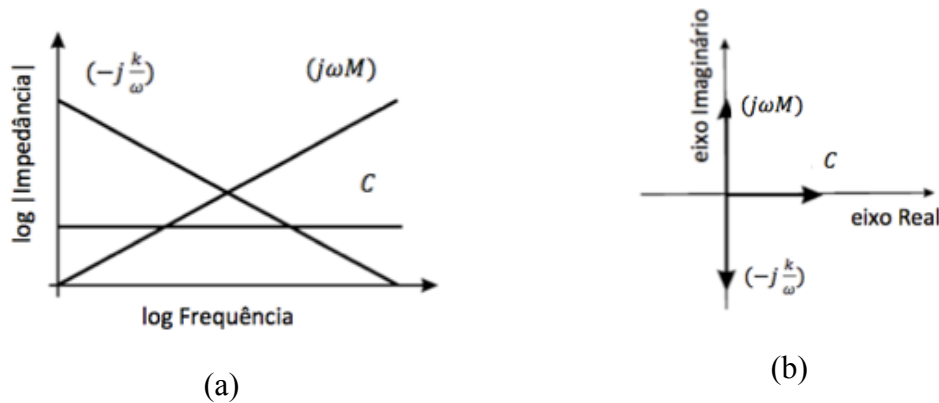


Figura 2.2: Impedância equivalente de massa, rigidez e amortecimento.

Fonte: Rossetti, Gardonio e Brennan (2005)

A contribuição da massa de fluido em um material poroso é proporcional à parte real da densidade efetiva (ρ_e), enquanto a parte imaginária proporciona o efeito de amortecimento devido à interação entre a estrutura rígida do material e o fluido contido nos poros (ROSSETI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

Em baixas frequências, o comportamento de amortecimento (parte imaginária da densidade efetiva) é predominante com relação ao comportamento de massa (parte real da densidade efetiva), enquanto que em frequências mais altas é o comportamento de massa do sistema que predomina em relação ao de amortecimento (ROSSETI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

De forma similar à densidade efetiva, o módulo de elasticidade (K_e) também pode ser expresso pela parte real e imaginária. A parte real é aproximadamente constante em todas as faixas de frequência, enquanto a parte imaginária varia em frequências mais baixas. Assim, o efeito da rigidez em um material poroso é devido a parte real do módulo de elasticidade, enquanto que a parte imaginária está relacionada à dissipação de energia (ROSSETI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

É possível concluir, desta forma, que um material poroso de estrutura rígida pode ser descrito por uma densidade efetiva complexa e um módulo de elasticidade complexo, que representam, respectivamente, o comportamento massa – amortecimento viscoso e rigidez – amortecimento histerético (dissipação) (ROSSETI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

A impedância característica pode ser determinada uma vez que a densidade efetiva e módulo de elasticidade são conhecidos e, assim como descrito acima, ela também pode ser reformulada em função da massa, rigidez e amortecimento ao se isolar as partes real e imaginária, que são, respectivamente, positiva e negativa. (ROSSETI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

Em baixas frequências, a amplitude da parte real varia com a frequência e indica um comportamento de dissipação, enquanto que em frequências mais altas, a parte real converge para um valor constante, indicando um comportamento de amortecimento viscoso, e a amplitude da parte imaginária, que varia conforme a frequência, indica um comportamento determinado pela rigidez. (ROSSETI, GARDONIO E BRENNAN, 2005).

Outra impedância também é importante de ser citada: o produto $\rho_0 c$ apresenta um enorme significado acústico como uma propriedade característica do meio e, por esta razão, é chamada de Impedância Característica (z_c), que é dada por (KINSLER, 2000):

$$z_c = \rho c \text{ [Pa.s/m] ou [rayl]} \quad (2.43)$$

onde ρ e c são a densidade e a velocidade de propagação da onda no meio.

2.2 ASTM E 1050 – 98 (2006)

A norma ASTM E 1050 – *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System* (2006) descreve o método de ensaio que abrange a utilização de um tubo de impedância, dois microfones e um sistema de análise de frequência digital para a determinação da incidência normal do coeficiente de absorção sonora e impedância superficial dos materiais.

2.2.1 Dispositivo

O dispositivo trata de um tubo com seção interior cilíndrica ou retangular com dimensão constante. O tubo deve ser suficientemente longo para que as ondas planas sejam completamente desenvolvidas antes de atingirem os microfones. Deve ser feito em material massivo de forma que a transmissão sonora no tubo seja desprezível.

O suporte da amostra do tubo pode ser integrado a ele ou ser um prolongamento separável capaz de se integrar hermeticamente ao mesmo.

2.2.2 Faixa de Frequência de Operação

A faixa de frequência de operação em um tubo de impedância é dada por:

$$f_l < f < f_u \quad (2.44)$$

onde f é a frequência de operação dentro do tubo, f_l e f_u os limites mínimo e máximo da frequência de operação.

O limite mínimo (f_l) da frequência de operação depende da distância entre os microfones e a precisão de análise do sistema. É recomendado que a distância entre os microfones exceda 1% do comprimento de onda correspondente à frequência de interesse mais baixa.

O limite máximo (f_u) da frequência de operação e o comprimento da onda correspondente dependem do diâmetro do tubo e da velocidade de propagação do som. Para se manter a propagação plana das ondas, o limite superior de frequência é definido por:

$$f_u < \frac{Qc}{d} \quad (2.45)$$

onde Q é 0,586, c a velocidade de propagação do som no tubo (m/s) e d o diâmetro do tubo (m).

2.2.3 Microfones

Dois microfones nominalmente idênticos devem ser montados, com diâmetro inferior a 20% do comprimento de onda para a maior frequência de interesse.

Um grande espaçamento entre os microfones aumenta a precisão da medições, no entanto, o espaçamento entre eles deve ser inferior à metade do menor comprimento de onda de interesse, assim:

$$s < c/f_u \quad (2.46)$$

onde s é o espaçamento dos microfones (m), c é a velocidade de propagação do som no tubo (m/s) e f_u o limite máximo da frequência do operação (Hz).

É recomendado que o espaçamento máximo entre os microfones (s) seja 80% de $(c/2f_u)$.

2.2.4 Amostra

As amostras devem ter o mesmo formato e área, de acordo com a seção do tubo. Devem encaixar suavemente no suporte sem que haja espaçamentos entre suas bordas e a parede do suporte e sua superfície deve ser posicionada em direção normal ao tubo. Um mínimo de duas amostras devem ser cortadas a partir do material e testadas com as mesma condições de montagem.

2.2.5 Procedimento

É necessário medir a função de transferência entre os sinais dos dois microfones ao longo do espaçamento dos mesmos, a distância do plano de referência para o microfone mais próximo e a temperatura do ar para avaliação das propriedades acústicas de incidência normal das amostras.

A velocidade do som e a densidade do ar, devem ser calculadas de acordo com as equações abaixo:

$$c = 20,047\sqrt{273,15 + T} \quad (2.47)$$

onde c é a velocidade do som (m/s) e T a temperatura do ambiente ($^{\circ}C$).

$$\rho = 0,001290 \left(\frac{P}{101,325} \right) \cdot \left(\frac{273,15}{273,15+T} \right) \quad (2.48)$$

onde ρ é a densidade do ar (gm/cm^3), P a pressão atmosférica (kPa) e T a temperatura do ambiente ($^{\circ}C$).

Dois sinais são obtidos em duas posições pré-determinadas, ao longo do tubo, conforme a Figura 2.3. A obtenção destes sinais é feita usando dois microfones.

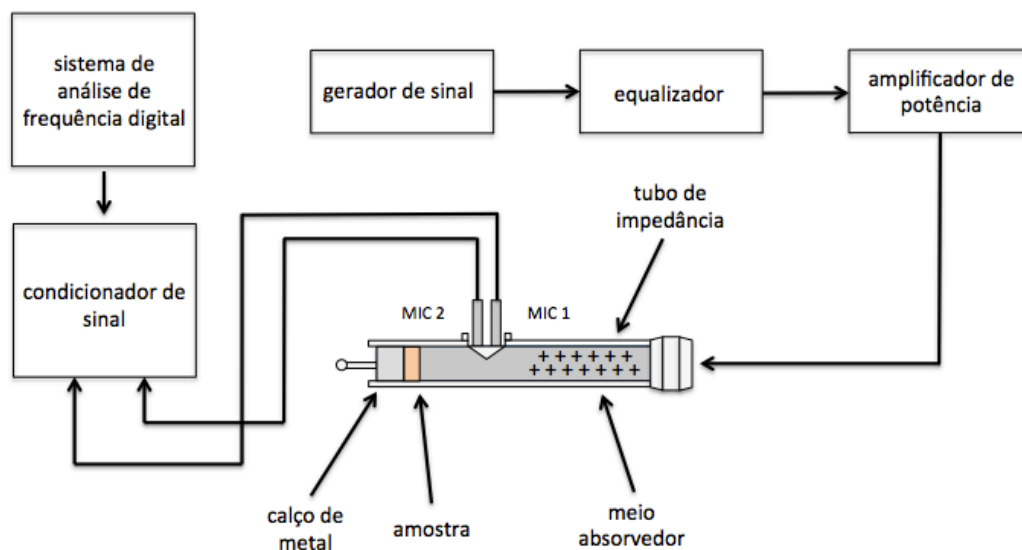


Figura 2.3: Detalhe esquemático dos possíveis posicionamentos dos microfones: microfone 1 pode ser trocado de posição com o microfone 2.

Fonte: ASTM E 1050-98 (2006)

Supondo-se que as posições escolhidas sejam as indicadas na Figura 2.3, os respectivos sinais poderiam ser expressos por:

$$P_1(\omega) = e^{i\omega t}(Ae^{-ikz_1} + Be^{ikz_1}) \quad (2.49)$$

$$P_2(\omega) = e^{i\omega t}(Ae^{-ikz_2} + Be^{ikz_2}) \quad (2.50)$$

sendo z_1 e z_2 as distâncias entre a posição 1 e a posição 2 da superfície da amostra.

A função de transferência entre os dois sinais, torna-se:

$$H_{12}(\omega) = \frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)} = \frac{[Ae^{-ikz_1} + Be^{ikz_1}]}{[Ae^{-ikz_2} + Be^{ikz_2}]} \quad (2.51)$$

O coeficiente de reflexão complexo (R) é dado pela razão entre B e A , conforme mostra a seguir:

$$R = \left(\frac{H_{12}(\omega) - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}(\omega)} \right) e^{2ikz_1} \quad (2.52)$$

sendo s o espaçamento entre os microfones ($z_2 - z_1$).

O coeficiente de absorção é dado por:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2.53)$$

onde R é o coeficiente de reflexão complexo.

A impedância acústica específica é dada por:

$$z = \frac{(1+r)}{(1-r)} \rho c \quad (2.54)$$

onde ρ é a densidade do ar a 25°C e c é a velocidade do som no ar.

A parte resistiva da impedância acústica é dada por:

$$r_n = \frac{\alpha}{[2(1-R_r) - \alpha]} \quad (2.55)$$

A parte reativa da impedância acústica é dada por:

$$x_n = \frac{2R_i}{[2(1-R_r)] - \alpha} \quad (2.56)$$

onde:

- $R_r = \{2H_r \cos[k(2l + s)] - \cos(2kl) - (H_r^2 + H_i^2) \cos [2k(l + s)]\}/D$;
- $R_i = \{2H_r \sen[k(2l + s)] - \sen(2kl) - (H_r^2 + H_i^2) \sen [2k(l + s)]\}/D$; e
- $D = 1 + H_r^2 + H_i^2 - 2[H_r \cos(ks) + H_i \sen(ks)]$

onde l é a distância entre a amostra e o microfone mais próximo (m), k é o número de onda (m^{-1}), s distância entre os eixos dos microfones (m), H_r e H_i respectivamente a parte real e a imaginária da função de transferência.

2.2.6 Escolha do Método

Segundo Salvo, Mairink, Oliveira e Teodoro (2005), o coeficiente de absorção sonora exato é difícil de ser medido por depender de diversos fatores como a forma com a qual o material foi instalado, o ângulo de incidência sonora e as características dos recinto.

O tubo de impedância é um método economicamente mais viável, rápido e simples. Pode ser muito vantajoso para o desenvolvimento de novos materiais absorvedores acústicos, uma vez que possibilita uma avaliação das variações da absorção segura, desde que calibrado com a comparação com materiais usuais (SALVO, MAIRINK, OLIVEIRA E TEODORO, 2005)

Dentre as alternativas disponíveis, ou seja, tubo de impedância ou câmara reverberante, o tubo de impedância foi avaliado como sendo o método mais adequado para esta pesquisa, afinal, a utilização de uma amostra de pequena dimensão do material analisado viabiliza testes com maior quantidade e variabilidade de materiais de amostras, visto que a proposta engloba a caracterização de diversos sistemas em multicamadas.

2.3 Materiais Acústicos Absorvedores

Os materiais fibrosos e porosos são os materiais acústicos mais comumente empregados para o tratamento de ambientes devido à sua grande capacidade de absorção sonora. Enquanto os fibrosos são aqueles que apresentam fibras cruzadas em sua constituição, os porosos são compostos por inúmeros poros vazios ou lacunas de ar (FLACH, 2012).

Todo material apresenta sua capacidade de absorver o som, que é dada por meio das transformações de energia vibratória mecânica em energia térmica, ou seja, a dissipação da energia sonora ao incidir no material (NAKARUMA, 2006).

Flach (2012) complementa que nos materiais porosos e fibrosos a energia acústica incidente se dissipa em calor devido aos seguintes fatores:

- condicionamento do ar;
- perdas de escoamento dentro do material;
- e perdas causadas por atrito interno no movimento das fibras.

O coeficiente de absorção sonora está diretamente relacionado ao tamanho, à forma, à densidade e às fibras que constituem o material. No material poroso, a absorção acontece também em função do tamanho dos poros e da proporção de lacunas de ar que o material possui (FLACH, 2012).

2.3.1 Lã de Vidro

A lã de vidro pode ser encontrada no mercado como painéis, mantas, feltros, cordões e, ainda, ser aplicada por jateamento. O material fibroso apresenta fibras com diâmetro por volta de 2 a 15mm e densidade aparente em uma margem de 10 a 100 kg/m³ (GERGES, 2000). Os coeficientes de absorção sonora comuns ao material podem ser analisados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 Coeficientes de Absorção Sonora para a Lã de Vidro (ISAR, 2014).

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de Absorção Sonora	0,21	0,58	0,84	1,00	0,99	1,03	0,85

2.3.2 Lã de Rocha

As fibras da lã de rocha são fabricada a partir da fusão de rochas diversas e/ou escória em temperaturas elevadas por volta de 1500°C. As mantas e painéis são confeccionados a partir do aglutinamento destas fibras por meio de uma resina (GERGES, 2000).

2.3.3 Espumas Acústicas

Devido à presença de poros abertos nas espumas de polímeros, estes materiais apresentam bom desempenho absorvedor. A sua característica porosa impede o acontecimento de erosões durante a propagação da onda. (GERGES, 2000).

Valores para os coeficiente de absorção sonora para a Espuma Acústica Sonex são demonstrados na Tabela 2.9 de acordo com a espessura do material.

Tabela 2.9 Coeficientes de Absorção Sonora para a Espuma Acústica SONEX
(OWA, 2014)

Placa Acústica SONEX illtec de 11 kg/m ³ .									
Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	NRC	
Coeficiente de Absorção Sonora	Espessura	25/35	0,11	0,14	0,40	0,72	0,76	0,91	0,55
	(mm)	35/125	0,14	0,21	0,61	0,80	0,89	0,92	0,65
		50/125	0,15	0,31	0,81	1,01	0,99	0,95	0,80

2.4 Materiais Acústicos não Convencionais

2.4.1 Cortiça

A cortiça é extraída do Sobreiro (*Quercus suber l.*) e tem em sua composição células mortas, com ausência de lacunas entre elas, localadas uma acima das outras e de forma

continua com orientação radial. A célula apresenta forma prismática, contendo 14 faces (VIEIRA, 2009).

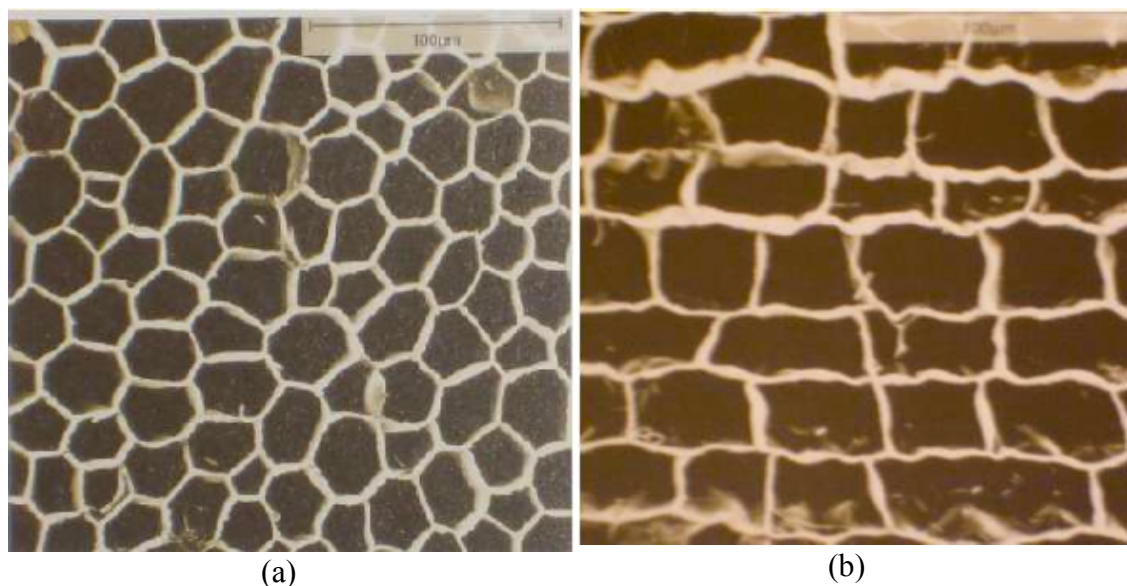


Figura 2.4: Estrutura celular da cortiça vista no plano tangencial (a) e no plano transversal (b).

Fonte: Fortes, Rosa e Pereira (2004).

A cortiça, além de ser um material natural, reciclável e renovável, possui algumas características como: leveza, impermeabilidade a líquidos e gases, elasticidade e compressibilidade, isolante térmico e acústico, combustão lenta e resistência ao atrito (APCOR, 2014).

Para sua aplicação em paredes de recintos, são encontradas no mercado em placas de cortiça de 1000x500mm ou 1000x600mm, cuja aplicação é feita com espátula ou bisnaga diretamente na parede. São compostas por aglomerados de cortiça, com espessura de 8mm e peso de 0,26 kg/m³, com coeficiente de absorção sonora apresentado na Tabela 2.10 (CORK DO BRASIL, 2015).

Tabela 2.10 Coeficiente de Redução Sonora (NRC) para Placa de Cortiça Cork do Brasil (CORK DO BRASIL, 2015)

Placa de Cortiça WallCork Acústico de 0,26 kg/m ³ .	
NRC	0,30

2.4.2 Fibra de Coco

A fibra de coco, encontrada em forma de painéis, apresenta estrutura aleatória, composta por grandes espaços vazios, que, não necessariamente, são configurados como poros. Em análise microscópica pode ser observada a presença de incrustações nas fibras, que podem ser atribuídas à sua constituição natural ou mesmo por depósitos de resíduos durante a fabricação do painel (SILVA, MAGALHÃES E GUMIERI, 2010).

A Figura 2.5 mostra a variação do diâmetro das fibras do material, que apresenta valor médio de $229,7 \times 10^{-6} m$. A porosidade da fibra de coco esta por volta de 0,92 (SILVA, MAGALHÃES E GUMIERI, 2010), que se aproxima do valor da porosidade da lã de rocha.

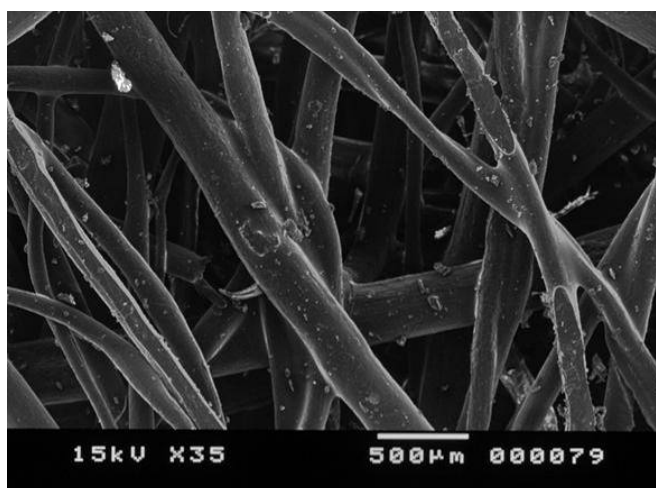


Figura 2.5: Fotomicrografia da fibra de coco obtida através da microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Silva, Magalhães e Gumieri (2010).

2.5 Trabalhos Relevantes na Área

A seguir, serão reportados os artigos mais recentes, publicados nos últimos oito anos, que abordam assuntos relevantes ao tema desta dissertação como a caracterização de novos materiais absorvedores por meio de ensaios experimentais, a implementação de modelos para predição de suas propriedades acústica, procedimentos de

caracterização de materiais e a predição de sistemas compostos por materiais em multicamadas.

Os artigos apresentados configuram base teórica e fazem parte da revisão bibliográfica como forma de subsídio para o desenvolvimento dos objetivos propostos por este trabalho.

Fouladi, Ayub e Nor (2011) fizeram uma análise das características acústicas da fibra de coco. Em seu trabalho, dois tipos de fibra de coco são investigadas por meio de ensaios no tubo de impedância, uma composta pelo material fresco recém extraído e a outra, sua versão passada por um processo de industrialização, no qual ela é misturada com aglutinante. Neste estudo, dois modelos teóricos são utilizados: o de Delany-Bazley e o de Biot-Allard.

Ainda baseado na análise de Fouladi, Ayub e Nor (2011), os resultados experimentais apresentam uma média do coeficiente de absorção sonora da fibra fresca, com espessura de 20mm, de 0,8 para frequências acima de 1.360Hz. O aumento de espessura para 45mm representa uma melhora em baixas frequências, com a média de 0,8 para frequências acima de 578Hz. Já com relação à aplicação dos métodos teórico, foi concluído que o modelo de Delany-Bazley, pode ser aplicado para ambos os tipos fibras de coco, enquanto o modelo de Biot-Allard é ideal para a fibra preparada industrialmente.

Oldham, Egan e Cookson (2011) apresentam estudos relacionados a sistemas de multicamadas e materiais sustentáveis, naturais e reciclados, classificados como fibrosos e não fibrosos. Para os materiais fibrosos, os ensaios de resistividade ao fluxo foram feitos por meio do tubo de impedância, e os métodos teóricos aplicados para predição do coeficiente de absorção são os de Delany-Bazley e Garai-Pompoli. Já os materiais não fibrosos foram ensaiados utilizando a câmara reverberante, para se obter um resultado mais preciso, e o tubo de impedância, para possíveis comparações. O método teórico para esses materiais segue o modelo de Zwicker-Kosten.

Na Figura 2.6 são demonstrados dois posicionamentos de ensaio para o junco e a Tabela 2.12 contém a relação de absorção sonora por sistemas testados pelo autores.



Figura 2.6: Configuração de colocação da amostra para ensaio: longitudinal (a) e transversal (b).

Fonte: Oldham, Egan e Cookson (2010).

Tabela 2.12 Relação Material – Coeficiente de Absorção (OLDHAM, EGAN E COOKSON, 2015)

Materiais	Coeficiente de Absorção Sonora a 500Hz
Fibrosos	
Algodão	0,75
Fibra de Madeira	0,22
Juta	0,30
Sisal	0,05
Linho	0,62
Rami	0,65
Chumaços de Lã	0,35
Chumaços de Cânhamo	0,45
Não Fibrosos	
Config. Longitudinal (tubo de impedância)	
Junco (15,0cm)	0,80
Config. Longitudinal (câmara reverberante)	
Junco (14,0cm)	0,98
Config. Transversal (tubo de impedância)	
Junco (5,0cm)	0,88
Config. Transversal (câmara reverberante)	
Junco (5,0cm)	0,85

Tabela 2.12 Relação Material – Coeficiente de Absorção (OLDHAM, EGAN E COOKSON, 2015)

Materiais	Coeficiente de Absorção Sonora a 500Hz
Sistemas em Multicamadas	
5cm Junco + 7cm Cânhamo	1,00
10cm Junco + 7cm Cânhamo	1,00

Silva, Magalhães e Gumieri (2010) fizeram um estudo comparativo de sistemas sanduíches compostos por fibra de coco e espuma acústica. Para que os ensaios em multicamada fossem realizados, a caracterização da fibra de coco foi o passo inicial, por meio de medições utilizando o tubo de impedância.

Os sistemas (representados na Tabela 2.13) I, II, III e IV apresentam como coeficiente de absorção máximo relacionado à frequência, respectivamente, os seguintes valores: 0,74 – 1700Hz, 0,91 – 1480Hz, 0,78 – 1660Hz, 0,93 – 1400Hz, desta forma, eles concluíram que a presença da espuma no sistema incorpora aumento significativo de absorção sonora. O trabalho apresenta ainda, para cada sistema, a frequência limite correspondente aos valores em que a parte imaginária da impedância se torna positiva. A mudança de sinal demonstra o momento em que a massa controla a dinâmica do mecanismo de absorção sonora do sistema.

Tabela 2.13 Descrição de configuração dos sistemas utilizados nos testes experimentais (SILVA, MAGALHÃES E GUMIERI, 2010)

Sistema	Descrição	Espessura de cada camada (mm)
I	Fibra de Coco	40
II	Espuma + Fibra de Coco	3 + 40
III	Fibra de Coco + Espuma	40 + 3
IV	Espuma + Fibra de Coco + Espuma	3 + 40 + 3

Asdrubali, Schiavoni e Horoshenkov (2012) apresentam um levantamento atualizado sobre as propriedades acústicas de materiais sustentáveis, sejam eles naturais, reciclados ou compósitos, como alternativa para os usuais materiais sintéticos. Os autores mencionam que materiais como as fibras de bambu, kenaf, sisal e fibra de coco apresentam bom desempenho como materiais absorvedores e que a cortiça pode ser um material eficaz para o isolamento ao ruído de impacto. A Tabela 2.13 apresenta os valores referentes aos coeficientes de absorção sonora dos materiais representados no trabalho.

Tabela 2.14 Coeficiente de Absorção Sonora para materiais sustentáveis (ASDRUBALI, SCHIAVONI, HOROSHENKOV, 2012).

Material	Espessura (mm)	Coeficiente de Absorção Sonora a 500Hz
Cânhamo	300	0,60
Kenaf	50	0,74
Fibra de Coco	50	0,2
Junco	50	0,90
Sisal	50	0,45
Lã de Ovelha	60	0,38
Linho	10	0,55
Argila Expandida	50	0,60
Bambu	50	0,40
Lã de Madeira	Não especificado	0,32
Cortiça	Não especificado	0,39
Celulose (papel)	6	1,00

Fouladi, Nor, Zulkarnain e Leman (2010) testaram o sistema multicamada composto por fibra de coco e painel perfurado. Análises foram realizadas por meio de três métodos baseado no método da matriz de transferência: o de Allard, o de Beranek e Ver e o de Atalla e Sgard. Duas configurações de camadas foram testadas: o sistema composto pelo painel perfurado, camada de ar e fibra de coco, e o sistema composto por fibra de coco, painel perfurado e ar. O método que mais se aproximou na

comparação dos resultados com os ensaios experimentais por meio de tubo de impedância foi o de Allard.

Os mesmo autores, diagnosticaram ainda que quando o painel é adicionado à frente de todo o sistema, o percentual de aberturas do mesmo apresenta forte influência no ajuste da capacidade da absorção sonora em baixas frequências, enquanto a média é reduzida e que utilização do painel no sistema permite que o mesmo desempenho seja alcançado, porém com considerável redução da camada de ar, em comparação com o sistema composto apenas por fibra de coco e ar.

O trabalho de Ayub, Nor, Fouladi, Zulkifli e Amin (2011) utiliza a fibra de coco e explique que trata-se de um sistema rígido, não elástico, uma vez que a resistividade ao fluxo da fibra de coco é muito baixa. A comparação entre o coeficiente de absorção sonora obtido experimentalmente e calculado pelo método da estrutura rígida aponta uma discrepância inferior a 20% para maior parte dos resultados de absorção entre 200 e 1.500Hz e de 15% quando entre 1.500 e 5.000Hz.

Wang e Geng (2007) fizeram uma comparação e aplicação de diversos modelos experimentais para a predição de sistemas em multicamadas. Dentre seus experimentos eles propuseram uma nova metodologia de predição do coeficiente de absorção sonora dos sistemas, baseada no modelo de duas cavidades e no modelo de duas cargas, chamado de modelo híbrido experimental de predição de multicamadas. A intenção de utilização do novo modelo é a otimização da obtenção de propriedades acústicas de sistemas formados por camadas diversas e materiais variáveis, para o controle de ruído.

Ali (2010) descreve um rápido algoritmo que estabelece equações recursivas para o desenvolvimento do cálculo de impedância em sistemas de multicamadas constituído por qualquer número de camadas. Baseado na analogia entre linhas de transmissão elétrica e mecânica, em que a matriz de transmissão de duas linhas conectadas em paralelo é igual ao produto das matrizes individuais e, que pode ser generalizado para obter a expressão da matriz para qualquer número de linhas de transmissão ligadas em tandem, a impedância também pode ser obtida quando formada por múltiplas camadas.

Oliva e Hongisto (2013) analisaram diversos métodos para predição da impedância acústica superficial, como os modelos de: Delany-Bazley, Qunli, Miki, Mechel-Vér, Komatsu e Allard-Champoux. Todos os modelos apresentam como variáveis independentes, a resistividade ao fluxo e a espessura do material, entretanto, não existia na literatura até então um conhecimento adequado sobre a precisão da predição desses métodos.

O estudo realizado envolve apenas a incidência normal da propagação da onda e a precisão foi determinada através da comparação da predição e dos ensaios experimentais de 82 configurações de lã mineral. O método da matriz de transferência foi usado para calcular o coeficiente de absorção sonora para frequências entre 100 e 3.150Hz e o método de Allard e Champoux alcançou entre todos os modelos propostos a melhor precisão da predição

3

METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa combinou análises teóricas e experimentais. Enquanto o método teórico tem o escopo de implementar a formulação teórica para o cálculo das impedâncias acústicas e do coeficiente de absorção sonora para materiais absorvedores em sistemas de multicamadas, o ensaio experimental mensura as propriedades acústicas utilizando um tubo de impedância.

3.1 Objeto de Estudo

O trabalho tem seu enfoque voltado para a avaliação do comportamento de materiais absorvedores em sistemas de multicamadas, através da análise do desempenho destes materiais seguindo os dois métodos: teórico e experimental.

3.2 Método Teórico

O método teórico é constituído, inicialmente, pelo processo da predição da Impedância Característica e Superficial dos materiais absorvedores, baseado em dois modelos: o modelo macroscópico empírico conforme Delany e Bazley (1970) e o modelo teórico fenomenológico proposto por Allard e Champoux (1992) e posteriormente a aplicação dos resultados no Método da Matriz de Transferência segundo Cox e D'Antonio (2000), para predizer os valores referentes ao coeficiente de absorção sonora de materiais absorvedores em sistema de multicamadas.

3.2.1 Predição da Impedância Característica

Segundo Cox e D'Antonio (2009), a modelagem da propagação da onda no interior de um material poroso é um processo complexo de ser analisado, e duas abordagens

podem ser utilizadas. A primeira é uma abordagem completamente empírica dada por Delany e Bazley, de aplicação simples e eficaz. A segunda, é a formulação do problema utilizando um tratamento semi-analítico dado por Allard e Champoux.

3.2.1.1 Modelo macroscópico empírico de Delany e Bazley

Delany e Bazley (1970) mediram um grande número de amostras de materiais porosos e utilizaram o ajuste de curva para chegar em relações que descrevem como a impedância característica e o número de onda variam de acordo com a resistividade ao fluxo.

Segundo eles, a resistividade ao fluxo é um parâmetro físico conveniente para a avaliação da propagação da onda no material poroso. A resistividade ao fluxo foi ensaiada por meio do tubo de impedância, sua metodologia será explanada na seção 3.3 deste Capítulo.

A impedância característica (z_c) é dada por:

$$z_c = \rho_0 c_0 (1 + 0,0571 X^{-0,754} - j0,087 X^{-0,732}) \quad (3.1)$$

e o número de onda (k), por:

$$k = \frac{\omega}{c_0} (1 + 0,0978 X^{-0,700} - j0,189 X^{-0,595}) \quad (3.2)$$

onde ρ_0 e c_0 são a densidade e velocidade do som no ar e ω é a velocidade angular. X é dado por:

$$X = \frac{\rho_0 f}{\sigma} \quad (3.3)$$

onde f é a frequência e σ a resistividade ao fluxo do material poroso.

Cox e D'Antonio (2000) argumentam que uma adequada formulação foi realizada, mas existem restrições em sua aplicação. Desta forma, aplicáveis somente quando:

- A porosidade, ε , for próxima de 1,0, no qual a maioria dos materiais fibrosos atingem;
- $0,01 < X < 1,0$, o que significa que a equação funciona apenas em uma determinada faixa de frequência;
- Os limites para a resistividade ao fluxo são:
 $1.000 \leq \sigma \leq 50.000 \text{ rayls/m}^{-1}$.

3.2.1.2 Modelo fenomenológico de Allard e Champoux (1992)

Dadas as propriedades do materiais, tais como resistividade ao fluxo, porosidade, tortuosidade e os comprimentos característicos, é possível calcular a impedância característica e a propagação do número de onda considerando a propagação microscópica no interior dos poros. Trata-se de um modelo fenomenológico simples no qual a estrutura absorvedora é assumida como sendo rígida.

A densidade efetiva (ρ_e) do material poroso é dada pela Equação 2.31, enquanto o módulo de elasticidade do ar (K_e) pela Equação 2.32. Uma vez que a densidade efetiva e o módulo de elasticidade foram determinados segundo as equações dadas por Allard e Champoux aplica-se à fórmula matemática para calcular impedância característica e número de onda. A impedância característica (z_c) é dada por:

$$z_c = \sqrt{K_e \rho_e} \quad (3.4)$$

e o número de onda (k), por:

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho_e}{K_e}} \quad (3.5)$$

Uma vez que se tem a impedância característica e o número de onda de um material poroso, hajam sido calculados pelo modelo macroscópico empírico conforme Delany e Bazley ou através do modelo fenomenológico de Allard e Champoux, é necessário converter estes valores para a impedância superficial e, posteriormente, obter o coeficiente de absorção sonora para uma espessura específica do material. Assim

sendo, a melhor forma de prever o coeficiente de absorção é utilizando o Método da Matriz de Transferência.

3.2.2 Método da Matriz de Transferência

O método da Matriz de Transferência considera apenas as ondas planas, de incidência normal, da mesma forma que o ensaio experimental realizado por meio do tubo de impedância, que segue na seção 3.3 deste Capítulo.

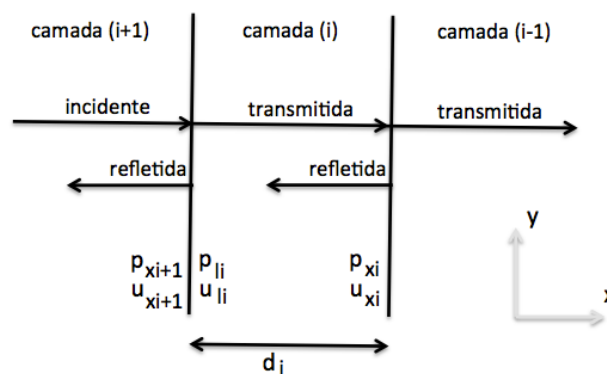


Figura 3.1: Geometria para o modelo de matriz de transferência de um material absorvedor em multicamada.

Fonte: Cox e D'Antonio (2009).

A Figura 3.1 demonstra cada interface entre as camadas, na qual é assumida a continuidade da pressão e da velocidade das partículas e isto permite uma relação entre pressão e velocidade da partícula, nas partes mais interna e mais externa de uma camada, que é dada, de forma compacta, sob a seguinte matriz:

$$\begin{Bmatrix} p_{li} \\ u_{li} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_{xi+1} \\ u_{xi+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos(k_{xi} d_i) & j \frac{\omega \rho_i}{k_{xi}} \text{sen}(k_{xi} d_i) \\ j \frac{k_{xi}}{\omega \rho_i} \text{sen}(k_{xi} d_i) & \cos(k_{xi} d_i) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{xi} \\ u_{xi} \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

onde p_{xi} e u_{xi} são a pressão e a velocidade das partícula na parte inferior da camada (i); p_{xi+1} e u_{xi+1} são a pressão e a velocidade da partícula no inferior da camada ($i + 1$); p_{li} e u_{li} são a pressão e a velocidade da partícula na parte superior da camada

(i); d_i é a espessura da camada; ρ_i é a densidade da camada (i), e k_{xi} é o número de onda da camada (i).

O cálculo da impedância característica ($z_{c(i-1)}$) do material da primeira camada ($i - 1$) é dado pela Equação 3.1, Modelo Delany-Bazley, ou pela Equação 3.4, Modelo Allard-Champoux. Já a impedância superficial da segunda camada (z_{si}) segue a seguinte equação:

$$z_{si} = -jz_{c(i-1)} \cot(k_{x(i-1)}d_{i-1}) \quad (3.7)$$

onde $k_{x(i-1)}$ e d_{i-1} são o número de onda e a espessura da primeira camada ($i - 1$).

A formulação pode ser aplicada recursivamente para as sucessivas camadas e permite o cálculo da impedância superficial de materiais absorvedores em sistemas de multicamadas. Se a parte inferior da camada (i) tem uma impedância superficial de z_{si} , e o material da camada (i) possui uma impedância característica de z_{ci} , então a impedância superficial na parte inferior da camada ($i + 1$) é dada por:

$$z_{si+1} = \frac{-jz_{si}z_{ci} \cot(k_{xi}d_i)}{z_{si} - jz_{ci} \cot(k_{xi}d_i)} \quad (3.8)$$

Para estabelecer o coeficiente de absorção, é necessário colocar a relação entre a impedância superficial z_s e o fator de reflexão r :

$$r = \frac{\frac{z_s}{\rho c} \cos(\psi) - 1}{\frac{z_s}{\rho c} \cos(\psi) + 1} \quad (3.9)$$

onde z_s é a impedância superficial da última camada e (ψ) é o ângulo de incidência da onda. Para este trabalho é utilizado o ângulo de 0° devido à formulação baseada na incidência normal da onda sonora.

O coeficiente de absorção é, desta forma, dado em função do fator de reflexão, de acordo com:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (3.10)$$

3.3 Método Experimental

O método experimental envolve dois diferentes objetivos:

- Ensaio 1: obtenção de resultados relativos à resistividade ao fluxo dos materiais;
- Ensaio 2: obtenção dos parâmetros acústicos, impedância acústica superficial normalizada e coeficiente de absorção sonora.

As medições da resistividade ao fluxo (Ensaio 1) deste trabalho foram baseadas no método de Ingard e Dear, mencionado em Bies e Hansen (1996). Já as medições relacionadas aos resultados referentes aos coeficientes de absorção sonora e impedância acústica superficial normalizada (Ensaio 2) foram realizadas conforme recomendações da Norma Internacional ASTM E 1050 – 98 (2006): *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*.

3.3.1 Equipamentos

Para a realização dos experimentos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- **Tubo de impedância:** composto de parede maciça em aço, o tubo é desmontável e dividido em segmentos. Para a realização do Ensaio 1 foi utilizado o tubo com os segmentos 1 e 2 com comprimento final de dimensão linear de 107cm e seção circular interna de 60mm, segmento 1, e 30mm, segmento 2, ambos de superfície lisa. Para o Ensaio 2 foi utilizado o tubo com os segmentos 1 e 3 com comprimento final de dimensão linear de 57cm e seção circular interna de 60mm de superfície lisa, conforme demonstrado nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4:



Figura 3.2: Configuração do tubo de impedância para Ensaio 1.

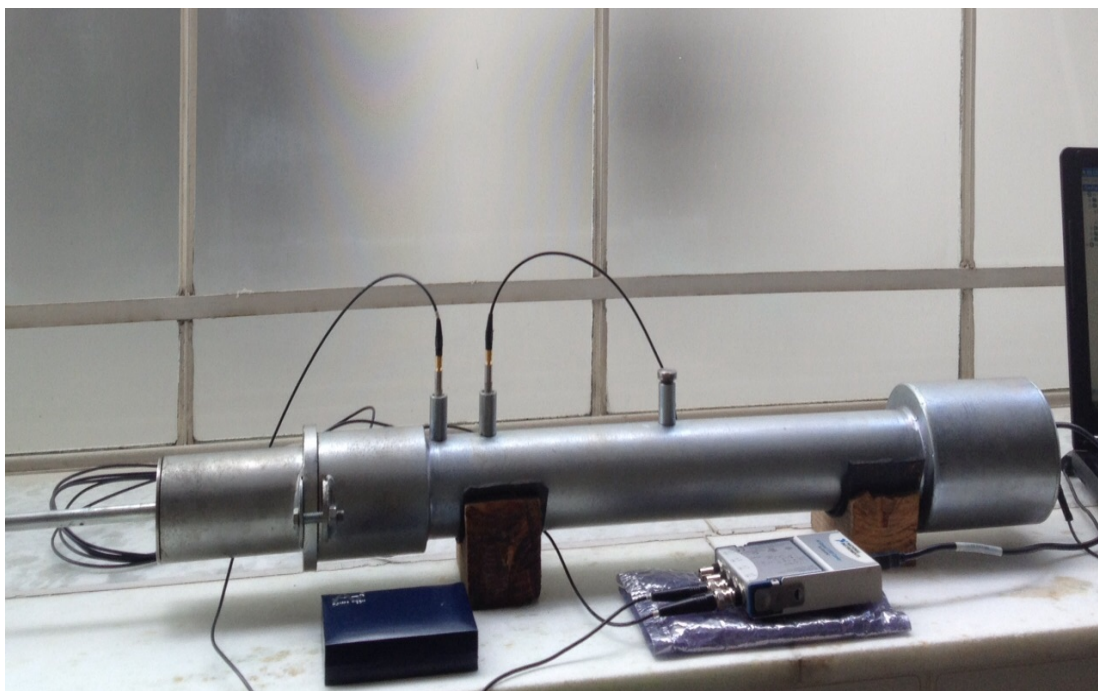


Figura 3.3: Configuração do tubo de impedância para Ensaio 2.

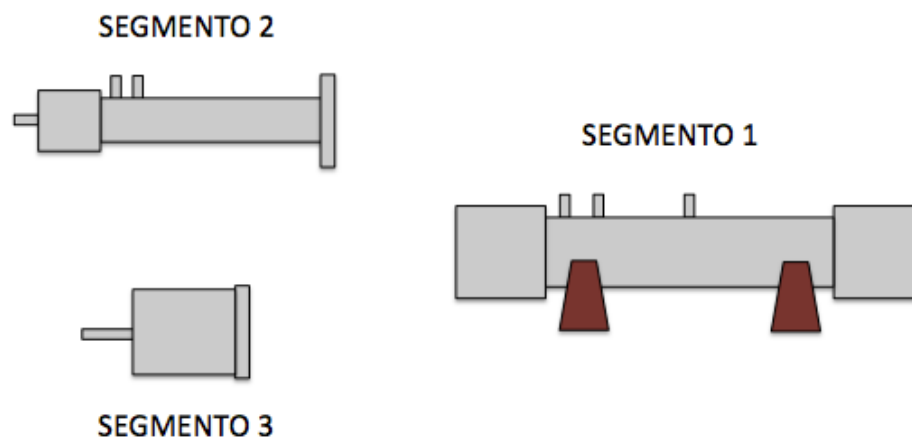


Figura 3.4: Segmentações do tubo de impedância.

- **Amplificador:** Marantz SR 6000
- **Fonte Sonora:** aut falante com potência sonora de 40W e diâmetro de 60mm.
- **Microfones:** 2 microfones fabricados pela BSWA, modelo: MPA416. Apresentam tipo de resposta de campo livre, pré-polarizados, com diâmetro igual a 1/4", possuem uma sensibilidade de 50mV/Pa e atuam na faixa de frequência entre 20Hz e 20kHz.
- **Interface *National Instruments* USB-9234:** A interface *National Instruments* foi utilizada juntamente com o *software* MATLAB. O sistema de aquisição de dados possui quatro entradas que utilizam conectores do tipo BNC e funciona como um conversor AD/DA conectada a um computador via USB.
- **Software MATLAB:** foi utilizado para a digitalização dos resultados obtidos pelo sistema de aquisição de dados da *National Instruments* através de modelo computacional desenvolvido por Magalhães (2013).

A Figura 3.5 demonstra a distribuição dos equipamentos de acordo com as exigências da ASTM E 1050-98 (2006):

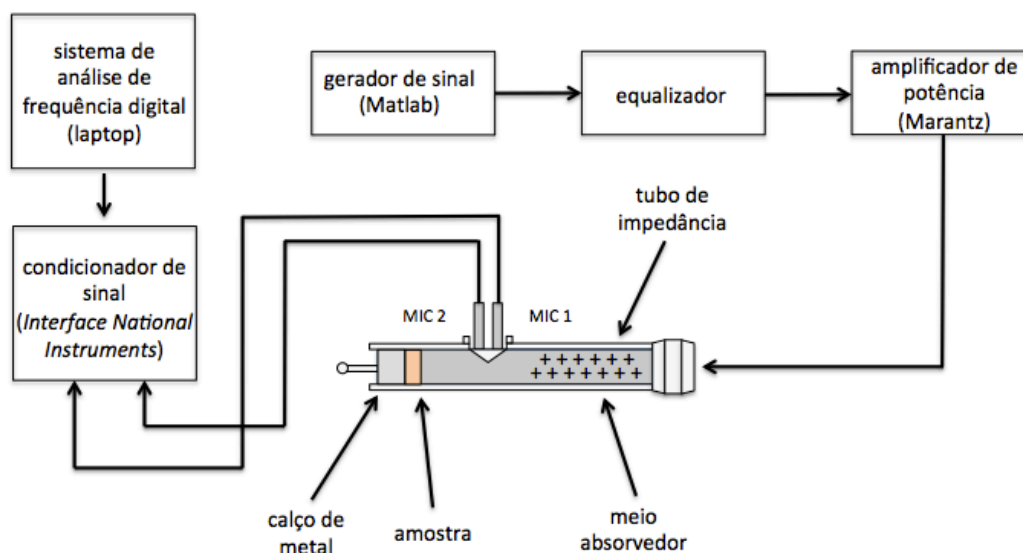


Figura 3.5: Configuração do tubo de impedância para Ensaio 1 com equipamentos, relacionada à montagem segundo a ASTM E 1050-98.

Fonte: adaptado de ASTM E 1050-98 (2006)

3.3.2 Escolha dos Materiais

Para este trabalho foram escolhidos cinco materiais: duas espumas de poliuretano, por serem materiais absorvedores comerciais e de propriedades conhecidas, com características e espessuras diferentes, uma espuma de polietileno e dois materiais naturais, interesse de estudo devido às suas propriedades promissoras e inovação do seu uso de mercado como materiais absorvedores quando usados como revestimento arquitetônico.

3.3.3 Amostras

Todas as amostras foram cortadas no mesmo formato. Os cortes foram feitos com o intuito de permitir que elas se encaixassem suavemente nas paredes do tubo sem que houvesse deformação. O formato de corte foi circular e medidos com paquímetro. Para o Ensaio 1 os cortes foram realizados com o diâmetro de 30mm e para o Ensaio 2 com diâmetro de 60mm, para que as amostras se enquadrassem nas devidas áreas das seções transversais dos segmentos do tubo.

3.3.4 Propriedades dos Materiais Utilizados

O cálculo da densidade aparente de cada material foi feito a partir da medição da massa de cada um deles com a utilização de uma balança eletrônica de precisão da marca Marte, modelo AS 5500C, com precisão de 0,1g. A realização do procedimento experimental seguiu a norma ASTM D1622-08, que calcula a densidade aparente de acordo com a seguinte equação:

$$D = \frac{m}{V} \quad (3.11)$$

onde D é a densidade aparente (Kg/m^3), m é a massa (Kg) e V o volume (m^3).

Observe nas Tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 as amostras referentes ao Ensaio 2 e as propriedades de cada material.

Tabela 3.1 Propriedades do Material 1 – Espuma de poliuretano.




Material 1			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Imagem			
Espessura (mm)	29	29	29
Diâmetro (mm)	60	60	60
Massa (g)	3,37	3,39	3,13
Densidade (Kg/m^3)	41,10	41,34	38,17

Tabela 3.2 Propriedades do Material 2 – Espuma de polietileno.




Material 2			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Imagem			
Espessura (mm)	42	42	42
Diâmetro (mm)	60	60	60
Massa (g)	2,78	3,08	3,09
Densidade (Kg/m ³)	23,41	25,94	26,02

Tabela 3.3 Propriedades do Material 3 – Cortiça.




Material 3			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Imagem			
Espessura (mm)	3	3	3
Diâmetro (mm)	60	60	60
Massa (g)	3,25	2,86	3,04
Densidade (Kg/m ³)	383,15	337,17	358,39

Tabela 3.4 Propriedades do Material 4 – Espuma de Poliuretano.







Material 4			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Imagem			
Espessura (mm)	19	19	19
Diâmetro (mm)	60	60	60
Massa (g)	1,61	1,62	1,63
Densidade (Kg/m ³)	29,97	30,16	30,34

Tabela 3.5 Propriedades do Material 5 – Fibra de coco.

