

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Dyhonatan Willian Russi

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS DE  
MODELOS RETANGULARES E NÃO RETANGULARES DE SALAS  
EM ESCALA REDUZIDA**

Santa Maria, RS  
2020



**Dyhonatan Willian Russi**

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS DE MODELOS  
RETANGULARES E NÃO RETANGULARES DE SALAS EM ESCALA REDUZIDA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**. Defesa realizada por videoconferência.

**ORIENTADOR: Prof. ERIC BRANDÃO CARNEIRO**

Santa Maria, RS  
2020

Russi, Dyhonatan Willian

Caracterização acústica em baixas frequências de modelos retangulares e não retangulares de salas em escala reduzida / Dyhonatan Willian Russi.- 2020.

219 p.; 30 cm

Orientador: Eric Brandão Carneiro

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2020

1. Baixas Frequências. 2. Acústica Modal 3. Salas Não Retangulares 4. Modelos Escala Reduzida 5. Coeficiente de Correlação I. Carneiro, Eric Brandão II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Dyhonatan Willian Russi. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: engenheiro.russi@gmail.com

**Dyhonatan Willian Russi**

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS DE MODELOS  
RETANGULARES E NÃO RETANGULARES DE SALAS EM ESCALA REDUZIDA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovado em 31 de agosto de 2020:**



---

**ERIC BRANDÃO CARNEIRO, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**MARCIO HENRIQUE DE AVELAR GOMES, Dr. (UTFPR)**

---

**VIVIANE SUZEY GOMES DE MELO, Dra. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2020



## **AGRADECIMENTOS**

*Primeiramente, gostaria de agradecer à Liziane, obrigado por tudo. Obrigado por me incentivar e não me deixar cair. Em segundo lugar, gostaria de agradecer ao professor Eric pela oportunidade e pela paciência em me orientar nesta pesquisa. Muito obrigado "chefe"! Gostaria de agradecer também, aos professores Marcio e Viviane por terem aceito fazer parte e contribuir com banca de defesa. Agradeço muito ao professor Willian, por fazer parte da banca de minha defesa e por todas as correções. Agradeço ao colega Sidney V. Cândido pelos dados cedidos e pela ajuda nas etapas finais da pesquisa. Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria - RS, pelo espaço e pelos equipamentos cedidos. Por fim, e não menos importante, gostaria de agradecer a minha família.*





*..ninguém vai bater tão forte como a vida, mas não se trata de bater forte. Se trata de quanto você aguenta apanhar e seguir em frente, o quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando. É assim que se consegue vencer.*

*(Rocky Balboa)*



## RESUMO

# CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS DE MODELOS RETANGULARES E NÃO RETANGULARES DE SALAS EM ESCALA REDUZIDA

AUTOR: Dyhonatan Willian Russi

ORIENTADOR: ERIC BRANDÃO CARNEIRO

A escolha da metodologia de análise para estudar, analisar e projetar o comportamento acústico em baixas frequências, de salas de pequeno porte, não retangulares e salas de escuta crítica, pode influenciar nas sensações auditivas que o usuário da sala terá, ao fazer uso do espaço. A presente pesquisa compara, duas metodologias de analisar as baixas frequências em modelos de escala reduzida, de possíveis formatos, retangulares e não retangulares, de salas acústicas. As comparações são feitas entre os parâmetros  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  e  $T_s$ , obtidos em modelos computacionais que fazem uso dos métodos de elementos finitos (FEM) e em modelos analíticos de cálculo que fazem uso das equações que descrevem o comportamento acústico de salas retangulares com paredes rígidas. Essa pesquisa avaliou ainda, por meio do coeficiente de correlação de Pearson  $r$ , a similaridade existente entre as curvas de decaimento, sobre a forma das integrais cumulativas invertidas das respostas ao impulso (ICI), avaliou a similaridade existente entre as funções de resposta em frequência (FRF) e avaliou a similaridade entre as respostas ao impulso (RI), obtidas nessas metodologias de avaliação. Os resultados mostram que, quanto menos retangular é o formato da sala, menor é a similaridade entre as respostas ao impulso obtidas nas metodologias. Esse fato pode influenciar, por exemplo, a percepção acústica em uma sala não retangular projetada com uso de modelos analíticos para salas retangulares. As metodologias usadas nesta pesquisa foram validadas com a medição de um modelo físico construído em escala reduzida, após identificada a convergência de resultados entre os dados obtidos nas medições, os dados obtidos nos modelos virtuais em FEM e os dados obtidos nos analíticos. Todas formas geométricas, das possíveis salas acústicas, foram elaboradas em escala reduzida, com proporção de redução de (1:8). Os dados obtidos nessas medições foram usados como dados de entrada para todas as outras análises feitas por essa pesquisa.

**Palavras-chave:** Baixas Frequências. Acústica Modal. Salas Não Retangulares. Modelos Escala Reduzida. Coeficiente de Correlação.