Material 5			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Imagem			
Espessura (<i>mm</i>)	22	22	22
Diâmetro (<i>mm</i>)	60	60	60
Massa (<i>g</i>)	7,01	9,44	7,78
Densidade (<i>Kg/m³</i>)	112,69	151,76	125,07

3.3.5 Ensaio 1

3.3.5.1 Resistividade ao Fluxo

A resistividade ao fluxo de uma amostra de um material poroso pode ser medida através de ensaio normalizado pela ASTM C522-80 (2003), que utiliza um aparato específico de medição (BIES E HANSEN, 1996). Entretanto, segundo Ingard e Dear (1984), assim como mencionado em Bies e Hansen (1996), o Ensaio 1 pode ser realizado, alternativamente, com a utilização de um tubo de impedância.

As medições dos níveis de pressão sonora são realizadas através do posicionamento de microfones na parte frontal e posterior à amostra dentro do tubo. (INGARD E DEAR, 1984)

A fonte sonora é conduzida com o sinal de um tom puro e a frequência é ajustada de modo que a distância entre os eixos dos microfones, seja exatamente um número ímpar de um quarto do comprimento de onda (BIES E HANSEN, 1996). Essa distância se dá pelo fato de que em paredes rígidas, a velocidade da partícula é nula enquanto que para uma distância igual a um quarto do comprimento de onda da parede a velocidade da partícula se torna máxima.

Conforme o posicionamento apresentado na Figura 3.7, o nível de pressão sonora é medido antes da amostra, L_1 , e depois da amostra, L_2 . Desta forma, a resistividade ao fluxo é calculada segundo a equação abaixo (BIES E HANSEN, 1996):

$$\sigma = \frac{\rho c}{l} 10^{\frac{(L_1 - L_2)}{20}} \quad (3.12)$$

onde ρ é a densidade do g (kg/m^3), c é a velocidade de propagação da onda no ar (m/s) e l (m) é a espessura.

Como a distância entre os eixos dos microfones do tubo impedância utilizado era de 41cm e a primeira frequência de ensaio é dada para um quarto do comprimento de onda, tem-se 209Hz como a frequência para a qual foi encontrada o valor referente à resistividade ao fluxo utilizado.

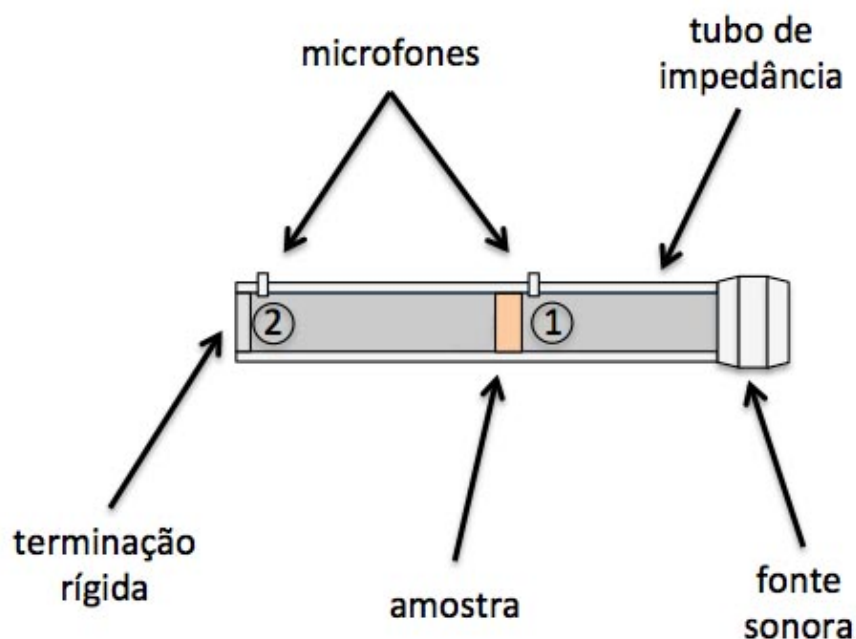


Figura 3.7: Configuração do tubo de impedância para ensaio da resistividade ao fluxo – Ensaio 1. Medições no nível de pressão sonora realizadas antes do posicionamento da amostra e próximo à terminação rígida, pontos 1 e 2 respectivamente.

Fonte adaptada: Ingard e Dear (1984).

3.3.6 Ensaio 2

3.3.6.1 Impedância Acústica e Coeficiente de Absorção Sonora

A metodologia utilizada para as medições do Ensaio 2 foi baseada nas medições de um Tubo de Impedância com Sistema Computadorizado e seu procedimento segue a norma ASTM E 1050-98 (2006) citada no Capítulo 2, seção 2.2.1.

O tubo de impedância possui um alto-falante em uma de suas extremidades, que é conectado a um gerador de sinais. O gerador de sinais envia para o alto falante um sinal com características de ruído branco. O ruído branco é a definição de um ruído aleatório de banda larga com nível constante para todas as frequências do espectro. (BISTAFA, 2006)

O gerador de sinal excita o tubo e gera um campo constituído pela interação de duas ondas planas: a incidente e a refletida (GIESBRECHT, 2007). Na outra extremidade do tubo é alocada a amostra na qual deseja-se medir a absorção acústica.

A pressão sonora dentro do tubo é medida por dois microfones em duas posições diferentes, para obter informações sobre ruído que incidiu na amostra e o que foi refletido por ela. Os sinais obtidos pelos microfones são processados simultaneamente por um analisador digital de espectro de frequência e a função de transferência entre eles é calculada (GERGES, 2000).

A partir da função de transferência o coeficiente de reflexão, Equação 2.52, o coeficiente de absorção sonora, Equação 2.53, e a impedância acústica, Equação 2.54 podem ser obtidos.

3.3.6.2 Faixa de Frequência de Operação

Segundo as Equações 2.44 e 2.45 a faixa de frequência de operação calculada para o tubo de impedância utilizado ficou entre 20 e 3.350Hz. Determinadas pelo comprimento e diâmetro do tubo de impedância, 57cm e 60mm, as frequências limites (f_l) e (f_u), estabeleceram o limite da frequência de operação do sistema entre

20,17Hz e 3.349,97Hz, e desta forma, as frequências estudadas foram as faixas de frequências contidas entre 100Hz e 3.000Hz.

3.3.6.3 Caracterização das amostras

Segundo a norma ASTM E 1050-98 (2006) a caracterização das propriedades acústicas dos materiais utilizando o tubo de impedância, deve ser realizada com o ensaio de no mínimo duas amostras sob a mesma condição de montagem. Para este trabalho, entretanto, foram utilizadas três amostras para melhor caracterização e feita a média aritmética a partir do valor obtido em cada material.

3.3.6.4 Desvio Padrão e Intervalo de Confiança

A média aritmética é um modelo estatístico de síntese formado por um valor hipotético que não necessariamente consiste em um valor realmente observado nos dados. Desta forma, assim como em qualquer modelo estatístico empregado, para determinar a precisão em que a média representa os dados, o desvio padrão (s) foi calculado através da seguinte equação (FIELD, 2009):

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3.13)$$

onde x_i são os valores para os coeficientes de absorção sonora ensaiados encontrados por frequência para cada amostra, \bar{x} a média aritmética do coeficiente de absorção sonora das amostras e N o número de amostras.

Como os dados foram coletados por apenas três amostras é importante determinar o quão bem é provável que essas amostras representam aquele material como um todo e, para isso, calcula-se o erro padrão (SE), dado por (FIELD, 2009):

$$SE = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3.14)$$

onde s é o desvio padrão e N o número de amostras.

Entretanto, é necessário ainda calcular a amplitude de valores que tem probabilidade de conter o verdadeiro valor através do intervalo e confiança (E) (FIELD, 2009):

$$E = \pm 1.96 \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3.15)$$

onde 1.96 é o valor crítico: número na fronteira que separa os valores das estatísticas amostrais prováveis de ocorrerem, dos valores que tem pouca chance de ocorrer (FIELD, 2009).

3.3.6.5 Configuração dos sistemas e posicionamento das amostras.

Para cada um dos cinco materiais foram confeccionadas três amostras, sendo totalizado um número de 15 corpos de prova.

O ensaio foi dividido em 3 etapas:

- Etapa 1: ensaio de cada amostra isolada para caracterização de cada um dos cinco materiais utilizados;
- Etapa 2: ensaio do sistema multicamada composto por 2 camadas;
- Etapa 3: ensaio do sistema multicamada composto por 3 camadas.

Etapa 1: Cada amostra foi ensaiada isoladamente e a caracterização de cada material foi baseada na média global dos resultados das 3 amostras referentes àquele material. Total de 15 ensaios.






Etapa 2: Nesta etapa ocorreu a combinação da utilização de 5 materiais para duas possibilidades (2 camadas), desta forma, cada material teve uma combinação com os outros quatro e com ele mesmo. Total de 25 ensaios.

Etapa 3: Nesta etapa o Material 4 foi dispensado, por ter propriedades similares às do Material 1. A repetição de materiais também foi excluída deste ensaio, visto que o enfoque foi dado à atuação de materiais com propriedades divergentes ao formarem um sistema de multicamadas e não o aumento de espessura. Foi realizada uma

permutação de 4 materiais para 3 possibilidades (3 camadas), totalizando em 24 ensaios.

Para facilitar o entendimento das composições dos materiais dos sistemas em multicamadas utilizado nos ensaios, os materiais serão representados graficamente segundo a Tabela 3.6. A ordem de colocação dos materiais no tubo de impedância será sempre referenciada da esquerda para a direita, conforme Figura 3.8, sendo o material mais a esquerda aquele considerado mais externo e, o mais a direita, o material mais interno, aquele encostado na parte rígida do tubo. As Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9 constituem um descritivo das nomenclaturas para cada ensaio e a representação gráfica das composições dos sistemas propostos.

Tabela 3.6 Representação gráfica dos materiais para entendimento da composição de camadas dos sistemas de multicamadas.

Material	Representação Gráfica
Material 1 – Espuma de Poliuretano	
Material 2 – Espuma de Polietileno	
Material 3 – Cortiça	
Material 4 – Espuma de Poliuretano	
Material 5 – Fibra de Coco	

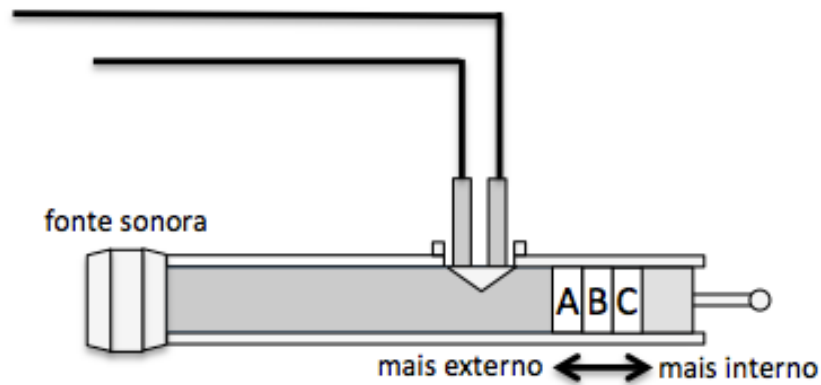


Figura 3.8 Ensaio composto pelos materiais A, B e C – Nomenclatura dada para a ordem de colocação de materiais no tubo de impedância para ensaio. Sendo A o mais externo e o C o material mais interno ao tubo, encostado na parede rígida.

Tabela 3.7 Descritivo de ensaios para a Etapa 1 – Caracterização dos materiais.

Ensaio	Especificação	Representação Gráfica
1.1	amostra 1	
1.2	Material 1 amostra 2	
1.3	amostra 3	
1.4	amostra 1	
1.5	Material 2 amostra 2	
1.6	amostra 3	
1.7	amostra 1	
1.8	Material 3 amostra 2	
1.9	amostra 3	
1.10	amostra 1	
1.11	Material 4 amostra 2	
1.12	amostra 3	
1.13	amostra 1	
1.14	Material 5 amostra 2	
1.15	amostra 3	

Tabela 3.8 Descritivo de ensaios para a Etapa 2 – Sistemas de 2 camadas.


























Ensaio	Materiais	Representação Gráfica	Ensaio	Materiais	Representação Gráfica
2.1	1 e 1		2.14	3 e 4	
2.2	1 e 2		2.15	3 e 5	
2.3	1 e 3		2.16	4 e 1	
2.4	1 e 4		2.17	4 e 2	
2.5	1 e 5		2.18	4 e 3	
2.6	2 e 1		2.19	4 e 4	
2.7	2 e 2		2.20	4 e 5	
2.8	2 e 3		2.21	5 e 1	
2.9	2 e 4		2.22	5 e 2	
2.10	2 e 5		2.23	5 e 3	
2.11	3 e 1		2.24	5 e 4	
2.12	3 e 2		2.25	5 e 5	
2.13	3 e 3				

Tabela 3.9 Descritivo de ensaios para a Etapa 3 – Sistemas de 3 camadas.

Ensaio	Materiais	Representação Gráfica	Ensaio	Materiais	Representação Gráfica
3.1	1, 2 e 3		3.13	3, 1 e 2	
3.2	1, 2 e 5		3.14	3, 1 e 5	
3.3	1, 3 e 2		3.15	3, 2 e 1	
3.4	1, 3 e 5		3.16	3, 2 e 5	
3.5	1, 5 e 2		3.17	3, 5 e 1	
3.6	1, 5 e 3		3.18	3, 5 e 2	
3.7	2, 1 e 3		3.19	5, 1 e 2	
3.8	2, 1 e 5		3.20	5, 1 e 3	
3.9	2, 3 e 1		3.21	5, 2 e 1	
3.10	2, 3 e 5		3.22	5, 2 e 3	
3.11	2, 5 e 1		3.23	5, 3 e 1	
3.12	2, 5 e 3		3.24	5, 3 e 2	

4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados do trabalho realizado e as discussões sobre os mesmos com estudos encontrados na literatura.

O Capítulo foi dividido em quatro partes para facilitar seu entendimento, a primeira parte refere-se ao Ensaio 1:

- 4.1 Resistividade ao Fluxo: apresenta os ensaios de resistividade ao fluxo referentes aos cinco materiais propostos;

Sequencialmente serão apresentados os resultados referentes ao Ensaio 2 - coeficiente de absorção sonora e impedância acústica superficial normalizada e resultados dos métodos teóricos de Delany-Bazley e Allard-Champoux, assim como comparações pertinentes. Estes resultados foram subdivididos por número de camadas que compõem os sistemas:

- 4.2 Sistemas de Única Camada
- 4.3 Sistemas de Duas Camadas;
- 4.4 Sistemas de Três Camadas.

4.1 Resistividade ao Fluxo

Os primeiros resultados a serem apresentados são os relativos ao Ensaio 1 para os cinco materiais propostos neste trabalho, conforme Tabela 4.1. Os resultados referentes à resistividade ao fluxo (σ) são os valores que fundamentaram a implementação da formulação teórica de Delany-Bazley e Allard-Champoux.

Tabela 4.1 Ensaio 1 – Valores para Resistividade ao Fluxo.

Ensaio	Resistividade ao Fluxo σ [<i>rayl.m</i>⁻¹]
Tubo Vazio	36,47
Material 1 – Espuma de Poliuretano	5.335,00
Material 2 – Espuma de Polietileno	56.141,00
Material 3 – Cortiça	273.510,00
Material 4 – Espuma de Poliuretano	20.278,00

Antes das amostras serem ensaiadas, foi realizado um ensaio com o tubo de impedância vazio para verificar sua calibração. A partir desse experimento foi possível diagnosticar que o valor para a resistividade ao fluxo dentro do tubo, de 36,47 rayls.m⁻¹, apresenta um valor ínfimo, representando que o ar não tem resistência à propagação da onda considerável no interior do tubo sem amostra.

Para o Material 5, fibra de coco, foi adotado valor obtido na literatura. Silva, Magalhães e Gumieri (2008), para uma amostra de fibra de coco de 20cm, obtiveram resistividade ao fluxo de 1.300 rayls.m⁻¹, no entrando, foi utilizado o valor encontrado por Ayub, Nor, Fouladi, Zulkifi e Amim (2012), de 1.680 rayls.m⁻¹ pela semelhança encontrada entre os resultados do ensaio de absorção do estudo citado com o ensaio das amostras utilizadas neste trabalho.

Segundo Cox e D'Antonio (2009) espumas de poliuretano apresentam resistividade ao fluxo entre 2.000 e 40.000 rayls.m⁻¹, o que corrobora com as resistividades encontradas para o Material 1 e para o Material 4, respectivamente, 5.335 e 20.278 rayls.m⁻¹.

Ainda com relação à espuma de poliuretano Kino (2015) realizou experimentos com uma amostra de 20mm, e obteve resistividade ao fluxo de 13.178 rayls.m⁻¹, valor intermediário com relação aos obtidos pelos Materiais 1 e 4.

O Material 2, espuma de polietileno, apresenta uma constituição diferente dos demais materiais, ele é composto por uma estrutura formada por células fechadas, o que

diminui a capacidade da onda sonora de penetrar em seu interior e, por este motivo, é encontrado um valor de resistividade ao fluxo maior para este material, de $56.141 \text{ rayls. m}^{-1}$.

Já o Material 3, cortiça, tem sua composição estruturada por células mortas sem lacunas entre elas, o que traduz não se tratar de um material poroso. Desta forma, a resistividade ao fluxo para o material foi superior a todos os outros, atingindo $273.510 \text{ rayls. m}^{-1}$.

4.2 Sistemas de Única Camada

A segunda parte da apresentação dos resultados é referente aos sistemas formados por uma única camada. Aqui serão abordados: a caracterização do tubo de impedância, a caracterização dos cinco materiais com a apresentação de seus coeficientes de absorção sonora e impedância característica, através do Ensaio 2, e a implementação dos métodos teóricos para cada material, de forma isolada.

4.2.1 Caracterização do Tubo de Impedância Vazio

Para caracterizar o tubo de impedância, mediu-se o coeficiente de absorção sonora do seu interior, sem amostras, conforme representado na Figura 4.1. Foram verificados coeficientes de absorção muito baixos, com valores abaixo de 0,1 até cerca de 1.300Hz e valores por volta de, no máximo, 0,2, acima de 1.300Hz.

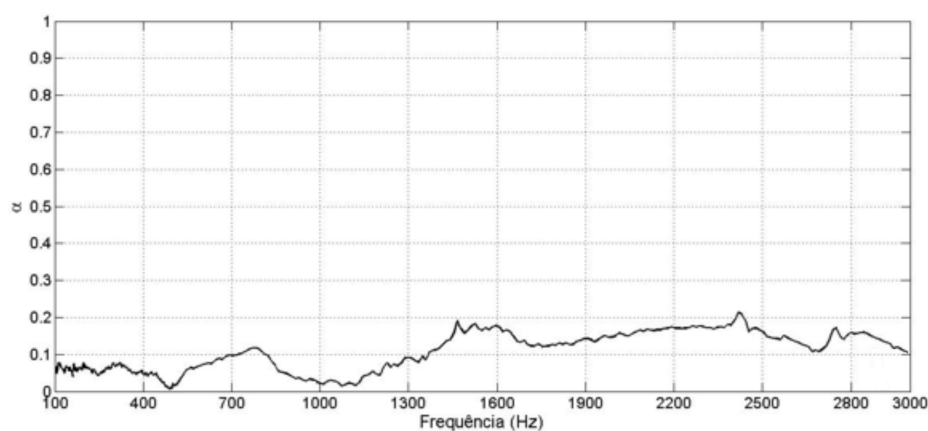


Figura 4.1: Tubo de Impedância sem amostra, Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

4.2.2 Coeficiente de Absorção Sonora

Como mencionado no Capítulo 3, para a caracterização de cada material foram confeccionadas e testadas três amostras, o resultado final obtido baseia-se na média das três e é apresentado juntamente com seu intervalo de confiança, para aferir os valores obtidos.

4.2.2.1 Material 1 – Espuma de Poliuretano

Os ensaios das três amostras do Material 1 representaram comportamentos acústicos similares, apresentados na Figura 4.2. A espuma de poliuretano apresenta um coeficiente de absorção sonora médio por volta de 0,8 entre as faixas de frequências de 1.300 e 3.000Hz, com valor máximo alcançado de 0,87 na frequência de 1.900Hz.

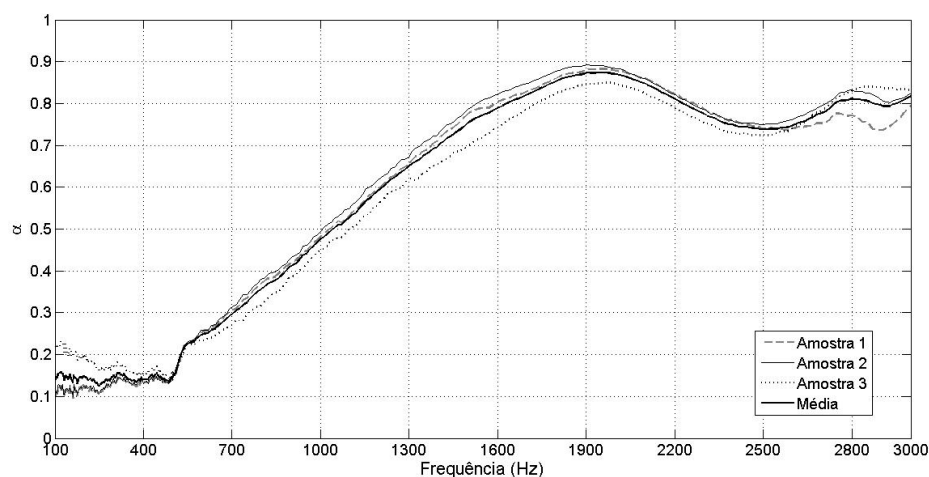


Figura 4.2: Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 1 e média aritmética das três.

Com relação ao intervalo de confiança do Material 1, evidenciado na Figura 4.3, é encontrada uma amplitude de variação de valores muito baixa, que se mantém, aproximadamente, por volta de 0,1 em todas as faixas de frequência.

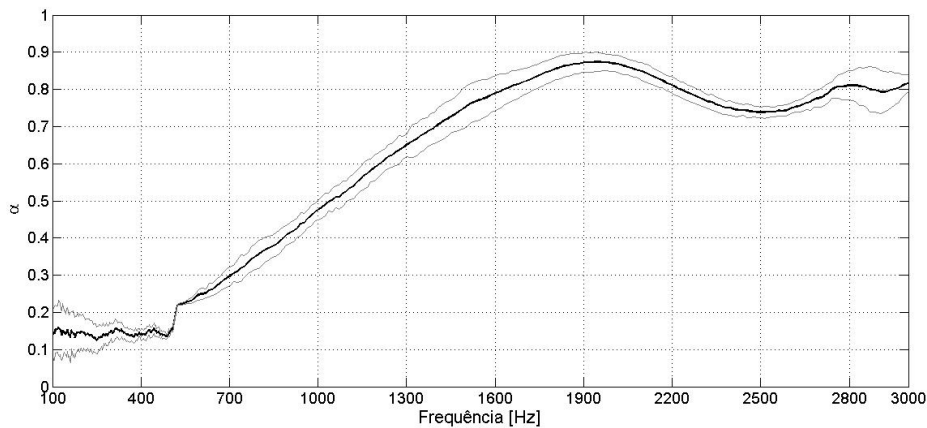


Figura 4.3: Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 1.

Comparando os resultados dos coeficientes de absorção sonora do Material 1 com os obtidos pela espuma de poliuretano ensaiada por Kino (2015), é possível constatar semelhanças de comportamento, com valores abaixo de 0,20 até 500Hz, um aumento progressivo a partir dessa frequência, e valores acima de 0,70 a partir de cerca de 1.350Hz.

4.2.2.2 Material 2 – Espuma de Polietileno

Os ensaios do Material 2 representaram comportamentos de absorção sonora semelhantes entre suas amostras, conforme Figura 4.4. O material indicou alguns picos de absorção sonora em frequências específicas, que são mais bem detalhados na Tabela 4.2. Na média obtida pelas três amostras os picos de absorção são de 0,56 a 900Hz, 0,78 a 1.400Hz e 0,47 a 2.800Hz.

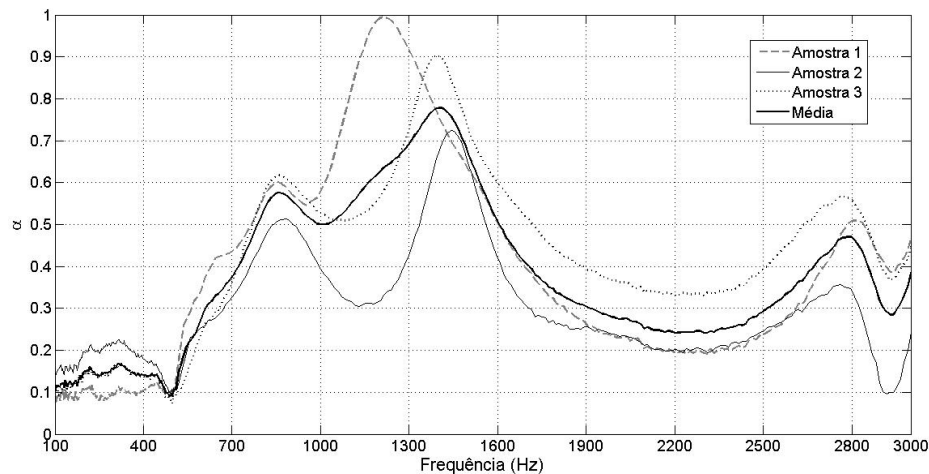


Figura 4.4: Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 2 e média aritmética das três.

Tabela 4.2 Picos de absorção sonora para as três amostras do Material 2.

	Frequências (Hz)	Coeficiente de Absorção Sonora (α)
Amostra 1	900	0,58
	1.200	0,99
	2.800	0,51
Amostra 2	900	0,50
	1.500	0,72
	2.700	0,34
Amostra 3	850	0,59
	1.400	0,90
	2.700	0,56

A espuma de polietileno, apesar de apresentar um comportamento de absorção semelhante entre as amostras testadas, apontou uma variação da ocorrência dos picos de absorção sonora entre elas. Assim, a amplitude de variação dos valores para a média obtida a partir das três amostras é consideravelmente maior, o que resultou em uma menor precisão dos valores obtidos. Conseqüentemente, o intervalo de confiança apresenta uma amplitude maior, variando em até cerca de 8 unidades para as faixas frequências entre 900 e 1.400Hz, conforme ilustra a Figura 4.5. No entanto, para as frequências restantes, a amplitude de variação do intervalo de confiança não é maior do que 2 unidades.

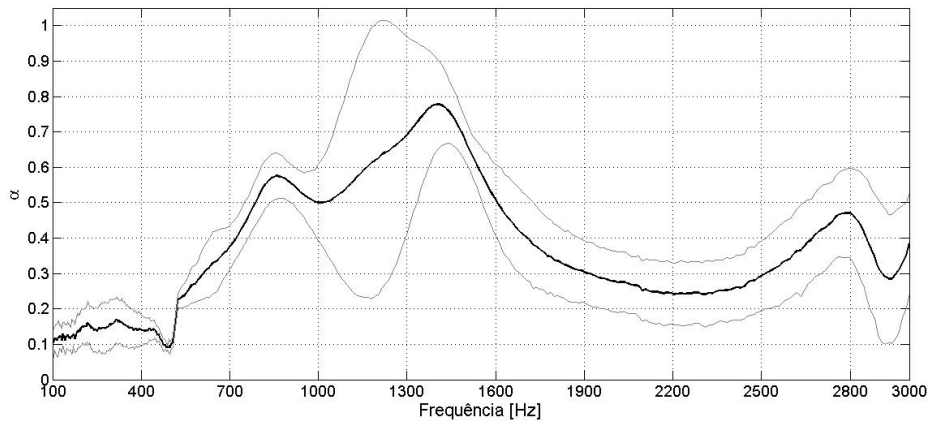


Figura 4.5: Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 2.

4.2.2.3 Material 3 – Cortiça

As amostras referentes ao Material 3 também apresentaram comportamentos de absorção sonora semelhantes, representados na Figura 4.6. Seus coeficientes de absorção sonora são baixos para todas as faixas de frequência, com uma média de 0,3 nas faixas de frequência entre 1.300 e 2.800Hz, tendo sido o maior valor alcançado de 0,48 a 2.900Hz.

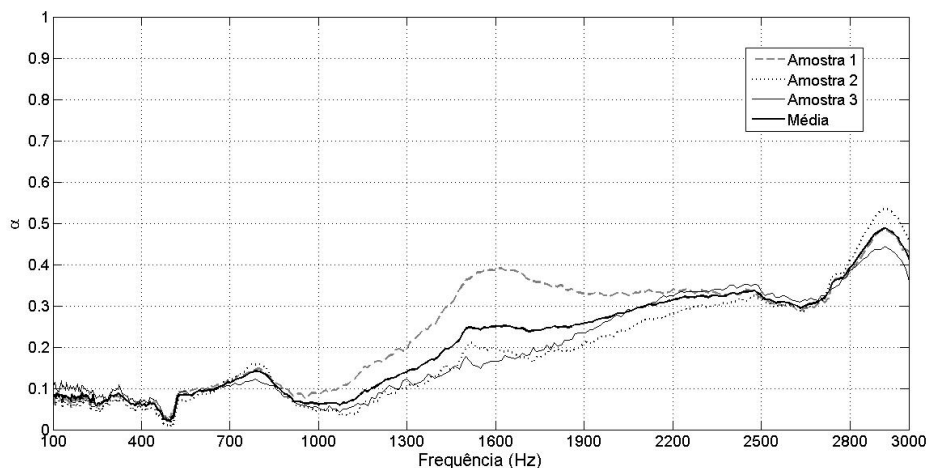


Figura 4.6: Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 3 e média aritmética das três.

As amostras apresentaram uma pequena variação de valores de coeficiente de absorção sonora entre 1.300 e 1.900Hz, o que estabelece menor precisão dos valores

obtidos para a média das três amostras nesse intervalo, com amplitude de variação de até 3 unidades, representada pela Figura 4.7. Entretanto, para todas as outras faixas de frequência, as amostras demonstraram comportamentos mais próximos.

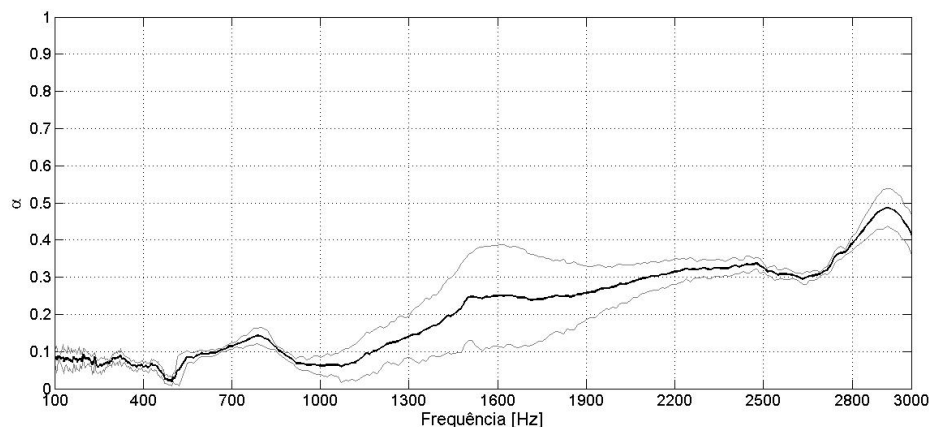


Figura 4.7: Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 3.

O desempenho da cortiça como um material absorvedor foi o mais baixo entre todos os materiais testados nos ensaios de absorção sonora, com valores que ficam em torno 0,2 somente a partir de 1.300Hz e nunca ultrapassam 0,5, o que permite dizer que o Material 2 não representa um material absorvedor. A constatação pode ser reforçada segundo o trabalho de Desarnaulds, Constanzo, Carvalho e Arlaud (2005), que fez uma análise da cortiça como um material isolante. Apesar do material não ter sido muito efetivo para o isolamento ao ruído aéreo, para o isolamento ao ruído de impacto apresentou resultados tão satisfatórios quanto aos de materiais tradicionais.

No entanto, Sans, Morillas e Escobar (2014) descobriram o potencial da cortiça como um bom material absorvedor quando o material é apresentado em granulados soltos, conformando partículas suficientemente pequenas, por volta de 1 a 2mm. Obtiveram resultados de resistividade ao fluxo de $2.580 \text{ rayls} \cdot \text{m}^{-1}$ e coeficientes de absorção sonora acima de 0,7 a partir de 500Hz nessas condições.

4.2.2.4 Material 4 – Espuma de Poliuretano

O Material 4 apresentou o melhor desempenho global como material absorvedor para todas as faixas de frequência, entre os 5 materiais analisados. Conforme representa a

Figura 4.8, os coeficientes de absorção sonora obtidos para a média das três amostras são 0,87 e 0,92, respectivamente, para 2.200Hz e 3.000Hz e valores acima de 0,70 a partir de 1.450Hz.

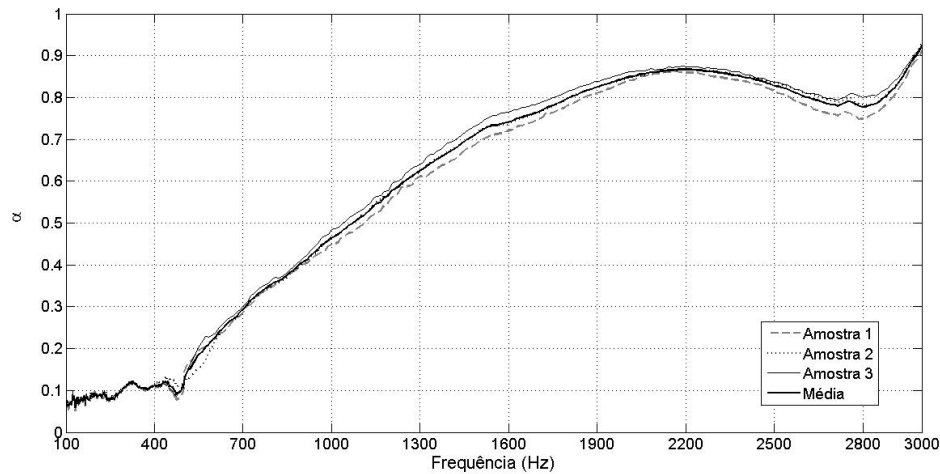


Figura 4.8: Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 4 e média aritmética das três.

Assim como para o Material 1, com relação aos valores obtidos por Kino (2015), o Material 4 também apresenta semelhanças de comportamento da absorção, com valores abaixo de 0,20 até 500Hz, aumento progressivo a partir dessa frequência e valores acima de 0,70 a partir de cerca de 1.350Hz.

Com relação ao intervalo de confiança, ilustrado pela Figura 4.9, a média obtida pelas três amostras obteve, entre os 5 materiais, a menor amplitude de variação de valores.

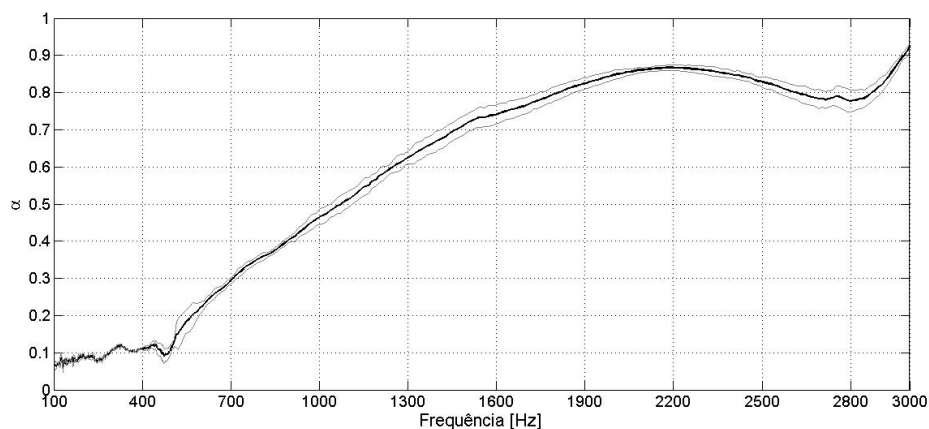


Figura 4.9: Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 4.

4.2.2.5 Material 5 – Fibra de Coco

A fibra de coco obteve valores para a média das amostras acima de 0,3 a partir de 1.500Hz, com maior representação de valor em 1.900Hz, de 0,53, de acordo com a Figura 4.10. É importante destacar que a amostra 2 teve um desempenho ligeiramente divergente das demais, com valores superiores a partir de 1.800Hz, onde alcançou 0,61 e 0,75, respectivamente, em 2.000 e 3.000Hz.

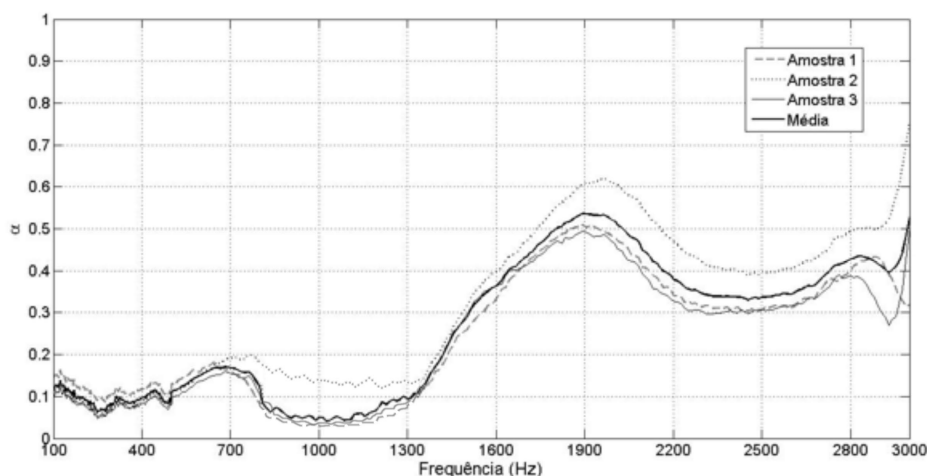


Figura 4.10: Coeficiente de Absorção Sonora para as amostras 1, 2 e 3 do Material 5 e a média aritmética entre das três.

Segundo a Figura 4.11, o intervalo de confiança obteve uma amplitude de variação menor do que 0,1 até 1.800Hz, a partir desta frequência ocorre maior amplitude de variação dos valores devido a divergência apresentada pela Amostra 2.

Com relação ao ensaio de absorção sonora, a amostra de 20mm do estudo de Fouladi, Ayub e Nor (2011) obteve valores que corroboram com os resultados da amostra de 22mm do presente trabalho. Valores para o coeficiente de absorção sonora abaixo de 0,20 são constatados até cerca de 1.400Hz, valores que ficam em torno de 0,60 por entre 1.900 e 2.000Hz, e que alcançam desempenhos mais elevados que os demais citados por volta de 3.000Hz acontecem em ambos os estudos.

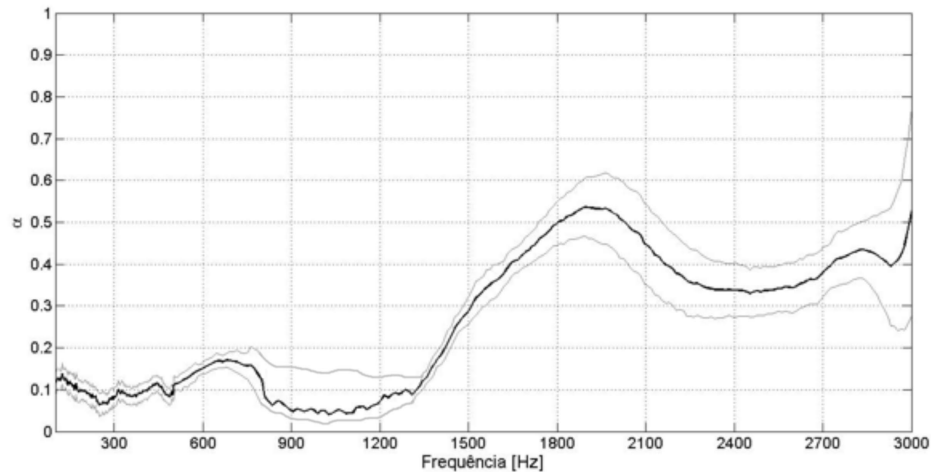


Figura 4.11: Intervalo de confiança para a média das amostras 1, 2 e 3 do Material 4.

4.2.3 Impedância Superficial Normalizada - Resistivo e Reativo

Como citado no Capítulo 2, semelhante a um modelo mecânico, o comportamento de um material está associado às suas propriedades dinâmicas, como massa, rigidez e amortecimento. A parte real da impedância (Resistivo), está associada aos mecanismos de perdas viscosas e transferência de calor e a parte imaginária da impedância (Reativo) leva em consideração os efeitos da massa ($j\omega m$) e/ou da rigidez ($-jk/\omega$).

Nos Materiais 1, 4 e 5 (espumas de poliuretano e fibra de coco) o elemento Resistivo apresenta valores mais constantes e uma curvatura mais suave do que a parte imaginária (Reativo), retratados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14.

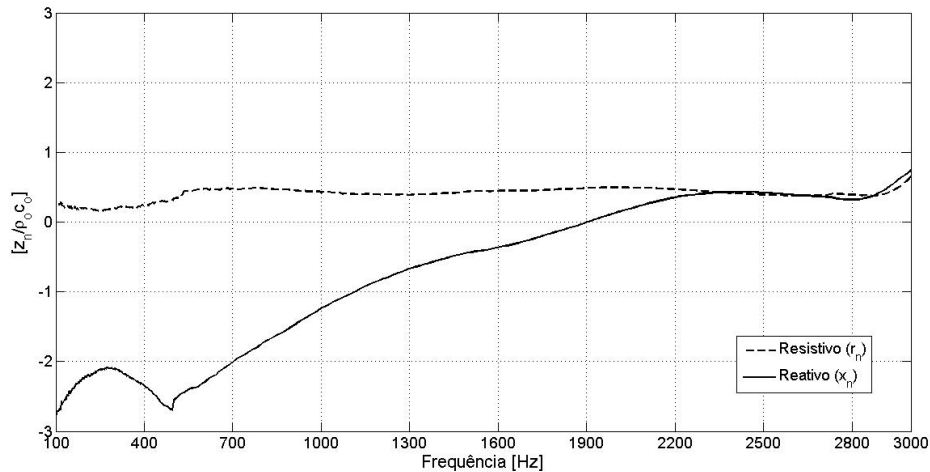


Figura 4.12: Impedância Superficial Normalizada para o Material 1 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).

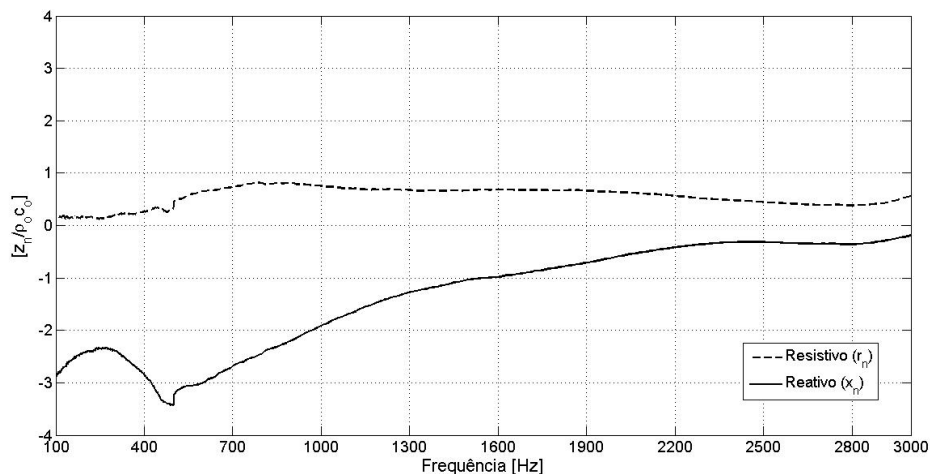


Figura 4.13: Impedância Superficial Normalizada para o Material 4 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).

O comportamento do Reativo é regido pela rigidez enquanto negativo, ao ser tornar positivo indica que o sistema é regido pela massa. No Material 1 o Reativo se torna positivo e passa a ser regido pela massa a partir de 1.900Hz, já o Material 4, que apesar de ter configuração semelhante, seu sistema Reativo permanece controlado pela rigidez em todas as faixas de frequência, assim como o Material 5, que, entretanto, apresenta um pico por volta entre 400 e 700Hz.

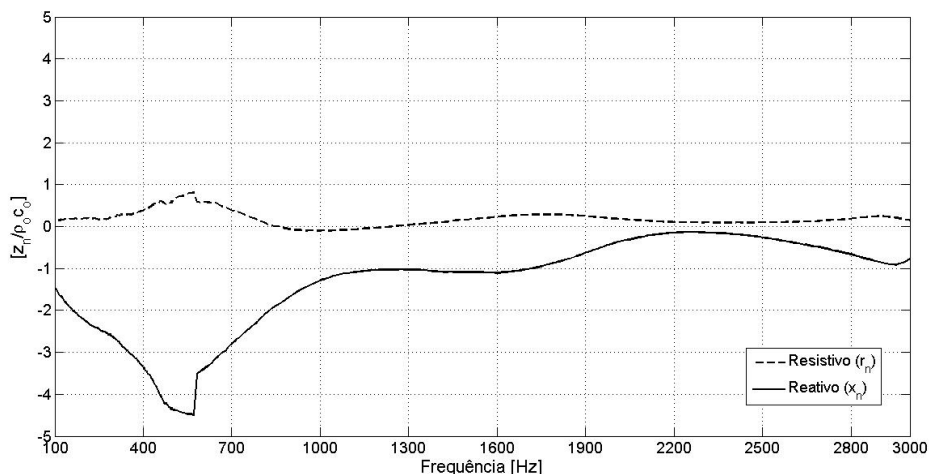


Figura 4.14: Impedância Superficial Normalizada para o Material 5 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).

Nos Materiais 2 e 3 (espuma de polietileno e cortiça) é possível perceber um comportamento diferente dos demais, com ocorrência de picos no Resistivo, por volta de 2.500Hz para o Material 2 e entre 700 e 1.000Hz para o Material 3, conforme as Figuras 4.15 e 4.16.

O sistema Reativo do Material 2 apresenta um decréscimo de valor a partir de 1.800Hz e abrupta troca de sinal por volta de 2.300Hz com sua elevação até por volta de 2.550Hz e posteriormente suave decréscimo.

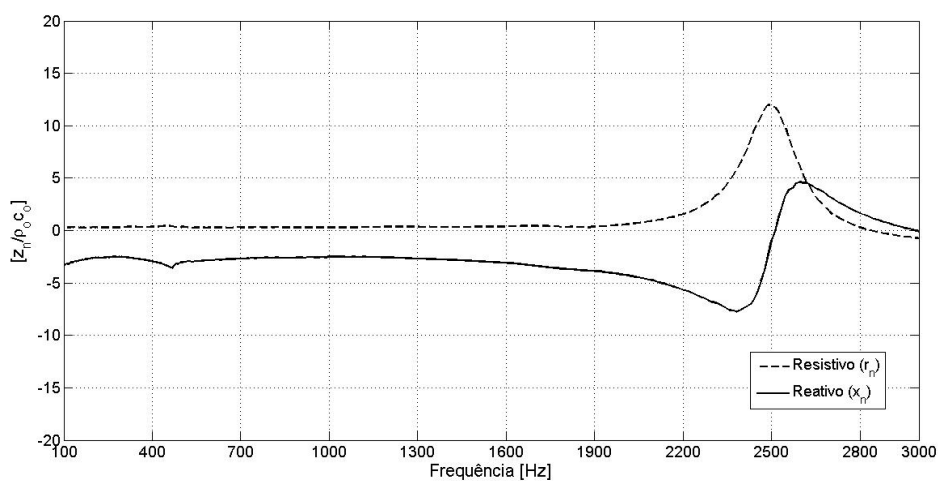


Figura 4.15: Impedância Superficial Normalizada para o Material 2 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).

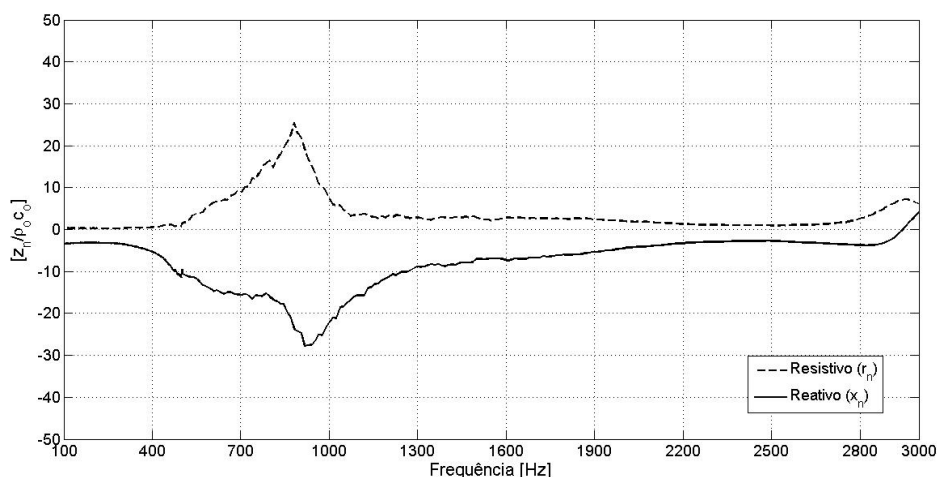


Figura 4.16: Impedância Superficial Normalizada para o Material 3 – Resistivo (r_n) e Reativo (x_n).

O Material 3 apresenta, entre 400 e 1300Hz, decréscimo de valor conformando um pico entre 700 e 1.000Hz, com troca de sinal apenas próximo de 2.900Hz.

4.2.4 Implementação dos Métodos Teóricos

Serão apresentados os resultados da implementação dos métodos teóricos com apresentação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica superficial normalizada calculados, assim como a comparação entre eles e com os ensaios experimentais.

Para a implementação do método teórico de Delany-Bazley foram utilizadas as resistividades ao fluxo apontadas na seção 4.1 deste Capítulo. Para o método teórico de Allard-Champoux foram encontrados valores na literatura apenas para a espuma de poliuretano, Tabela 4.3, que foram incorporados para os Materiais 1 e 4. Para a fibra de coco, Tabela 4.4, incorporados para o Material 5. Desta forma, a aplicação de Allard-Champoux se restringe aos Materiais 1, 4 e 5.

Tabela 4.3 Propriedades para Espuma de Poliuretano (KINO, 2015).

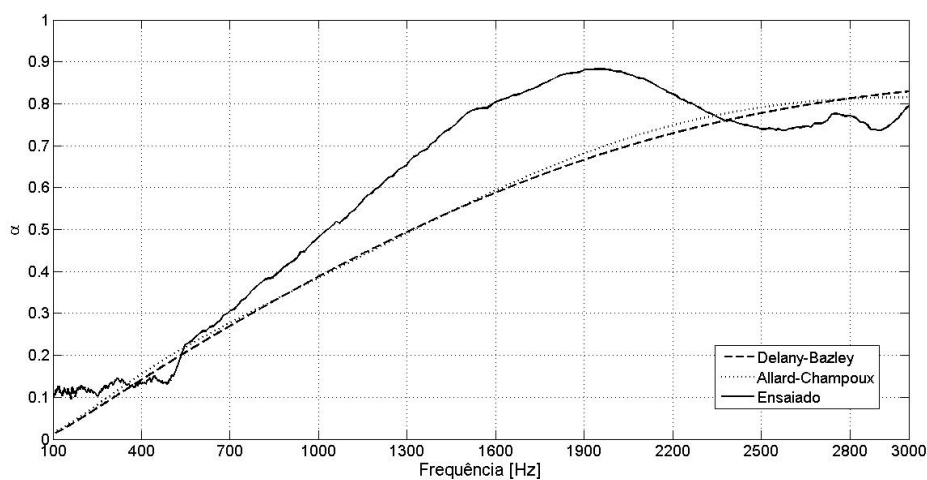
Material 1 e Material 4– Espuma de poliuretano		
Porosidade (ϵ)		0,93
Comprimento carac. Viscoso	(μm)	132
Comprimento carac. Térmico	(μm)	207
Tortuosidade		1,17

Tabela 4.4 Propriedades para a Fibra de Coco. (FOULADI, AYUB E NOR, 2011)

Material 5 – Fibra de Coco		
Porosidade (ϵ)		0,87
Comprimento carac. Viscoso	(μm)	134,5
Comprimento carac. Térmico	(μm)	269
Tortuosidade		1,06

4.2.4.1 Material 1 – Espuma de Poliuretano

As curvas para método de Delany-Bazley e Allard-Champoux apresentam comportamentos semelhantes para o Material 1. A maior disparidade entre os comportamentos dos métodos aplicados com o do ensaio experimental estão entre 1.000Hz e 2.100Hz.

**Figura 4.17:** Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 1.

Com relação a impedância superficial normalizada, foi diagnosticado grande semelhança entre os comportamentos dados pelos métodos teóricos com o ensaiado, principalmente quando se referente à parte real do sistema, conforme Figura 4.18. No entanto, os dois métodos teóricos apresentam valores muito diferenciados para a parte imaginária abaixo de 400Hz.

O sistema ensaiado deixa de ser influenciado pela rigidez e passa a ser controlado pela massa (mudança de sinal positivo para negativo) na frequência de 1.600Hz, enquanto no sistema de Allard-Champoux o fenômeno ocorre a 2.200Hz e no de Delany-Bazley a 2.500Hz.

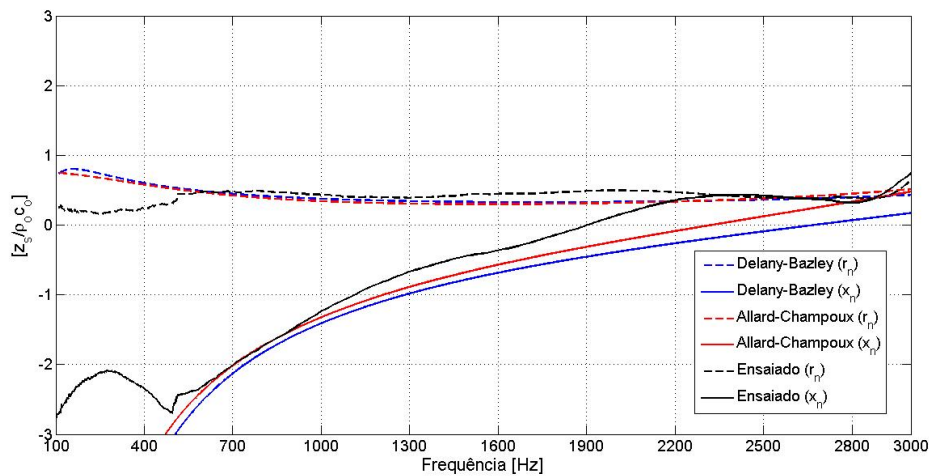


Figura 4.18: Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 1.

Segundo Rosseti, Gardonio e Brennan (2005) a frequência particular, na qual ocorre mudança de sinal da parte imaginária e o sistema é dominado pela massa, pode ser calculada por meio da equação abaixo:

$$\omega_t = \frac{\varepsilon \eta}{k_0 \rho_0 k_s} [\text{Hz}] \quad (4.1)$$

onde ε é a porosidade, η é a viscosidade do ar, k_0 permeabilidade viscosa, ρ_0 é a densidade do ar e k_s a tortuosidade.

Apenas para efeito de comparação, utilizando os valores da Tabela 4. ,para porosidade e tortuosidade, e para permeabilidade viscosa $k_0 = 0,84 \times 10^{-9} \text{m}^2$ citada para a

espuma de poliuretano por Mills (2005), o valor obtido é de 2.291,35Hz, o que corrobora com a troca de sinal apresentada por Allard-Champoux a 2.200Hz.

4.2.4.2 Material 2 – Espuma de Polietileno

A curvatura do método de Delany-Bazley para o Material 2 não apresentou semelhanças significativas que possam ser relatadas, como apresentado pela Figura 4.19. Enquanto o ensaio experimental apresenta um desempenho com oscilações variáveis de absorção sonora, o método teórico aponta uma curvatura mais uniforme e com crescimento linear, o que não corrobora com a sua utilização para a espuma de polietileno.

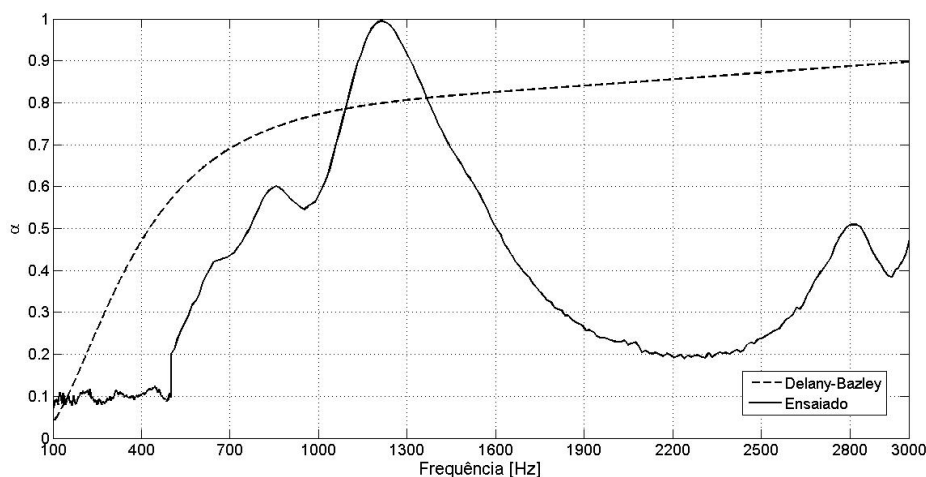


Figura 4.19: Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 2.

Como citado no Capítulo 3, a formulação para Delany-Bazley apresenta restrições de uso para materiais com porosidades acima de 1,0, resistividade ao fluxo diferente de do limite de $1.000 \leq \sigma \leq 50.000$ e do limite de X , $0,01 \leq X \leq 1,0$.

O Material 2 apesar de ter sua resistividade ao fluxo próxima do limite estabelecido, $56.141 \text{ rayls. m}^{-1}$, ela o ultrapassa, assim como os valores encontrados para X , que ficam entre 0,03 e 0,09. Mesmo não sendo conhecido o valor para a porosidade do material, pode ser afirmado que a restrição dada ao método colabora com o seu resultado inadequado.

Pode ser analisado na Figura 4.20, que a parte real do modelo apresenta valores superiores aos obtidos no ensaio, e não apresenta o pico existente por volta de 2.500Hz. No entanto, a parte imaginária teórica permanece controlada pela rigidez, não apresentando a mudança de sinal com ocorrência no ensaio na frequência de 2.600Hz.

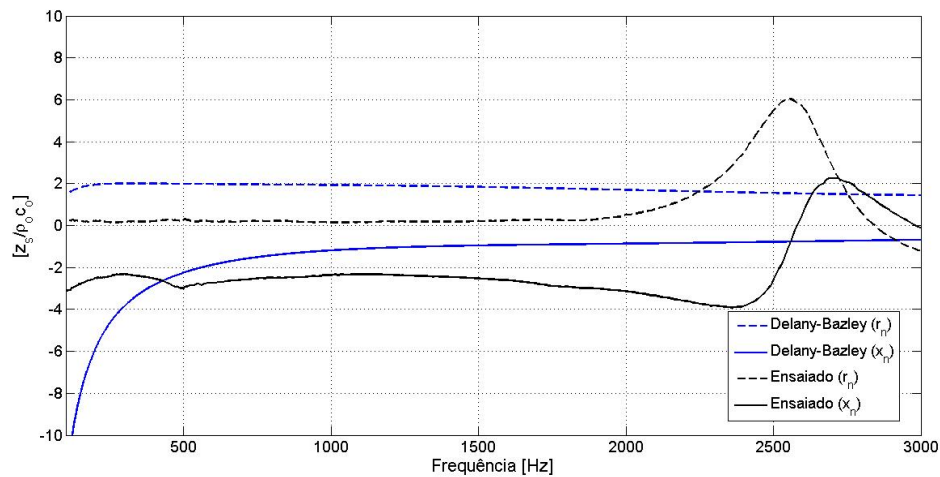


Figura 4.20: Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 2.

4.2.4.3 Material 3 – Cortiça

O alto valor encontrado para a resistividade ao fluxo da cortiça (Ensaio1), gerou um comportamento de absorção sonora muito baixo para no método teórico, com valores abaixo de 0,10, que muito se diverge do comportamento observado pela absorção obtida no ensaio experimental, conforme é observado na Figura 4.21.

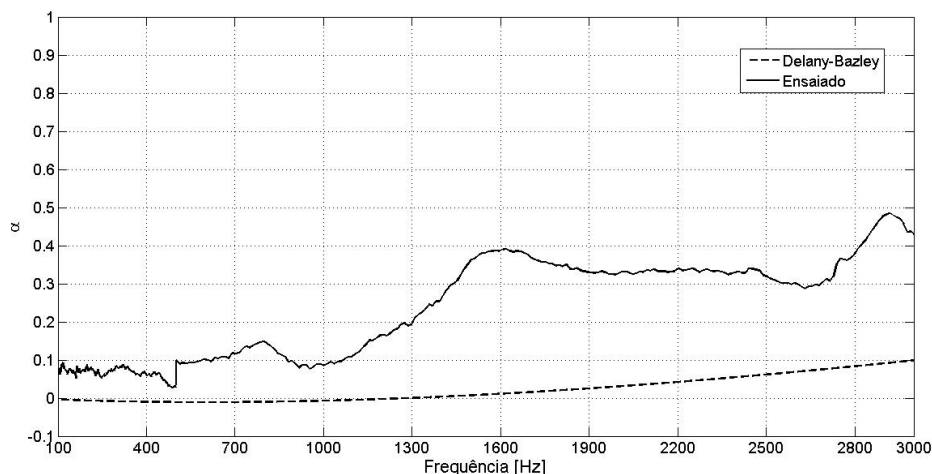


Figura 4.21: Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 3.

Assim como o Material 2 (espuma de polietileno), o Material 3 (cortiça) também apresenta uma resistividade ao fluxo elevada, na ordem de $273.510 \text{ rayls} \cdot \text{m}^{-1}$. Entretanto, valores muito baixos para o X , abaixo do limite exigido pela formulação, de no máximo $0,014$. Estes fatores, mais uma vez, implicam em sua inadequada utilização da formulação para o devido material.

É possível identificar divergências entre as impedâncias tanto na parte real quanto na imaginária. Os valores se aproximam apenas quando em torno de 1.900 Hz , de acordo com a Figura 4.22.

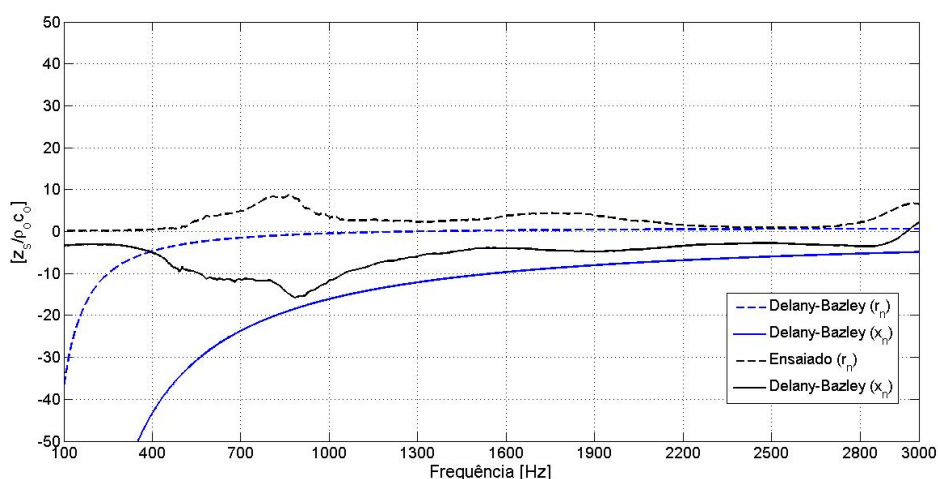


Figura 4.22: Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 3.

4.2.4.4 Material 4 – Espuma de Poliuretano

Para o Material 4 os métodos de Delany-Bazley e Allard-Champoux apresentam comportamentos semelhantes com o ensaiado até a frequência de 550Hz. A partir de tal frequência, os coeficientes de absorção teóricos apontam valores substancialmente mais baixos do que os encontrados no ensaio. As curvaturas de Delany-Bazley e Allard-Champoux apontam divergência a partir de 1.000Hz, Delany-Bazley permanece com coeficientes mais altos a partir deste ponto. As constatações podem ser observadas na Figura 4.23.

Acredita-se que os valores utilizados para o método de Allard-Champoux, da Tabela 4.3, não se aproximam tanto com as propriedades espuma de poliuretano do Material 4 quanto foi para a espuma do Material 1.

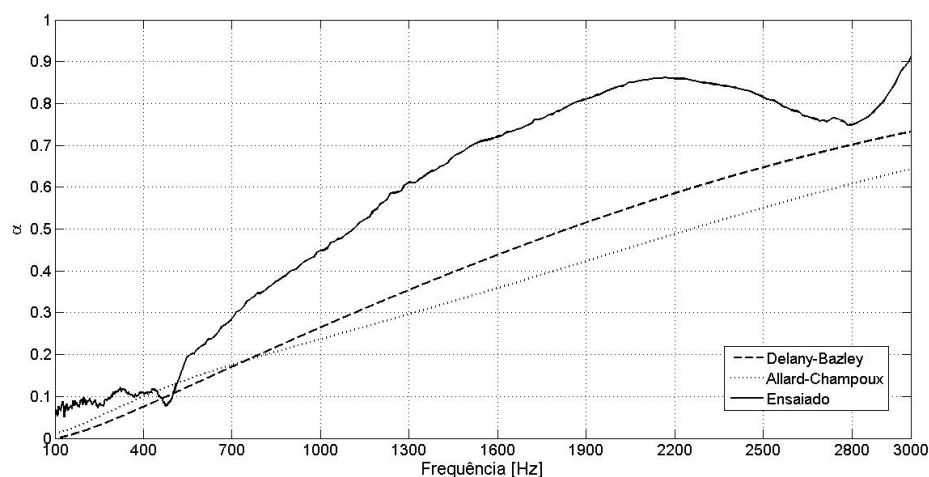


Figura 4.23: Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 4.

Na Figura 4.24, as curvaturas teóricas e ensaiadas para a impedância, possuem comportamentos semelhantes para a parte real. Já para a parte imaginária, ocorrem valores de divergência entre ensaio e métodos teóricos nas faixas de frequência abaixo de 400Hz, assim como ocorreu com o Material 1.

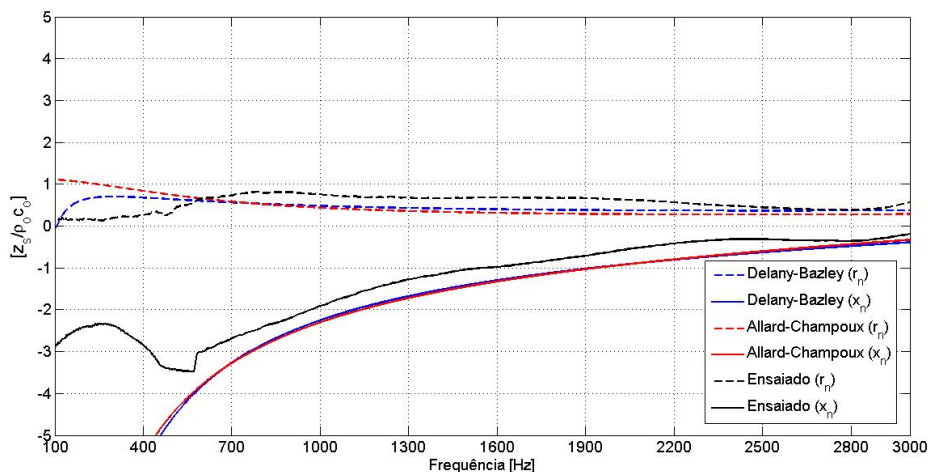


Figura 4.24: Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 4.

4.2.4.5 Material 5 – Fibra de Coco

O ensaio experimental da fibra de coco também apresenta ocorrências de picos de absorção, que não são diagnosticados nos comportamentos dados pelos métodos teóricos, assim como apresenta a Figura 4.25. As oscilações podem ser observadas, principalmente entre 700 e 1.300Hz e 1.300Hz e 2.200Hz. Os valores ensaiados se aproximam dos teóricos em baixas frequências até 700Hz. No entanto, a partir de 2.200Hz o método de Delany-Bazley se configura mais próximo ao ensaio, enquanto Allard-Champoux apresenta um salto a partir de 1.300Hz.

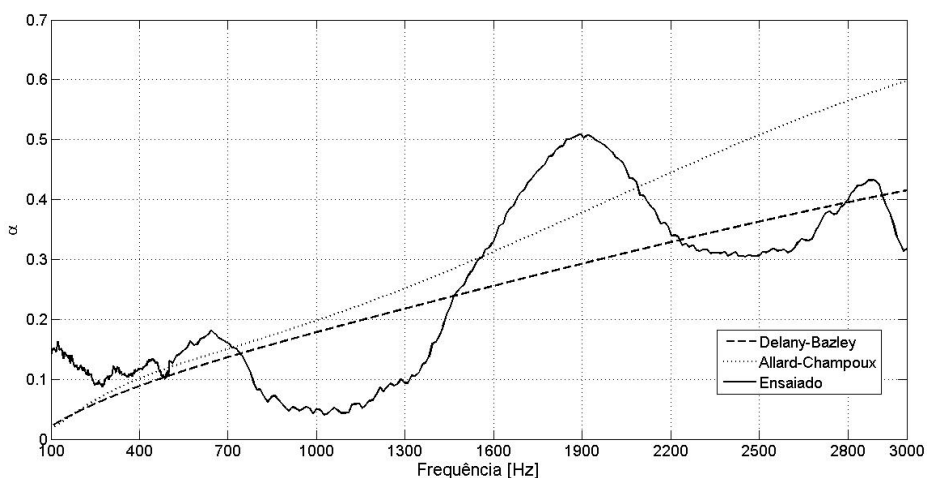


Figura 4.25: Coeficiente de Absorção Sonora teórico para o Material 5.

Enquanto Fouladi, Ayub e Nor (2011) calcularam para suas amostras uma porosidade de 0,88; Silva, Magalhães e Gumieri (2008) obtiveram o valor de 0,92. Apesar de a resistividade ao fluxo do Material 5 ($1.680 \text{ rayls} \cdot \text{m}^{-1}$) estar dentro do limite permitido pela formulação de Delany-Bazley e sua porosidade se aproximar de 1,0, os valores para X ultrapassam o limite permitido e ficam em torno de 2,38 e 2,90, o que possivelmente compromete a utilização da formulação.

Fouladi, Ayub e Nor (2011) também implementaram o método de Allard-Champoux para a fibra de coco e obtiveram valores que corroboram com os encontrados para a esta dissertação: acima de 1.500Hz os valores para o método teórico citado são consideravelmente mais baixo do que o ensaiado.

Com relação à impedância, de acordo com a Figura 4.26, os valores obtidos pelos métodos teóricos se aproximam dos valores obtidos em ensaio, com exceção daqueles entre as frequências de 100 e 400Hz.

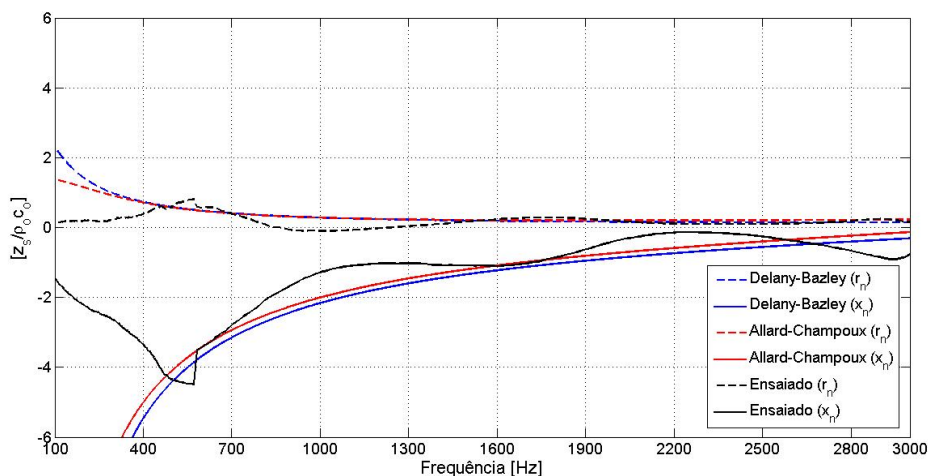


Figura 4.26: Impedância Superficial Normalizada teórica para o Material 5.

4.3 Sistemas de Duas Camadas

Nesta seção serão apresentados apenas as combinações de dois materiais, nos quais as análises foram consideradas mais relevantes. Ensaios não mencionados são encontrados no Apêndice B desta dissertação.

4.3.1 Aumento de Espessura

Os desempenhos de sistemas compostos por dupla camada, a partir do momento em que as camadas são constituídas por um mesmo material, configura-se como um aumento de espessura do sistema.

Segundo Cox e D'Antonio (2009) conforme a espessura é aumentada, a absorção do material em baixas frequências também aumenta, assim como é diagnosticado neste trabalho em sistemas compostos por duas camadas do mesmo material.

4.3.1.1 Duplicação de Camada do Material 1 – Espuma de Poliuretano

Demonstrado na Figura 4.27, a duplicação da camada do Material 1 apresenta aumento considerável em baixas frequências. Em 400Hz o coeficiente é da ordem de 0,32 para a dupla camada enquanto para a camada única o valor é de 0,14. Coeficientes acima de 0,70 são obtidos para o material em camada dupla e única, respectivamente, em frequências de 600 e 1.400Hz.

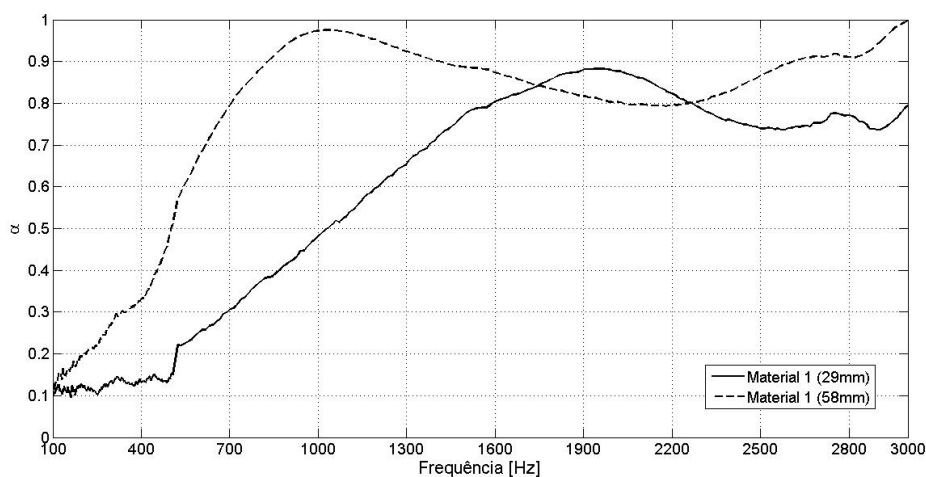


Figura 4.27: Dupla camada composta por duas amostras do Material 1, aumento de espessura do sistema.

4.3.1.2 Duplicação de camada do Material 2 – Espuma de Polietileno

No caso do sistema composto pela duplicação da espuma de polietileno, apesar de ser evidente o aumento da absorção em baixas frequências, como demonstrado na Figura

4.28, alcançando o valor de 0,4 para a frequência de 350Hz, o sistema configura um deslocamento nas frequências de ocorrência do pico de absorção. Os valores dos coeficientes de absorção sonora para única e dupla camada apresentam valores muito próximos, mas com suas ocorrências em frequências antecipadas para o sistema de dupla camada.

Conforme a Figura 4.28, a partir da análise dos picos para os sistemas em camada única e dupla, pode ser relatado que o primeiro pico de 0,59 a 850Hz acontece para a dupla camada em 650Hz com o valor de 0,63. O segundo pico de 0,90 a 1.400Hz tem ocorrência em 980Hz com o valor de 0,91. Já o terceiro pico, foi o que apresentou maior antecipação de ocorrência, seu valor teve uma redução de 0,56 a 2.700Hz em camada única para 0,52 a 1.800Hz em dupla camada.

A partir de 2.000Hz o coeficiente de absorção sonora tem seu aumento progressivo até 2.800Hz onde a curva começa a declinar suavemente.

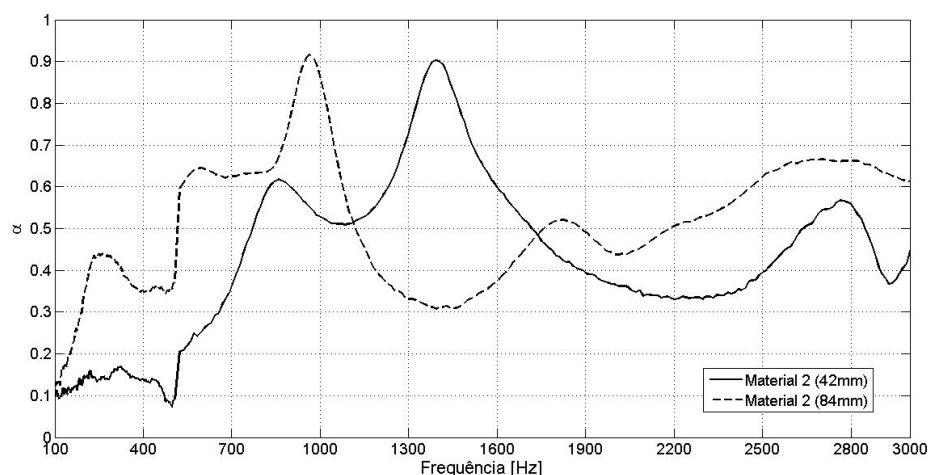


Figura 4.28: Dupla camada composta por duas amostras do Material 2, aumento de espessura do sistema.

4.3.1.3 Duplicação de camada do Material 3 – Cortiça

De acordo com a Figura 4.29, a cortiça quando em dupla camada, apresenta um aumento menos expressivo em baixas frequências até 800Hz e aumento mais expressivo entre 1.000 e 1.900Hz. A partir de 2.800Hz os valores obtidos chegam a 0,53 em 1.400Hz e 0,60 em 3.000Hz.

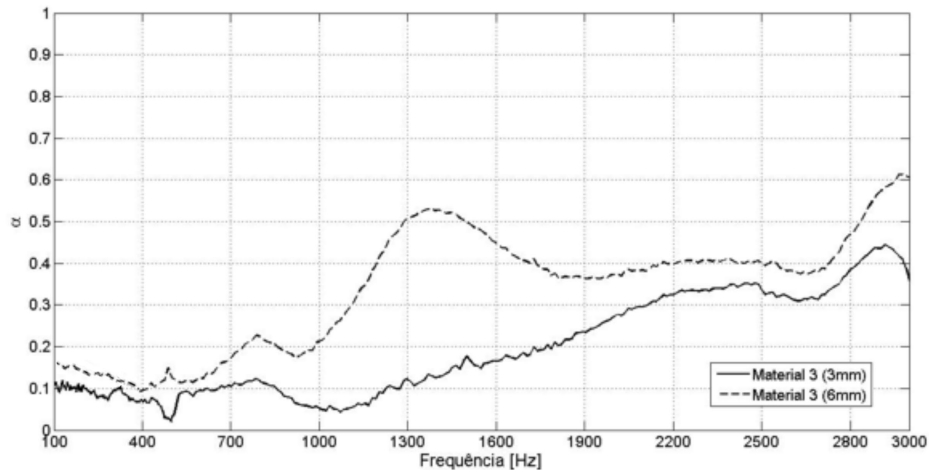


Figura 4.29: Dupla camada composta por duas amostras do Material 3, aumento de espessura do sistema.

4.3.1.4 Duplicação de camada do Material 4 – Espuma de Poliuretano

O aumento de espessura do Material 4 obteve um considerável aumento da absorção sonora para todas as faixas de frequência, observado na Figura 4.30. Valores do coeficiente de absorção sonora acima de 0,90, para a dupla camada do material, são encontrados a partir de 1.000Hz. Em contrapartida, em camada única o mesmo valor é alcançado apenas por volta de 2.000 e de 3.000Hz.

O sistema em camada dupla obteve aumento expressivo entre 600 e 1.600Hz, atingindo valores próximos a 0,65 e 0,97, respectivamente, em comparação com o alcançado pelo sistema em camada única, que para as mesmas frequências obtiveram 0,30 e 0,74. O valor máximo obtido é de 0,99 em 2.300 e 2.600Hz e valores acima de 0,95 entre 1.300 e 2.800Hz.

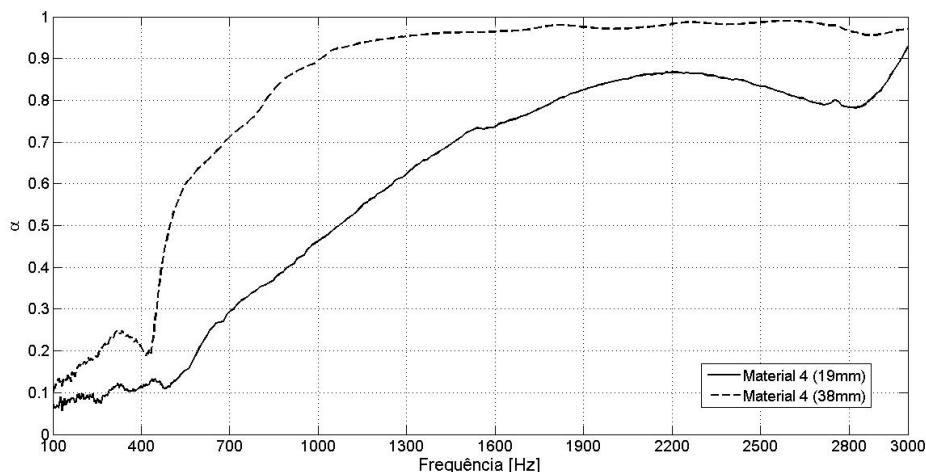


Figura 4.30: Dupla camada composta por duas amostras do Material 4, aumento de espessura do sistema.

4.3.1.5 Duplicação de camada do Material 5 – Fibra de Coco

Conforme a Figura 4.31, a duplicação de camada da fibra de coco não demonstrou aumento expressivo para baixas frequências até 550Hz, entretanto, para médias frequências, em torno de 700 e 1.900 Hz, apresentou um salto no desempenho, com um aumento de até 0,40 se comparado com o sistema em camada única. A partir de 1.900 e até 2.750Hz, aumento constante de aproximadamente 0,20. A dupla camada alcançou os valores mais altos, atingindo 0,72 em 1.650 e 0,54 em 2.750Hz, enquanto que para a camada única os valores são de 0,50 e 0,39 em 1.900 e 2.800Hz.

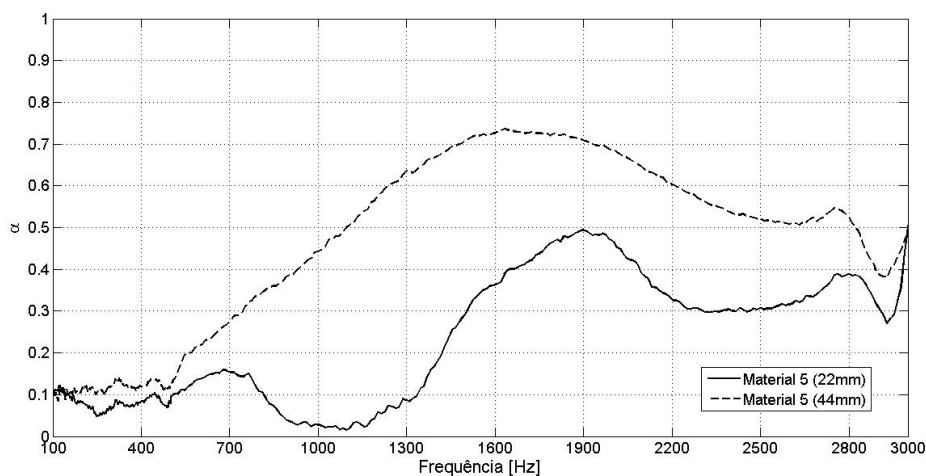


Figura 4.31: Dupla camada composta por duas amostras do Material 5, aumento de espessura do sistema.

4.3.2 Análise de Comportamento do Desempenho Devido ao Posicionamento dos Materiais que Compõem os Sistemas

Aqui serão apresentados sistemas compostos por duas camadas, constituídos por materiais divergentes e a análise comparativa da inversão do posicionamento desses materiais. O nome adotado para cada sistema segue o padrão exemplificado na Figura 3.8, do Capítulo anterior.

4.3.2.1 Materiais 1 e 2

No Sistema composto pelos Materiais 1 e 2 (espuma de poliuretano e espuma de polietileno) é notada uma sobreposição de comportamento dos materiais: o Material 1 demonstra o seu bom desempenho em todas as faixas de frequência, predominantemente acima de 0,80 a partir de 700Hz. Os picos do Material 2 são ressaltados, por volta de 850, 1.400 e 2.400Hz, respectivamente, com valores de 0,93, 0,86 e 0,99. Uma maior absorção sonora para todas as faixas de frequência é observada com relação aos desempenhos dos materiais quando isolados.

Já no sistema composto pelos materiais 2 e 1 (espuma de polietileno e espuma de poliuretano) é possível constatar que o comportamento do desempenho do Material 2 sobressai em relação ao Material 1. Enquanto o comportamento do Material 2 é mantido os altos valores de absorção do Material 1 são consideravelmente minimizados. Pode ser constatado ainda uma variação dos picos de absorção, a 250, 800 e 2.900Hz, com valores, respectivamente, de 0,72, 0,80 e 0,71.

Conforme citado acima, a Figura 4.32 demonstra a comparação da inversão de materiais de dupla camada compostos por amostras de espuma de poliuretano e polietileno.

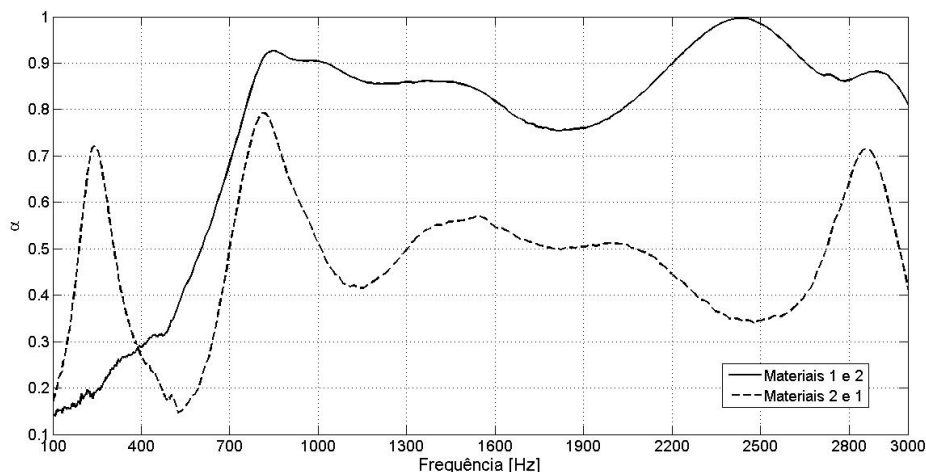


Figura 4.32: Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 2.

4.3.2.2 Materiais 1 e 3

O sistema composto pelos Materiais 1 e 3 (espuma de poliuretano e cortiça) apresenta valores altos em médias frequências, acima de 0,70 a partir de 800Hz, o que demonstra que o desempenho do Material 1 isolado é mantido e ocorre uma sobreposição de valores no sistema advinda do Material 3. Alguns picos, antes não existentes para ambos os materiais isolados, são encontrados a 900, 1.200 e 1950Hz, com valores de coeficiente de absorção sonora, respectivamente, de 0,80, 0,79, 0,98.

Assim como na análise anterior, feita para os Materiais 2 e 1, na análise para o sistema composto pelos Materiais 3 e 1 é possível constatar que o posicionamento do Material 3 afrente do Material 1 resulta na minimização do efeito do comportamento de absorção do Material 1 isolado. Picos podem ser destacados, antes não aparentes para ambos os sistemas isolados, que ocorrem a 250, 550, 850 e 2.900Hz, com seus valores correspondentes de 0,47, 0,75, 0,69 e 0,93, e redução de valores entre 1.150 e 2350Hz para menos de 0,30.

A Figura 4.33 ilustra a diferenciação dos picos encontrados de acordo com a composição do sistema de dupla camada composto por cortiça e espuma de poliuretano.

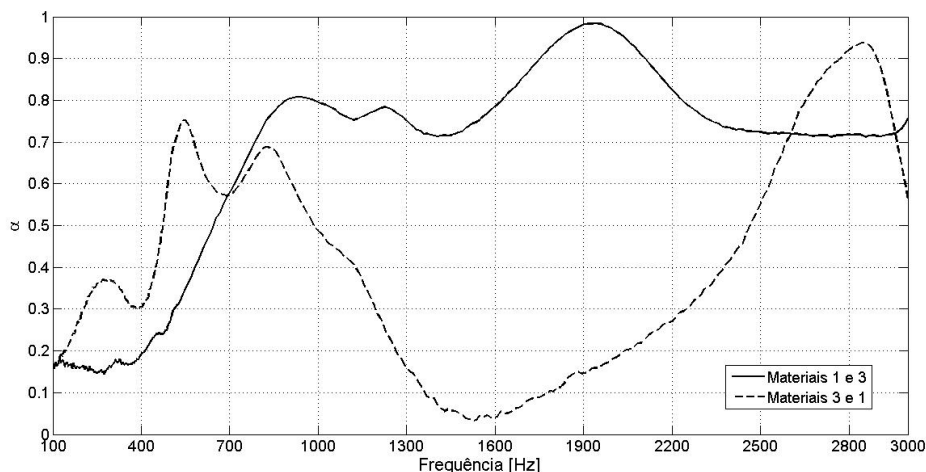


Figura 4.33: Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 3.

4.3.2.4 Materiais 1 e 4

Os sistemas compostos pelo conjunto do material 1 (espuma de poliuretano) com o material 4 (espuma de poliuretano) apresentaram desempenhos semelhantes, como ilustrado na Figura 4.34. É interessante destacar que ambos os sistemas apontam redução da absorção sonora por volta de 1.600 até cerca de 2.200Hz, chegando a valores próximos de 0,7 por volta de 2.200Hz. Essa ocorrência é observada no desempenho do Material 1 isolado, a partir de 1.900Hz, e no Material 4 isolado, a partir de 2.200Hz, entretanto, a redução da curvatura nesses materiais analisados isoladamente chegam a valores em torno de 0,74, 0,79, respectivamente.

Os Materiais 1 e 4, por possuírem comportamento semelhantes quando isolados, constituem de certa forma um aumento de espessura com aumento do coeficiente de absorção sonora como um todo, principalmente nas baixas frequências.

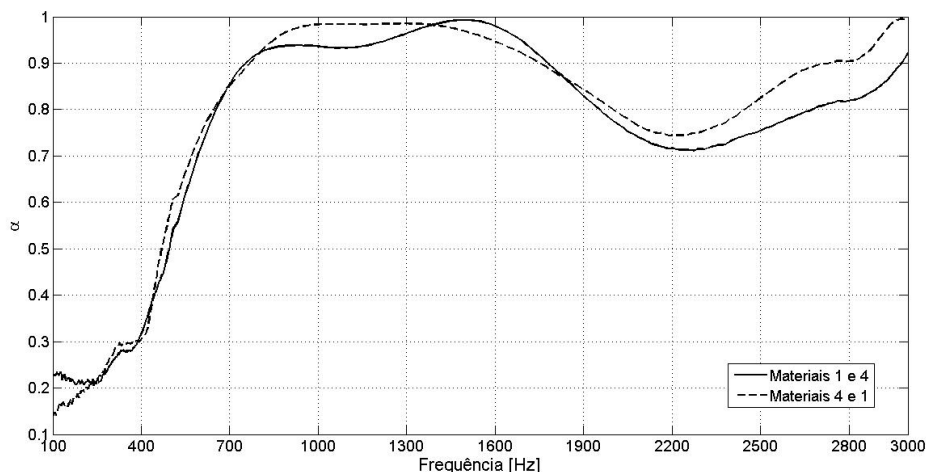


Figura 4.34: Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 4.

4.3.2.5 Materiais 1 e 5

Os sistemas formados pelo conjunto do material 1 (espuma de poliuretano) com o material 5 (fibra de coco) também configuraram comportamentos semelhantes, apresentando apenas uma pequena variação entre 700 e 1.300Hz, conforme a Figura 4.35.

É interessante analisar que, em ambos os sistemas, é representada uma potencialização do comportamento de absorção do Material 5 isolado, como se o Material 1, independente do seu posicionamento, conformasse um aumento dos valores dos coeficientes de absorção para o Material 5. Foi constatada uma redução de desempenho a partir de 1.600Hz, que chega a valores em torno de 0,55 entre 2.200 e 2.500Hz. Essa redução representa, em relação ao desempenho do Material 1 de forma isolada, uma perda em seu desempenho para esta faixa de frequência.

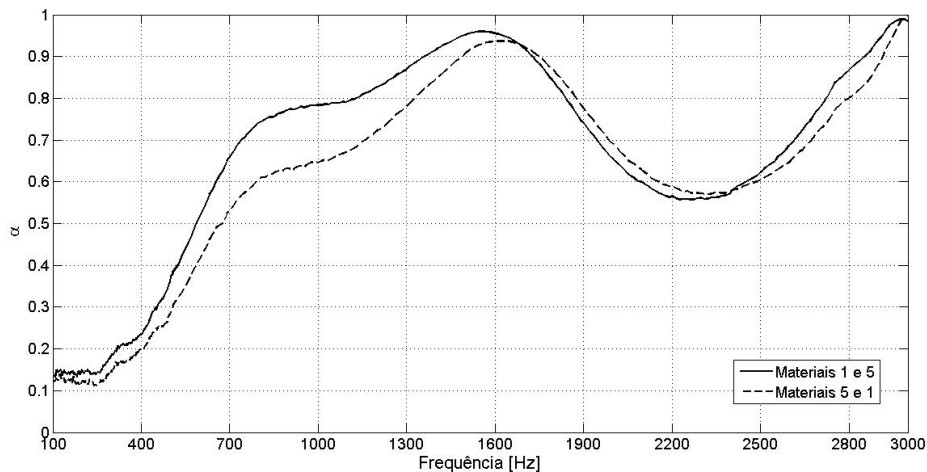


Figura 4.35: Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 1 e 5.

4.3.2.6 Materiais 2 e 3

Como ilustrado pela Figura 4.36, os sistemas compostos pelo conjunto do material 2 (espuma de polietileno) com o material 3 (cortiça) apresentaram comportamentos semelhantes, apesar de apontarem uma variação considerável entre 700 e 2.200Hz. Essa variação representa um deslocamento do segundo pico de absorção dos sistemas.

O sistema composto pelos Materiais 2 e 3 tem picos de 0,29, 0,97 e 0,46, em 500, 950 e 2.800Hz, respectivamente, enquanto o sistema dos Materiais 3 e 2, apresenta seus 3 picos de 0,25, 0,83 e 0,30 por volta de 400, 800, 2.650Hz, respectivamente.

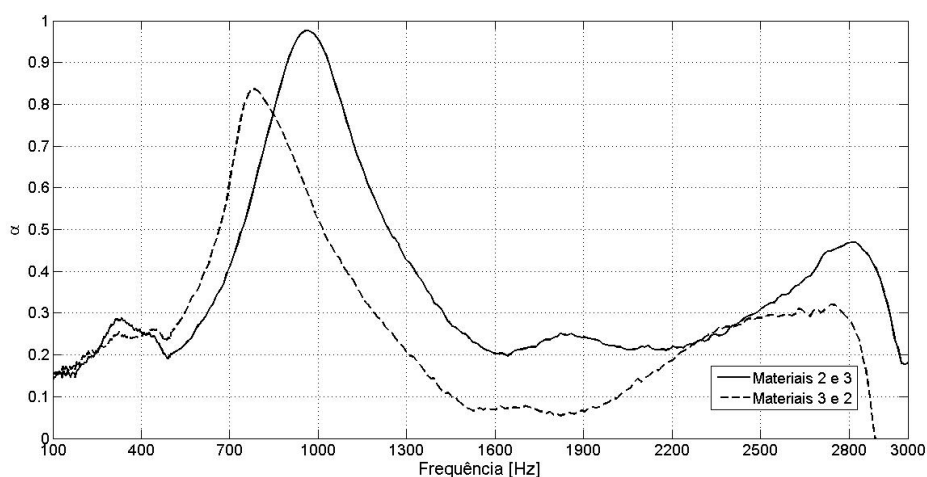


Figura 4.36: Comparação de posicionamento das amostras para os materiais 2 e 3.

4.3.3 Implementação dos Métodos Teóricos

4.3.1 Aumento de Espessura

Os métodos de Delany-Bazley e Allard-Champoux apresentaram curvaturas com configurações semelhantes para os sistemas compostos pelos Materiais 1 e 1 (espumas de poliuretano). Os valores apresentados para o modelo de Delany-Bazley, são ligeiramente mais altos, principalmente a partir de 1.600Hz. Os dois sistemas teóricos se aproximaram da configuração do ensaio experimental, no entanto, entre 500 e 1.300Hz, Delany-Bazley representa de forma mais adequada o sistema ensaiado, enquanto que entre 1.300Hz e 2.500Hz, por sua vez, Allard-Champoux melhor se adequa. Tais constatações podem ser analisadas na Figura 4.37.

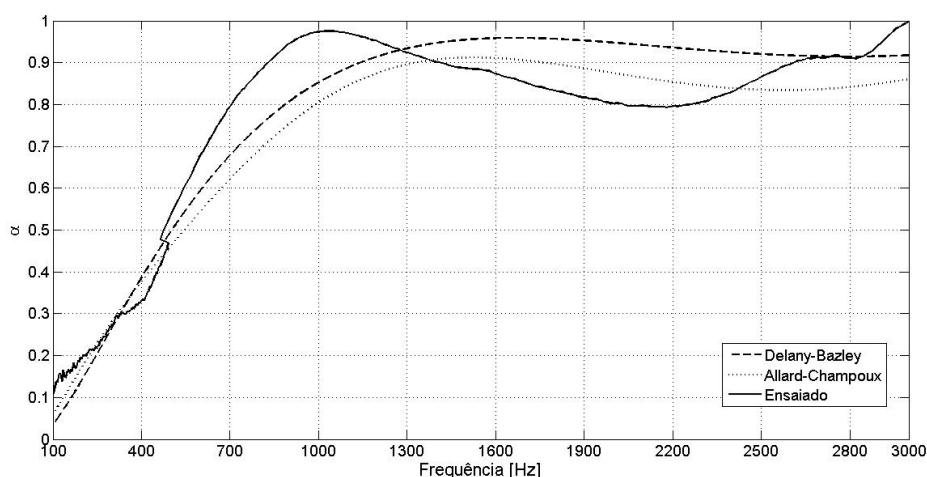


Figura 4.37: Materiais 1 e 1 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

As configurações dos resultados para impedância se conformam semelhantes, segundo a Figura 4.38. Para a parte real, os picos encontrados variam suas frequências de ocorrência, enquanto a do ensaio ocorre em 1.900Hz, Allard-Champoux se apresentam em 2.350Hz e Delany-Bazley em 2.500Hz.

Os modelos teóricos apresentaram resultados divergentes para a parte imaginária entre 100 e 400Hz e a partir de 1.700Hz, quando comparados com o ensaio. A troca de sinal do Reativo do ensaio (1.000Hz) é antecedida com relação à troca de sinais para os métodos teóricos (1.300Hz).