## ABSTRACT

# LOW-FREQUENCY ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF RECTANGULAR AND NON-RECTANGULAR MODELS OF SMALL-SCALE ROOMS

AUTHOR: Dyhonatan Willian Russi  
ADVISOR: ERIC BRANDÃO CARNEIRO

Choosing the correct analysis methodology to study and design acoustic behavior at low frequencies, considering small non-rectangular rooms and critical listening rooms, can influence the auditory sensations that the user of the room will have when making use of the space. This research compares two methodologies that analyze low frequencies in small scale models, of possible rectangular and non-rectangular shapes, of acoustic rooms. Comparisons are made between the parameters  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  and Ts, obtained in computational models that make use of the finite element method (FEM) and analytical calculation models that make use of the equations that describe the acoustic behavior of rectangular rooms with rigid walls. This research also evaluated, through Pearson's correlation coefficient  $r$ , the similarity between the decay curves, in the form of the inverted cumulative integrals of the impulse responses (ICI), evaluated the similarity between the frequency response functions (FRF) and evaluated the similarity between the impulse responses (IR), obtained with these evaluation methodologies. The results indicate that the less rectangular the shape of the room is, smaller will be the similarity between the impulse responses obtained in the methodologies. This fact can influence, for example, the acoustic perception in a non-rectangular room designed using analytical models for rectangular rooms. The methodologies used in this research were validated with the measurement of a physical model built on a small scale, after identifying the convergence of results between the data obtained in the measurements, in the virtual models in FEM and in the analytical ones. All geometric shapes, of the possible acoustic rooms, were elaborated on a reduced scale, with a reduction ratio of (1: 8). The data obtained in these measurements were used as input data for other analyzes made by this research.

**Keywords:** Low Frequencies. Modal Acoustics. Non-Rectangular Rooms. Reduced Scale Models. Correlation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Frequências fundamentais em que alguns instrumentos musicais trabalham. . . . .	33
Figura 1.2 – Sala São Paulo, exemplo de sala estudada pelo campo da acústica de salas. . . . .	34
Figura 1.3 – Subdivisões de um espectro e suas abordagens de estudo. . . . .	35
Figura 1.4 – Comparação entre os custos relativos e metodologias de análise. . . . .	38
Figura 1.5 – Imagem de maquete impressa por tecnologia de impressão em 3D. . . . .	39
Figura 3.1 – Esquema representativo de um Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT). . . . .	45
Figura 3.2 – Esquema representativo da cadeia de aquisição de uma resposta impulsiva. . . . .	46
Figura 3.3 – Resposta ao impulso típica de uma sala. . . . .	47
Figura 3.4 – Resposta ao impulso típica de uma sala. . . . .	47
Figura 3.5 – Proporções ideais de Bolt para as dimensões de uma sala. . . . .	49
Figura 3.6 – Exemplo de malha tetraédrica criada com <i>software</i> de elementos finitos. . . . .	51
Figura 3.7 – Exemplo de campo de pressão calculado com FEM. . . . .	52
Figura 3.8 – Representação de um corte longitudinal mostrando a montagem de um tubo de impedância. . . . .	55
Figura 3.9 – Representação da microfonação segundo a técnica de medição <i>in situ</i> . . . . .	56
Figura 3.10 – Figura representando uma curva de decaimento e sua faixa dinâmica. . . . .	58
Figura 3.11 – Esquema de aparato usado para medição da velocidade de volume de sons na saída de tubos. . . . .	63
Figura 4.1 – Representação dos volumes das formas geométricas estudadas. . . . .	66
Figura 4.2 – Representação das áreas (em planta), das formas geométricas estudadas. . . . .	68
Figura 4.3 – Modelo físico MFI-1 construído. . . . .	69
Figura 4.4 – Dimensões internas do modelo construído MFI-1. . . . .	69
Figura 4.5 – Proporções do modelo construído, segundo os critérios de Bolt. . . . .	70
Figura 4.6 – Crescimento exponencial do número de modos em função da banda de frequência. . . . .	71
Figura 4.7 – Distribuição modal do MFI-1. . . . .	71
Figura 4.8 – Distribuição modal por forma do MFI-1. . . . .	72
Figura 4.9 – Fonte sonora usada nas medições. . . . .	75
Figura 4.10 – Resposta em frequência da fonte usada nas medições. . . . .	75
Figura 4.11 – Direcionalidade da fonte sonora usada nas medições. . . . .	76
Figura 4.12 – Modelo de microfone usado nas medições. . . . .	76
Figura 4.13 – Resposta em frequência típica do microfone Panasonic WM-61A. . . . .	77
Figura 4.14 – Modelo de placa de áudio usada nas medições. . . . .	77
Figura 4.15 – Mínimo de posições e medições indicados pela norma (ISO:3383-2, 2009). . . . .	78
Figura 4.16 – Tripé usado para posicionar microfone durante a medição. . . . .	79
Figura 4.17 – Representação dos posicionamento de fonte e receptores em planta e vista longitudinal. . . . .	80
Figura 4.18 – Resposta ao impulso sem a desconsideração do tempo de resposta da placa e do tempo chegada do som direto aos receptores. . . . .	80
Figura 4.19 – Tempo de resposta da placa medido. . . . .	81
Figura 4.20 – Comparação entre sinais medidos, com e sem as desconsiderações de tempo de resposta da placa e tempo chegada do som direto. . . . .	82
Figura 4.21 – Malhas criadas nas etapas de simulação do MCO-1. . . . .	84
Figura 4.22 – Decaimentos em 1250 Hz, obtidas em MFI-1 e MCO-1 com uso de $ Z_s $ . . . . .	86
Figura 4.23 – Decaimentos em 1250 Hz, obtidas em MFI-1 e MCO-1 com uso de $Z_s$ com-	