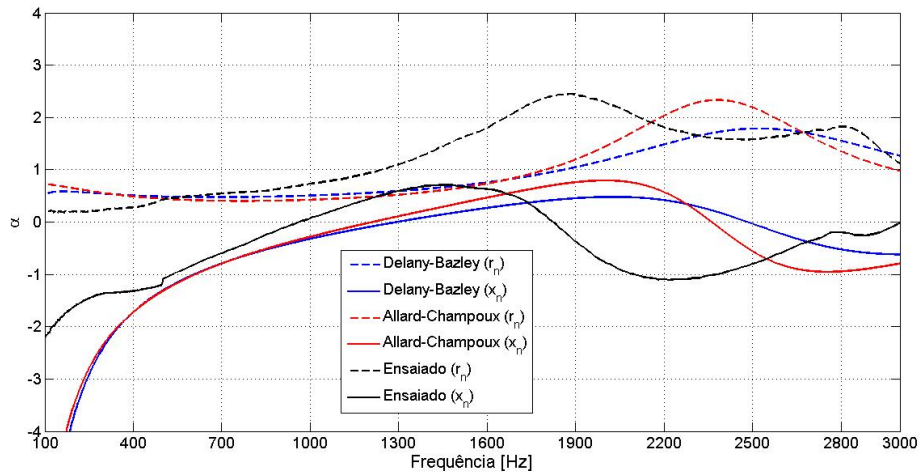


Figura 4.38: Materiais 1 e 1 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

4.3.2 Posicionamento das amostras

É interessante observar que a curvatura para o modelo de Delany-Bazley para os Materiais 1 e 2 (espuma de poliuretano e espuma de polietileno) apresentam valores altos assim como os ensaiados, generalizando acima de 0,7 a partir de 700Hz, no entanto, são ressaltadas as divergências que ocorrem entre 200 e 700Hz, 1.000 e 2.300Hz, 2.600 e 3.000Hz. A Figura 4.39 ilustra a comparação do método teórico com o ensaio experimental.

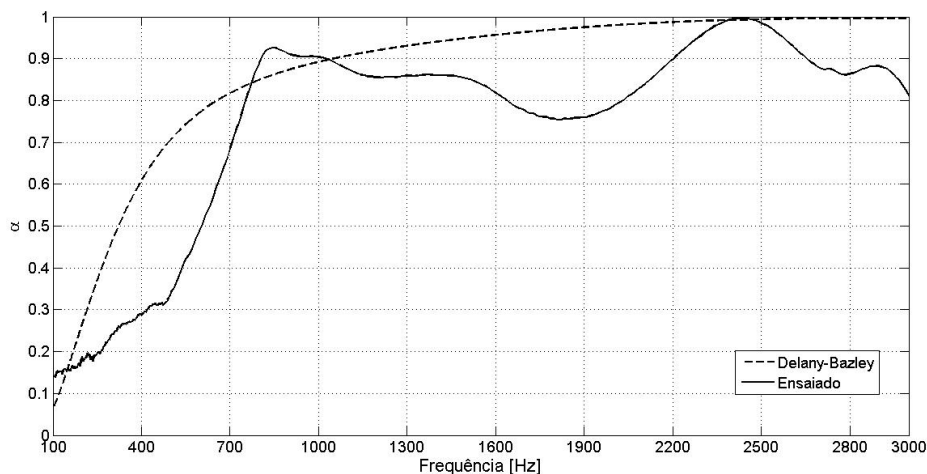


Figura 4.39: Materiais 1 e 2 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

Conforme a Figura 4.40, a parte real teórica se aproxima da ensaiada apenas entre 1.300 e 2.350Hz, já a parte imaginária a partir de 700Hz, com coincidência da troca de sinal negativo para positivo a 2.500Hz.



Figura 4.40: Materiais 1 e 2 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

É interessante destacar que, com a inversão do posicionamento da amostra para o sistema formado pelos Materiais 2 e 1 (espuma de polietileno e espuma de poliuretano), uma redução geral dos valores do coeficiente de absorção sonora ocorre tanto no teórico quanto no ensaiado, conforme demonstrado pela Figura 4.41. Porém, com relação ao método teórico, os picos gerados pelo Material 2 não são representados e os seus valores, acima de 1.000Hz, são consideravelmente superiores aos atingidos pelo ensaio.

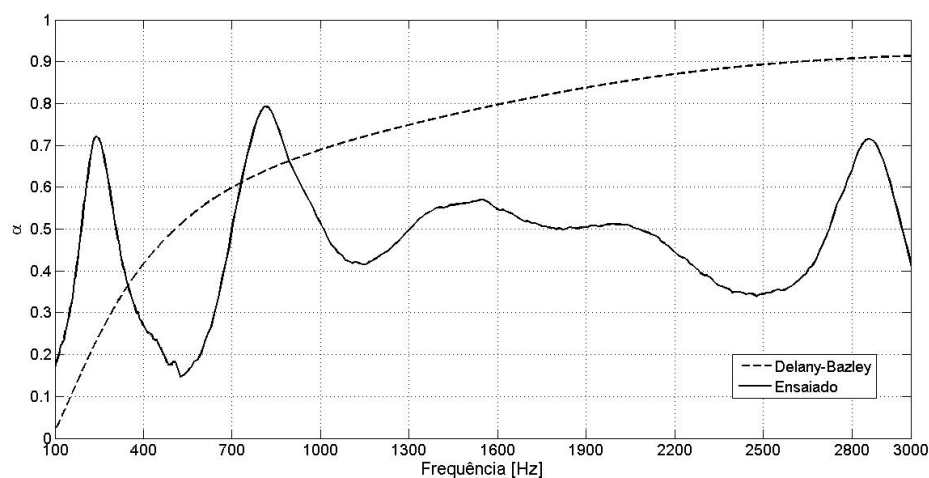


Figura 4.41: Materiais 2 e 1 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

Tanto o elemento Resistivo quanto o Reativo não são bem representados pelo método teórico, Figura 4.42. Ele se apresenta com curvaturas suaves enquanto as do ensaio apresentam oscilações com o aumento de frequência.

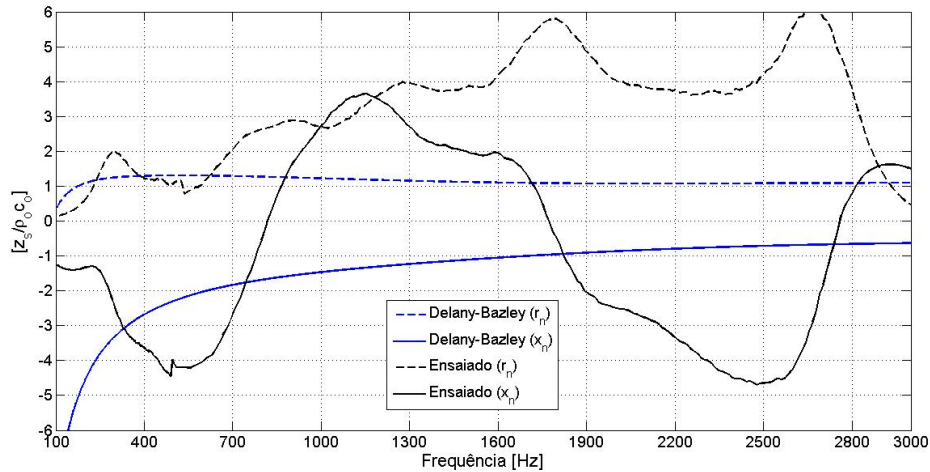


Figura 4.42: Materiais 2 e 1 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

Para o sistema formado pelos Materiais 1 e 5 (espuma de poliuretano e fibra de coco), tanto o método de Delany-Bazley quanto o de Allard-Champoux apresentaram boa representação do método ensaiado até 1.750Hz, Figura 4.43.

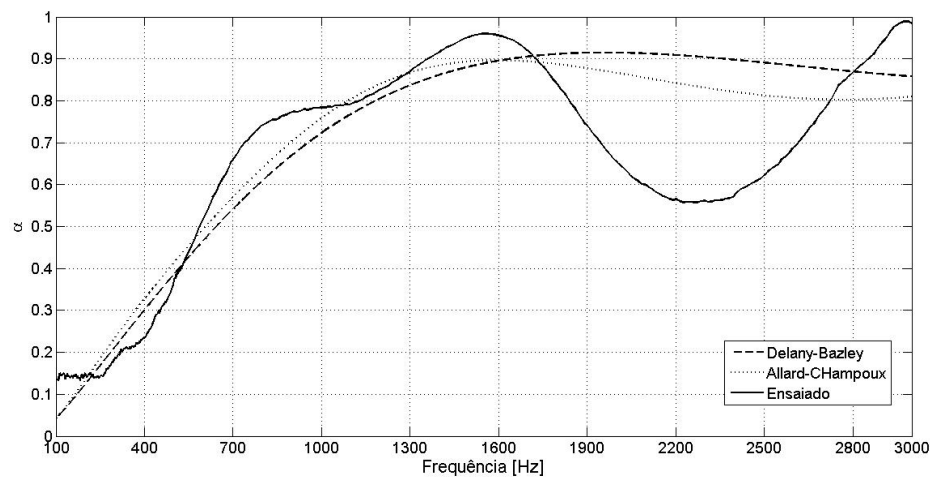


Figura 4.43: Materiais 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

Conforme a Figura 4.44, a parte real dos métodos teóricos representam bem o ensaio até cerca de 1.600Hz, com ocorrência de um longo período coincidente. Para a parte imaginária boa representação ocorre entre 400 e 2.200Hz, entretanto, com pontos de

frequência variável para a troca do sinal, do negativo para positivo, nos três casos, em 1.000Hz para o ensaio, em 1.300Hz para Allard-Champoux e em 1.600Hz para Delany-Bazley.

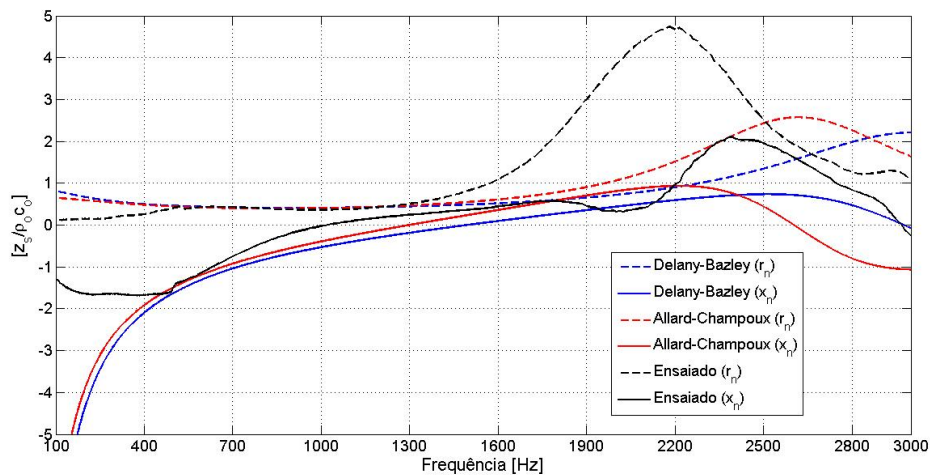


Figura 4.44: Materiais 1 e 5 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

O sistema composto pela inversão de posicionamento, formado pelos Materiais 5 e 1 (fibra de coco e espuma de poliuretano), também apresenta métodos teóricos com resultados semelhantes que se aproximam do ensaio até cerca de 1.450Hz, conforme ilustra a Figura 4.45).

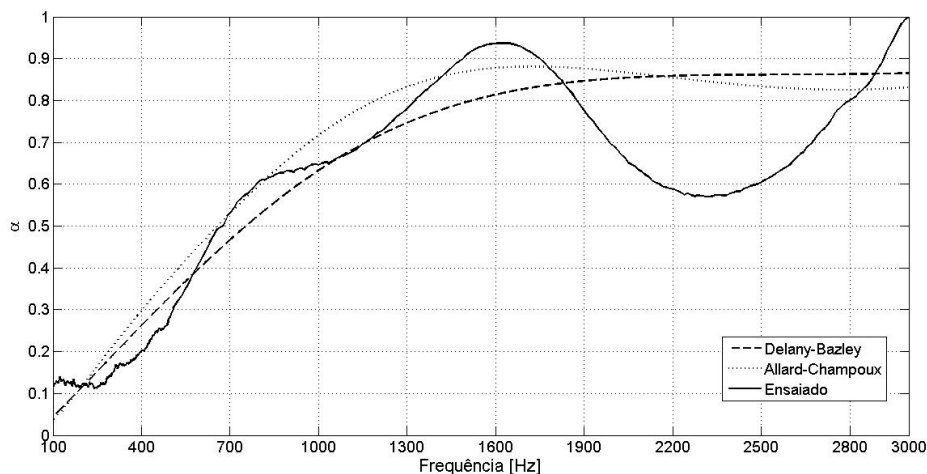


Figura 4.45: Materiais 5 e 1 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

De acordo com a Figura 4.46 e, assim como para o sistema formado pelos Materiais 1 e 5, no sistema formado pelos Materiais 5 e 1, a parte real dos métodos teóricos

representam bem o ensaio até cerca de 1.600Hz, com ocorrência de um longo período coincidente. Já a parte imaginária apresenta uma variação da uma boa representação, entre 400 e 1.600Hz. Os pontos de frequência de troca de sinal negativo para positivo, ocorrem nas mesmas frequências do sistema anterior: em 1.000Hz para o ensaio, em 1.300Hz para Allard-Champoux e em 1.600Hz para Delany-Bazley.

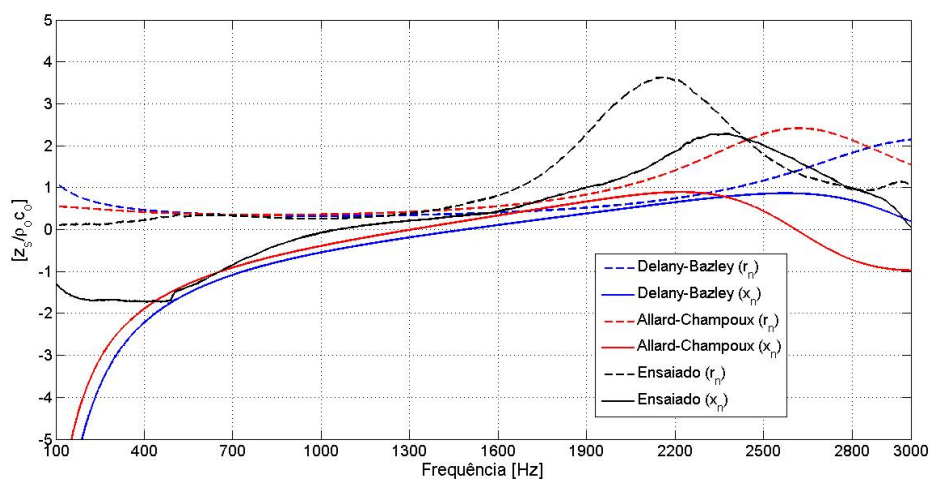


Figura 4.46: Materiais 5 e 1 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

4.4 Sistemas de três camadas

4.4.1 Análise Geral do Comportamento do Desempenho dos Sistemas Testados

Os resultados dos desempenhos do coeficiente de absorção sonora, para os sistemas compostos por três camadas, foram divididos em quatro gráficos com o objetivo de sintetizar o conteúdo, visto que inúmeras comparações entre os sistemas podem ser estabelecidas e, desta forma, apenas algumas constatações mais relevantes serão destacadas.

Os sistemas apresentados nos gráficos, dados pelas Figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50, foram agrupados por cores similares, com o intuito de representar aqueles sistemas que apresentam o mesmo posicionamento dos dois materiais mais externos, porém com a alteração do material mais interno, na parte rígida do tubo, que é diferenciados por linhas contínua e tracejada.

Na Figura 4,47 os sistemas foram agrupados em sistemas que apresentam o Material 1 sempre com o material mais externo do sistema. Os sistemas ‘Materiais 1, 2 e 3’ (espuma de poliuretano, espuma de polietileno e cortiça) e ‘Materiais 1, 2 e 5’ (espuma de poliuretano, espuma de polietileno e fibra de coco) apresentam configurações muito semelhantes ao analisarmos apenas a sua forma. No entanto, pode ser constatado que em seus desempenhos, apesar de apresentarem valores próximos nas faixas de frequências entre cerca 400 e 1.600Hz, eles possuem divergências consideráveis fora dessas faixas. É interessante ser destacado que os 3 picos de absorção referentes ao Material 2, alocado na camada intermediária, é evidenciado nos dois casos, estando por volta de 300, 850 e 2.500Hz, com absorção, respectivamente, de 0,5, 0,96 e 1,0 para o primeiro sistema citado. Para o segundo sistema citado os picos ocorrem por volta de 250, 800 e 2.000Hz, com absorção, respectivamente, de 0,61, 0,86 e 0,93.

Na análise referente à comparação entre os sistemas ‘Materiais 1, 3 e 2’ (espuma de poliuretano, cortiça e espuma de polietileno) e ‘Materiais 1, 3 e 5’ (espuma de poliuretano, cortiça e fibra de coco) é possível destacar uma semelhança de desempenho com ocorrência dada em um período menor, entre 1.300 e 2.350Hz. Os picos de absorção relativos ao comportamento do Material 2 são novamente evidenciados. Para o primeiro sistema citado, tem sua ocorrência em 250, 850 e 2.800Hz com coeficientes, respectivamente, de 0,30, 0,77 e 1,00, enquanto para o segundo sistema em 300, 530 e 2.200Hz coeficientes de 0,40, 0,81 e 0,95.

A absorção sonora nos sistemas ‘Materiais 1, 5 e 2’ (espuma de poliuretano, fibra de coco e espuma de polietileno) e ‘Materiais 1, 5 e 3’ (espuma de poliuretano, fibra de coco e cortiça) se apresentam muito similares até frequências mais altas por volta de 2.000Hz. Acredita-se que o melhor desempenho apontado para o sistema ‘Materiais 1, 5 e 2’ a partir de 2.000Hz, aconteça devido ao terceiro pico de absorção, referente ao Material 2, que ocorre em frequências mais altas. É interesse ressaltar, que o fato de o material ter sido posicionado na última camada do sistema resulta em um mascaramento do efeito dos seus picos.

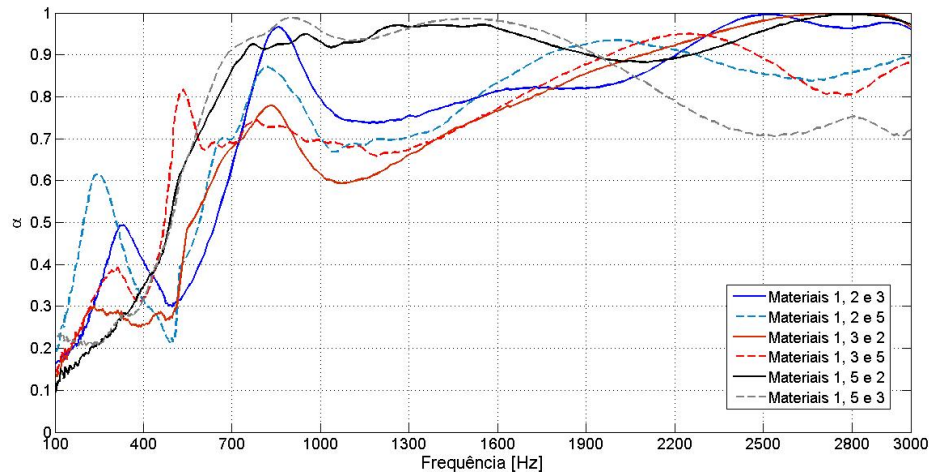


Figura 4.47: Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com a camada mais externa representada pela Material 1.

Na figura 4.48 o Material 2 é sempre o elemento que configura a parte mais externa do sistema, o que caracteriza um evidência muito forte dos picos característicos do material em todos os sistemas representados. Pode ainda, ser evidenciada a ocorrência dos picos mais relevantes dos sistemas serem coincidentes, entre 100 e 400Hz, 700 e 1.000Hz e 2.800 e 3.000Hz.

Dentre todos os sistemas, o desempenho do ‘Materiais 2, 1 e 5’ e ‘Materiais 2, 5 e 1’ se destacam como absorvedores e, em contrapartida o do ‘Materiais 2, 1 e 3’ pode ser considerado como o pior sistema absorvedor.

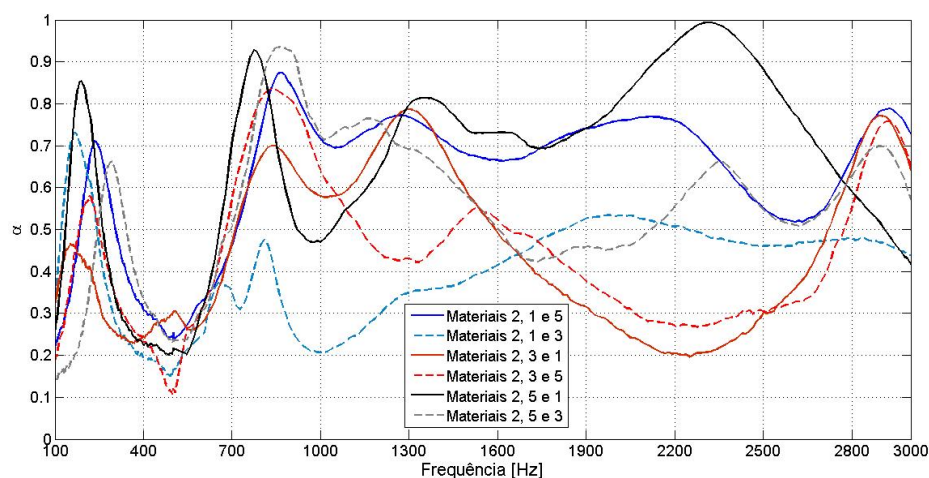


Figura 4.48: Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com camada mais externa preenchida pela Material 2.

O Material 3, na Figura 4.49, é o material mais externo do sistema que, por apresentar baixos coeficientes de absorção sonora, são os sistemas que apresentam valores de absorção substancialmente piores, com coeficientes de absorção baixos localizados, principalmente, entre as faixas de frequências de 1.000 e 2.700Hz.

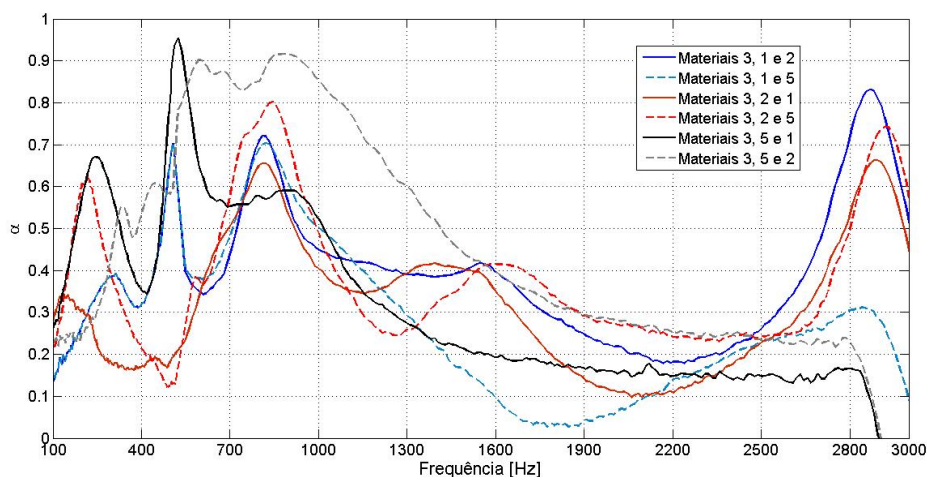


Figura 4.49: Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com camada mais externa preenchida pela Material 3.

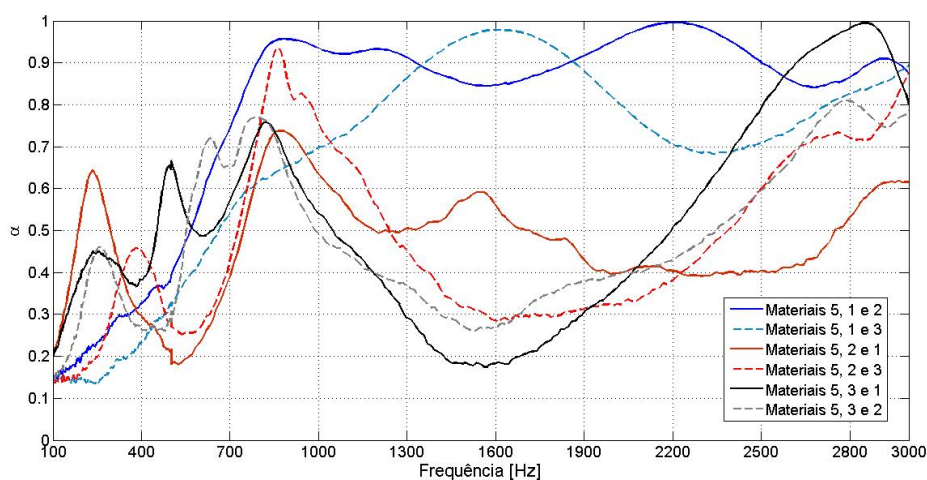


Figura 4.50: Comportamento de sistemas compostos por três camadas, com camada mais externa preenchida pela Material 5.

Todos os sistemas que apresentam o Material 1 em sua composição, Materiais 1 e 5 ou 5 e 1, Figuras 4.47 e 4.50, apontam desempenho como sistema absorvedor substancialmente mais alto do que os outros. O valor da absorção é mais alto quão

mais externos estiverem esses materiais, ou a organização do posicionamento deles na composição de um sistema.

4.4.2 Implementação de Delany-Bazley

O método teórico de Delany-Bazley para o sistema composto pelos Materiais 1, 2 e 5 apresentou valores de absorção sonora elevados, assim como o do ensaio para o mesmo sistema, entretanto, na faixa entre 400 e 700Hz e acima de 1.000Hz existe uma variação considerável de valores, Figura 4.51.

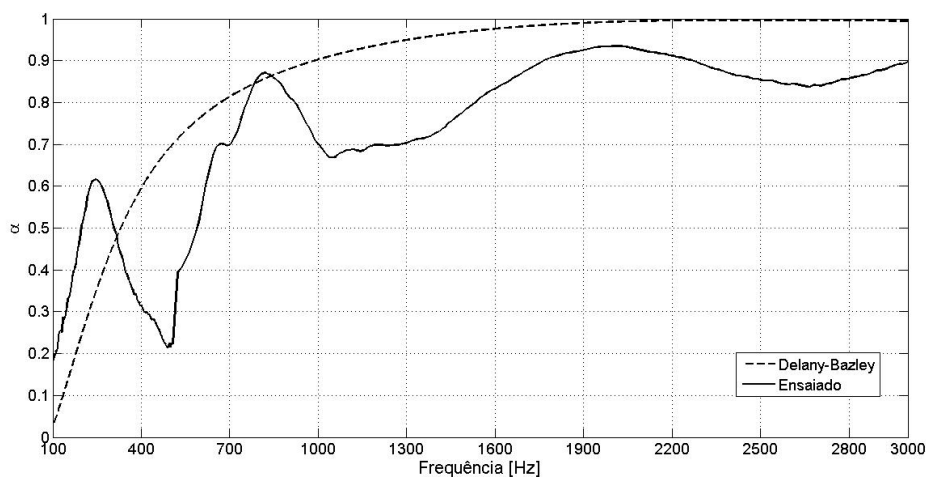


Figura 4.51: Materiais 1, 2 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

Conforme a Figura 4.52, o comportamento da impedância do método teórico se aproxima muito com o do ensaio, tanto para a parte real quanto para a parte imaginária, com coincidência da frequência de troca de sinal negativo para positivo, na parte imaginária, por volta de 2.000Hz.

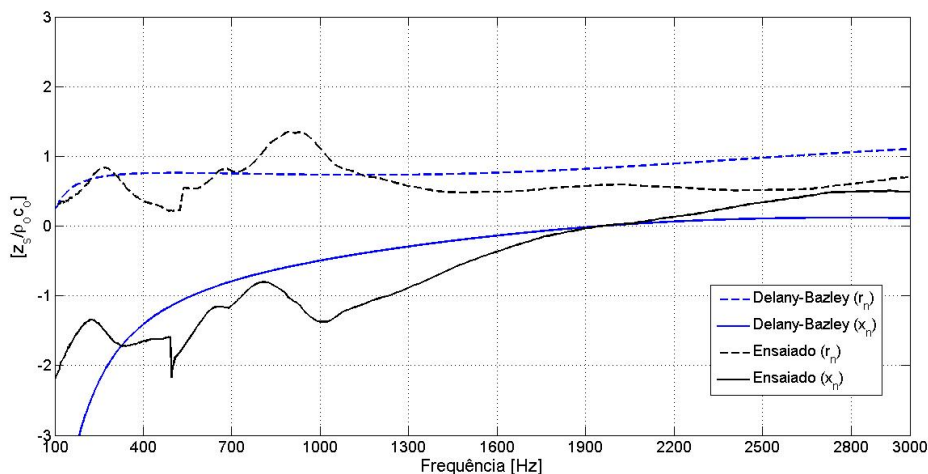


Figura 4.52: Materiais 1, 2 e 5 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

A substituição do Material 2 (espuma de polietileno) pelo Material 3 (cortiça) na camada intermediária do sistema, representando o sistema composto pelos Materiais 1, 3 e 5 (espuma de poliuretano, cortiça e fibra de coco), apresenta um resultado teórico próximo dos valores do ensaiado, com variações mais consideráveis entre 500 e 800Hz, 1.100 e 2.100Hz e acima de 2.500Hz, de acordo com a Figura 4.53.

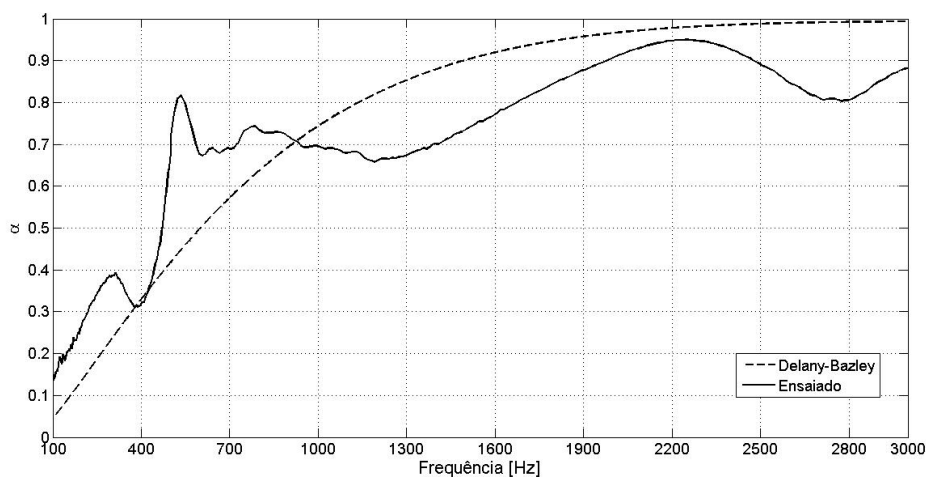


Figura 4.53: Materiais 1, 3 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

A Figura 4.54 mostra que as impedâncias teóricas e ensaiadas também se aproximam, com maiores variações abaixo de 400Hz, para ambas as partes e acima de 2.200Hz, para as partes imaginárias. Ocorre coincidência do ponto de troca de sinal positivo para negativo, em 2.200Hz, tanto para o sistema ensaiado quanto para o teórico.

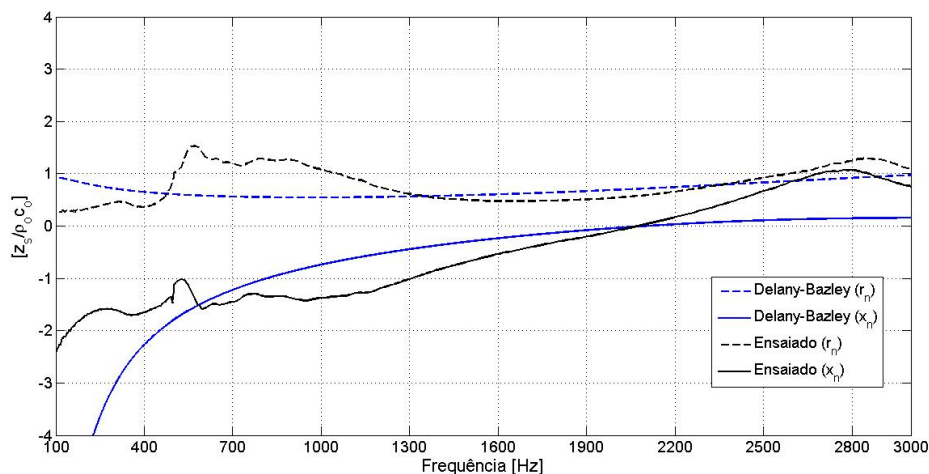


Figura 4.54: Materiais 1, 3 e 5 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

A Figura 4.55 demonstra que o emprego do Material 2 na primeira camada do sistema, representado pelo sistema composto pelos Materiais 2, 1 e 5 (espuma de polietileno, espuma de poliuretano e fibra de coco), demonstra uma redução nos valores de absorção. Essa redução também é demonstrada por Delany-Bazley, se comparado com os dois sistemas de três camadas mostrados acima. Entretanto, os valores alcançados no método teórico são consideravelmente maiores do que os obtidos no ensaio e não apresentam os picos de absorção produzidos pelo Material 2.

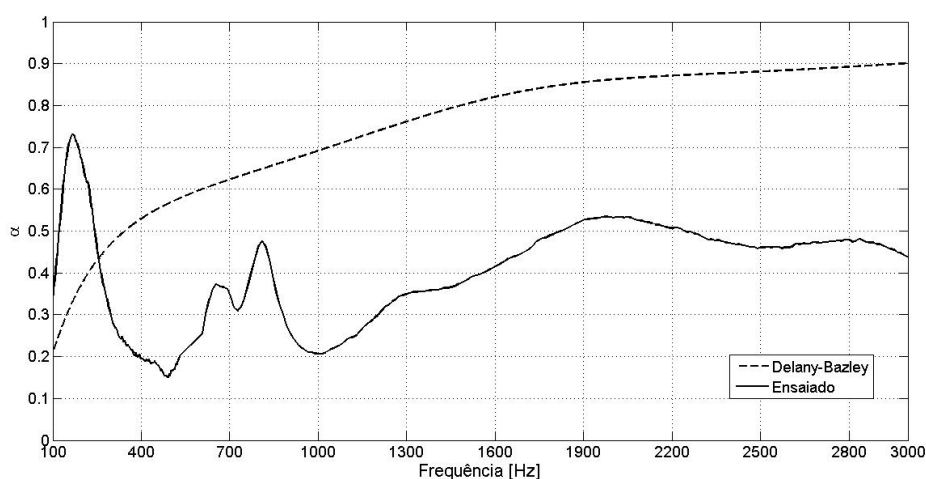


Figura 4.55: Materiais 2, 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

Assim como a absorção não é tão bem representada, a impedância teórica e a ensaiada também comportam muitas divergências, representado pela Figura 4.56.

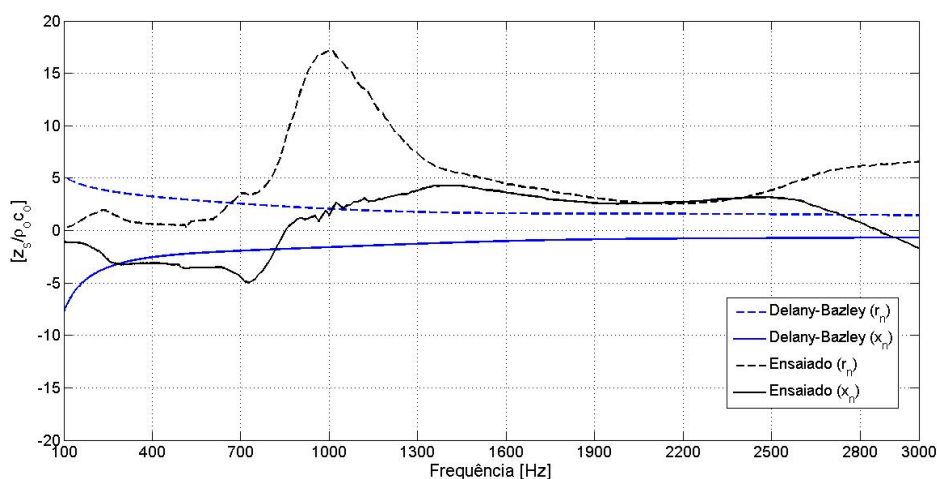


Figura 4.56: Materiais 2, 1 e 5 – Impedância Superficial Normalizada teórica.

Na Figura 4,57, ao substituir o Material 2 da parte mais externa do sistema pelo Material 3, compondo o sistema formado pelos Materiais 3, 1 e 5 (cortiça, espuma de poliuretano e fibra de coco), também é possível perceber que o resultado teórico tem uma redução de seus valores, não bem representada, a partir de 1.000Hz, ainda assim a configuração de desempenho se aproxima do ensaio.

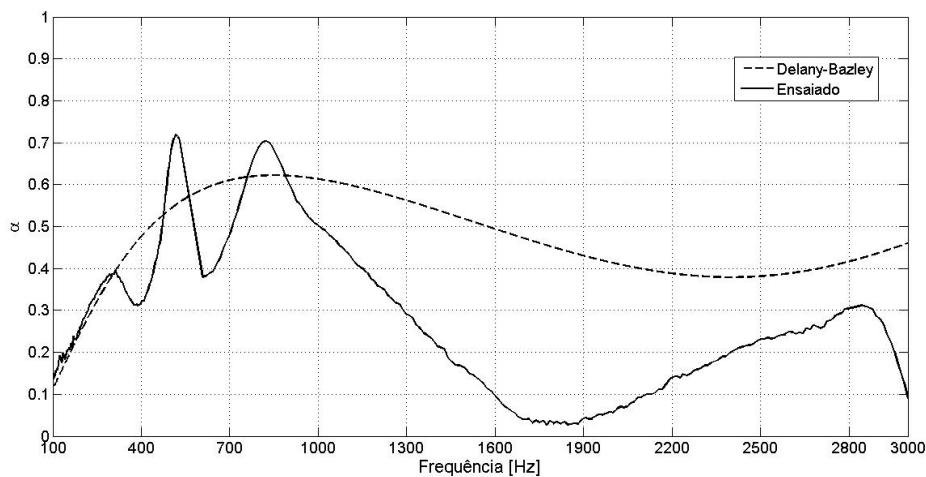


Figura 4.57: Materiais 3, 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

A impedância não é bem representada pelo método teórico, uma vez que tanto para a parte real quanto para a imaginária, apresentam suas curvaturas suaves, o que não condiz com a grande oscilação de valores representada pelo ensaio, Figura 4.58.

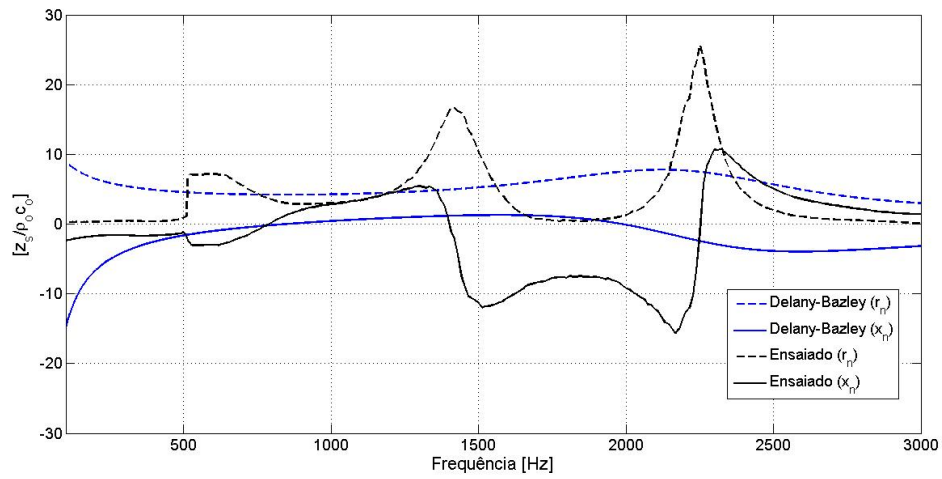


Figura 4.58: Materiais 3, 1 e 5 – Coeficiente de Absorção Sonora teórico.

5

CONCLUSÕES

Com relação à caracterização dos materiais propostos:

- As espumas de poliuretano apresentaram os melhores desempenhos como materiais absorvedores;
- A espuma de polietileno apresentou coeficientes de absorção globais baixos, com presença de oscilações aleatórias contendo altos valores de absorção sonora;
- A cortiça teve o pior desempenho como material absorvedor;
- A fibra de coco apresentou coeficientes de absorção sonora relevantes com sua espessura duplicada;

Com relação aos ensaios de absorção sonora em tubo de impedância de sistemas compostos por materiais em multicamadas:

- A duplicação de camada por um mesmo material apresenta relevante aumento de absorção sonora em baixas frequências;
- A duplicação de camada por um mesmo material, para as espumas de poliuretano, cortiça e fibra de coco, apresentam aumentos substanciais de comportamento absorvedor dos sistemas;
- A duplicação de camada para a espuma de polietileno conforma um deslocamento de antecipação nas frequências de pico de absorção sonora;
- Em sistemas de duas camadas, a utilização de espuma de polietileno ou cortiça afrente de materiais como espumas de poliuretano ou fibra de coco, ocasiona uma redução do comportamento absorvedor destes materiais;

- Em sistemas de duas camadas, a utilização de espumas de poliuretano ou fibra de coco, afrente de espuma de polietileno ou cortiça, ocasiona sobreposição de comportamentos isolados dos dois materiais constituintes do sistema;
- Sistemas de duas camadas constituídos por materiais que apresentaram bom desempenho de absorção sonora (espumas de poliuretano ou fibra de coco), desde que não configure aumento de espessura, apresentam comportamentos semelhantes independente do posicionamento do materiais;
- Sistemas de duas camadas constituídos por materiais que apresentaram mau desempenho de absorção sonora (espuma de polietileno ou cortiça), desde que não configure aumento de espessura, apresentam comportamentos semelhantes independente do posicionamento do materiais;
- Sistemas de duas ou de três camadas que incorporam a espuma de polietileno ou a cortiça em alguma de suas camadas apresentam picos de absorção devido à ressonância;
- Os melhores desempenhos de absorção sonora obtidos para sistemas de três camadas foram os sistemas que apresentam a espuma de poliuretano na camada mais externa ao sistema e os sistemas: Materiais 5,1e2 (fibra de coco, espuma de poliuretano) e Materiais 5,1e3 (fibra de coco, espuma de poliuretano e cortiça).
- Os piores desempenhos de absorção sonora obtidos para os sistemas de três camadas foram os sistemas que apresentam a espuma de polietileno ou a cortiça na camada mais externa ao sistema;

Com relação à implementação do método teórico de Delany-Bazley para sistemas de multicamadas:

- Em sistemas isolados o método apresentou bons resultados de impedância para as espumas de poliuretano, apesar de não ter sido satisfatório para o coeficiente de absorção em ambos os materiais;
- Em sistemas isolados o método não apresentou resultados satisfatórios de coeficiente de absorção sonora ou de impedância para a espuma de polietileno, cortiça e fibra de coco, por terem propriedades que estão além dos limites estabelecido pela formulação;

- Em sistemas de duas camadas o método apresentou resultados satisfatórios, com relação aos ensaios, para todos sistemas, independente do posicionamento dos materiais, compostos por espumas de poliuretano;
- O método não apresentou resultados satisfatórios de coeficientes de absorção sonora para sistemas de duas camadas formadas por espuma de polietileno e espuma de poliuretano, mas representou redução ou aumento significativos de comportamento de absorção do sistema, com relação ao posicionamento dos materiais;
- O método representou valores significativos de coeficiente de absorção sonora e impedância em baixas e médias frequências para sistemas de duas camadas compostos por espuma de poliuretano e fibra de coco, independente do posicionamento das amostras;
- Em sistemas compostos por três camadas o sistema apresentou representatividade dos valores globais dos coeficientes de absorção sonora, demonstrando redução ou aumento de absorção de acordo com a composição de materiais que constituem a camada.

Com relação à implementação do método de Allard-Champoux para sistemas de multicamadas:

- Em sistemas isolados o método apresentou bons resultados de impedância para as espumas de poliuretano, apesar de não ter sido satisfatório para o coeficiente de absorção em ambos os materiais;
- Em sistemas de duas camadas o método apresentou resultados satisfatórios, com relação aos ensaios, para todos sistemas, independente do posicionamento dos materiais, compostos por espumas de poliuretano
- O método representou valores significativos de coeficiente de absorção sonora e impedância em baixas e médias frequências para sistemas de duas camadas compostos por espuma de poliuretano e fibra de coco, independente do posicionamento das amostras;

Comparações entre Delany-Bazley e Allard-Champoux:

- Os métodos apresentaram curvaturas de coeficiente de absorção sonora e impedância similares para o Material 1 (espuma de poliuretano);
- Em sistemas de duas camadas os métodos apresentaram resultados similares de coeficiente de absorção sonora e impedância para os sistemas compostos por espumas de poliuretano ou espumas de poliuretano e fibra de coco, independente do posicionamento das amostras;

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALLARD, J. F. CHAMPOUX, Y. *New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials*. J. Acoust. Soc. Am. 91(6), 3346-3353, 1992.

ALI, M . G. S. *Recursive algorithm for the efetive impedance of multilayered acoustic losses media*. Journal of Algorithms & Computational Technology Vol. 5 No. 3, 2010.

APCOR – Associação Portuguesa de Cortiça; “<http://www.apcor.pt>”. Acesso em: outubro 2014.

ASDRUBALI, F., SCHIAVONI, S. HOROSHENKOV, K. V. *A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications*. Building Acoustics, vol. 19, n4, 283-312, 2012.

ASTM D1622-08 *Standard Test Method for Aparent Density Rigid Cellular Plastics* Nova Iorque, 2003.

ASTM E1050-98 *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System*, Nova Iorque, 2006

AYUB, M. NOR, M. J. M. FOULADI, M. H. ZULKIFLI, R. AMIN, N. *A practical acoustical absorption analysis of coir fiber based on rigid frame modeling*. Acoustical Pphysics Vol. 58, No. 2, pp. 246-255, 2012.

BALVEDI, A. M. *Medição e simulação acústica de materiais porosos e sistemas multicamadas*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 1998.

- BERANEK, L. L. VÉR, I. L. *Noise and Vibration Control Engineering: principles and applications*. Estados Unidos da América, John Wiley & Sons, Inc, 1992.
- BIES, D. A. HANSEN, C. H. *Engineering Noie Control, Theory and Practice*, E & FN Spon, London and New York, NY, Second edition, 1996.
- BIES, D. A. HANSEN, C. H. *Flow resistance information for acoustical design*. Applied Acoustics 13, 357-391, 1980.
- BISTAFA, S. R. *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*. 1ª edição. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.
- BISTAFA, S. R., BRADLEY, J. S. *Predicting reverberation times in a simulated classroom*. The Journal of the Acoustical Society of America. 108, 1721-1731, 2000.
- BRENNAN, M. J. TO, W. M. *Acoustic properties of rigid-frame porous materials – an engineering perspective*. Applied Acoustics 62, 793-811, 2001
- CARVALHO, B. A. *Acústica aplicada à arquitetura*. São Paulo: Livraria Freitas e Bastos S. A., 1967.
- CAVANAUGH, W. J. WILKES, J. A. *Architectural acoustics principles and practice*, New York, John Wiley & Sons, 1999
- CORK DO BRASIL – Revestimento Acústico. Disponível em: “www.corkdobrasil.com”. Acessado em: maio 2015.
- COX, T. J., D’ANTONIO, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers, theory, design and application*. 2ª edição, Oxônia e Nova Iorque: Taylor & Francis, 2009.
- DELANY, M. E. BAZLEY, E. N. Bazley, “Acoustical properties of fibrous absorbent materials”, Applied Acoustics, 3, 105-116 (1970).

DESARNAULDS, V. CONSTANZO, E. CARVALHO, A. ARLAUD, B.

Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials. ICSV 12, Lisboa, 2005.

DUARTE, E. A. C. *Estudo do isolamento acústico das paredes de vedação da moradia brasileira ao longo da história*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Florianópolis, 2005.

EGAN, M. D. *Architectural Acoustics*. Editor B. J. Clark. EUA, 1988.

FAHY, F. *Foundations of Engineering Acoustics*. Academic Press, 2000.

FIELD, A. *Discovering statistics using spss*. 3th edition, Sage, Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington Dc, 2006.

FOULADI, M. H. AYUB, M. NOR, M. J. M. *Analysis of coir fiber acoustical characteristic*. Applied Acoustics 72, 35-42, 2011.

FOULADI, M. H. NOR, M. J. M. AYUB, M. LEMAN, Z. A. *Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel*. Applied Acoustics 71, 241-249, 2010.

FLACH, F. *Investigação do potencial de absorção sonora acústica de compósitos de argamassa com materiais reciclados*. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.

FORTES, M.A.; ROSA, M.E.; PEREIRA, H. *A Cortiça*. Editora IST Press. Lisboa, 2004.

GARAI, M. POMPOLI, F. *A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications*, *Appl. Acoust.* **66(12)**, 1383–98 (2005).

GERGES, S. N. Y. *Ruído: Fundamentos e Controle*. Florianópolis: NR Ed, 2ª ed, 2000.

GIESBRECHT, P. K. *Incerteza na medição das características acústicas dos materiais*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2007

INGARD, K. U. DEAR, T. A. *Measurement of acoustic flow resistance*. Journal of Sound and Vibration, 103(4), 567-572, 1985.

ISAR – Lã de vidro – Isolamento Acústico. Disponível em:
“<http://www.isar.com.br>”. Acesso em: outubro de 2014

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATIONS 354. *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*. Suíça: ISO. 2003.

KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., SANDERS, J. V. *Fundamentals of Acoustics*. 4ª edição, Estados Unidos da América, John Wiley & Sons, Inc, 2000.

KINO, N. *Further investigations of empirical improvements to the Johnson-Champoux-Allard model*. Applied Acoustics, 96, 153-170, 2015.

MAFRA, M. P. A., SOEIRO, N. S. ALVES, E. C. *Determinação e análise comparativa dos coeficientes de absorção de painéis confeccionados a partir da fibra de coco e um painel de uso comercial*. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. São Paulo. Ilha Solteira, 2005.

MAGALHÃES, M. D. C. *Fundamentos de Acústica Estrutural*. Editora All Print, São Paulo, 2013.

MILLS, N. J. *The wet kelvin model for air flow through open-cell polyurethane foams*. Journal of Materials Science 40, 5845-5851, 2005

NAKARUMA, J. Conforto Acústico. Revista Técnica, 106ª Ed., Ano XIV, p.44-47, 2006.

NEPOMUCENO, L. A. *Elementos de Acústica física e psicoacústica*. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda, 1994.

OLDHAM, D. J. EGAN, C. A. COOKSON, R. D. *Sustainable acoustic absorbers from the biomass*. *Applied Acoustics* 72, p. 350-363, 2011.

OLIVA, D. HONGISTO, V. *Sound absorption of porous materials – accuracy of prediction methods*. *Applied Acoustics* 74, 1473-1479, 2013.

OLIVEIRA, R. C. *Análise das condições acústicas de unidades de suporte móveis: um enfoque na saúde do trabalhador*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2014.

OWA DO BRASIL – Sonex Illbruck. Placas Acústicas Sonex illtec. Diadema, SP. Disponível em: “www.owa.com.br”. Acesso em: outubro de 2014

PIMENTEL-SOUZA, F. *Efeitos do Ruído Estressante*. Disponível em: <http://www.icb.ufmg.br/lpf/2-22.html>. Acesso em: maio de 2015.

RAO, S. S. *Vibrações Mecânicas*. 5^a edição, Estados Unidos da América, Editora Prentice Hall, 2011.

RINDEL, J. H. *An introduction to room acoustics*. Note nº1. 0114, 2001.

ROSSETTI, S. GARDONIO, P. BRENNAN, M. J. *A wave model for rigid-frame porous materials using lumped parameter concepts*. *Journal of sound and vibration* 286, 81-96, 2005.

SALVO, R. V. MAIRINK, M. T. F. OLIVEIRA, E. C. TEODORO, E. B. Construção de um tubo de impedância. In: 15^o POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU. **Anais...** Uberlândia 2005.

SANZ, R. M. BARRIGON, J. M. ESCOBAR, V. G. *Acoustical performance of loose cork granulates*. J. Wood Prod, 72, 321-330, 2014.

SAVASTANO, J. H. *Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de, Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo, 1992.

SILVA, G. M. S. MAGALHÃES, M. C. GUMIERI, A. G. *Comparative Study of Sound Absorption System Composed of Multilayered Panels*. ICSV 17, 18-22 julho, Cairo, 2010.

SILVA, P. *Acústica Arquitetônica & Condicionamento de Ar*. 5ª edição. Belo Horizonte: EDTAL – Empresa Termo Acústica Ltda, 2005.

SOUZA, L. C. L., ALMEIDA, M. G., BRAGANÇA, L. *Bê-á-bá da acústica arquitetônica*. São Carlos. 4ª reimpressão. Editora EdUFSCar, 2012.

VIEIRA, H. D. *Análise de Características da Cortiça Amadia Relevantes para a sua Qualidade Industrial*. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.V

WANG, Y. S. GENG, A. L. *Comparison and application of the experimental methods for multi-layered prediction of acoustical properties of noise control materials in standing wave-duct systems*. Appl Acoust (2007), doi:10.1016/j.apacoust.2007.06.005

APÊNDICE A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Ensaio 1.1 – Material 1 – Amostra 1

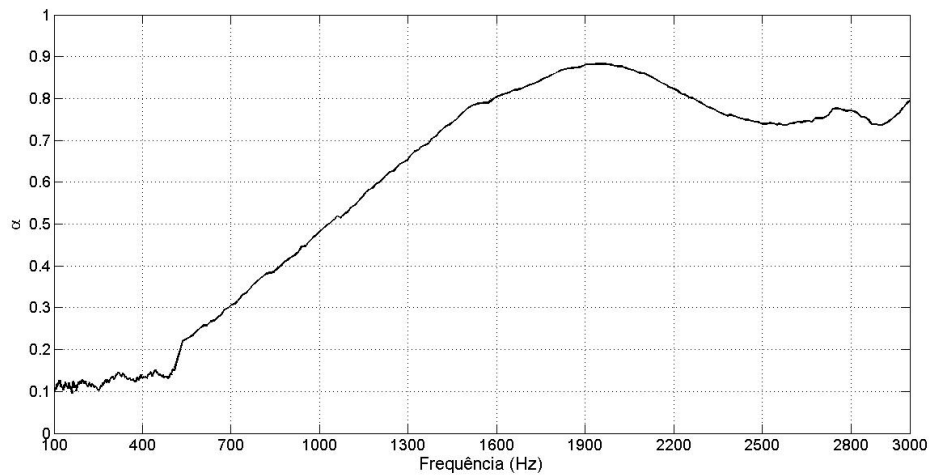


Figura 1: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.1 – Material 1 – Amostra 1

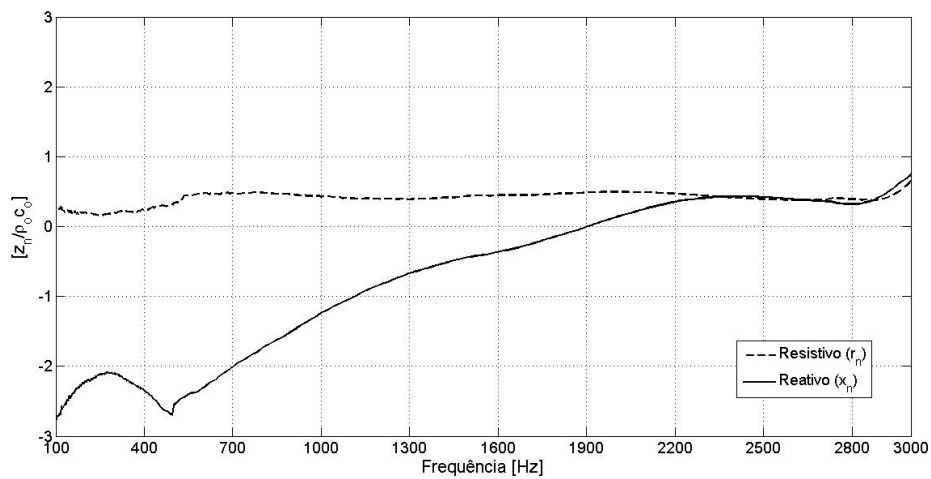


Figura 2: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.2 – Material 1 – Amostra 2

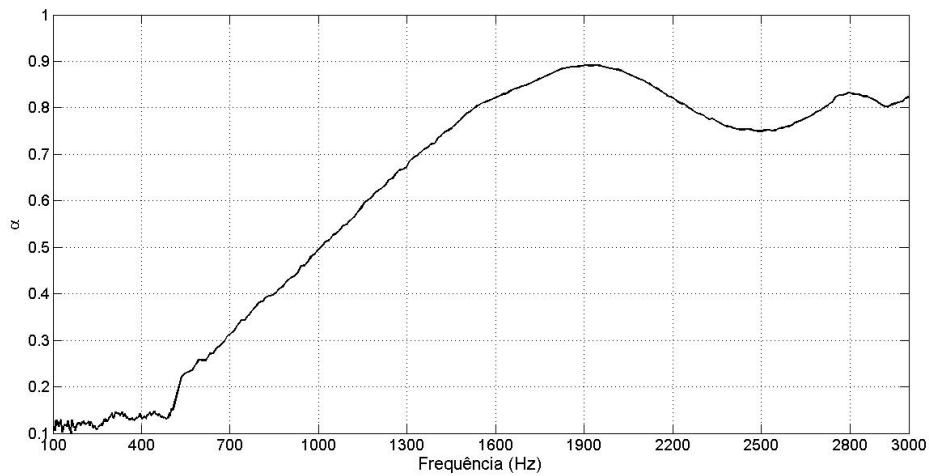


Figura 3: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.2 – Material 1 – Amostra 2

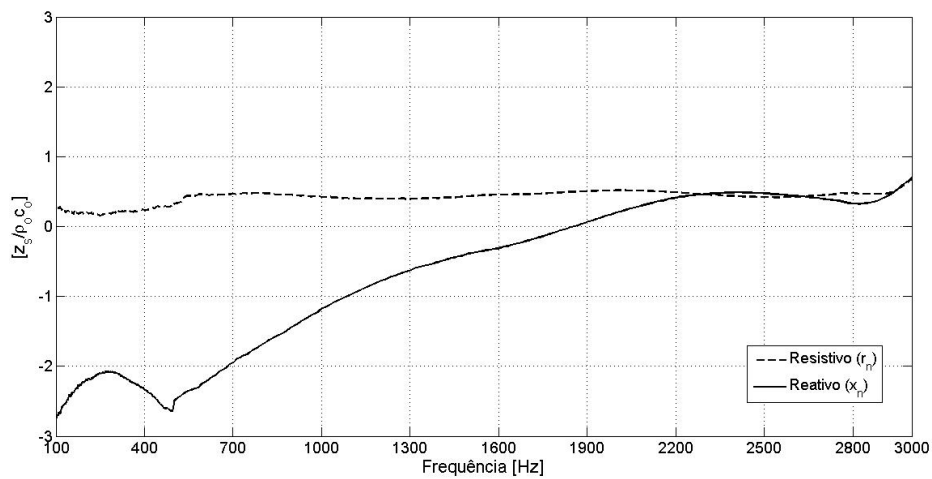


Figura 4: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.3 – Material 1 – Amostra 3

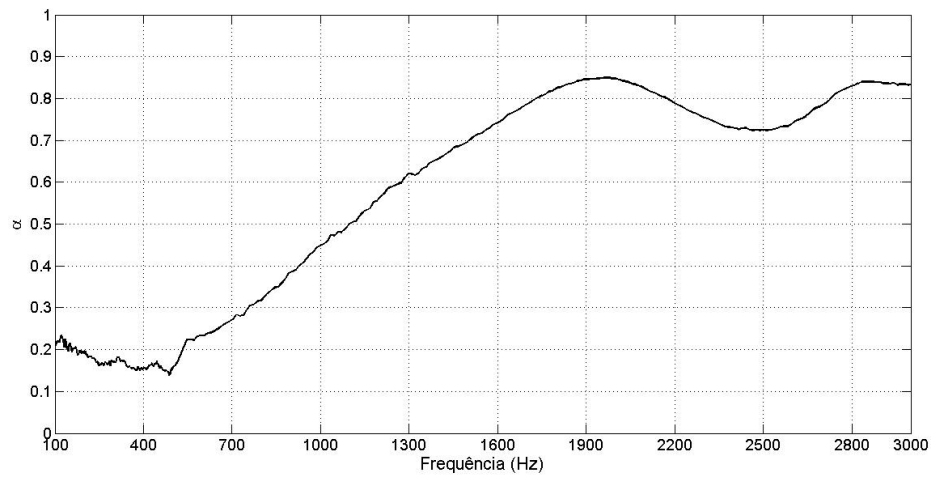


Figura 5: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.3 – Material 1 – Amostra 3

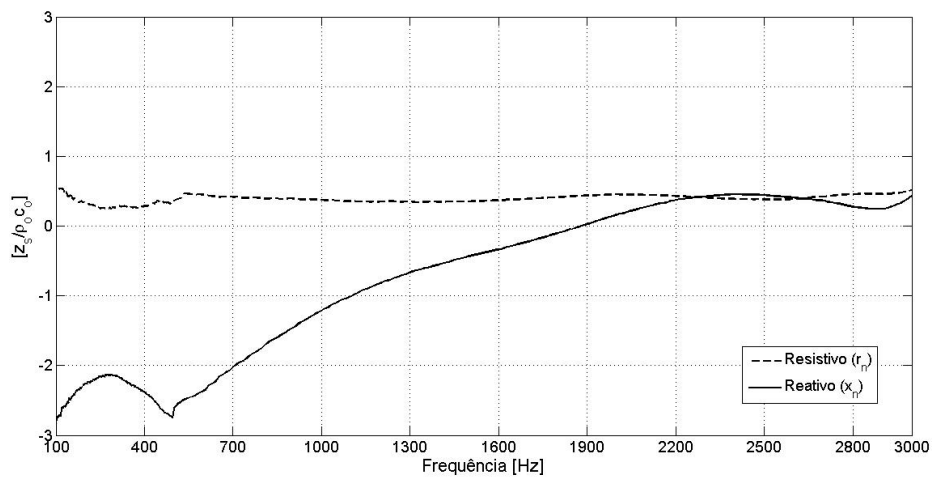


Figura 6: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.4 – Material 2 – Amostra 1

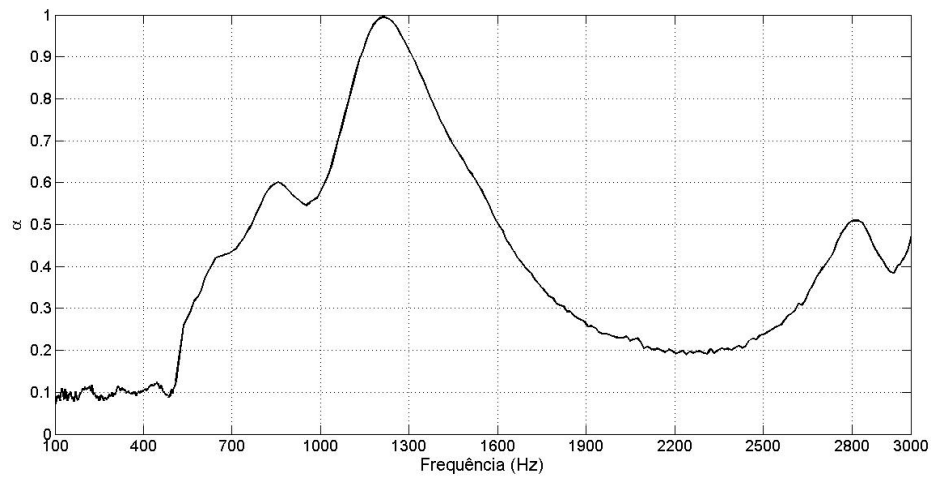


Figura 7: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.4 – Material 2 – Amostra 1

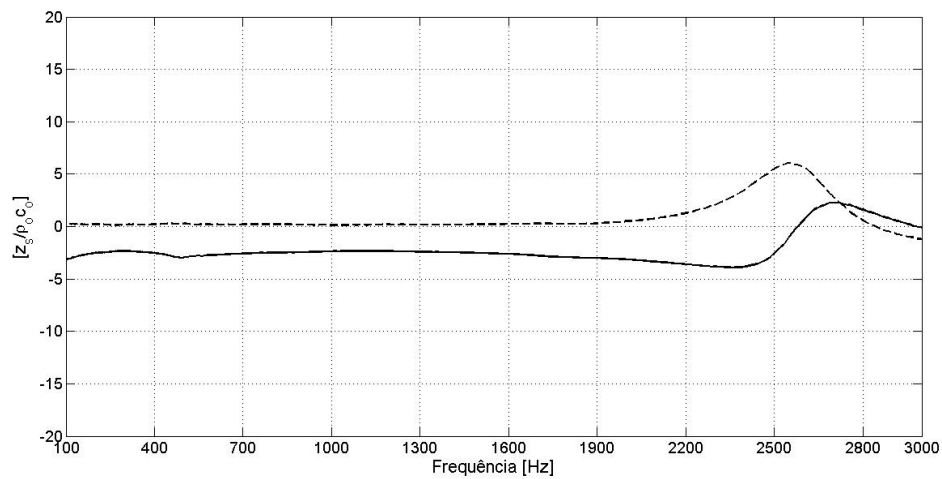


Figura 8: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) frequência.

Ensaio 1.5 – Material 2 – Amostra 2

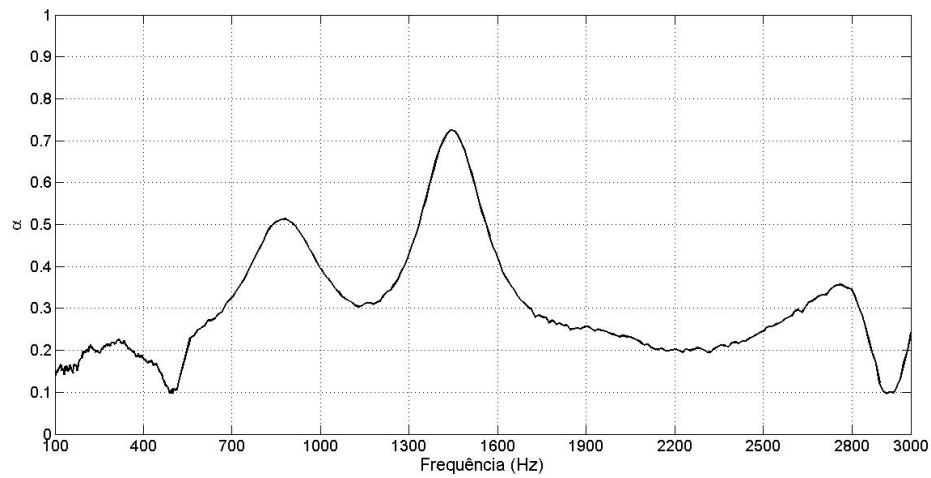


Figura 9: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.5 – Material 2 – Amostra 2

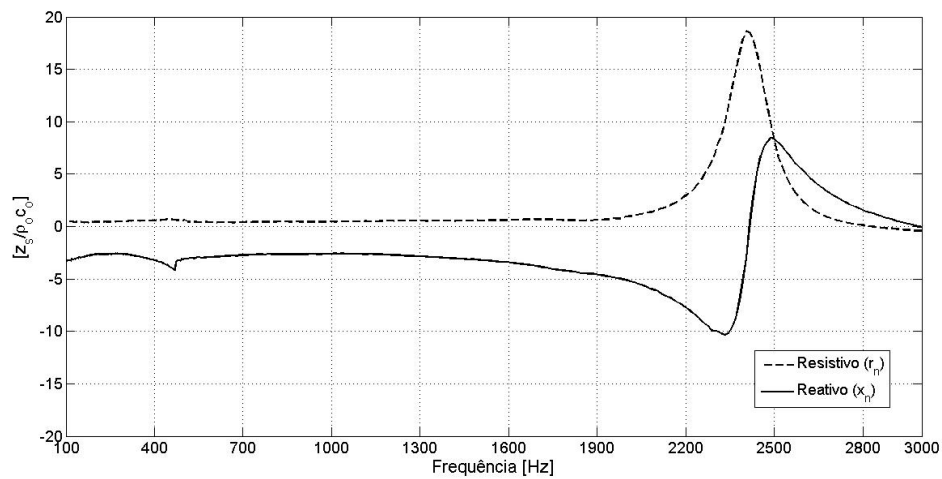


Figura 10: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.6 – Material 2 – Amostra 3

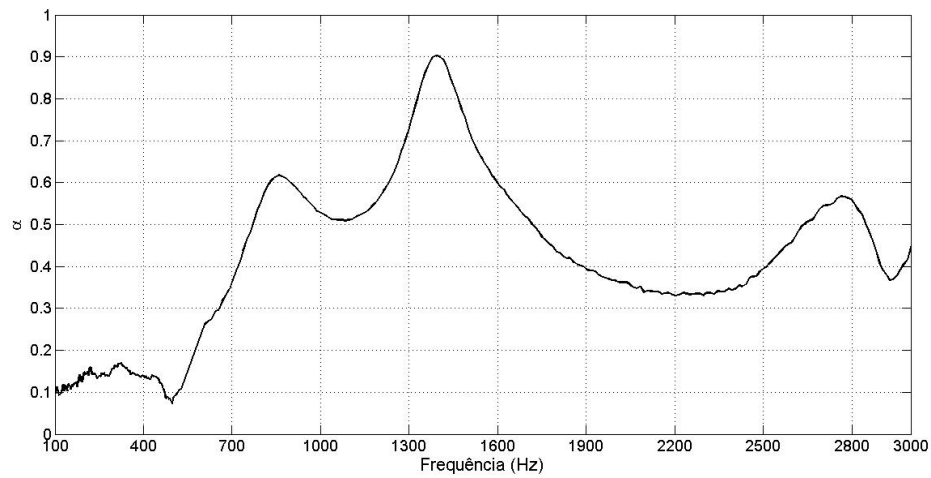


Figura 11: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência

Ensaio 1.6 – Material 2 – Amostra 3

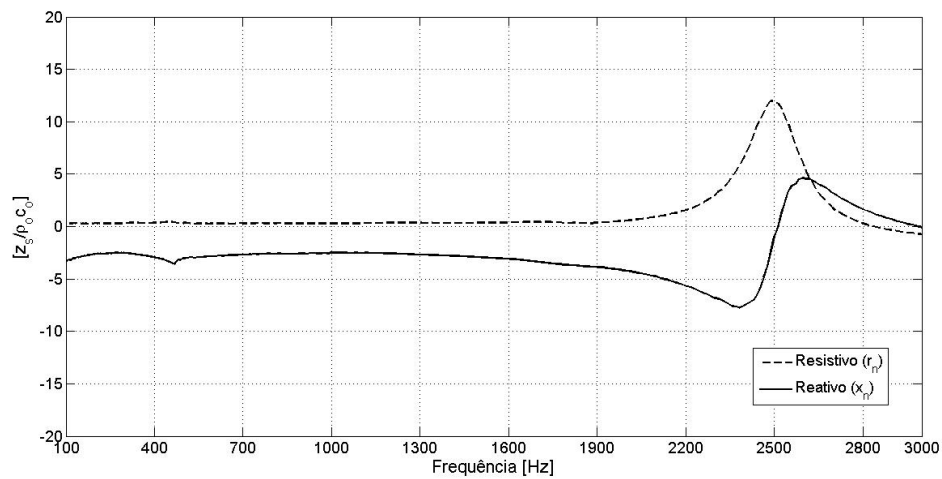


Figura 12: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.7 – Material 3 – Amostra 1

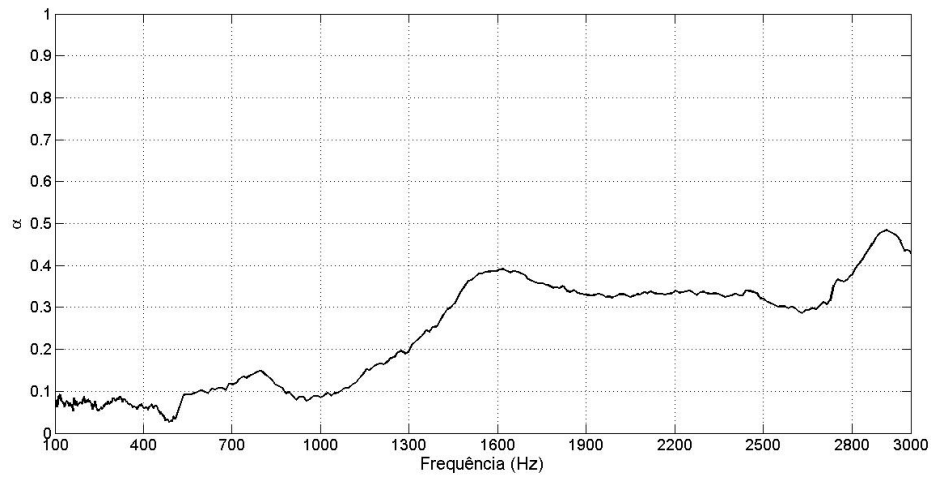


Figura 13: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.7 – Material 3 – Amostra 1

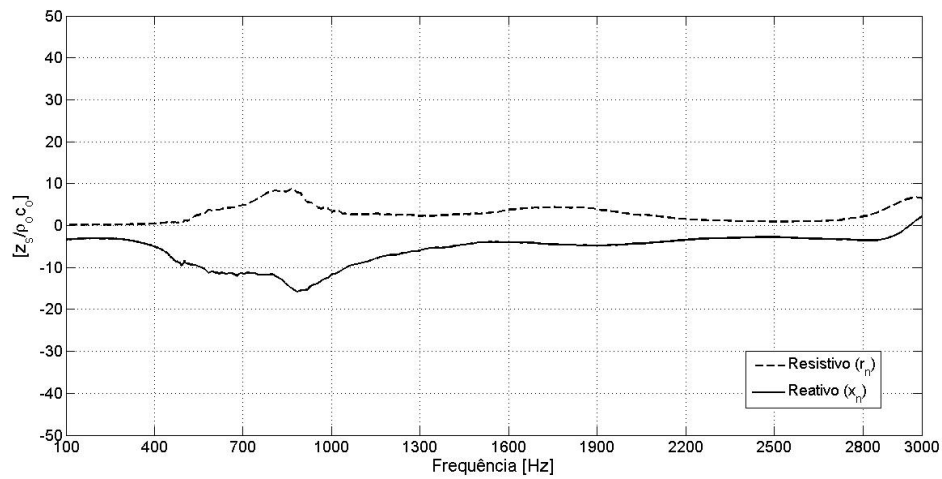


Figura 14: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.8 – Material 3 – Amostra 2

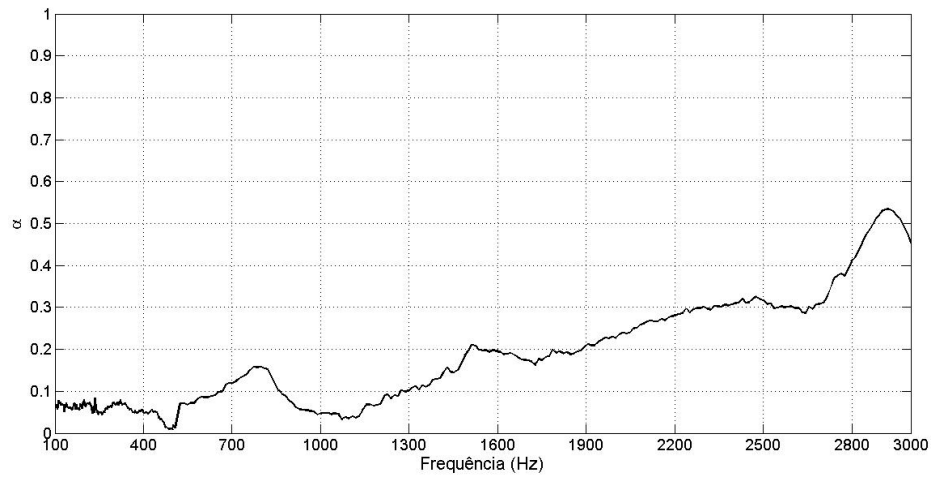


Figura 15: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.8 – Material 3 – Amostra 2

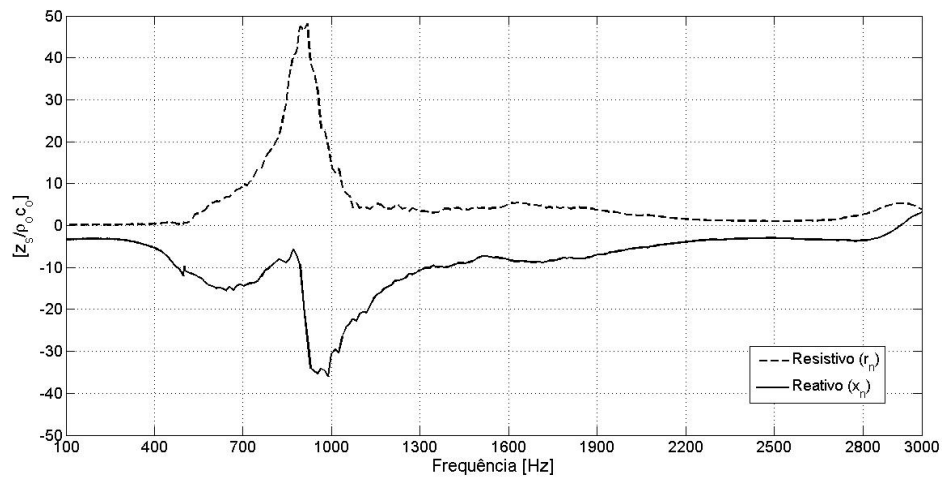


Figura 16: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.9 – Material 3 – Amostra 3

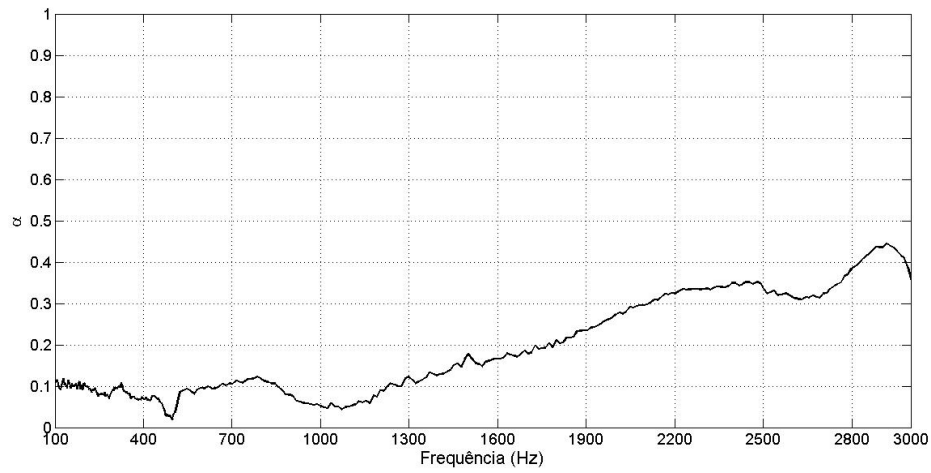


Figura 17: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.9 – Material 3 – Amostra 3

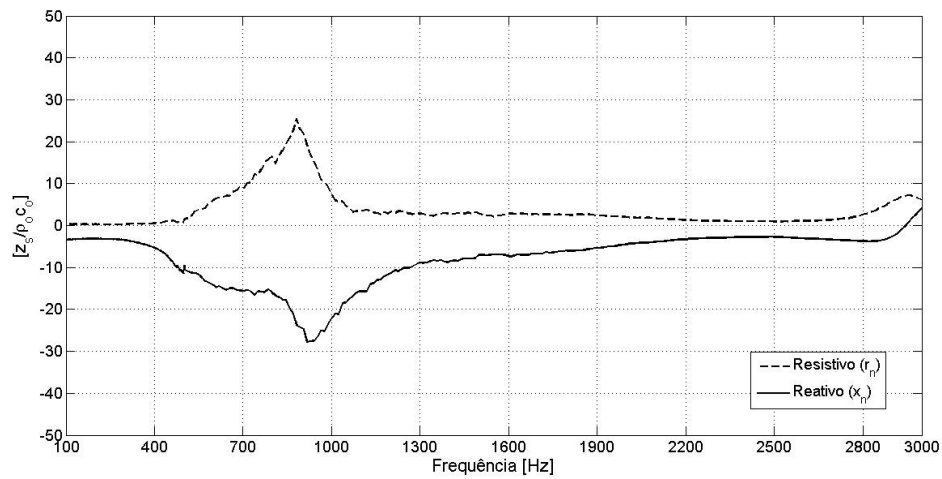


Figura 18: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.10 – Material 4 – Amostra 1

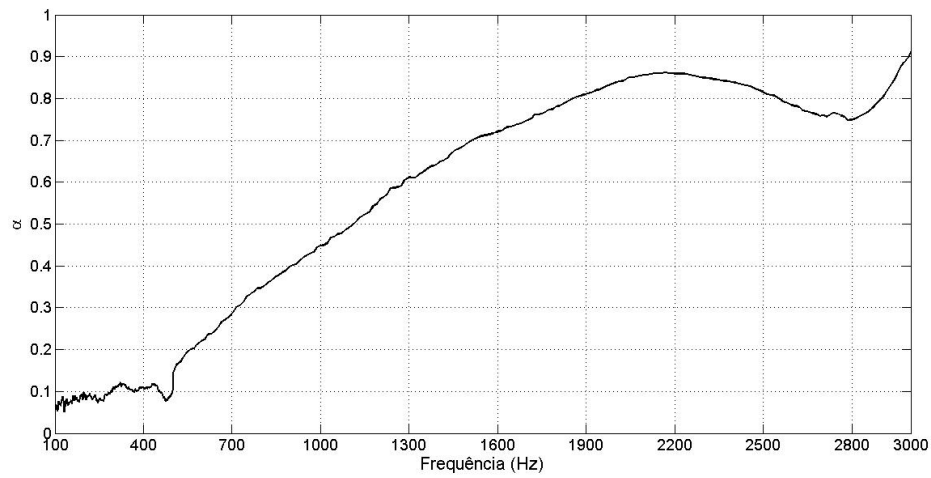


Figura 19: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.10 – Material 4 – Amostra 1

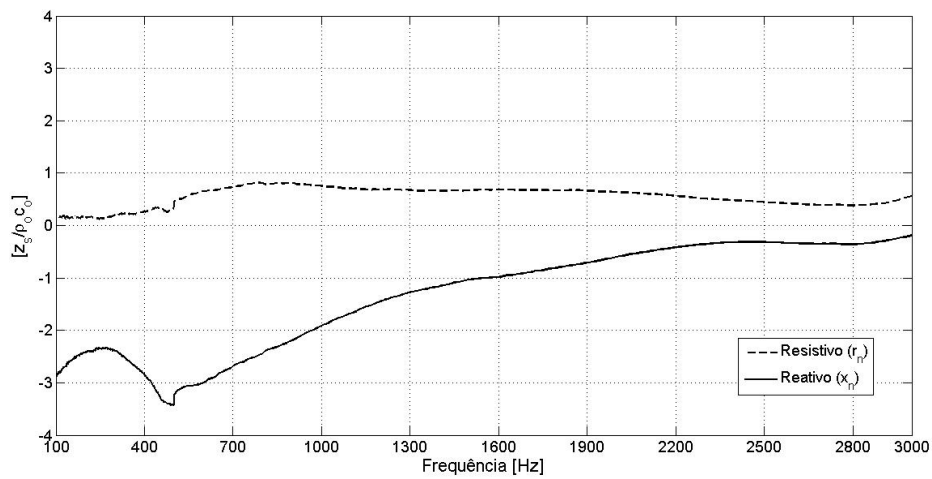


Figura 20: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.11 – Material 4 – Amostra 2

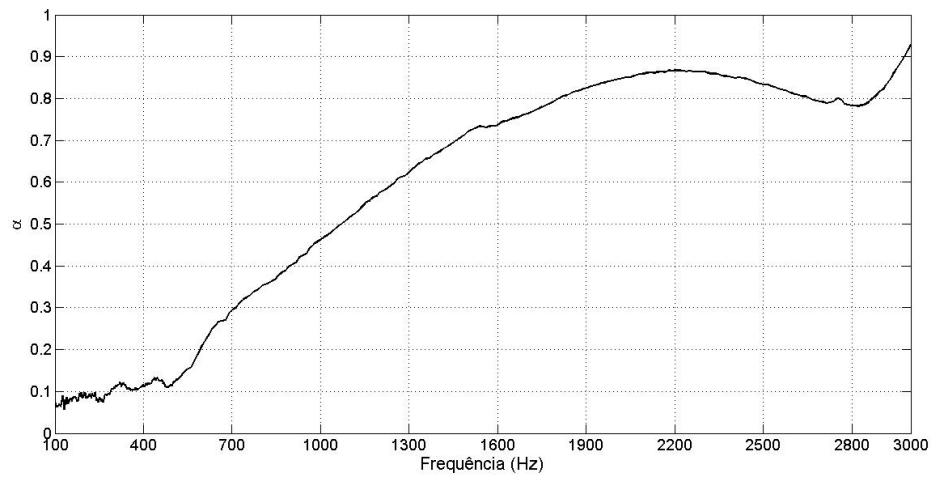


Figura 21: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.11 – Material 4 – Amostra 2

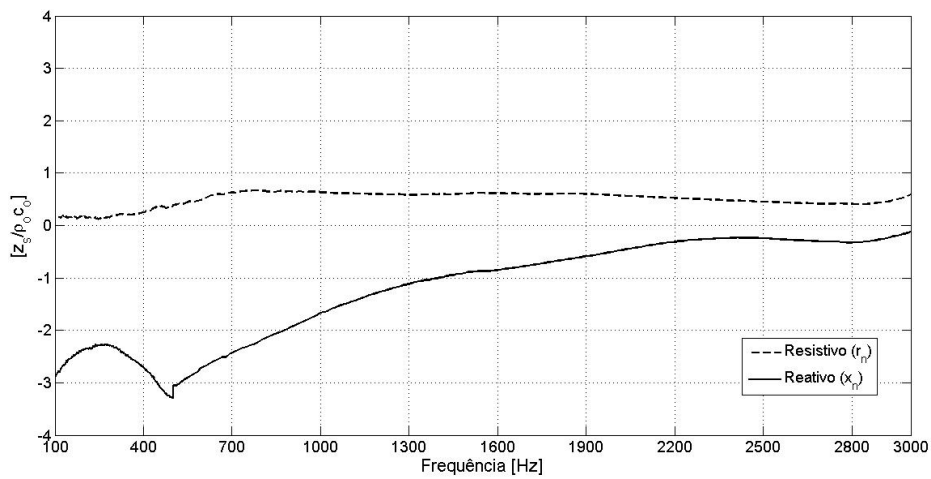


Figura 22: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.12 – Material 4 – Amostra 3

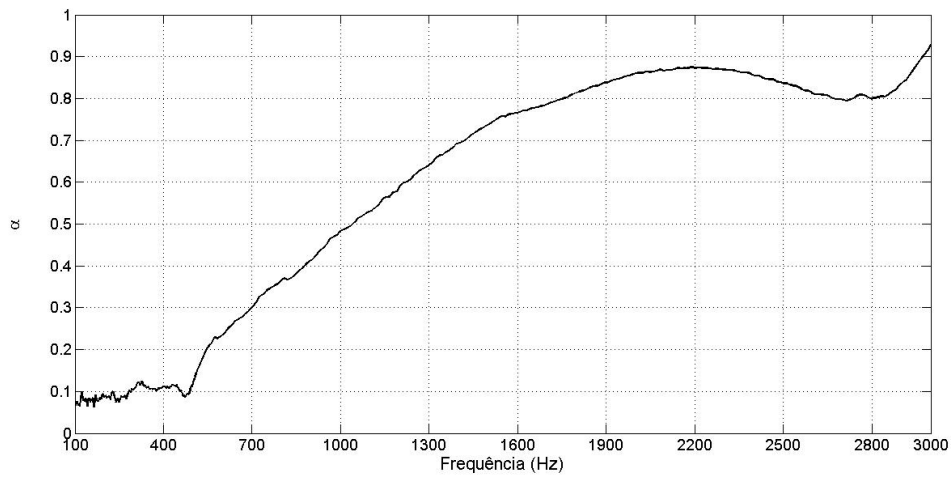


Figura 23: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.12 – Material 4 – Amostra 3

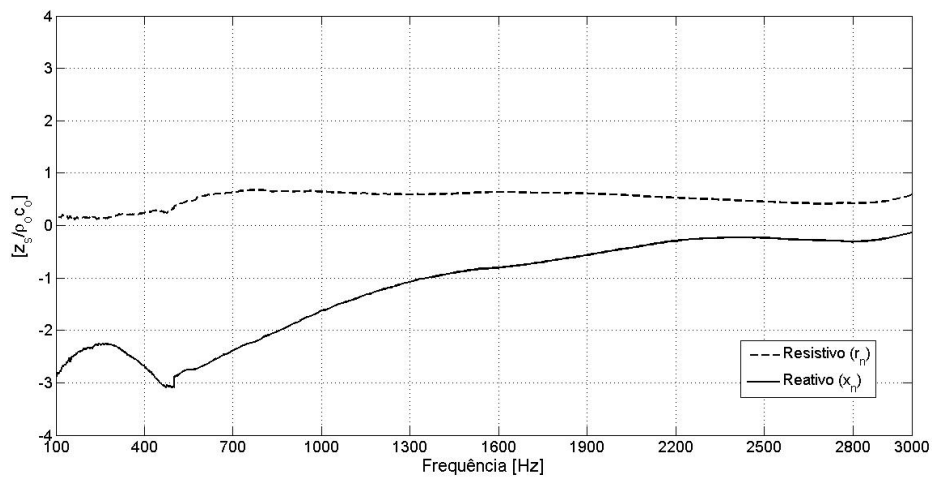


Figura 24: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.13 – Material 5 – Amostra 1

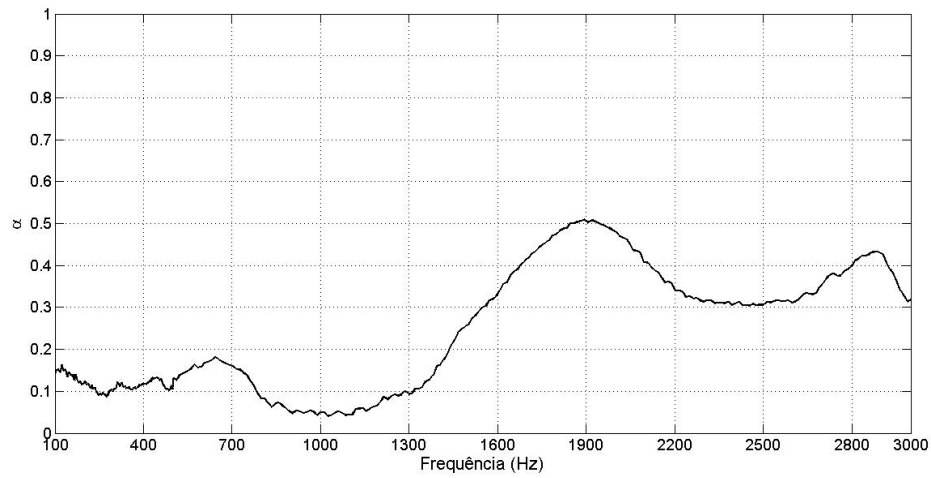


Figura 25: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.13 – Material 5 – Amostra 1

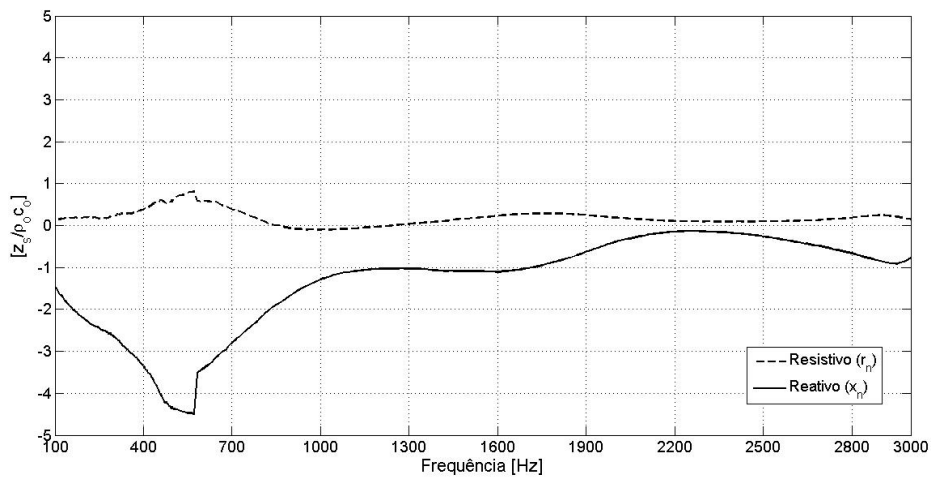


Figura 26: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.14 – Material 5 – Amostra 2

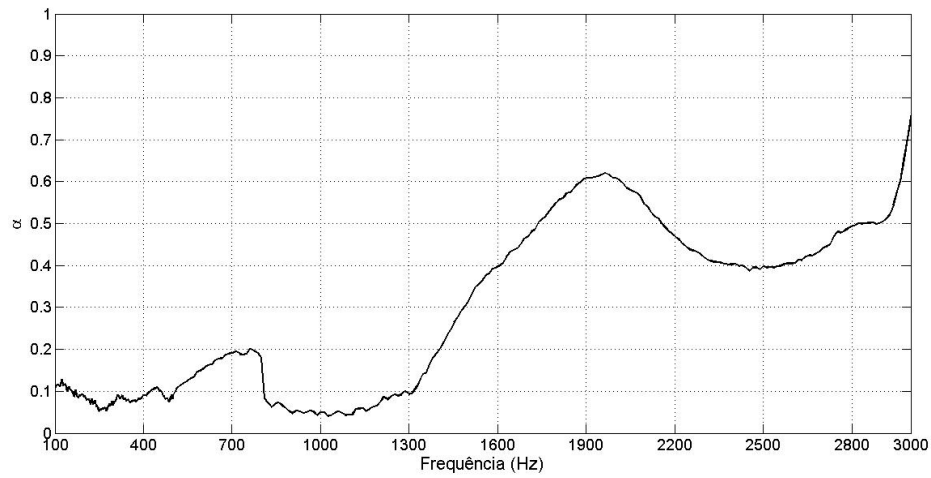


Figura 27: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.14 – Material 5 – Amostra 2

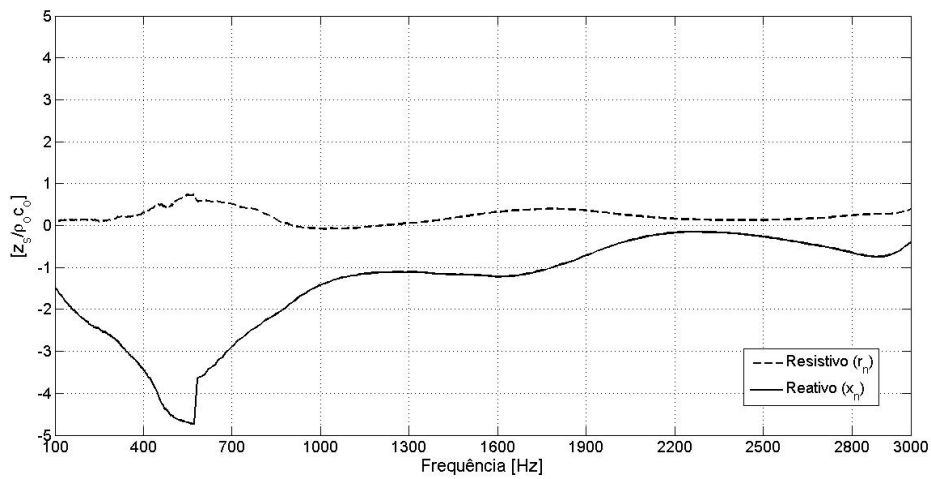


Figura 28: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 1.15 – Material 5 – Amostra 3

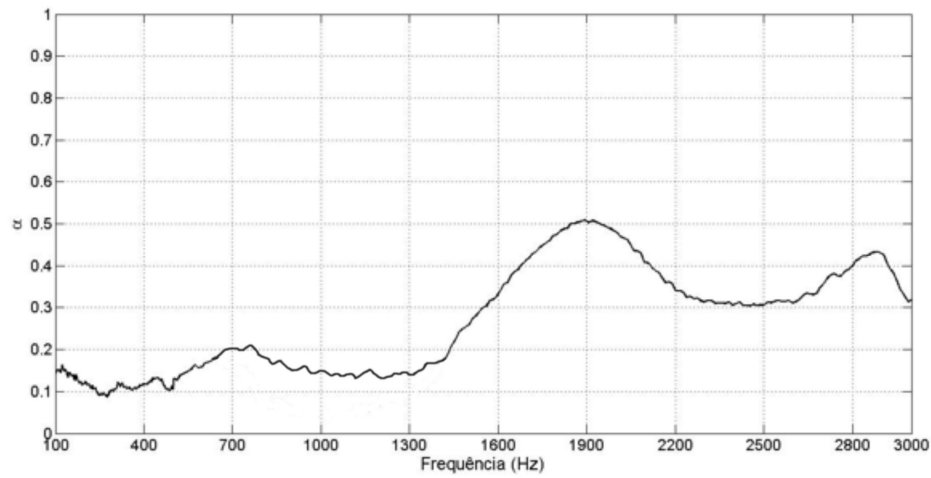


Figura 29: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 1.15 – Material 5 – Amostra 3

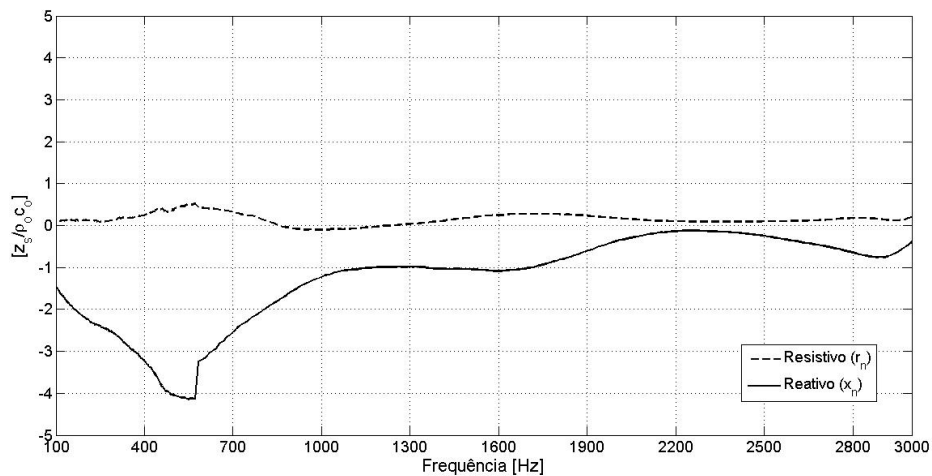


Figura 30: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

APÊNDICE B

SISTEMAS COMPOSTOS POR DUAS CAMADAS

Ensaio 2.1 – Materiais 1 e 1

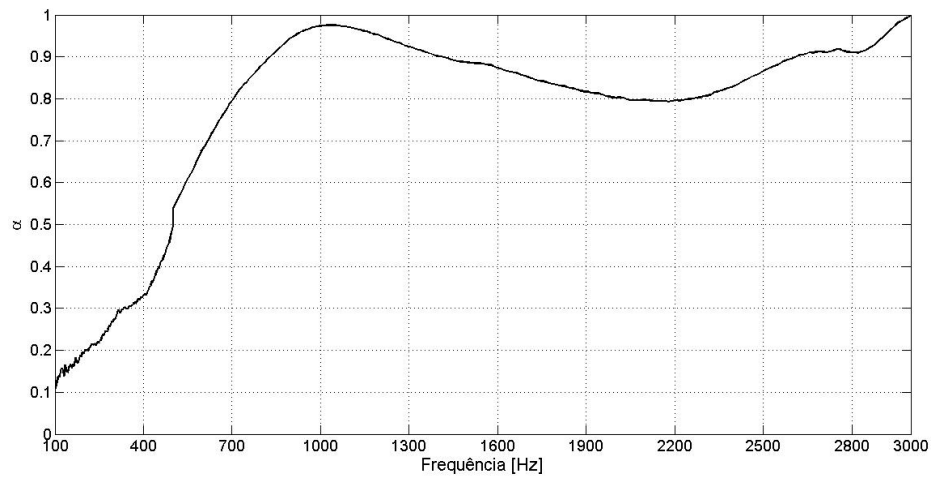


Figura 31: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.1 – Materiais 1 e 1