plexa. ....	88
Figura 4.24 – FRFs do PT-1 da FGE-1. ....	91
Figura 4.25 – FRFs do PT-2 da FGE-1. ....	91
Figura 4.26 – FRFs do PT-3 da FGE-1. ....	91
Figura 4.27 – FRFs do PT-4 da FGE-1. ....	91
Figura 4.28 – FRFs do PT-5 da FGE-1. ....	92
Figura 4.29 – FRFs do PT-6 da FGE-1. ....	92
Figura 4.30 – FRFs do PT-7 da FGE-1. ....	92
Figura 4.31 – FRFs do PT-8 da FGE-1. ....	92
Figura 4.32 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-1. ....	92
Figura 4.33 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-1. ....	92
Figura 4.34 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-1. ....	93
Figura 4.35 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-1. ....	93
Figura 4.36 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-1. ....	93
Figura 4.37 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-1. ....	93
Figura 4.38 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-1. ....	94
Figura 4.39 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-1. ....	94
Figura 4.40 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-1. ....	94
Figura 5.1 – Configuração de montagem de fonte e receptor dentro do MFI-2. ....	98
Figura 5.2 – FRFs do PT-1 da FGE-2. ....	99
Figura 5.3 – FRFs do PT-2 da FGE-2. ....	99
Figura 5.4 – FRFs do PT-3 da FGE-2. ....	99
Figura 5.5 – FRFs do PT-4 da FGE-2. ....	99
Figura 5.6 – FRFs do PT-5 da FGE-2. ....	99
Figura 5.7 – FRFs do PT-6 da FGE-2. ....	99
Figura 5.8 – FRFs do PT-7 da FGE-2. ....	100
Figura 5.9 – FRFs do PT-8 da FGE-2. ....	100
Figura 5.10 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-2. ....	100
Figura 5.11 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-2. ....	100
Figura 5.12 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-2. ....	100
Figura 5.13 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-2. ....	100
Figura 5.14 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-2. ....	101
Figura 5.15 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-2. ....	101
Figura 5.16 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-2. ....	101
Figura 5.17 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-2. ....	101
Figura 5.18 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-2. ....	101
Figura 5.19 – Chapa de melamina aderida ao teto de FGE-1 para configurar FGE-4. ....	102
Figura 5.20 – Parte real da $Z_{s,n}$ medidas para a malamina. ....	104
Figura 5.21 – Parte imaginária da $Z_{s,n}$ medidas para a malamina. ....	104
Figura 5.22 – Coeficientes de absorção $\alpha$ calculados com base na Equação (3.23) para os valores de $Z_{s,n}$ da melamina. ....	104
Figura 5.23 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-4. ....	105
Figura 5.24 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-4. ....	105
Figura 5.25 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-4. ....	105
Figura 5.26 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-4. ....	105
Figura 5.27 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-4. ....	106
Figura 5.28 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-4. ....	106
Figura 5.29 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-4. ....	106



Figura 5.30 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-4. ....	106
Figura 5.31 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-4. ....	106
Figura 5.32 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-4. ....	106
Figura 5.33 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-4. ....	107
Figura 5.34 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-4. ....	107
Figura 5.35 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-4. ....	107
Figura 5.36 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-4. ....	107
Figura 5.37 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-4. ....	108
Figura 5.38 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-4. ....	108
Figura 5.39 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-4. ....	108
Figura 6.1 – FRFs do PT-1 da FGE-3. ....	110
Figura 6.2 – FRFs do PT-2 da FGE-3. ....	110
Figura 6.3 – FRFs do PT-3 da FGE-3. ....	110
Figura 6.4 – FRFs do PT-4 da FGE-3. ....	110
Figura 6.5 – FRFs do PT-5 da FGE-3. ....	111
Figura 6.6 – FRFs do PT-6 da FGE-3. ....	111
Figura 6.7 – FRFs do PT-7 da FGE-3. ....	111
Figura 6.8 – FRFs do PT-8 da FGE-3. ....	111
Figura 6.9 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-3. ....	112
Figura 6.10 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-3. ....	112
Figura 6.11 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-3. ....	112
Figura 6.12 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-3. ....	112
Figura 6.13 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-3. ....	112
Figura 6.14 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-3. ....	112
Figura 6.15 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-3. ....	113
Figura 6.16 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-3. ....	113
Figura 6.17 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-3. ....	113
Figura 6.18 – FRFs do PT-1 da FGE-5. ....	115
Figura 6.19 – FRFs do PT-2 da FGE-5. ....	115
Figura 6.20 – FRFs do PT-3 da FGE-5. ....	115
Figura 6.21 – FRFs do PT-4 da FGE-5. ....	115
Figura 6.22 – FRFs do PT-5 da FGE-5. ....	115
Figura 6.23 – FRFs do PT-6 da FGE-5. ....	115
Figura 6.24 – FRFs do PT-7 da FGE-5. ....	116
Figura 6.25 – FRFs do PT-8 da FGE-5. ....	116
Figura 6.26 – Parâmetro $T_{20}$ médio FGE-5. ....	116
Figura 6.27 – Parâmetro $T_{30}$ médio FGE-5. ....	116
Figura 6.28 – Parâmetro EDT médio FGE-5. ....	116
Figura 6.29 – Parâmetro $T_s$ médio FGE-5. ....	116
Figura 6.30 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-5. ....	117
Figura 6.31 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-5. ....	117
Figura 6.32 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-5. ....	117
Figura 6.33 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-5. ....	117
Figura 6.34 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-5. ....	117
Figura 6.35 – FRFs do PT-1 da FGE-6. ....	118
Figura 6.36 – FRFs do PT-2 da FGE-6. ....	118
Figura 6.37 – FRFs do PT-3 da FGE-6. ....	118
Figura 6.38 – FRFs do PT-4 da FGE-6. ....	118

Figura 6.39 – FRFs do PT-5 da FGE-6. ....	119
Figura 6.40 – FRFs do PT-6 da FGE-6. ....	119
Figura 6.41 – FRFs do PT-7 da FGE-6. ....	119
Figura 6.42 – FRFs do PT-8 da FGE-6. ....	119
Figura 6.43 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-6. ....	119
Figura 6.44 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-6. ....	119
Figura 6.45 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-6. ....	120
Figura 6.46 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-6. ....	120
Figura 6.47 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-6. ....	120
Figura 6.48 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-6. ....	120
Figura 6.49 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-6. ....	121
Figura 6.50 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-6. ....	121
Figura 6.51 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-6. ....	121
Figura 6.52 – FRFs do PT-1 da FGE-7. ....	122
Figura 6.53 – FRFs do PT-2 da FGE-7. ....	122
Figura 6.54 – FRFs do PT-3 da FGE-7. ....	122
Figura 6.55 – FRFs do PT-4 da FGE-7. ....	122
Figura 6.56 – FRFs do PT-5 da FGE-7. ....	122
Figura 6.57 – FRFs do PT-6 da FGE-7. ....	122
Figura 6.58 – FRFs do PT-7 da FGE-7. ....	123
Figura 6.59 – FRFs do PT-8 da FGE-7. ....	123
Figura 6.60 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-7. ....	123
Figura 6.61 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-7. ....	123
Figura 6.62 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-7. ....	123
Figura 6.63 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-7. ....	123
Figura 6.64 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-7. ....	124
Figura 6.65 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-7. ....	124
Figura 6.66 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-7. ....	124
Figura 6.67 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-7. ....	124
Figura 6.68 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-7. ....	124
Figura 6.69 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-8. ....	125
Figura 6.70 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-8. ....	125
Figura 6.71 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-8. ....	125
Figura 6.72 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-8. ....	125
Figura 6.73 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-8. ....	126
Figura 6.74 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-8. ....	126
Figura 6.75 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-8. ....	126
Figura 6.76 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-8. ....	126
Figura 6.77 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-8. ....	127
Figura 6.78 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-8. ....	127
Figura 6.79 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-8. ....	127
Figura 6.80 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-8. ....	127
Figura 6.81 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-8. ....	127
Figura 6.82 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-8. ....	127
Figura 6.83 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-8. ....	128
Figura 6.84 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-8. ....	128
Figura 6.85 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-8. ....	128
Figura 6.86 – FRFs do PT-1 da FGE-9. ....	129