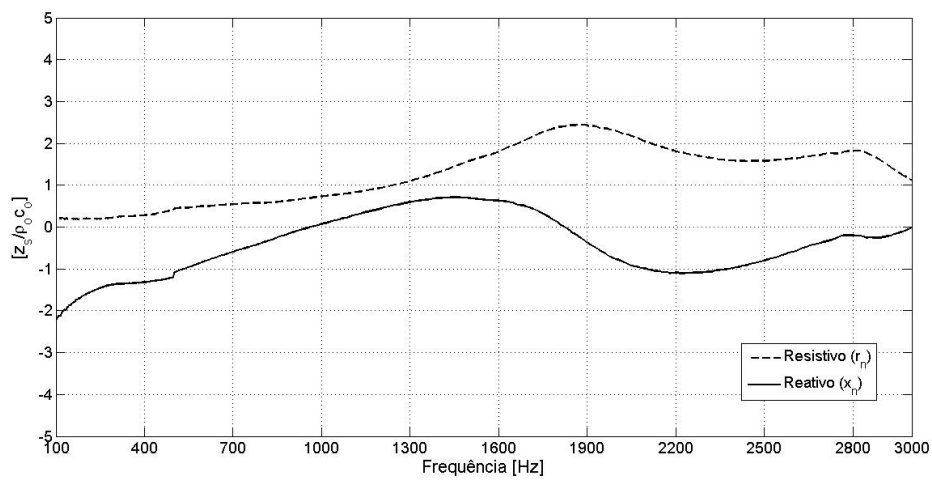


Figura 32: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.2 – Materiais 1 e 2

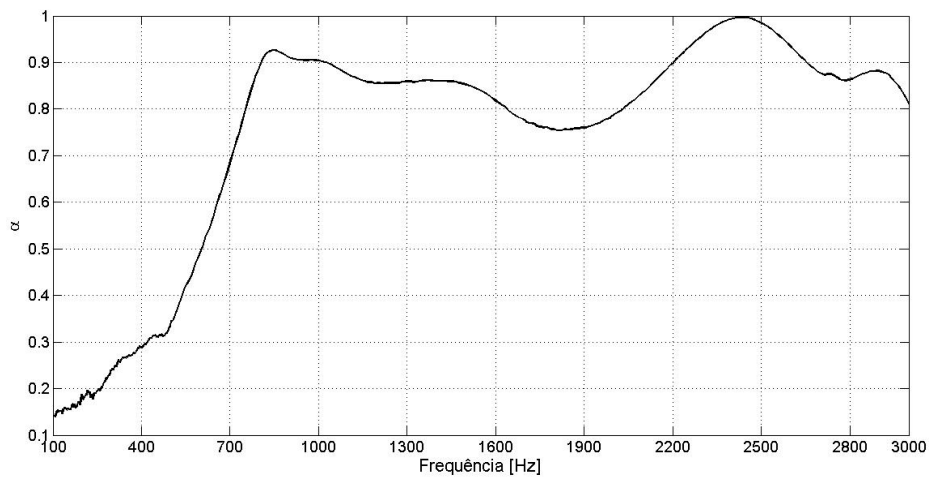
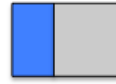


Figura 33: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.2 – Materiais 1 e 2

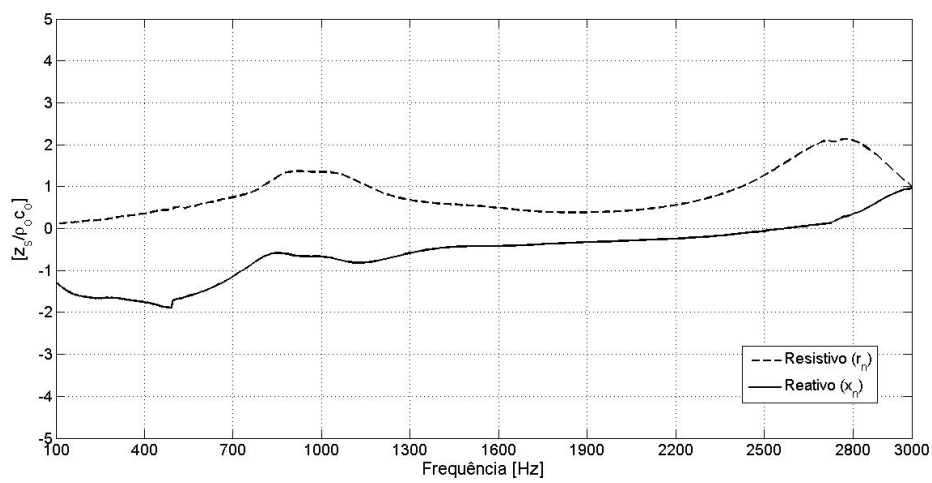


Figura 34: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.3 – Materiais 1 e 3

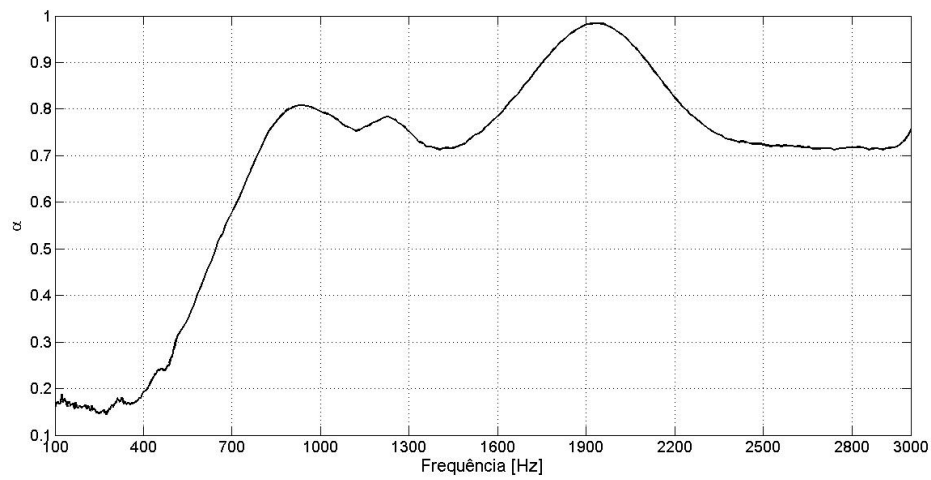


Figura 35: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.3 – Materiais 1 e 3

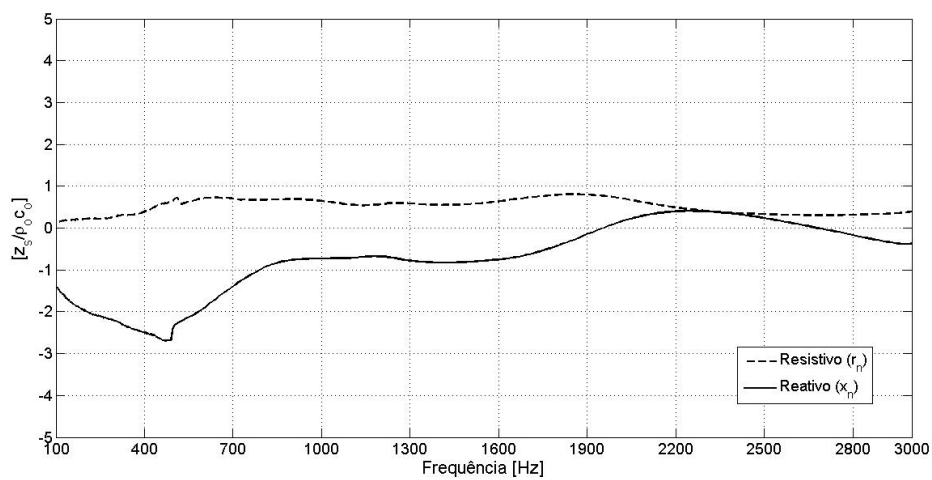


Figura 36: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.4 – Materiais 1 e 4

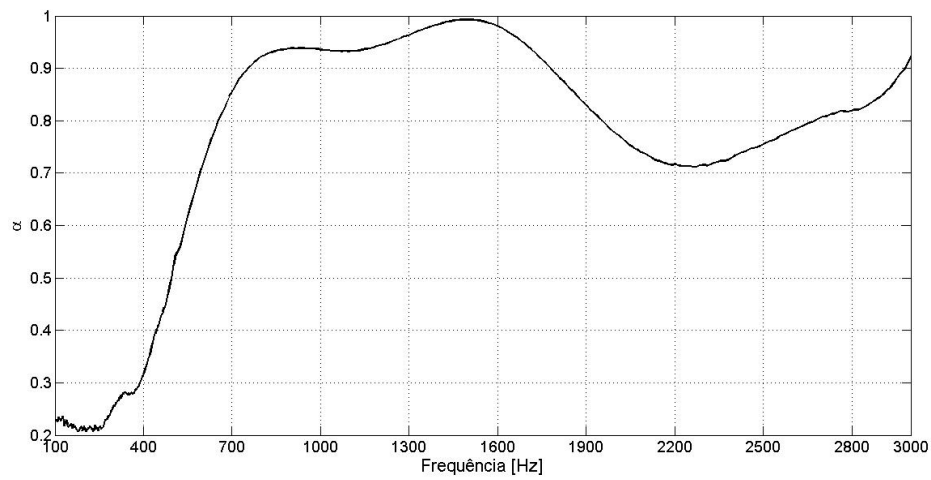


Figura 37: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.4 – Materiais 1 e 4

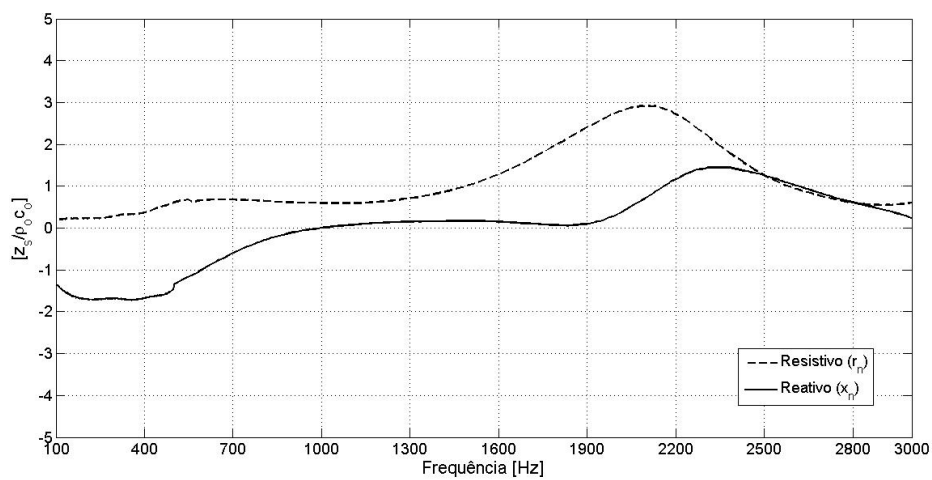


Figura 38: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.5 – Materiais 1 e 5

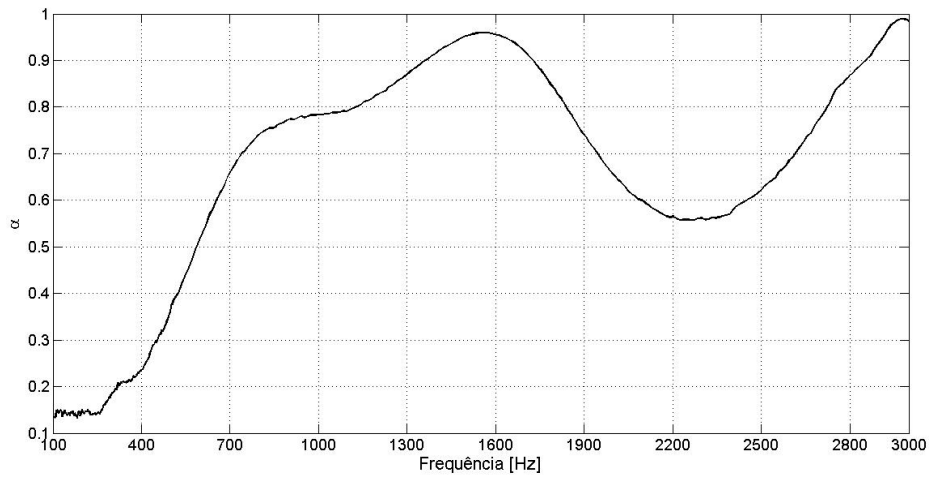


Figura 39: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.5 – Materiais 1 e 5

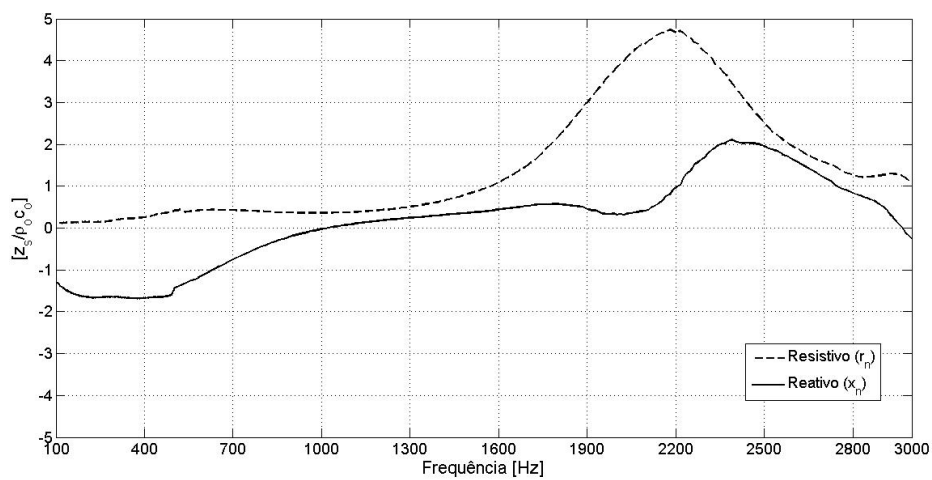


Figura 40: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.6 – Materiais 2 e 1

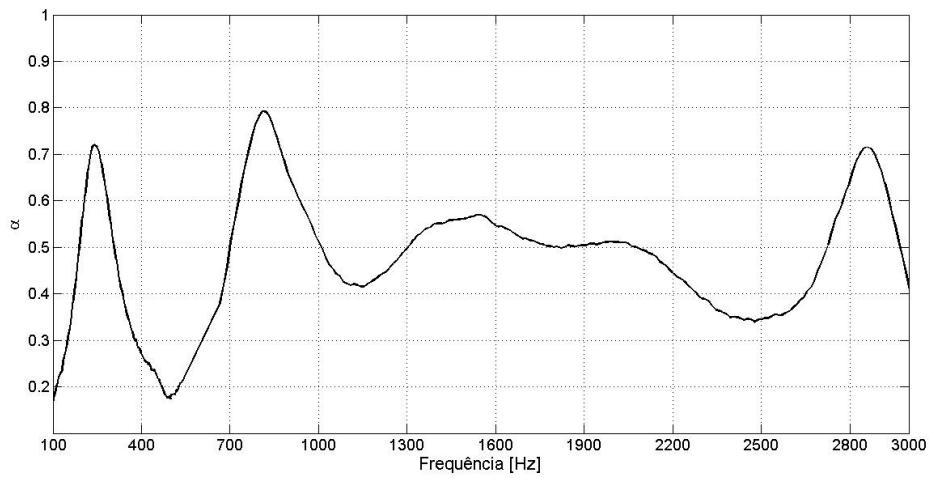


Figura 41: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.6 – Materiais 2 e 1

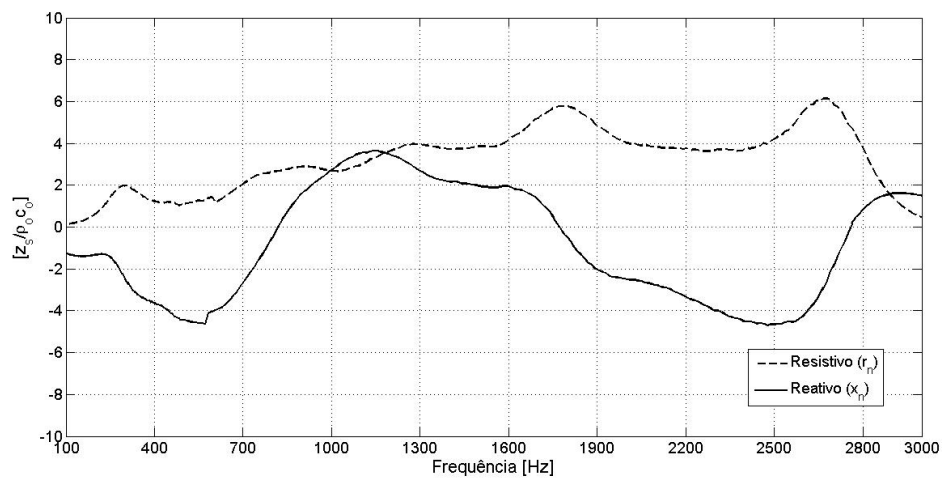


Figura 42: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.7 – Materiais 2 e 2

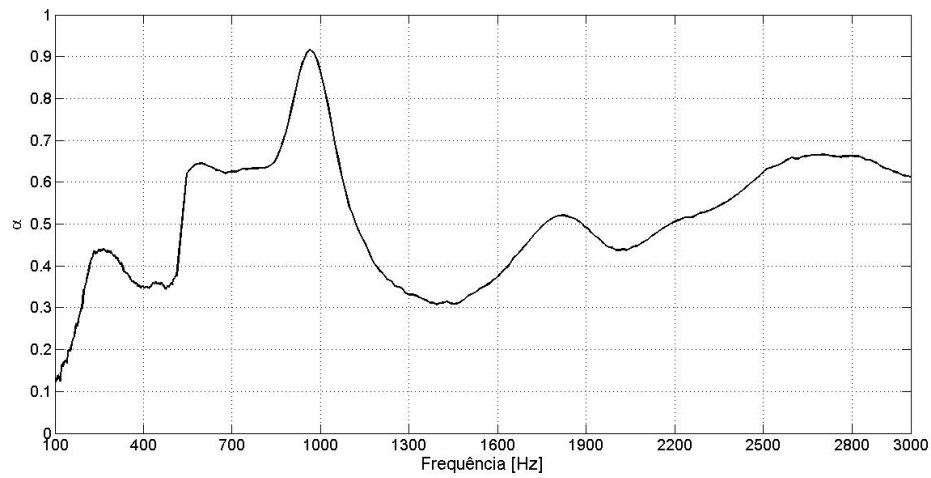


Figura 43: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.7 – Materiais 2 e 2

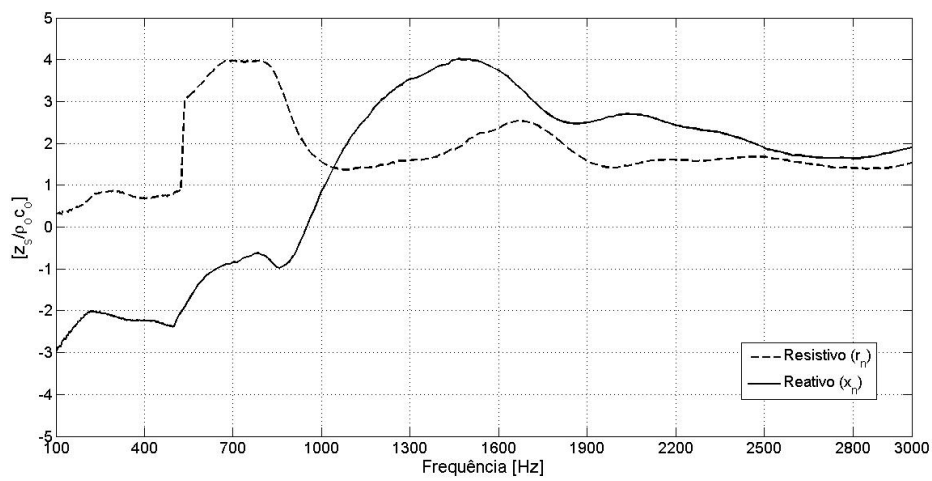


Figura 44: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.8 – Materiais 2 e 3

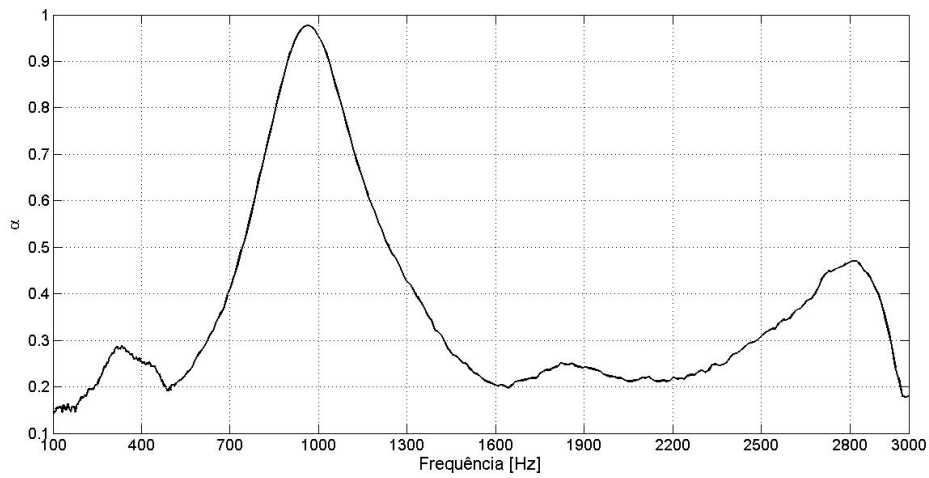


Figura 45: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.8 – Materiais 2 e 3

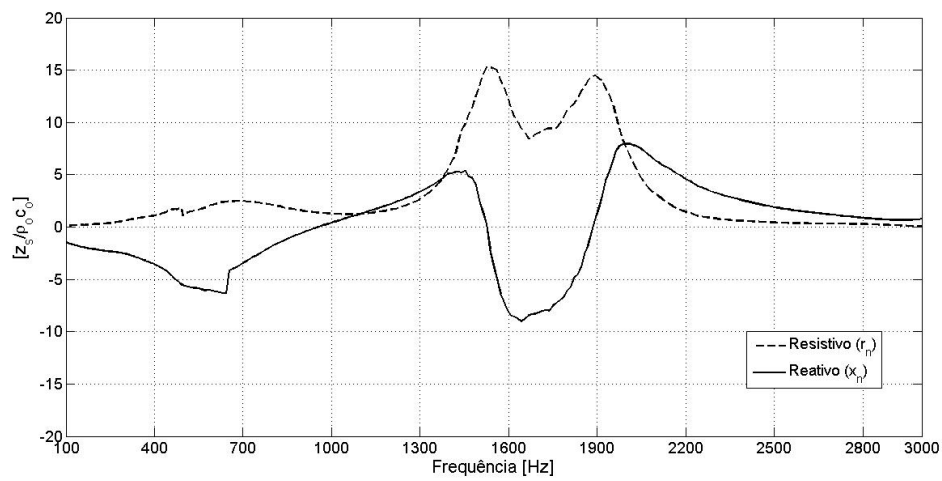


Figura 46: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.9 – Materiais 2 e 4

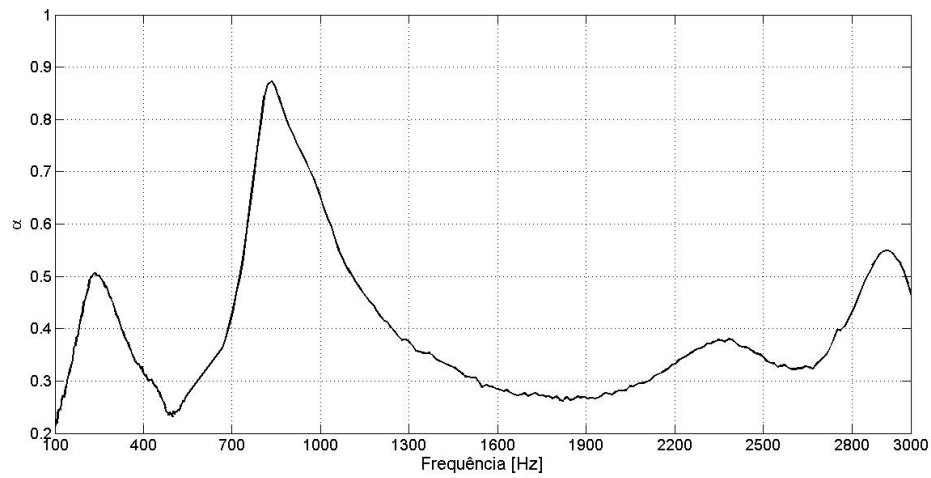


Figura 47: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.9 – Materiais 2 e 4

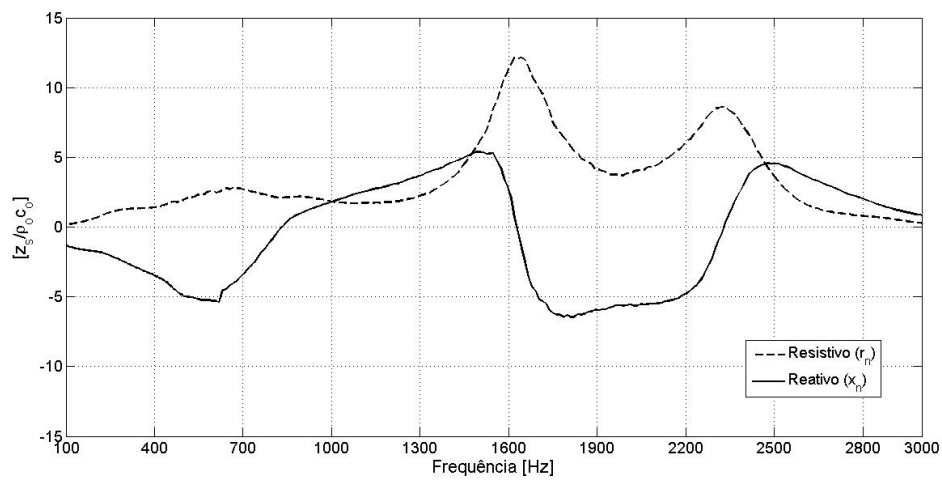


Figura 48: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.10 – Materiais 2 e 5

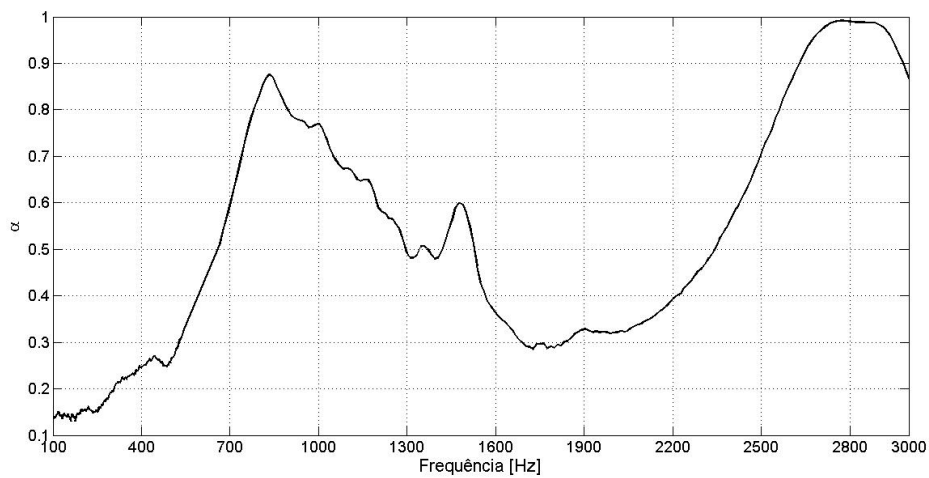


Figura 49: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.10 – Materiais 2 e 5

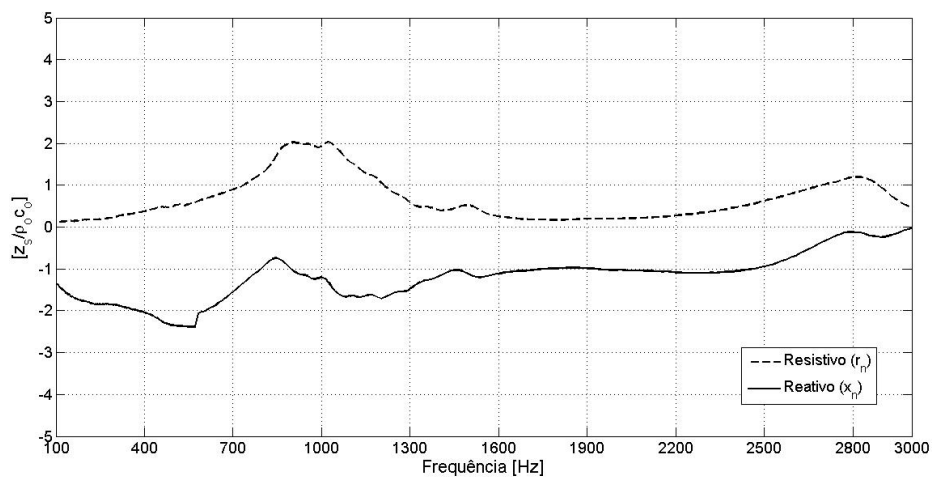
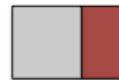


Figura 50: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.11 – Materiais 3 e 1

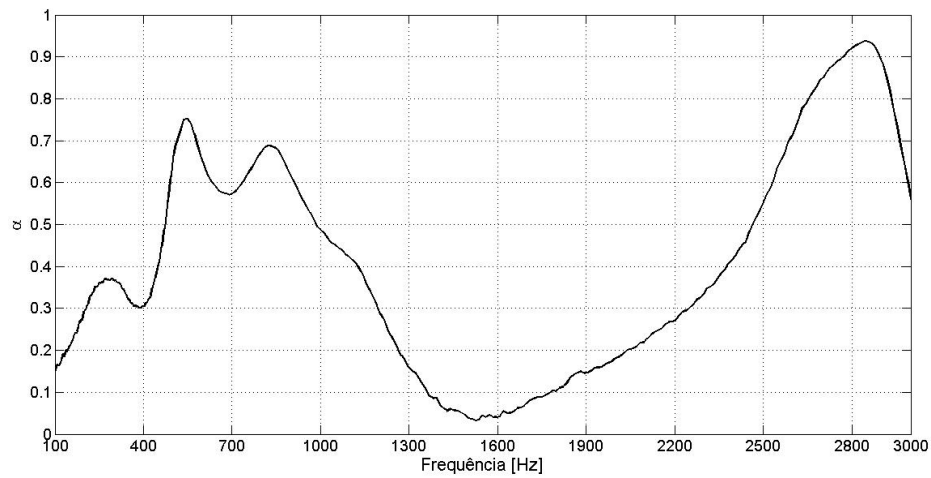


Figura 51: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.11 – Materiais 3 e 1

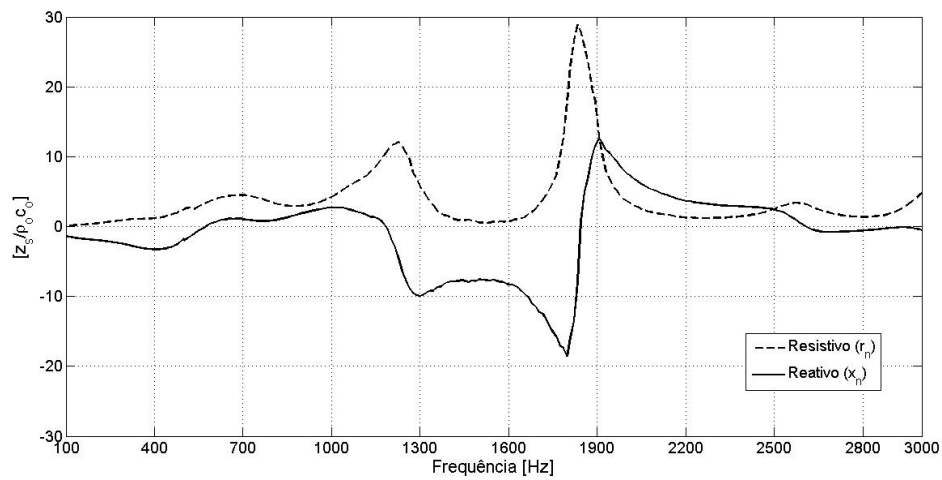


Figura 52: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.12 – Materiais 3 e 2

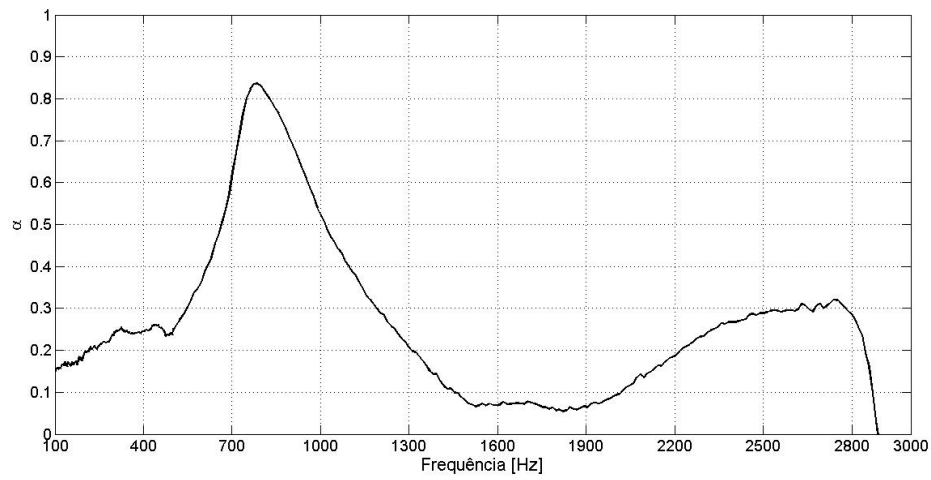
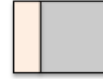


Figura 53: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.12 – Materiais 3 e 2

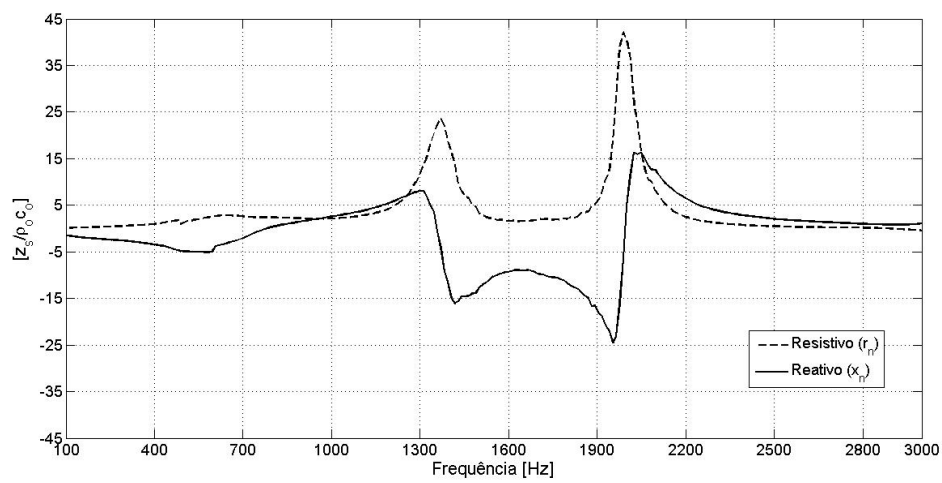
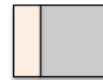


Figura 54: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.13 – Materiais 3 e 3

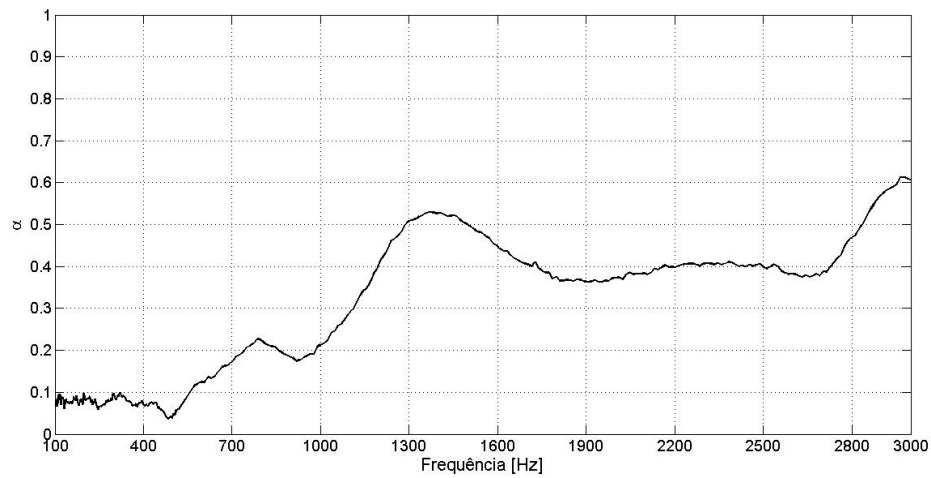


Figura 55: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.13 – Materiais 3 e 3

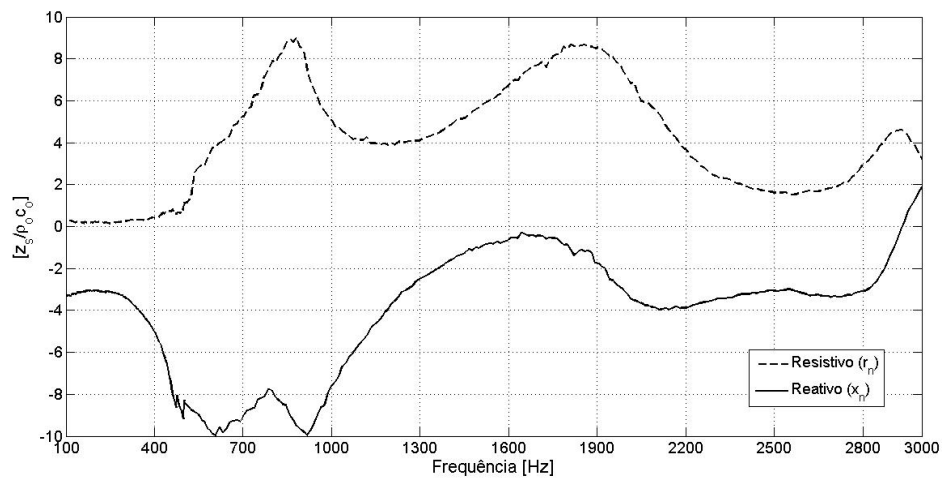


Figura 56: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.14 – Materiais 3 e 4

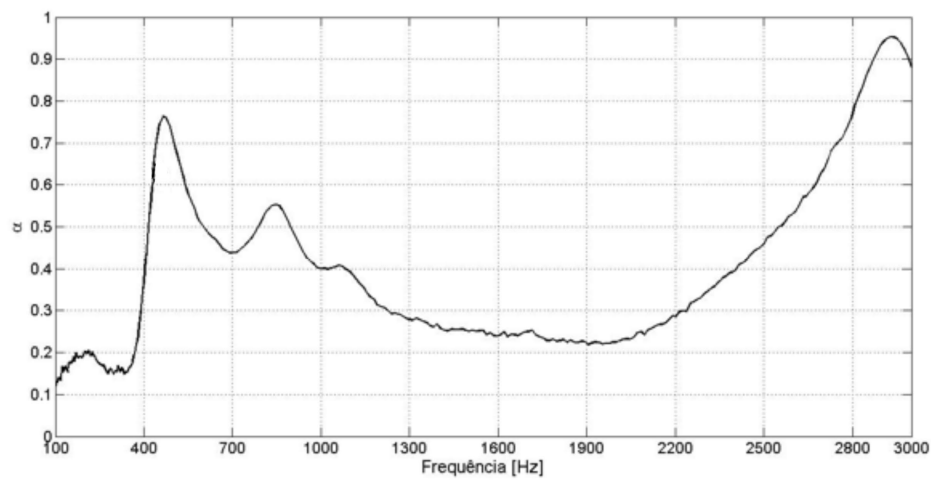


Figura 57: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.14 – Materiais 3 e 4

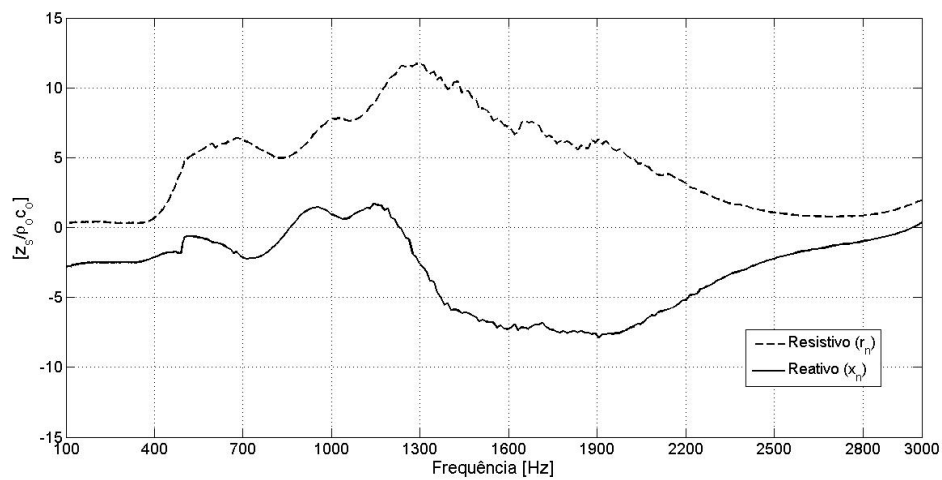


Figura 58: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.15 – Materiais 3 e 5

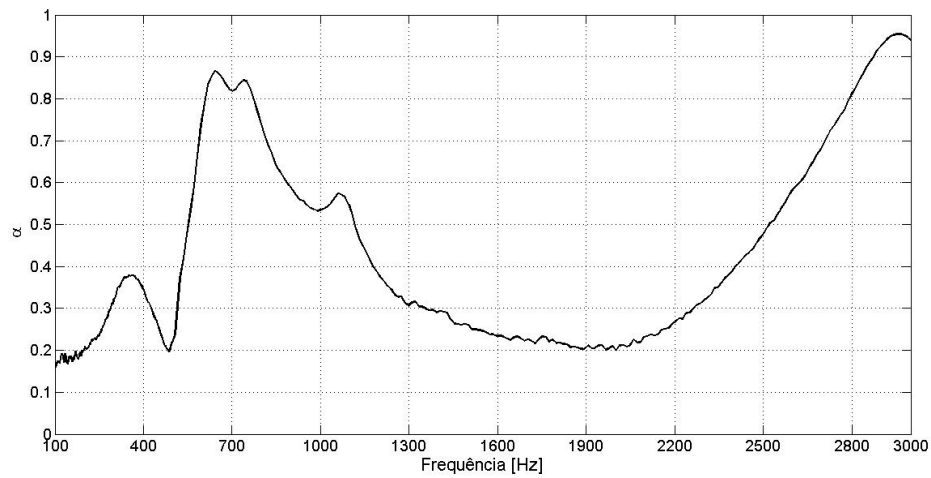


Figura 59: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.15 – Materiais 3 e 5

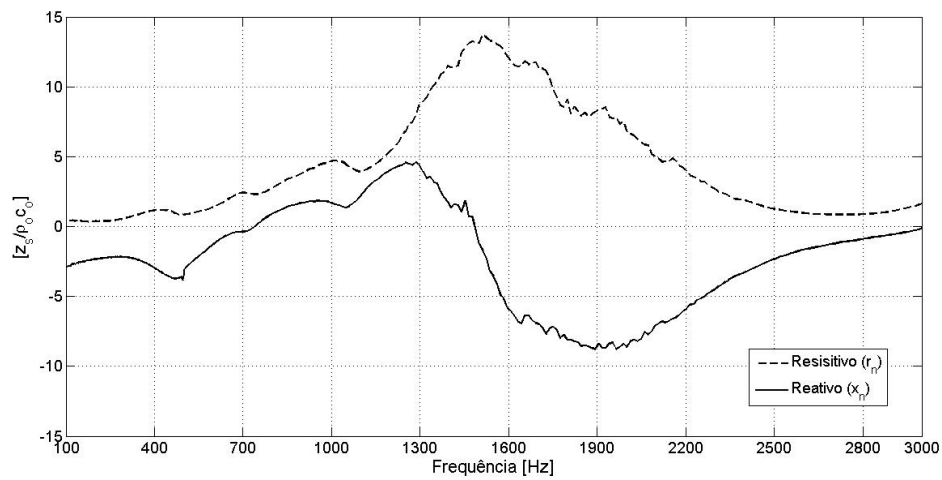


Figura 60: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.16 – Materiais 4 e 1

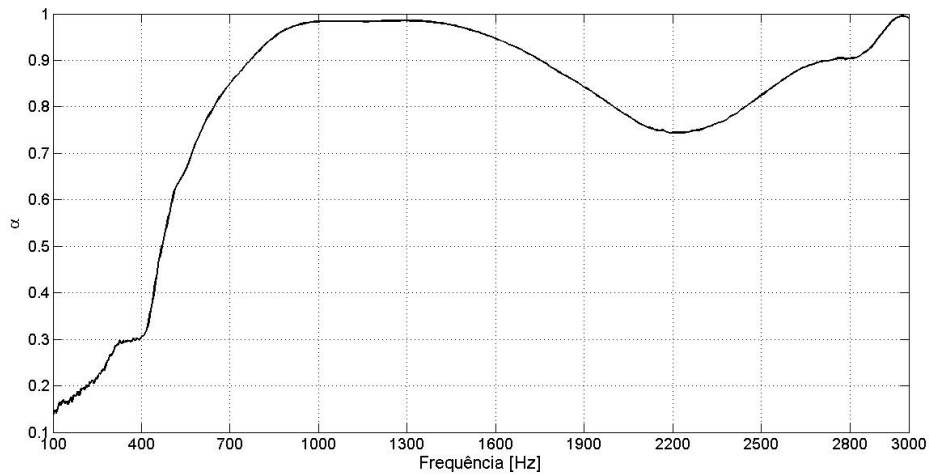


Figura 61: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.16 – Materiais 4 e 1

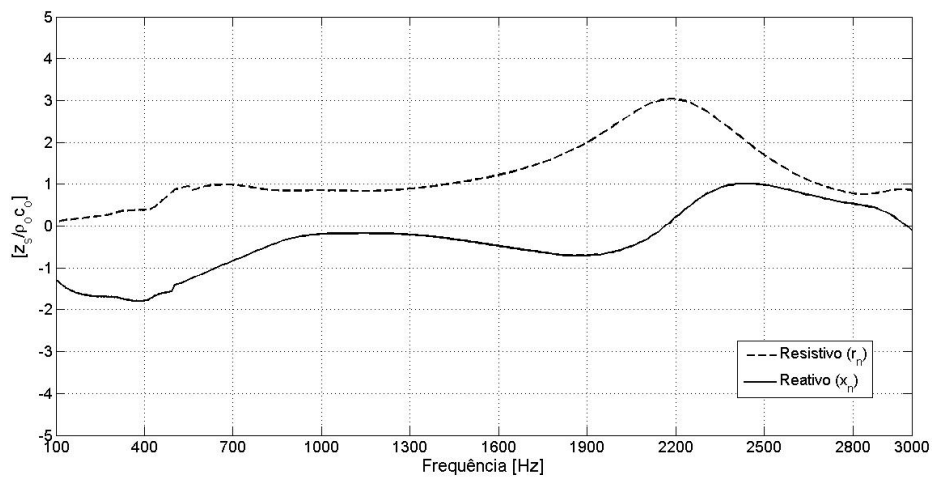


Figura 62: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.17 – Materiais 4 e 2

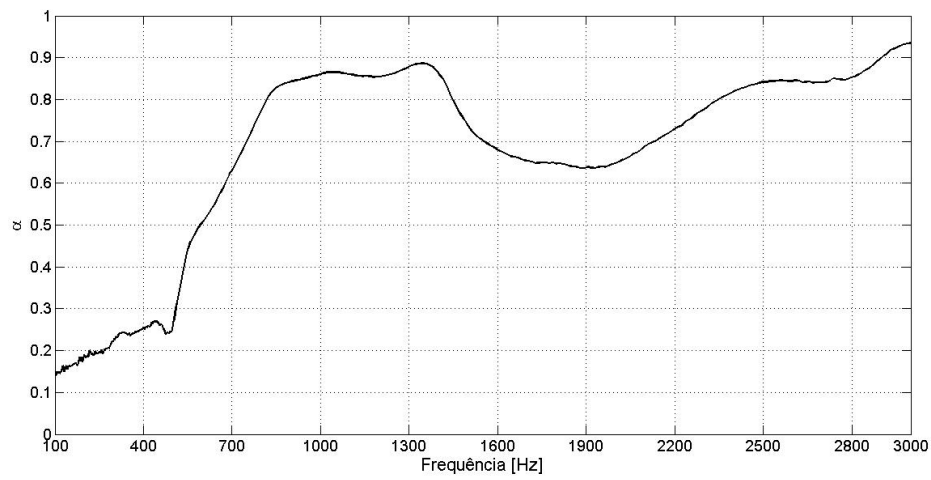


Figura 63: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.17 – Materiais 4 e 2