Figura 6.87 – FRFs do PT-2 da FGE-9. ....	129
Figura 6.88 – FRFs do PT-3 da FGE-9. ....	129
Figura 6.89 – FRFs do PT-4 da FGE-9. ....	129
Figura 6.90 – FRFs do PT-5 da FGE-9. ....	129
Figura 6.91 – FRFs do PT-6 da FGE-9. ....	129
Figura 6.92 – FRFs do PT-7 da FGE-9. ....	130
Figura 6.93 – FRFs do PT-8 da FGE-9. ....	130
Figura 6.94 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-9. ....	130
Figura 6.95 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-9. ....	130
Figura 6.96 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-9. ....	130
Figura 6.97 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-9. ....	130
Figura 6.98 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-9. ....	131
Figura 6.99 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-9. ....	131
Figura 6.100 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-9. ....	131
Figura 6.101 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-9. ....	131
Figura 6.102 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-9. ....	131
Figura 6.103 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-10. ....	132
Figura 6.104 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-10. ....	132
Figura 6.105 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-10. ....	132
Figura 6.106 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-10. ....	132
Figura 6.107 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-10. ....	133
Figura 6.108 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-10. ....	133
Figura 6.109 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-10. ....	133
Figura 6.110 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-10. ....	133
Figura 6.111 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-10. ....	133
Figura 6.112 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-10. ....	133
Figura 6.113 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-10. ....	134
Figura 6.114 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-10. ....	134
Figura 6.115 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-10. ....	134
Figura 6.116 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-10. ....	134
Figura 6.117 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-10. ....	135
Figura 6.118 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-10. ....	135
Figura 6.119 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-10. ....	135
Figura 6.120 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-11. ....	136
Figura 6.121 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-11. ....	136
Figura 6.122 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-11. ....	136
Figura 6.123 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-11. ....	136
Figura 6.124 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-11. ....	136
Figura 6.125 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-11. ....	136
Figura 6.126 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-11. ....	137
Figura 6.127 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-11. ....	137
Figura 6.128 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-11. ....	137
Figura 6.129 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-11. ....	137
Figura 6.130 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-11. ....	137
Figura 6.131 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-11. ....	137
Figura 6.132 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-11. ....	138
Figura 6.133 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-11. ....	138
Figura 6.134 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-11. ....	138

Figura 6.135 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-11. ....	138
Figura 6.136 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-11. ....	138
Figura 6.137 – FRFs do PT-1 da FGE-12. ....	139
Figura 6.138 – FRFs do PT-2 da FGE-12. ....	139
Figura 6.139 – FRFs do PT-3 da FGE-12. ....	139
Figura 6.140 – FRFs do PT-4 da FGE-12. ....	139
Figura 6.141 – FRFs do PT-5 da FGE-12. ....	139
Figura 6.142 – FRFs do PT-6 da FGE-12. ....	139
Figura 6.143 – FRFs do PT-7 da FGE-12. ....	140
Figura 6.144 – FRFs do PT-8 da FGE-12. ....	140
Figura 6.145 – Tempos de reverberação $T_{20}$ médios obtidos para FGE-12. ....	140
Figura 6.146 – Tempos de reverberação $T_{30}$ médios obtidos para FGE-12. ....	140
Figura 6.147 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-12. ....	140
Figura 6.148 – Tempo central $T_s$ médios obtidos para FGE-12. ....	140
Figura 6.149 – Valores parâmetro definição $D_{50}$ médios obtidos para FGE-12. ....	141
Figura 6.150 – Valores parâmetro clareza $C_{80}$ médios obtidos para FGE-12. ....	141
Figura 6.151 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-12. ....	141
Figura 6.152 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-12. ....	141
Figura 6.153 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-12. ....	141
Figura 6.154 – Coeficiente $r$ , calculados com base nas ICIs de FGE-1 à FGE-4. ....	142
Figura 6.155 – Coeficiente $r$ , calculados com base nas ICIs de FGE-5 à FGE-8. ....	143
Figura 6.156 – Coeficiente $r$ , calculados com base nas ICIs de FGE-9 à FGE-12. ....	143
Figura 6.157 – Coeficiente $r$ , calculados com base nas RIs para as 4 formas geométricas mais retangulares. ....	144
Figura 6.158 – Coeficiente $r$ , calculados com base nas RIs para as 4 formas geométricas pouco alteradas. ....	145
Figura 6.159 – Coeficiente $r$ , calculados com base nas RIs para as 4 formas geométricas menos retangulares. ....	145
Figura 6.160 – Coeficiente $r$ , com base nas FRFs das 4 formas geométricas mais retangu- lares. ....	146
Figura 6.161 – Coeficiente $r$ , com base nas FRFs para as 4 formas geométricas pouco alteradas. ....	146
Figura 6.162 – Coeficiente $r$ , com base nas FRFs para as 4 formas geométricas menos retangulares. ....	147
Figura 6.163 – Modelo físico MFI-1 construído com ajustes após contratempos iniciais. .	148
Figura 6.164 – Sobreposição das frequências modais identificadas por medição e por meio de cálculo. ....	148
Figura M.1 – Esquema de montagem, em corte longitudinal, da fonte criada para monito- ramento da velocidade de volume. ....	199
Figura M.2 – Espectros em frequência obtidos na medição do MFI-1 construído, nas posi- ções de receptor. ....	201
Figura M.3 – Velocidade de volume medida em função da frequência ....	202
Figura M.4 – Distanciamento entre posições, em espectro, das frequências modais medidas com a fonte alternativa e as frequências modais calculadas para MFI-1. ...	203

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Frequências modais iniciais calculadas. ....	72
Tabela 4.2 – Posições de fonte e receptores adotados. ....	79
Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros obtidos na medição do modelo. ....	83
Tabela 4.4 – Limites em frequência e dimensões dos elementos de malha das etapas de simulação do modelo computacional desenvolvido. ....	84
Tabela 4.5 – Valores de $\alpha$ , $ Z_{s,n} $ e $ Z_s $ , calculados para os valores de $T_{30}$ medidos no MFI-1. ....	85
Tabela 4.6 – Configurações iniciais de simulação do MCO-1. ....	86
Tabela 4.7 – Configuração de simulação com valores complexos de impedância de superfície. ....	87
Tabela 4.8 – Valores médios dos parâmetros obtidos por simulação em FEM do modelo. .	88
Tabela 4.9 – Coeficientes ( $\alpha$ ) estimados com a Eq. 3.28 e o $T_{60}$ e, coeficientes ( $\alpha$ ) calculados com a Eq. 3.23 para ( $Z_{s,n}$ ) estipulada. ....	89
Tabela 4.10 – Cálculo dos termos de amortecimento modal ( $\eta$ ) para os tempos de reverberação medidos em banda de 1/3 oitava. ....	89
Tabela 4.11 – Valores médios dos parâmetros obtidos por avaliação analítica modelo. ...	90
Tabela 5.1 – Tempos de reverberação e amortecimentos modais usados no MAN-4. ....	103
Tabela 5.2 – Valores de ( $Z_{s,n}$ ) usados nas simulações de MCO-4. ....	104
Tabela 6.1 – Áreas, volumes dos modelos computacionais que nortearam as dimensões dos modelos analíticos. ....	114
Tabela M.1 – Valores médios dos parâmetros obtidos na medição usando a fonte construída. ....	201



## LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Relação de modelos elaborados para descrever o comportamento acústico das respectivas formas geométricas. ....	68
Quadro A.1 – Tempos de reverberação obtidos na medição do MFI-1. ....	153
Quadro A.2 – Tempos de reverberação usados no MAN-1. ....	153
Quadro A.3 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-1. ....	153
Quadro B.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-2. ....	155
Quadro B.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-2. ....	155
Quadro C.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-3. ....	159
Quadro C.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-3. ....	159
Quadro D.1 – Tempos de reverberação obtidos na medição do MFI-4. ....	163
Quadro D.2 – Tempos de reverberação usados no MAN-4. ....	163
Quadro D.3 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-4. ....	163
Quadro E.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-5. ....	167
Quadro E.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-5. ....	167
Quadro F.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-6. ....	171
Quadro F.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-6. ....	171
Quadro G.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-7. ....	175
Quadro G.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-7. ....	175
Quadro H.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-8. ....	179
Quadro H.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-8. ....	179
Quadro I.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-9. ....	183
Quadro I.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-9. ....	183
Quadro J.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-10. ....	187
Quadro J.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-10. ....	187
Quadro K.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-11. ....	191
Quadro K.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-11. ....	191
Quadro L.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-12. ....	195
Quadro L.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-12. ....	195





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	<i>Three dimensions</i> (três dimensões), pág. 29.
BBC	<i>British Broadcasting Corporation</i> , pág.31.
CREA – RS	Conselho regional de engenharia e agronomia do estado do Rio Grande do Sul, pág. 30.
CT	Centro de Tecnologia, pág. 3.
EDT	<i>Early Decay Time</i> (tempo de decaimento inicial), pág.34.
FEM	<i>Finite Element Method</i> (método de elementos finitos), pág.30.
FGE	Abreviação usada para designar Forma Geométrica, referente aos formatos de salas acústicas (i), avalidas na pesquisa, pág. 57.
FRF	Função de Resposta em Frequência, pág. 34.
ICI	Integral Cumulativa Invertida, pág. 34.
MAN	Abreviação usada para designar Modelo Analítico, referente aos formatos de salas acústicas (i), desenvolvidos para a pesquisa, pág. 57.
MCO	Abreviação usada para designar Modelo Computacional desenvolvido em FEM, referente aos formatos de salas acústicas (i), elaborados para a pesquisa, pág. 57.
MDF	<i>Medium-density fiberboard</i> (placa de fibra de média densidade), pág. 35.
MFI	Abreviação usada para designar Modelo Físico, referente a formato de salas acústicas (i), construídos para a pesquisa pág. 59.
NPS	Nível de Pressão Sonora, pág. 50.
RI	Resposta ao Impulso, pág. 34.
SLIT	Sistema Linear e Invariante no Tempo, pág. 37.
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria - RS, pág. 3.
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pág. 3.