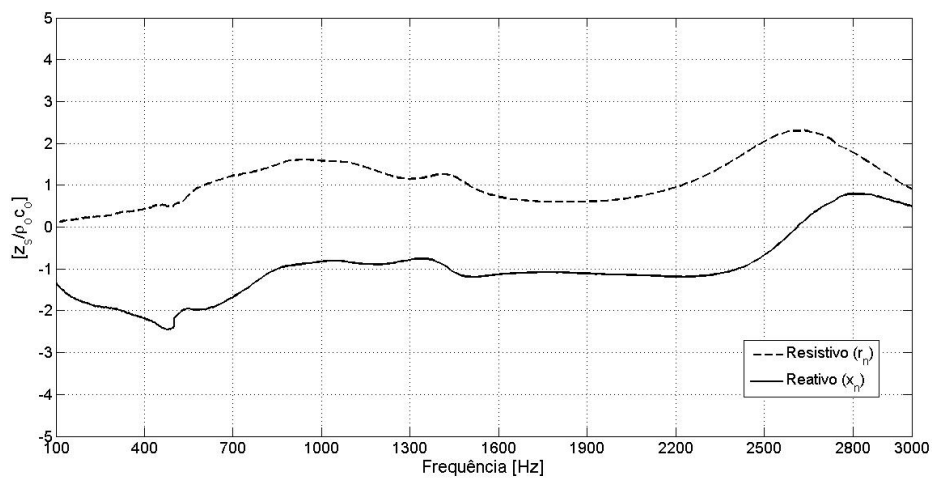


Figura 64: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.18 – Materiais 4 e 3

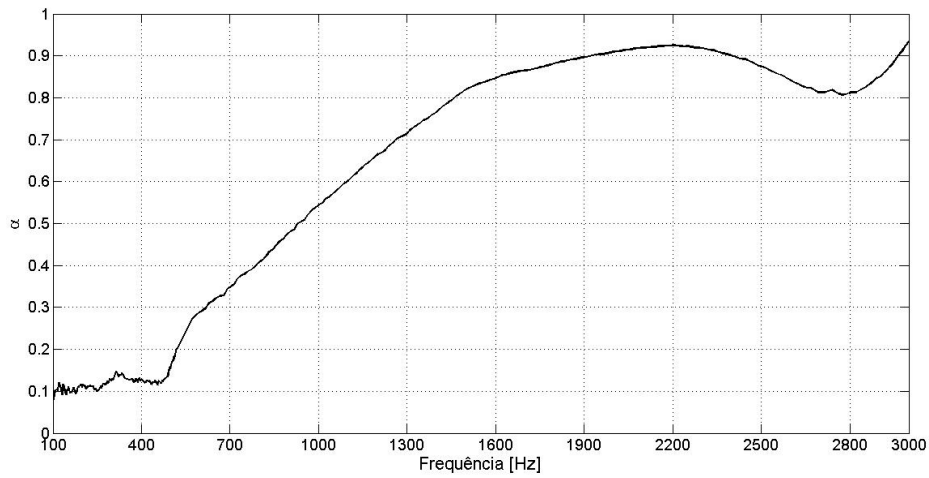


Figura 65: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.18 – Materiais 4 e 3

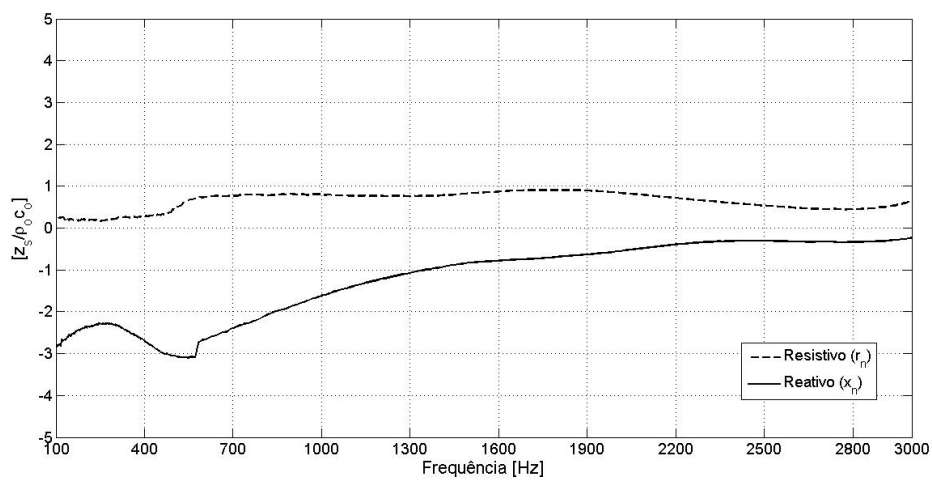


Figura 66: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.19 – Materiais 4 e 4

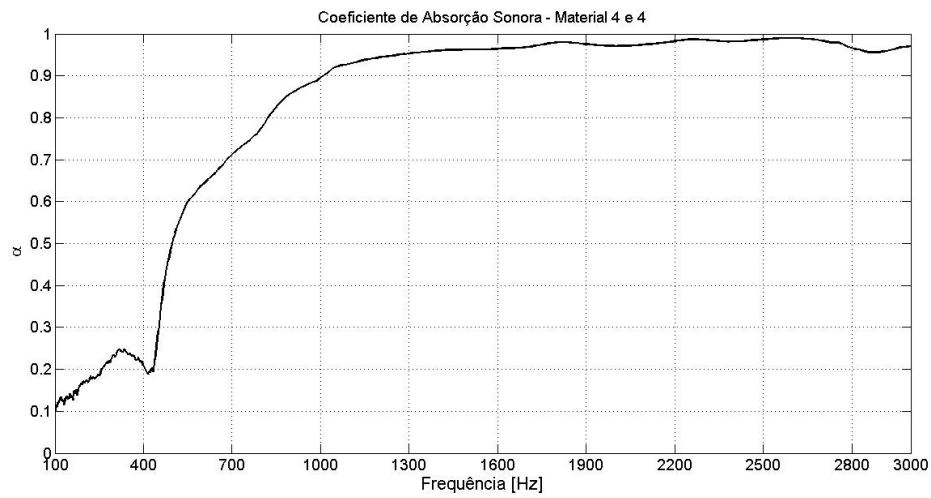


Figura 67: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.19 – Materiais 4 e 4

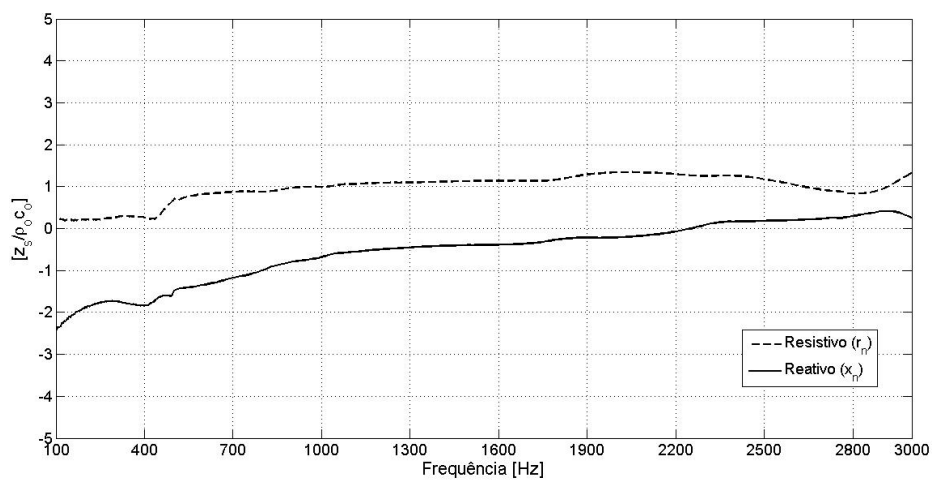


Figura 68: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.20 – Materiais 4 e 5

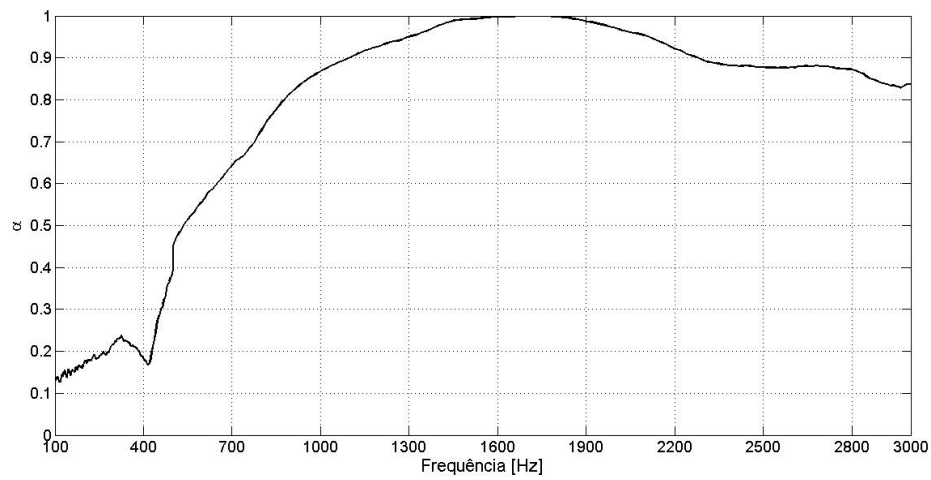


Figura 69: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.20 – Materiais 4 e 5

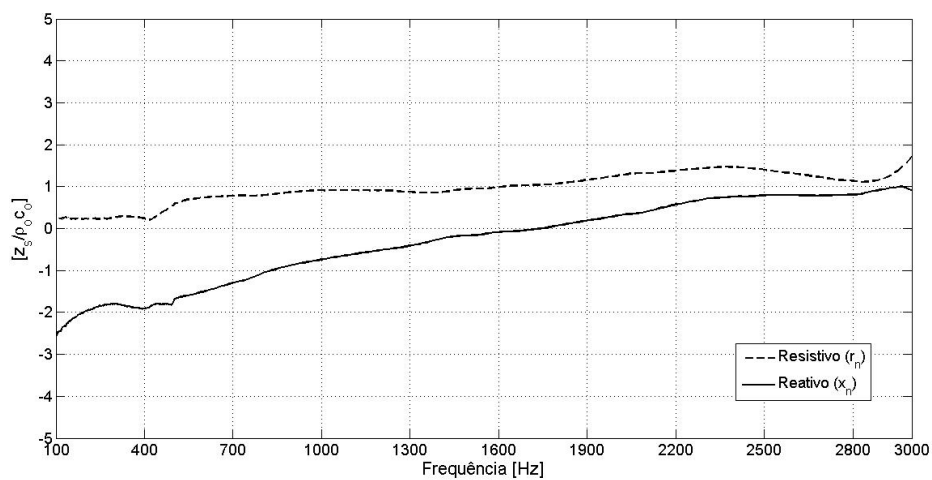


Figura 70: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.21– Materiais 5 e 1

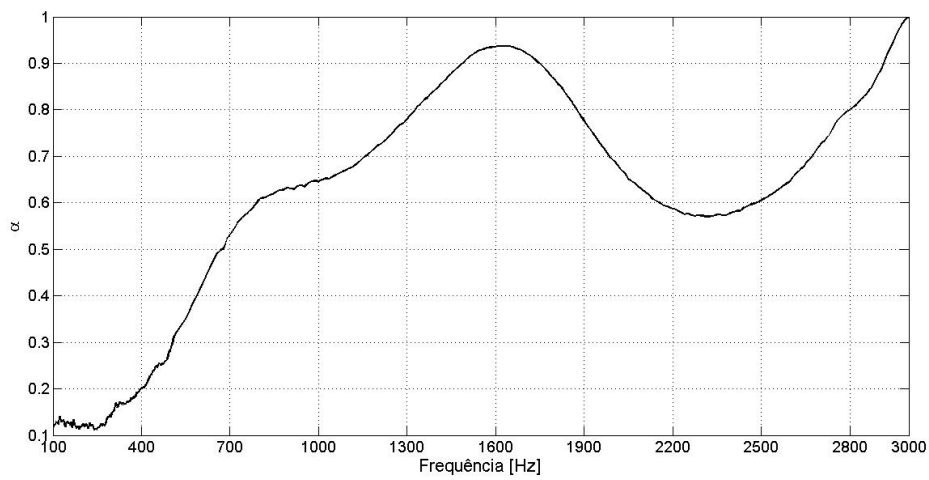


Figura 71: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.21– Materiais 5 e 1

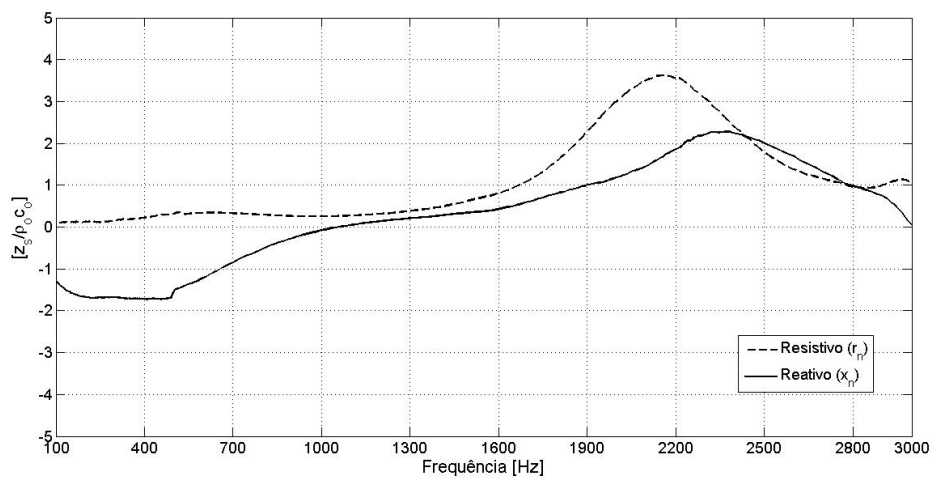


Figura 72: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.22– Materiais 5 e 2

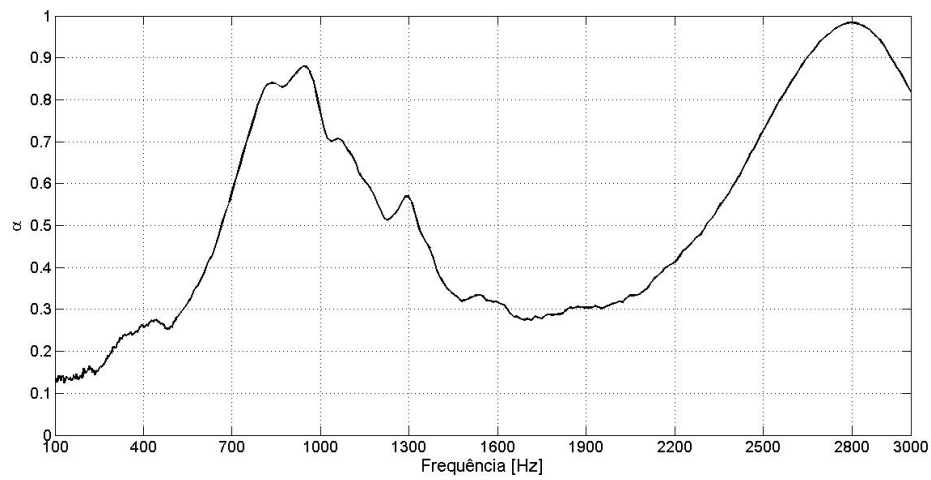
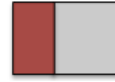


Figura 73: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.22– Materiais 5 e 2

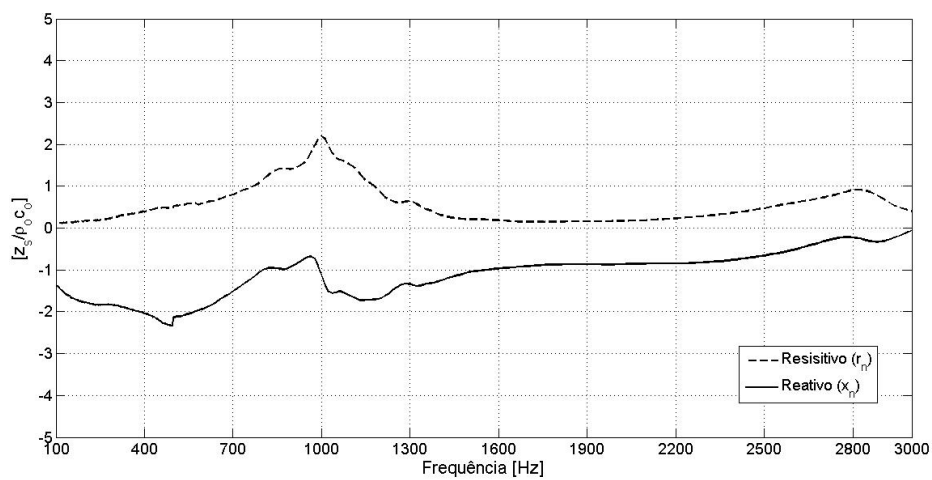
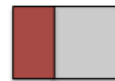


Figura 74: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.23– Materiais 5 e 3

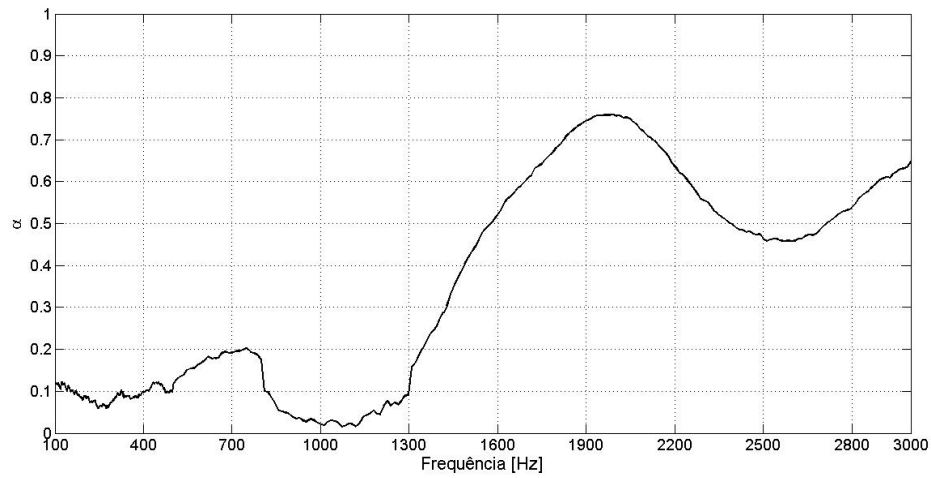


Figura 75: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.23– Materiais 5 e 3

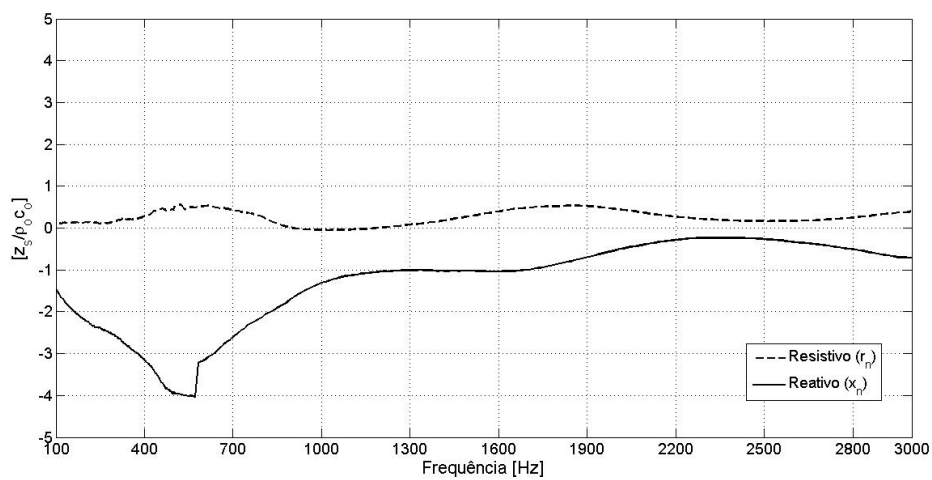


Figura 76: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.24 – Materiais 5 e 4

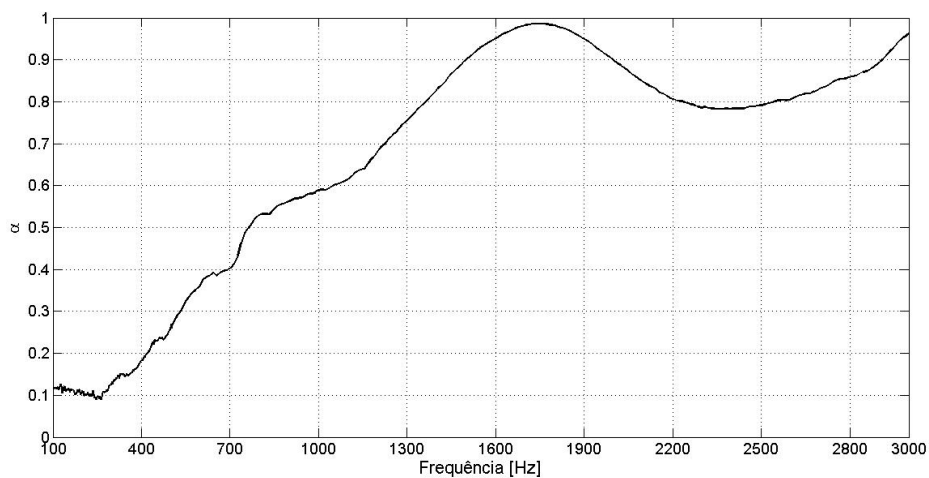


Figura 77: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.24– Materiais 5 e 4

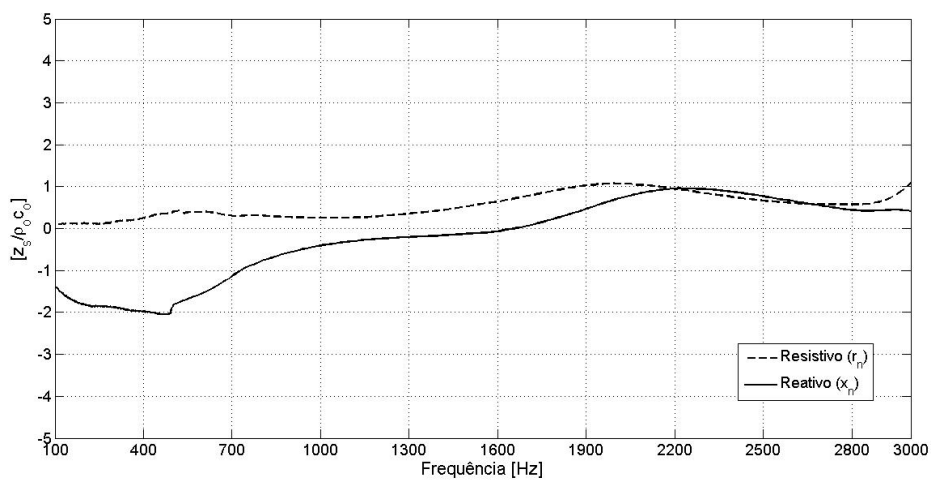


Figura 78: Valores de Impedância Superficial para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 2.24– Materiais 5 e 5

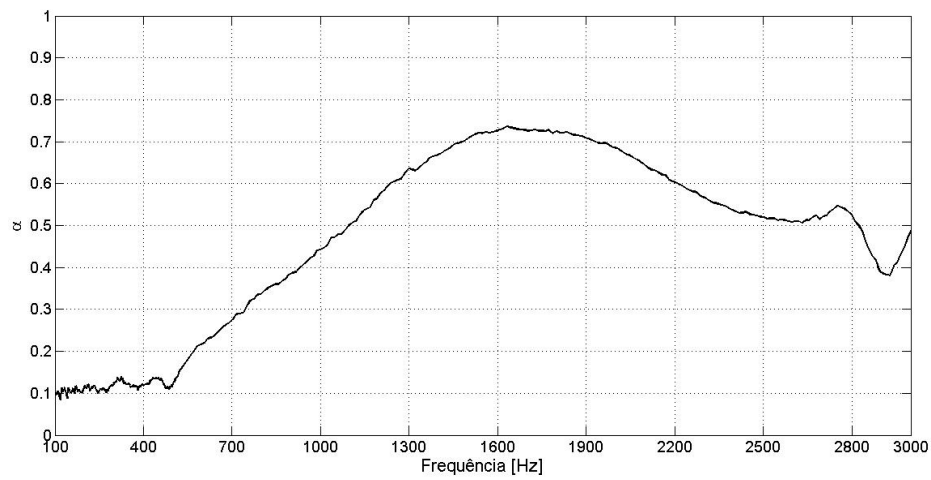


Figura 79: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 2.25– Materiais 5 e 5

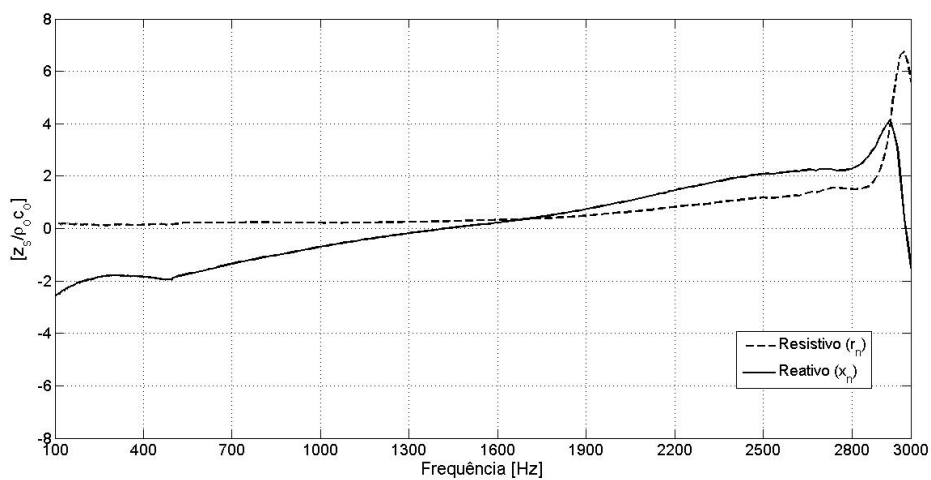


Figura 80: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

APÊNDICE C

SISTEMAS COMPOSTOS POR TRÊS CAMADAS

Ensaio 3.1 – Materiais 1, 2 e 3

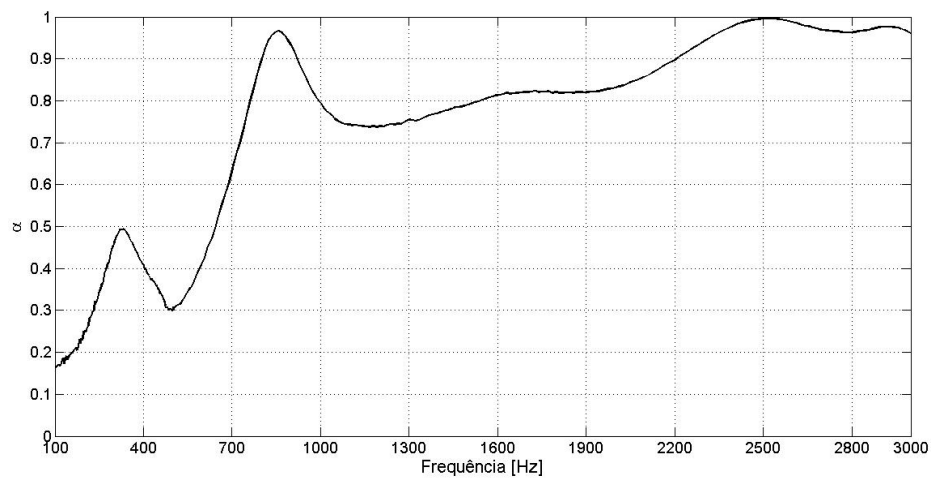


Figura 81: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.1 – Materiais 1, 2 e 3

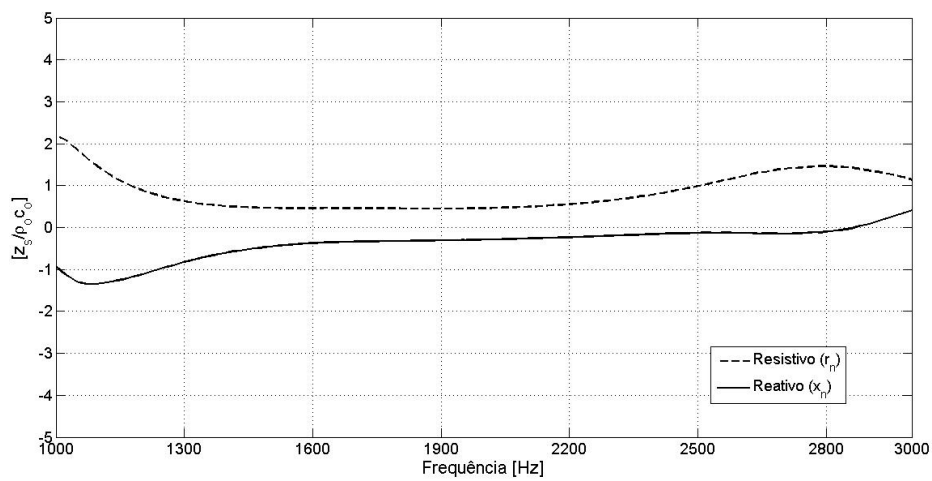


Figura 82: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.2 – Materiais 1, 2 e 5

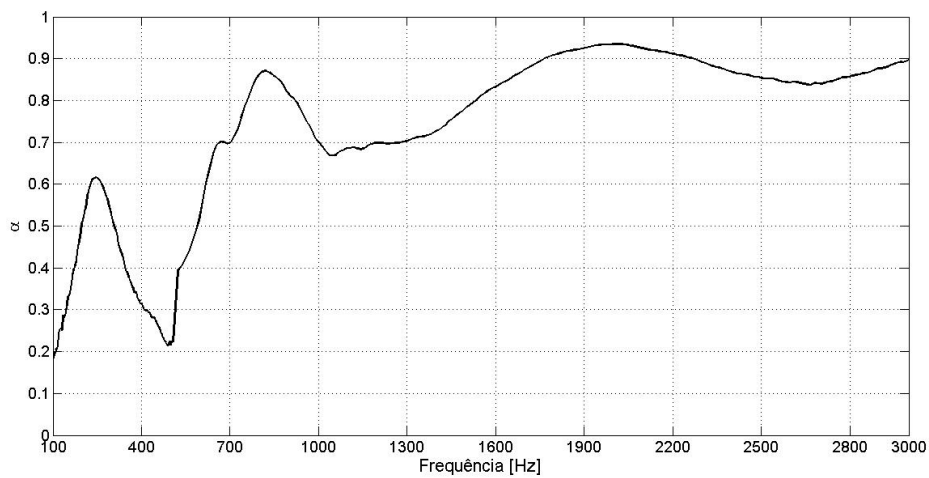


Figura 83: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.2 – Materiais 1, 2 e 5

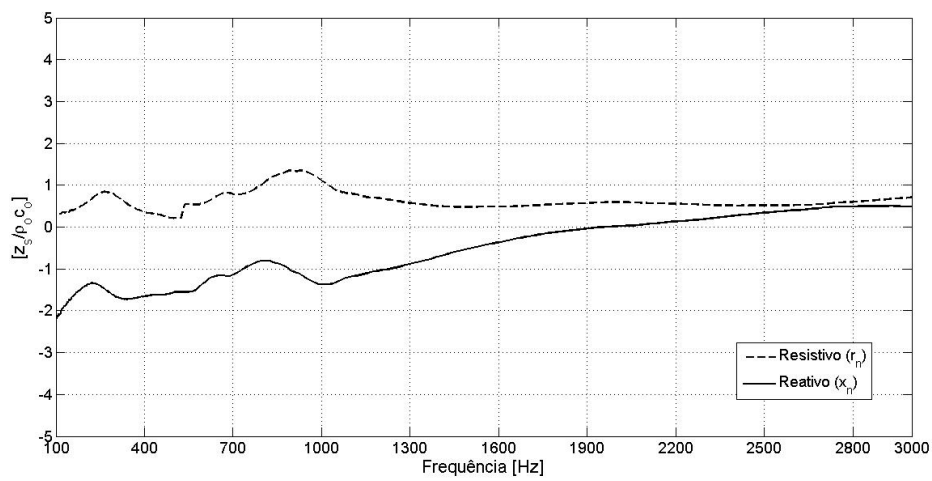


Figura 84: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.3 – Materiais 1, 3 e 2

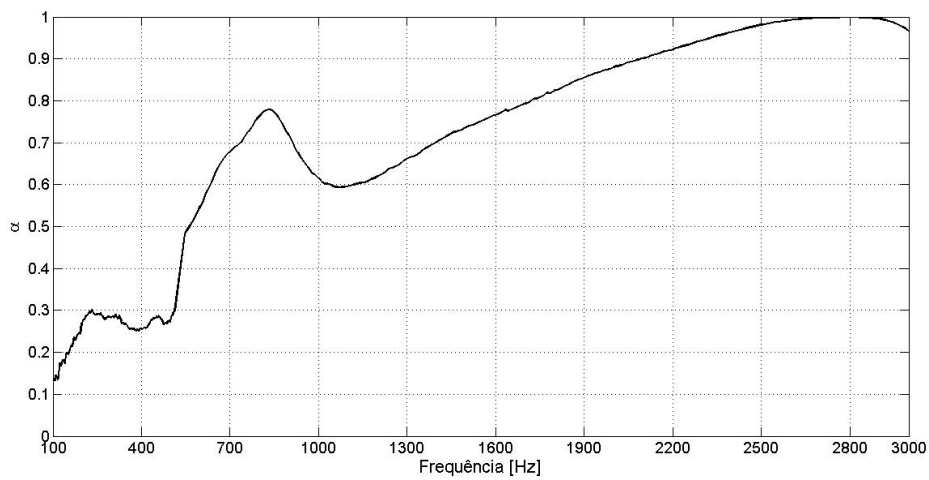


Figura 85: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.3 – Materiais 1, 3 e 2

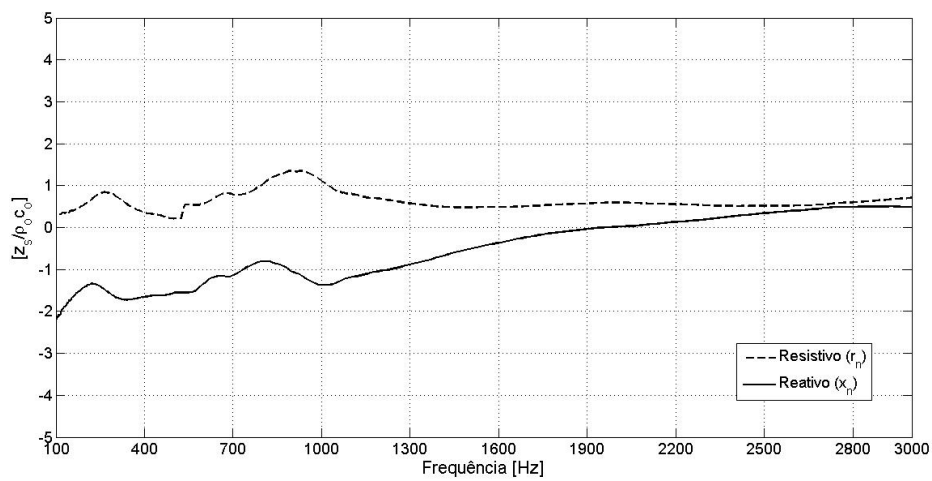
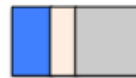


Figura 86: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.4 – Materiais 1, 3 e 5

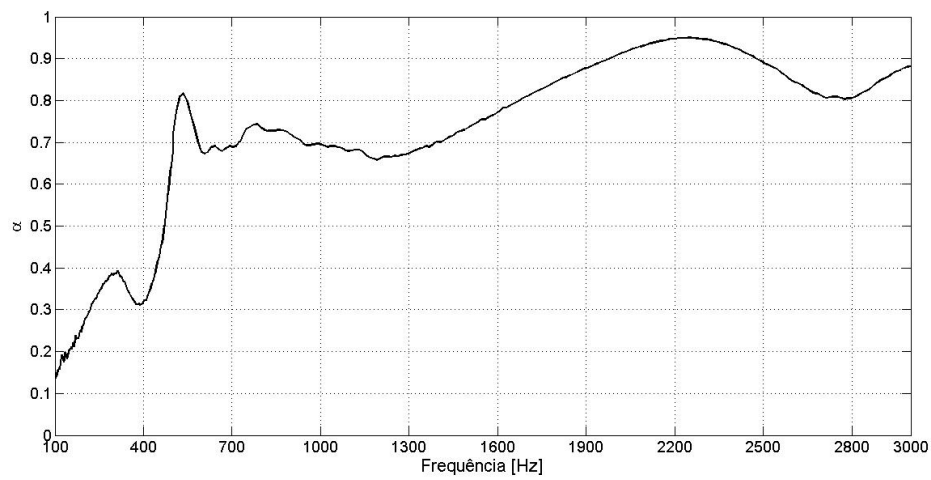
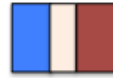


Figura 87: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.4 – Materiais 1, 3 e 5

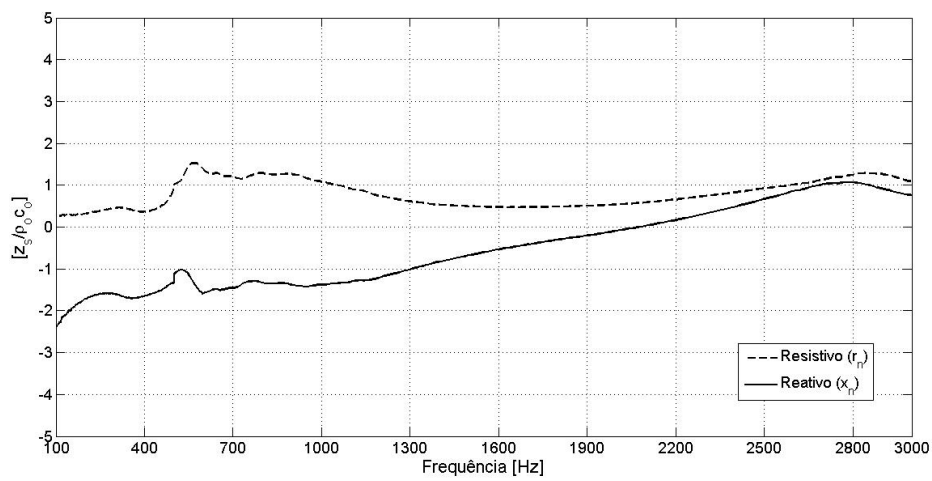
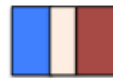


Figura 88: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.5 – Materiais 1, 5 e 2

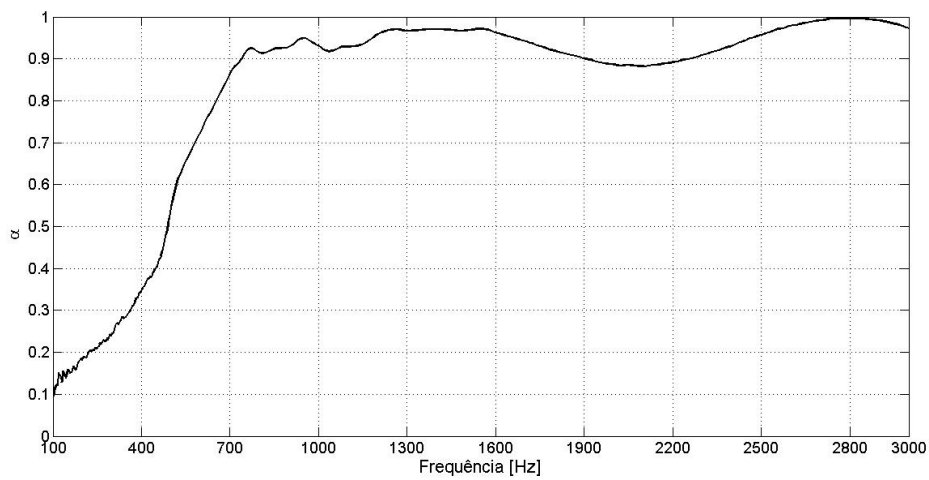


Figura 89: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.5 – Materiais 1, 5 e 2

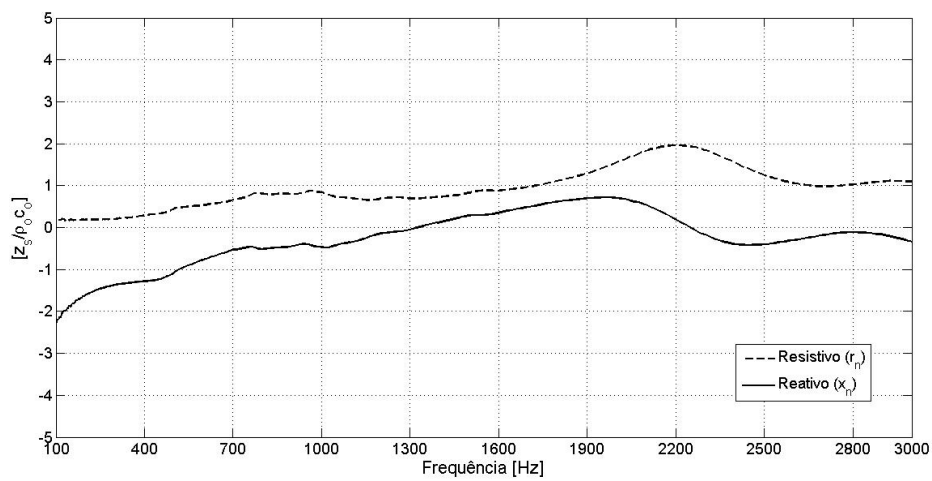


Figura 90: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.6 – Materiais 1, 5 e 3

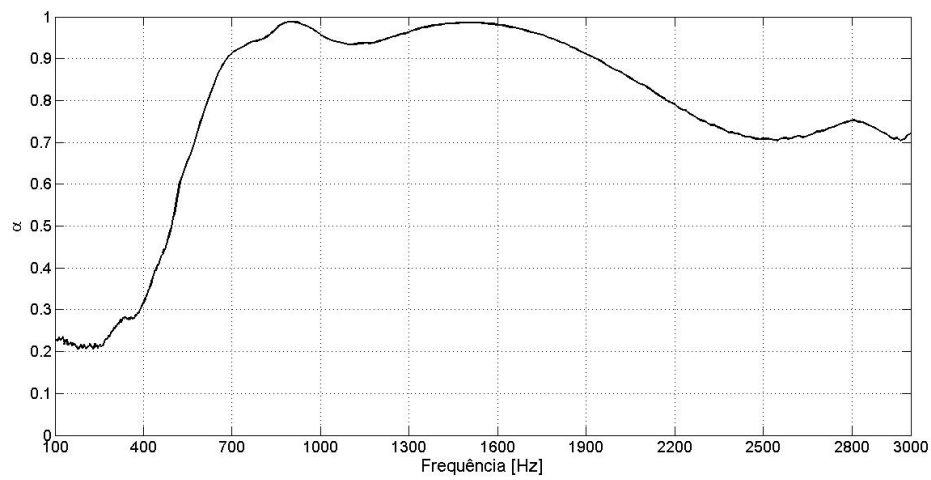


Figura 91: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.6 – Materiais 1, 5 e 3

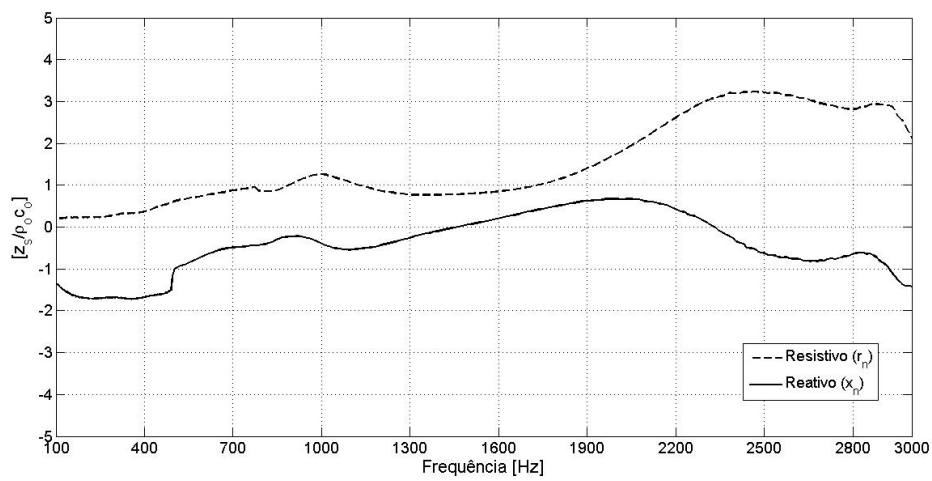


Figura 92: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.7 – Materiais 2, 1 e 3

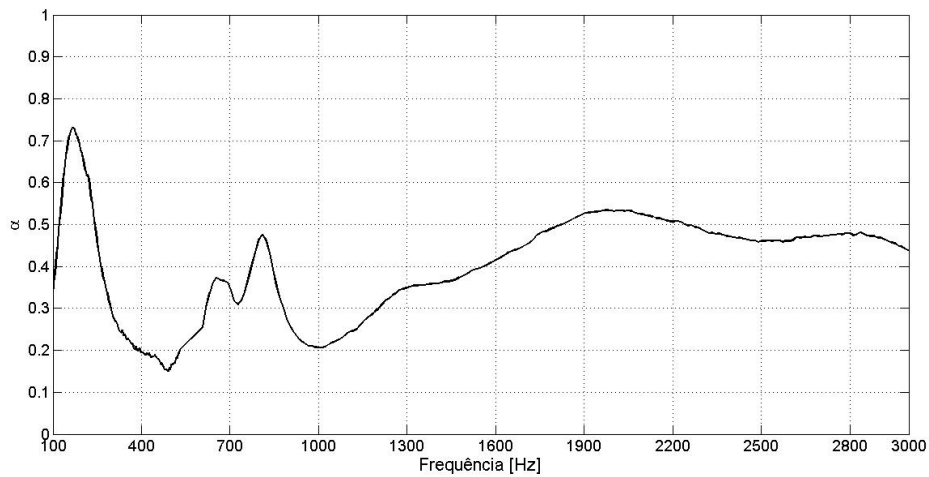


Figura 93: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.8 – Materiais 2, 1 e 3

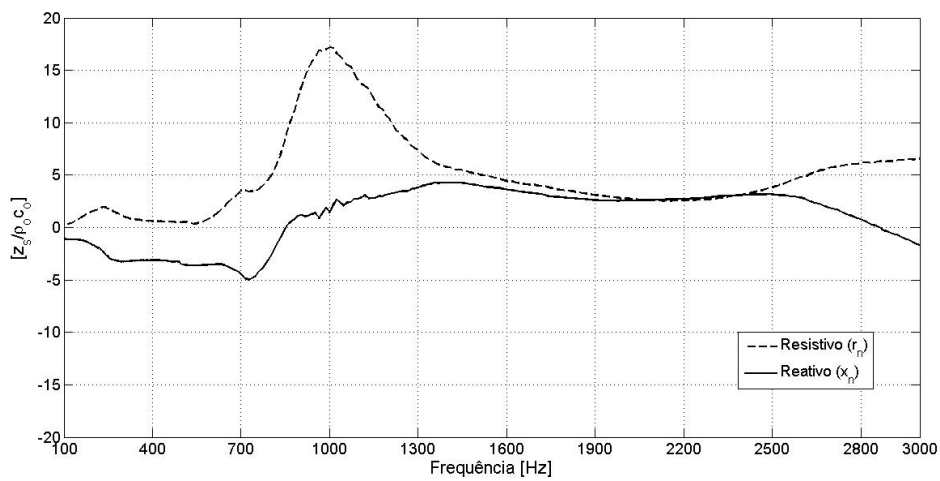


Figura 94: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.8 – Materiais 2, 1 e 5

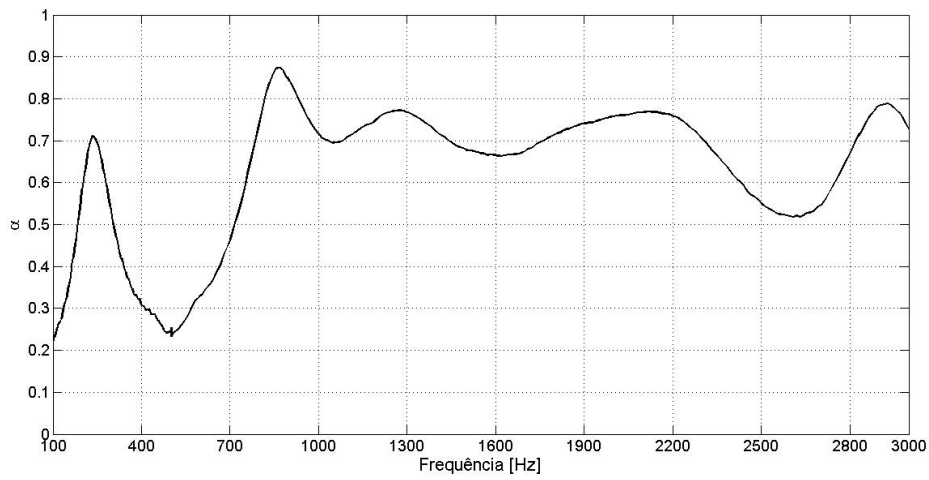


Figura 95: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.8 – Materiais 2, 1 e 5

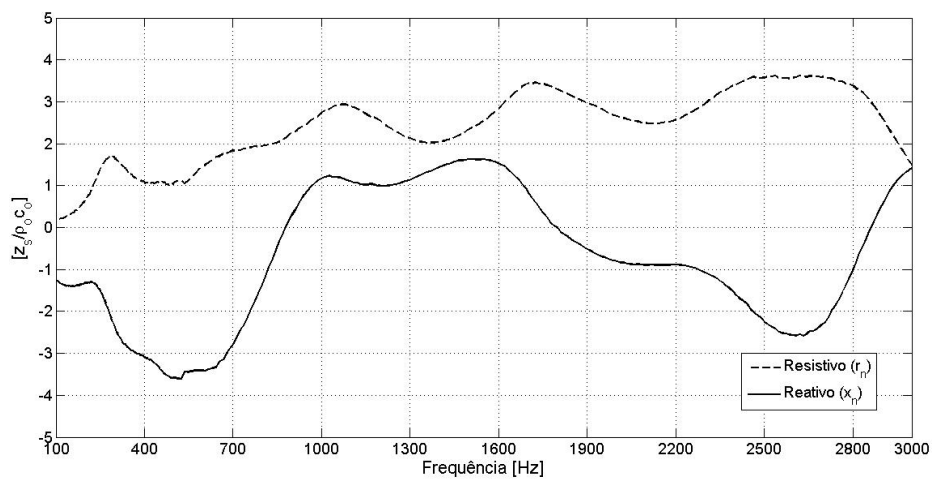


Figura 96: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.9 – Materiais 2, 3 e 1

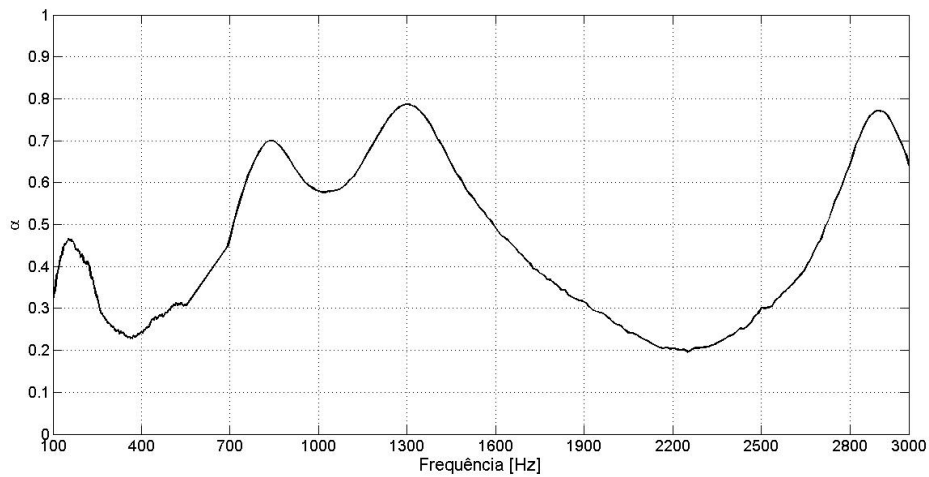


Figura 97: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.9 – Materiais 2, 3 e 1

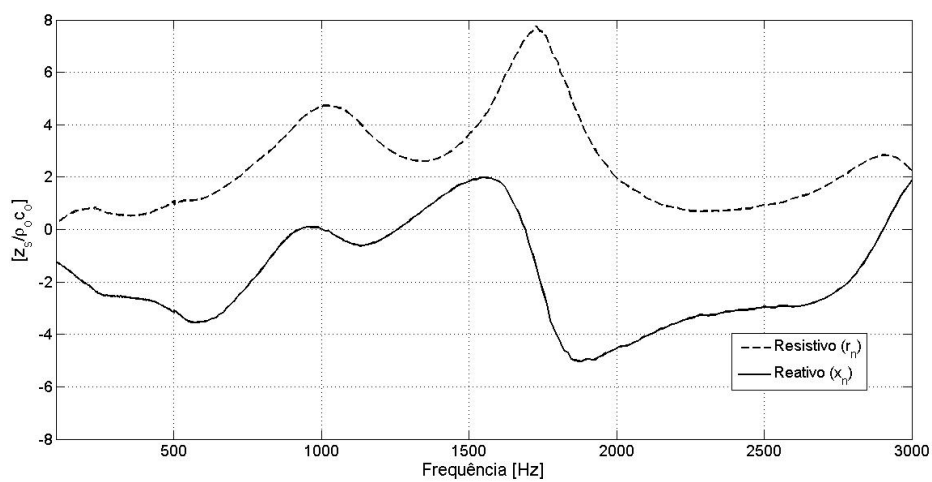


Figura 98: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.10 – Materiais 2, 3 e 5

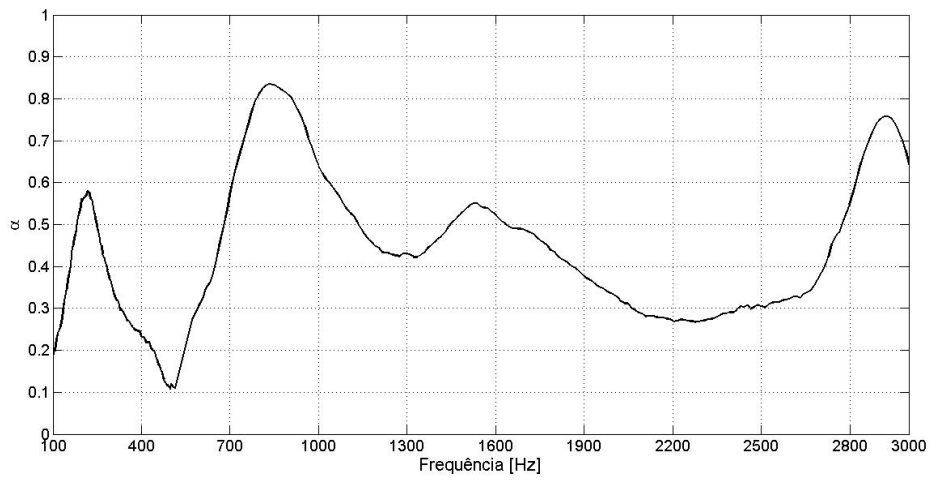


Figura 99: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.10 – Materiais 2, 3 e 5

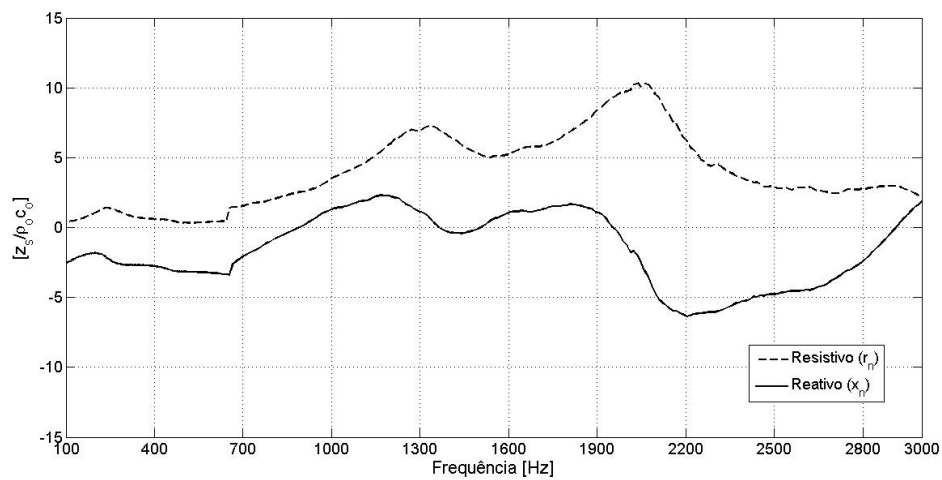


Figura 100: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.11 – Materiais 2, 5 e 1

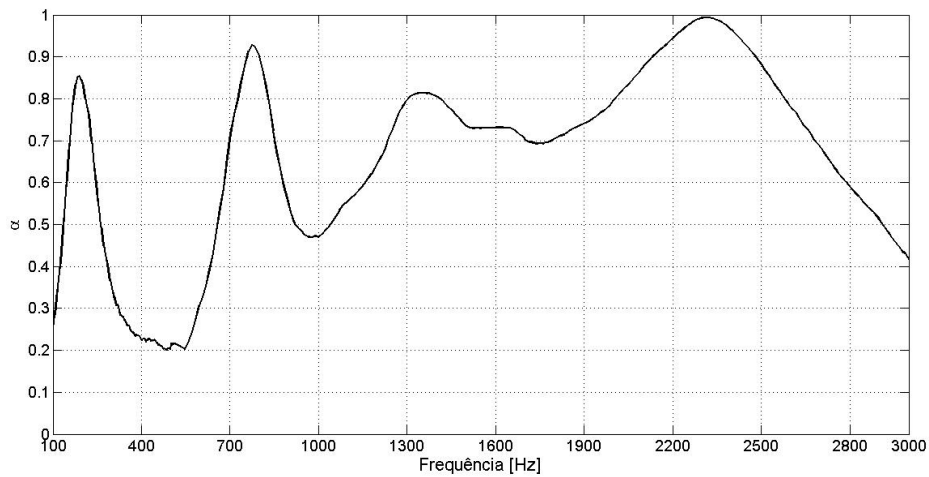


Figura 101: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.11 – Materiais 2, 5 e 1

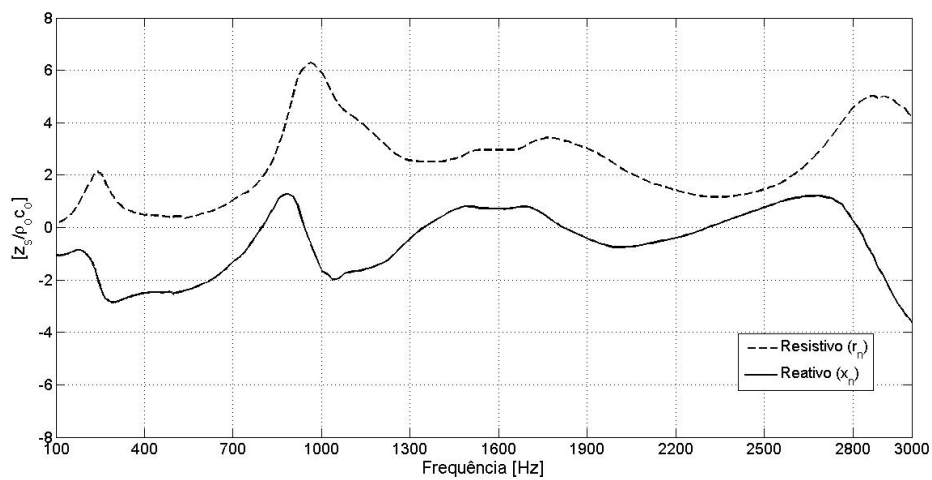


Figura 102: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.12 – Materiais 2, 5 e 3

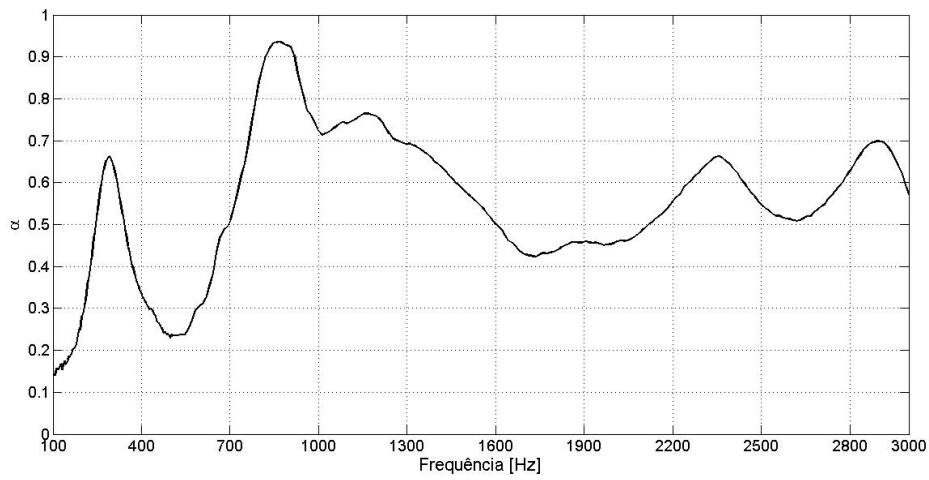


Figura 103: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.12 – Materiais 2, 5 e 3

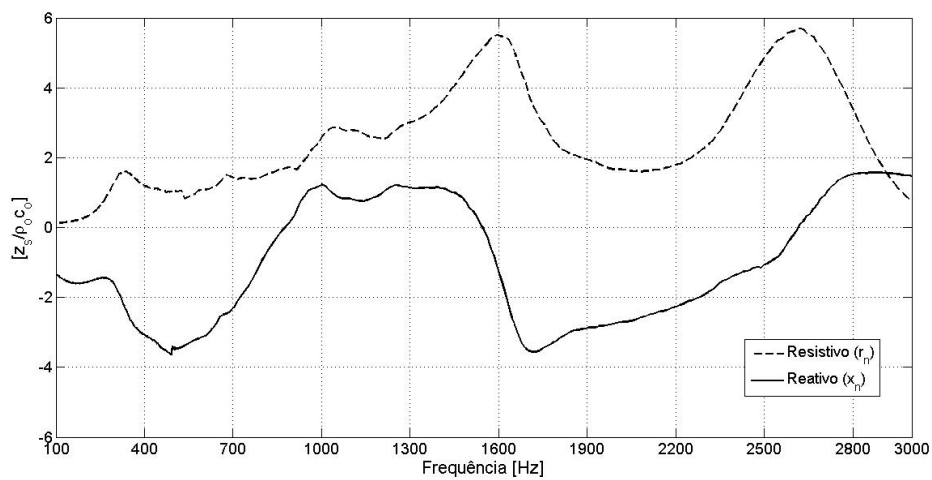


Figura 104: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.13 – Materiais 3, 1 e 2

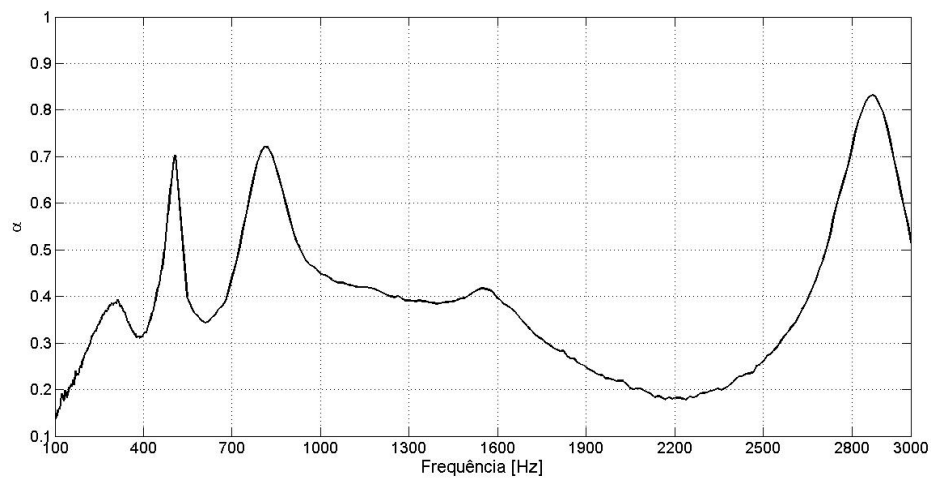


Figura 105: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.13 – Materiais 3, 1 e 2

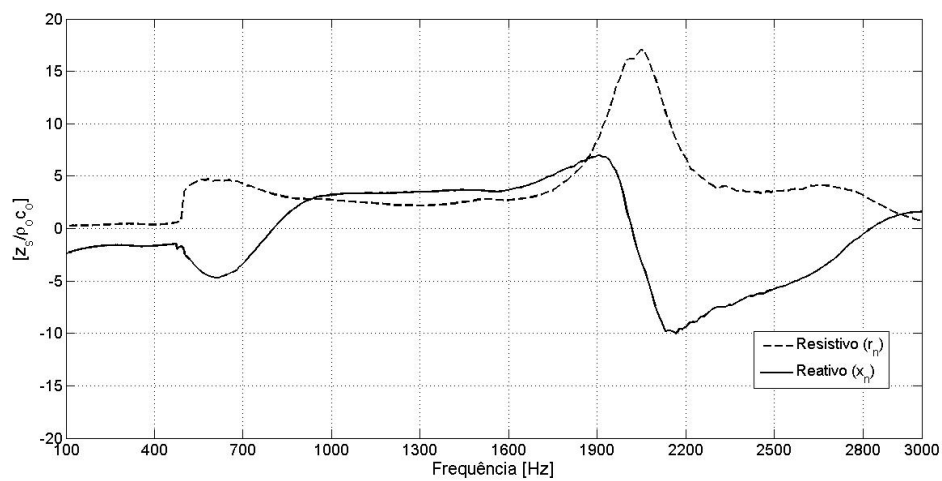


Figura 106: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.14 – Materiais 3, 1 e 5

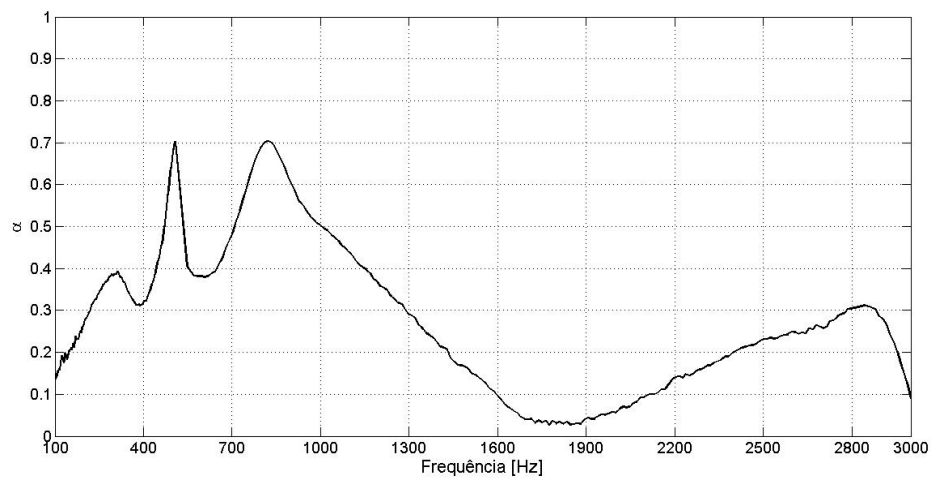


Figura 107: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.14 – Materiais 3, 1 e 5

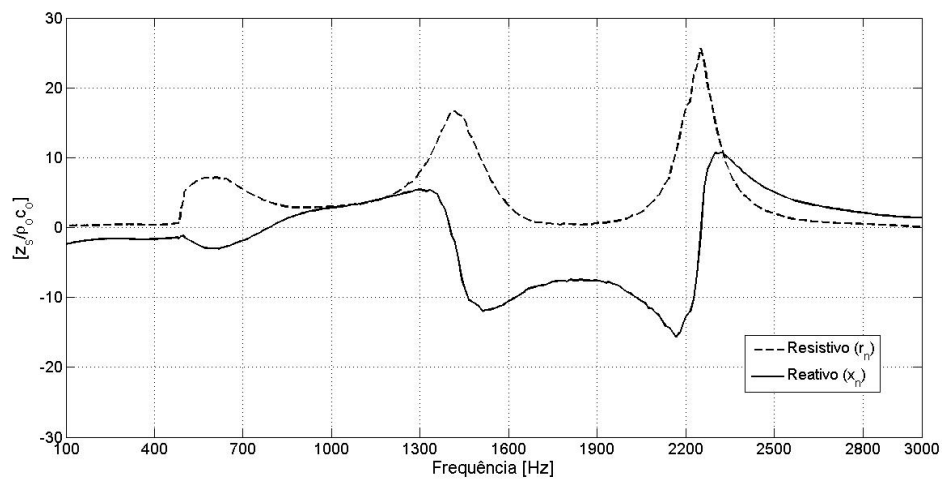


Figura 108: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.15 – Materiais 3, 2 e 1

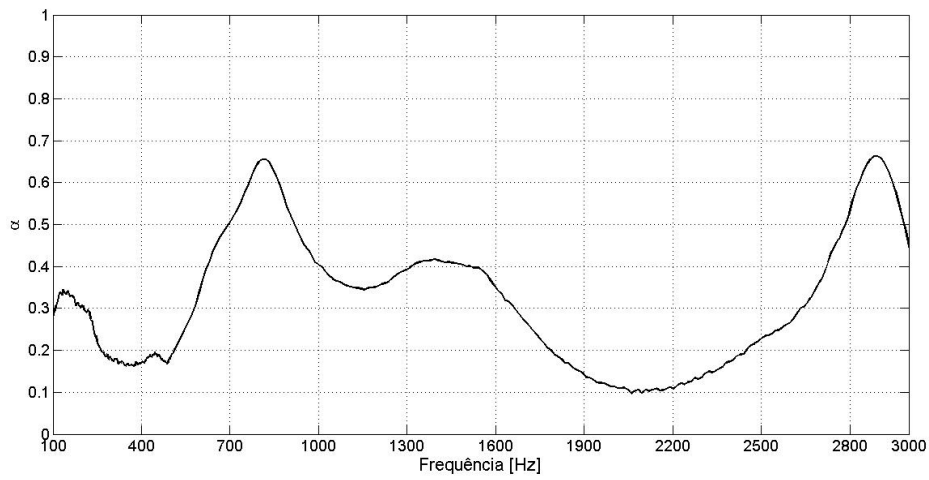


Figura 109: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.15 – Materiais 3, 2 e 1

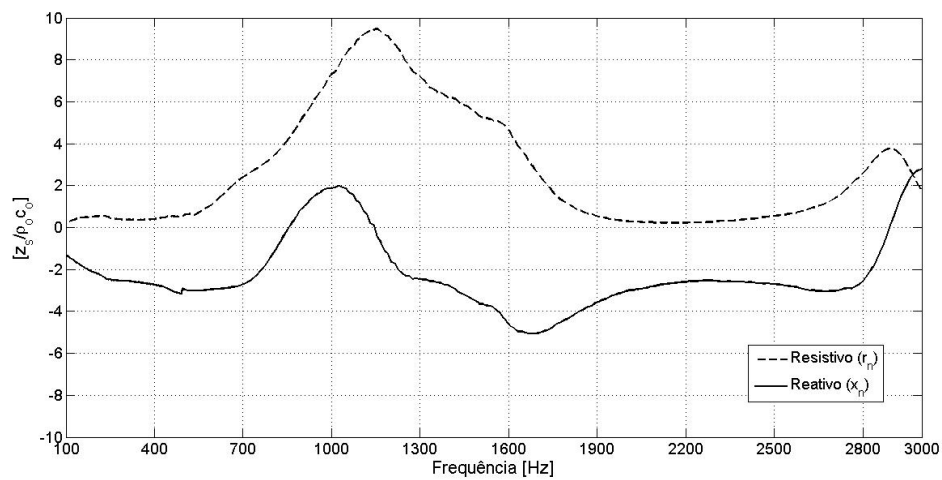


Figura 110: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.16 – Materiais 3, 2 e 5

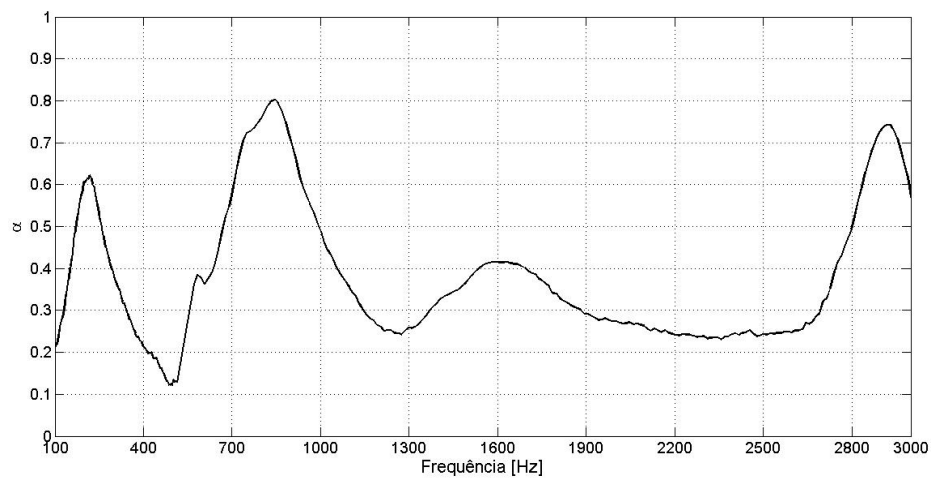
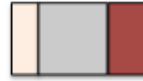


Figura 111: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.16 – Materiais 3, 2 e 5

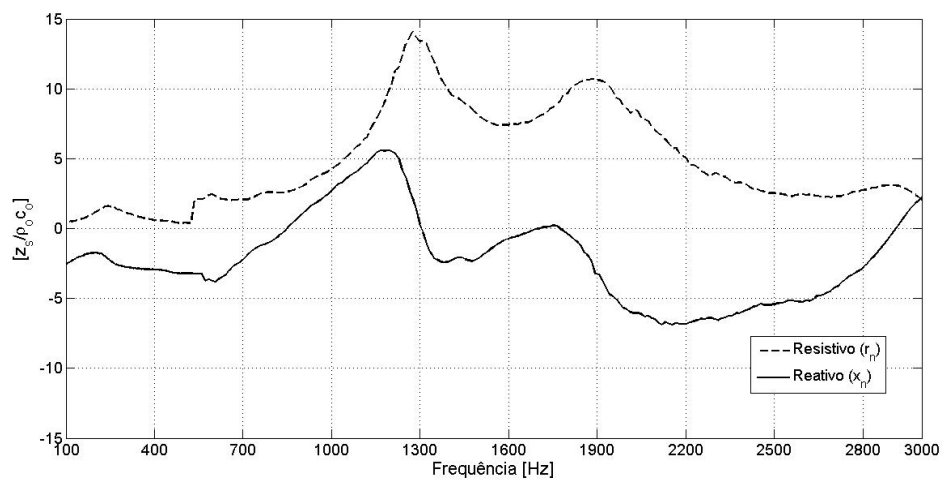


Figura 112: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.17 – Materiais 3, 5 e 1

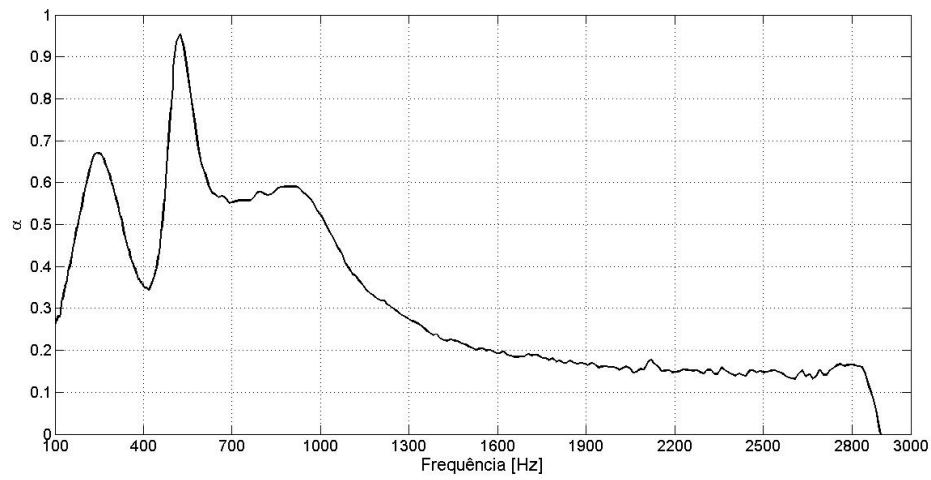


Figura 113: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.17 – Materiais 3, 5 e 1

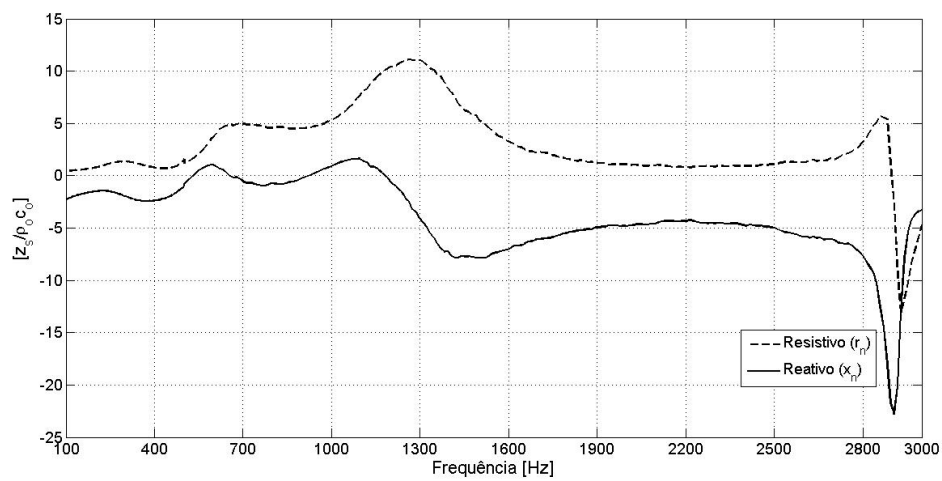


Figura 114: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.18 – Materiais 3, 5 e 2

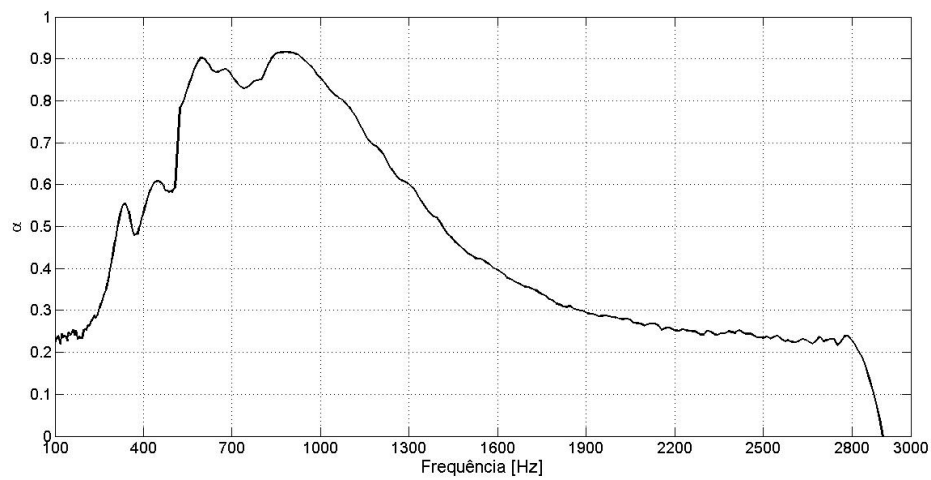


Figura 115: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.18 – Materiais 3, 5 e 2

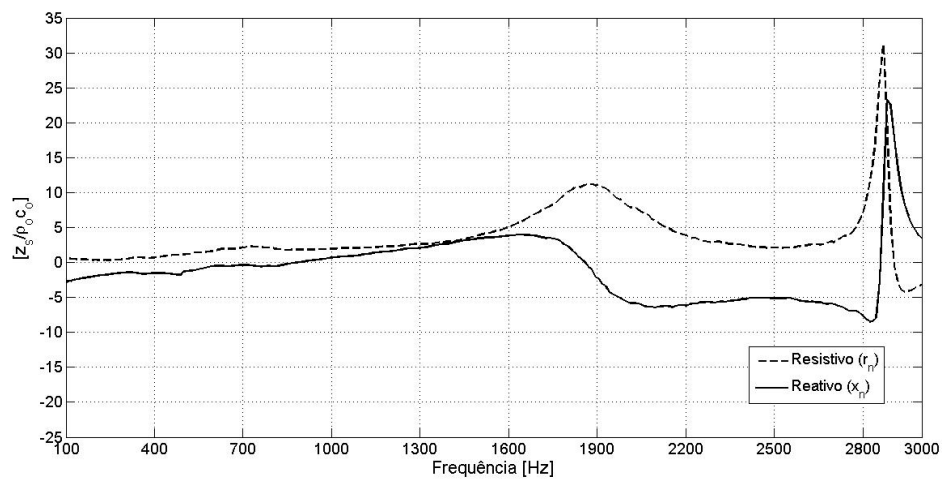


Figura 116: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.19 – Materiais 5, 1 e 2

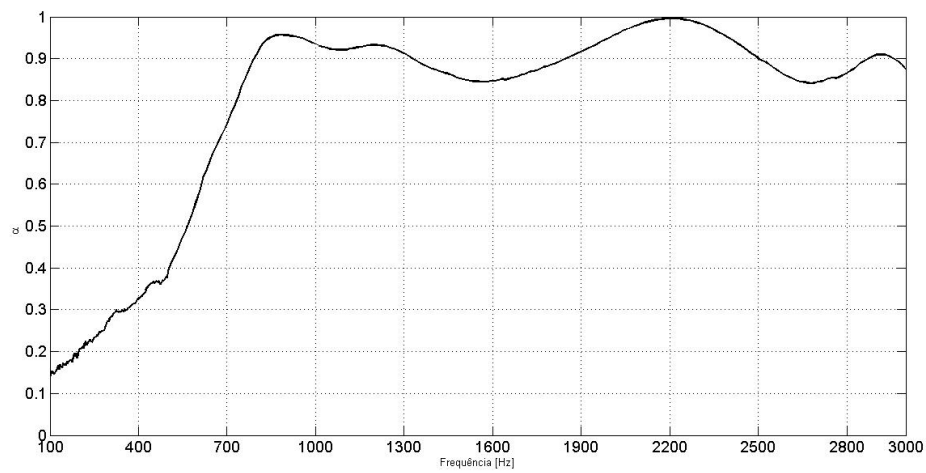
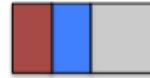


Figura 117: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.19 – Materiais 5, 1 e 2

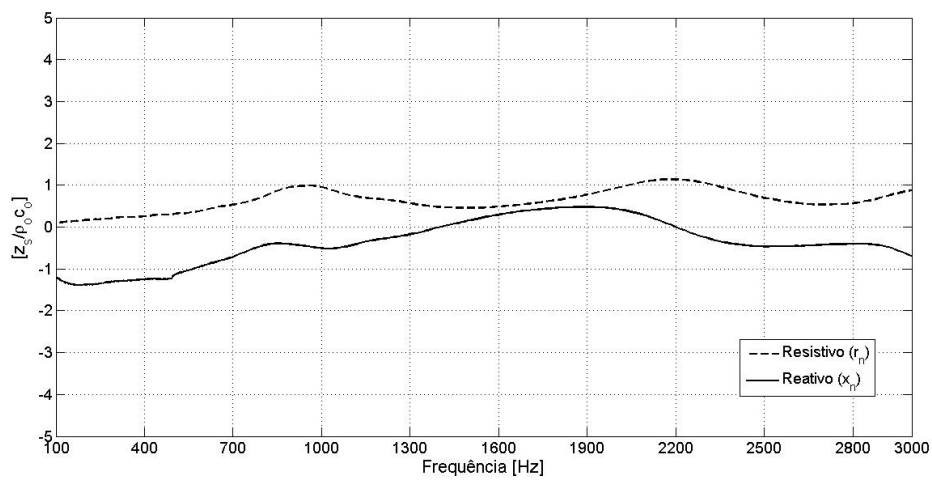
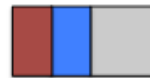


Figura 118: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.20 – Materiais 5, 1 e 3

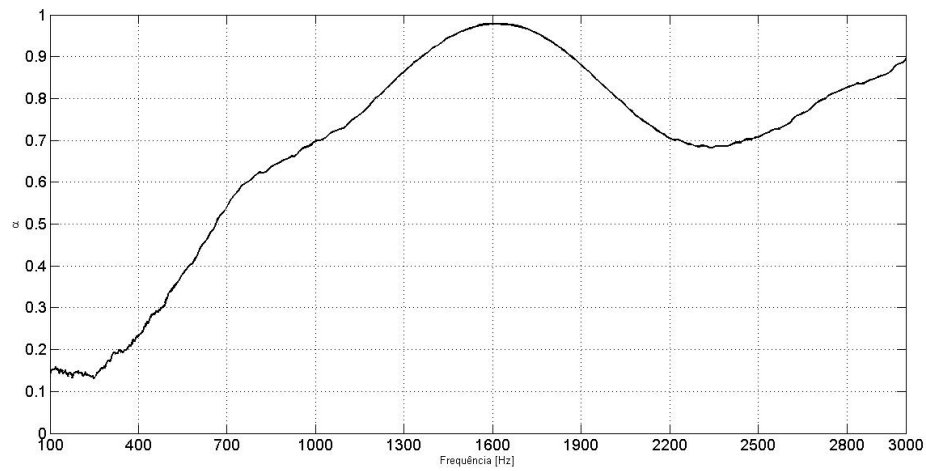


Figura 119: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.20 – Materiais 5, 1 e 3

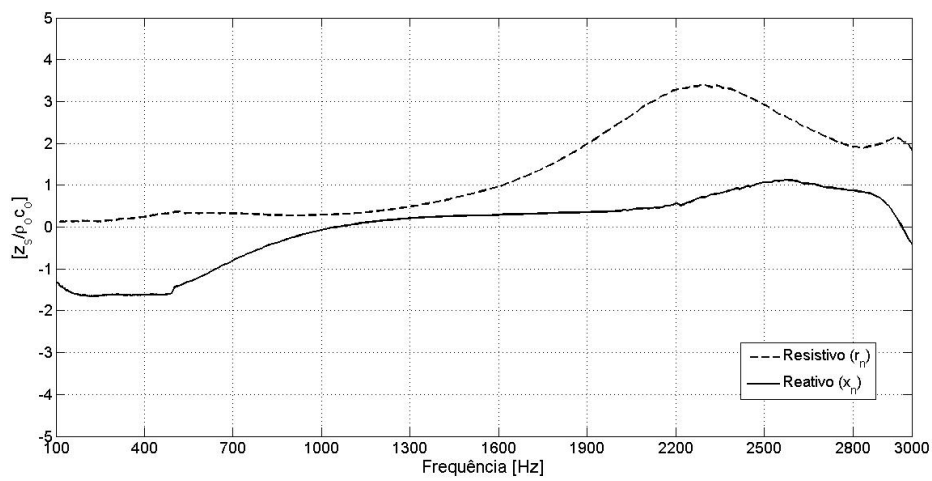
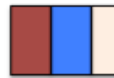


Figura 120: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.21 – Materiais 5, 2 e 1

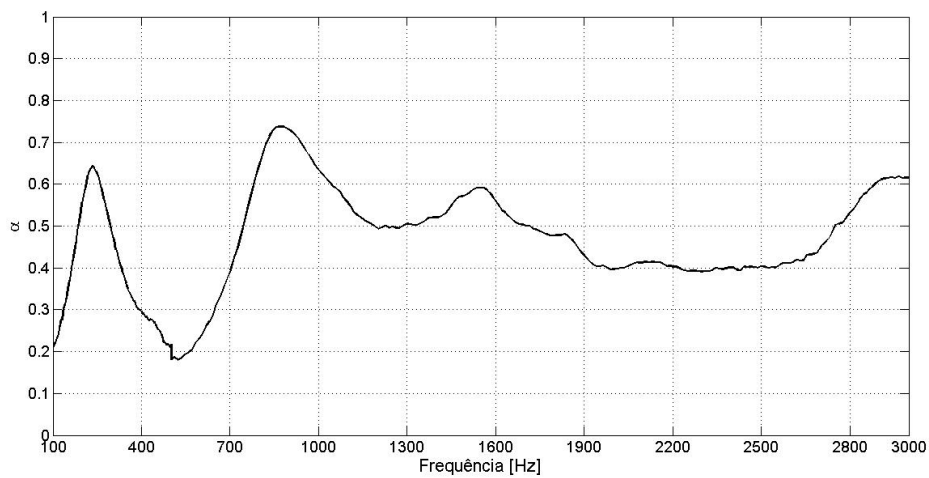


Figura 121: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.21 – Materiais 5, 2 e 1

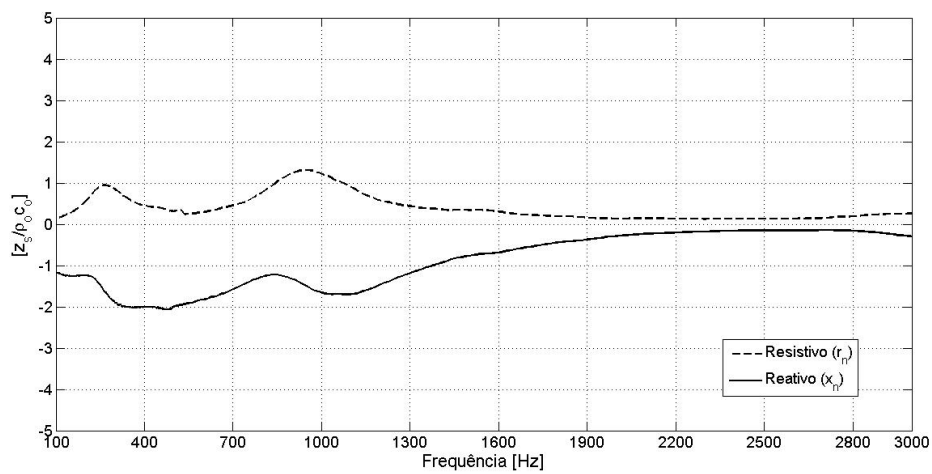


Figura 122: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.22 – Materiais 5, 2 e 3

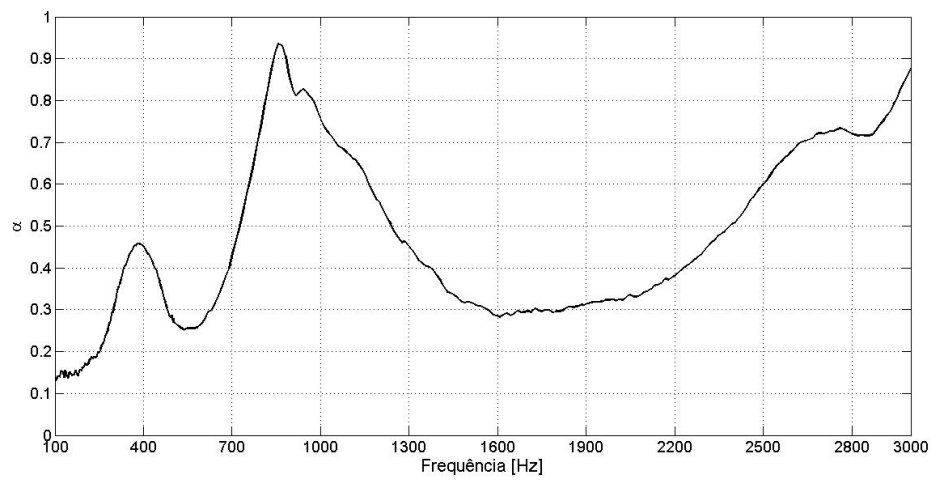


Figura 123: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.22 – Materiais 5, 2 e 3

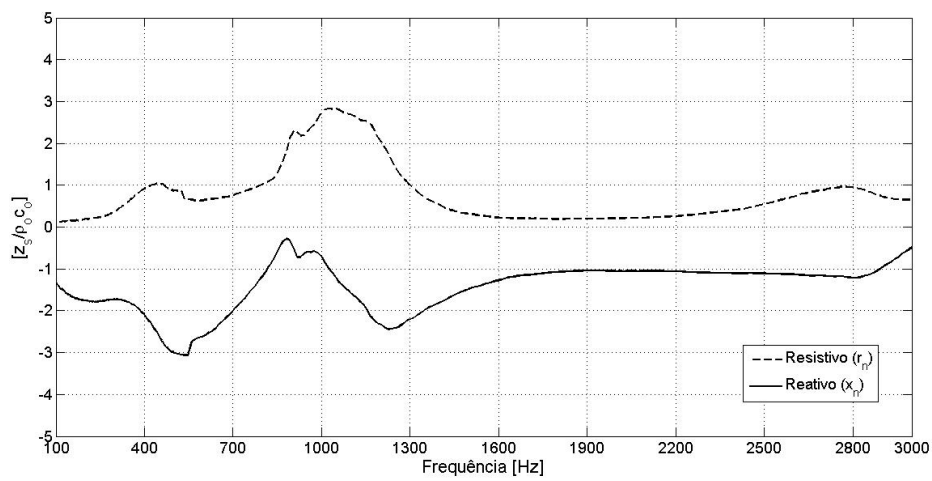


Figura 124: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.23 – Materiais 5, 3 e 1

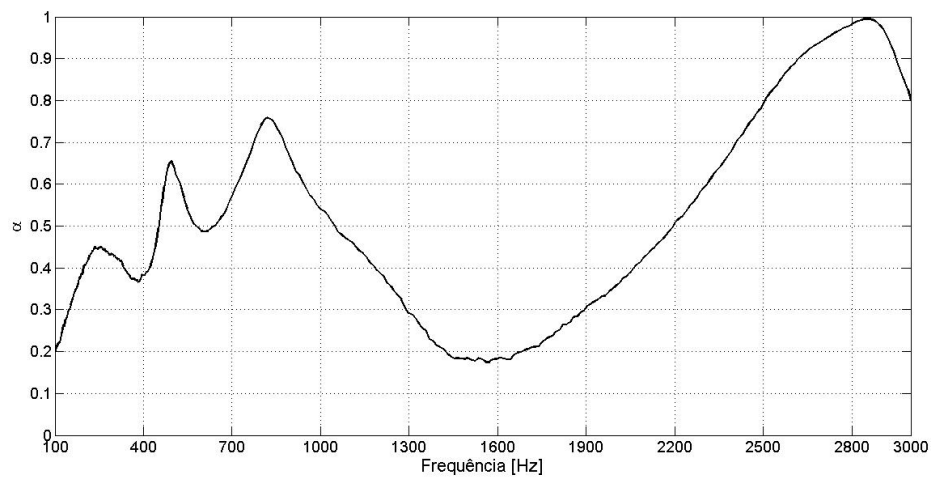


Figura 125: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.23 – Materiais 5, 3 e 1

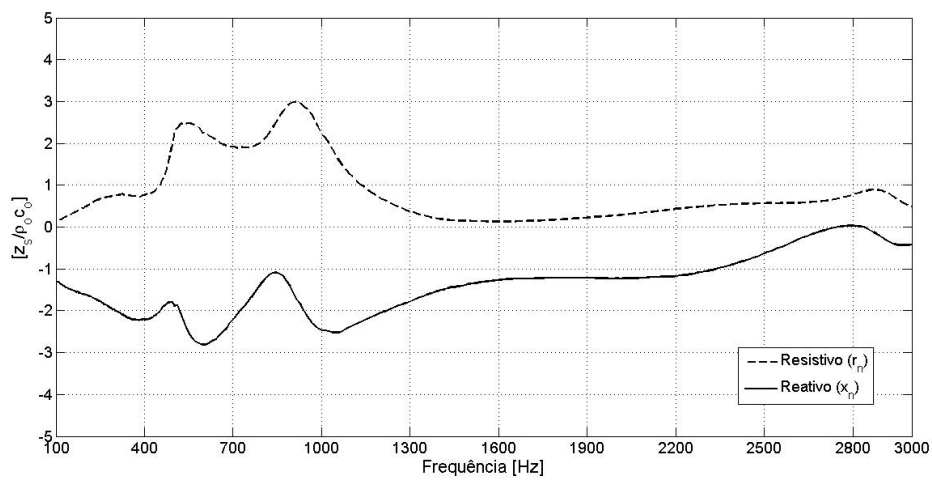


Figura 126: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.

Ensaio 3.24 – Materiais 5, 3 e 2

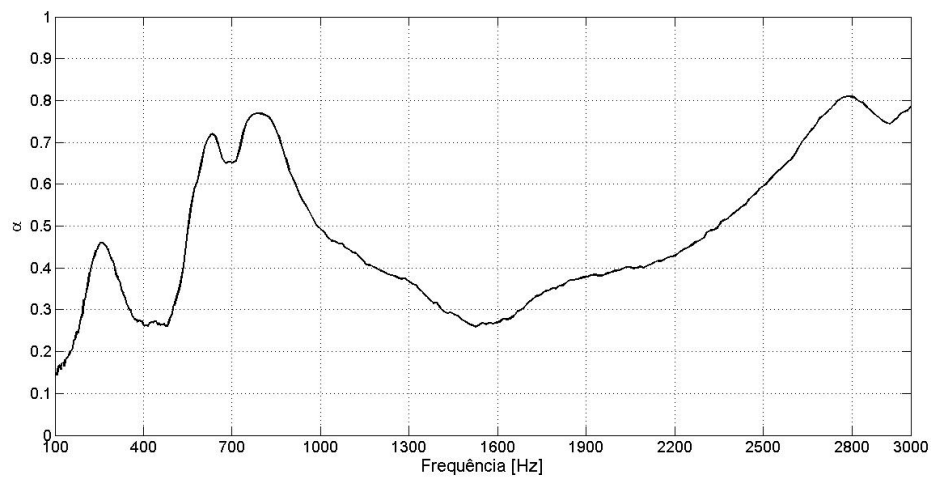


Figura 127: Valores de Coeficiente de Absorção Sonora (α) por frequência.

Ensaio 3.24 – Materiais 5, 3 e 2

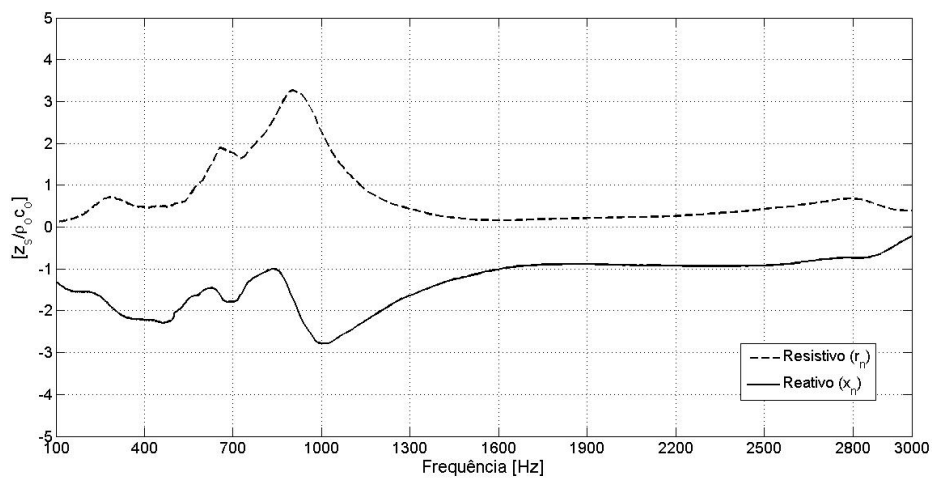


Figura 128: Valores de Impedância Superficial Normalizada para Resistivo (r_n) e Reativo (x_n) por frequência.