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Raio da seção transversal de um tubo [m], Equação (3.45), pág. 54.
$C_{80}$	Parâmetro acústico Clareza, dado em relação [dB], pág. 34.
$c_0$	Velocidade do som no ar [m/s], Equação (3.5), pág. 40.
$D_{50}$	Definição, dado em escala linear [-], pág. 34.
EDT	Tempo de reverberação em [s], medido na faixa de 0 a -10 [dB], pág. 34.
$f$	Indica frequência [Hz], Equação (3.7), pág. 42.
$f_1$	Frequência da primeira ressonância [Hz], pág. 28.
$fn$	Frequência natural, frequência de ressonância ou frequência modal [Hz], Equação (3.5), pág. 40.
$f_S$	Frequência de Schroeder [Hz], pág. 28.
$f_u$	Primeiro modo não planar no interior de um tubo de raio $a$ [Hz], Equação (3.45), pág. 54.
$h(t)$	Resposta ao impulso para um SLIT [Pa], Equação (3.1), pág. 37.
$H(j\omega)$	Função resposta em frequência (FRF), Equação (3.3), pág. 38.
$j$	Unidade imaginária ou operador complexo, Equação (3.2), pág. 38.
$k_0$	Número de onda em [ $m^{-1}$ ] associado a uma determinada frequência $f$ , Equação (3.8), pág. 43.
$k_n$	Número de onda em [ $m^{-1}$ ] associado as frequências modais $fn$ da sala, Equação (3.9), pág. 43.
$L$	Perímetro de uma sala [m], Equação (3.7), pág. 42.
$L_x$	Comprimento de uma sala retangular [m], por convenção a maior dimensão, Equação (3.5), pág. 40.
$L_y$	Largura de uma sala retangular [m], Equação (3.5), pág. 40.
$L_z$	Altura de uma sala retangular [m], Equação (3.5), pág. 40.
$m$	Fator de absorção sonora do ar [ $m^{-1}$ ], Equação (3.29), pág. 50.
$n_{(x,y,z)}$	Índices usados para cálculo das frequências modais, números naturais positivos, Equação (3.5), pág. 40.
$n(f)$	Estimativa para a densidade modal em função da frequência $f$ , Equação (3.7), pág. 42.
$\tilde{P}(\vec{r}, \vec{r}_0)$	Pressão som em $\vec{r}$ em sala retangular de paredes rígidas e fonte em $\vec{r}_0$ [Pa], Equação (3.9), pág. 43.

$\tilde{Q}(\omega)$	Amplitude complexa da velocidade de volume dada em $[m^3/s]$ , Equação (3.9), pág. 43.
$r$	Coefficiente de correlação de Pearson [-], pág. 34.
$\vec{r}$	Coordenada espacial $(x, y, z)$ associada ao posicionamento do receptor em uma sala, Equação (3.8), pág. 43.
$\vec{r}_0$	Coordenada espacial $(x, y, z)$ associada ao posicionamento da fonte sonora em uma sala, Equação (3.8), pág. 43.
$S$	Área de superfície $[m^2]$ , Equação (3.7), pág. 42.
$S_p$	Área de piso $[m^2]$ , pág. 112.
$T_{20}$	Tempo de reverberação em [s], medido na faixa de -5 a -25 [dB], pág. 34.
$T_{30}$	Tempo de reverberação em [s], medido na faixa de -5 a -35 [dB], pág. 34.
$T_{60}$	Tempo de reverberação em [s], medido na faixa de -5 a -65 [dB], Equação (3.4), pág. 40.
$T_s$	Tempo central, dado em [s], pág. 34.
$u(\omega)$	Velocidade de partícula calculada na saída de um tubo $[m/s]$ , Equação (3.55), pág. 56.
$V$	Volume de uma sala em $[m^3]$ , Equação (3.4), pág. 40.
$V_p$	Fator de reflexão [-], Equação (3.17), pág. 45.
$x$	Coordenada espacial [m], Equação (3.6), pág. 41.
$x(t)$	Entrada para um sistema SLIT, Equação (3.1), pág. 37.
$W$	Representa a média global de valores das 9 bandas de análise, que por sua vez é valor médio das oito posições de análise, pág. 76.
$y$	Coordenada espacial [m], Equação (3.6), pág. 41.
$y(t)$	Saída para um sistema SLIT, Equação (3.1), pág. 37.
$z$	Coordenada espacial [m], Equação (3.6), pág. 41.
$Z_c$	Impedância característica do meio $[Pa\ s/m]$ ou $[Rayl]$ , Equação (3.20), pág. 46.
$Z_s$	Impedância de superfície $[Pa\ s/m]$ ou $[Rayl]$ , Equação (3.19), pág. 46.
$Z_{s,n}$	Impedância característica de superfície normalizada por $Z_c$ [-], Equação (3.21), pág. 46.
$\alpha$	Coefficiente de absorção acústica [-], Equação (3.18), pág. 45.
$\epsilon_{n_x, n_y, n_z}$	Constantes de forma modal [-], Equação (3.6), pág. 41.

$\eta$	Fator de amortecimento modal [ $s^{-1}$ ], Equação (3.9), pág. 43.
$\rho_0$	Densidade característica do ar em [ $kg/m^3$ ], Equação (3.8), pág. 43.
$\varphi$	Angulo de fase de uma onda sonora [rad], Equação (3.17), pág. 45.
$\tilde{\Psi}_{n_{x,y,z}}$	Amplitude complexa de uma forma modal em função de coordenadas espaciais ( $x, y, z$ ), Equação (3.6), pág. 41.
$\omega$	Frequência angular [Hz] ( $\omega = 2\pi f$ ), Equação (3.2), pág. 38.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>33</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	37
1.2	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	40
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	41
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>45</b>
3.1	RESPOSTA AO IMPULSO E SUA MEDIÇÃO.....	45
3.2	RESPOSTA AO IMPULSO E RESPOSTA EM FREQUÊNCIA TÍPICA DE UMA SALA.....	46
3.3	FREQUÊNCIA DE SCHROEDER.....	48
3.4	MODELO ANALÍTICO (MAN) PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS.....	48
<b>3.4.1</b>	<b>Cálculo dos modos acústicos</b> .....	<b>48</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Distribuição modal: Critérios de Bolt</b> .....	<b>49</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Distribuição modal: Critérios de Bonello</b> .....	<b>50</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Pressão sonora causada por uma fonte pontual</b> .....	<b>50</b>
3.5	MODELO COMPUTACIONAL (MCO) PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS.....	51
3.6	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO E IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE.....	53
<b>3.6.1</b>	<b>Formas de determinar a impedância de superfície (<math>Z_s</math>)</b> .....	<b>54</b>
3.7	PARÂMETROS OBJETIVOS.....	56
<b>3.7.1</b>	<b>Tempo de reverberação (TR)</b> .....	<b>57</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Medição do Tempo de reverberação (TR)</b> .....	<b>57</b>
<b>3.7.3</b>	<b>Early Decay Time (EDT)</b> .....	<b>59</b>
<b>3.7.4</b>	<b>Clareza e Definição</b> .....	<b>59</b>
<b>3.7.5</b>	<b>Tempo central (<math>T_s</math>)</b> .....	<b>60</b>
3.8	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO AMOSTRAL DE PEARSON.....	61
3.9	OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE VOLUME NA SAÍDA DE TUBOS.....	62
<b>4</b>	<b>AS FORMAS GEOMÉTRICAS ESTUDADAS E, A ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO, DOS MODELOS DE ANÁLISE</b> .....	<b>65</b>
4.1	AS FORMAS GEOMÉTRICAS ESTUDADAS.....	65
4.2	O MFI-1 CONSTRUÍDO PARA REPRESENTAR A FGE-1.....	69
<b>4.2.1</b>	<b>MFI-1 e os critérios de boa distribuição modal de Bolt</b> .....	<b>70</b>
<b>4.2.2</b>	<b>O MFI-1 e os critérios de boa distribuição modal de Bonello</b> .....	<b>71</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Estimativa do tempo de reverberação do MFI-1</b> .....	<b>73</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Estimativa da frequência de Schroeder para MFI-1</b> .....	<b>73</b>
<b>4.2.5</b>	<b>O sinal de excitação</b> .....	<b>74</b>
<b>4.2.6</b>	<b>A fonte sonora</b> .....	<b>74</b>
<b>4.2.7</b>	<b>Os microfones de captação de sinais</b> .....	<b>76</b>
<b>4.2.8</b>	<b>A placa de áudio utilizada</b> .....	<b>77</b>
<b>4.2.9</b>	<b>Posicionamento de fonte e microfone</b> .....	<b>78</b>
<b>4.2.10</b>	<b>Desconsiderando os tempos de resposta da placa e chegada do som direto</b> .....	<b>81</b>
<b>4.2.11</b>	<b>Parâmetros acústicos obtidos na medição do MFI-1</b> .....	<b>82</b>
4.3	O MCO-1 CRIADO PARA REPRESENTAR A FGE-1.....	83
<b>4.3.1</b>	<b>Curvas de decaimento obtidas para MCO-1 usando <math> Z_s </math></b> .....	<b>85</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Valores dos parâmetros obtidos para MCO-1 usando valores de <math>Z_s</math> complexos</b> .....	<b>87</b>

4.4	O MAN-1 ELABORADO PARA FGE-1 .....	89
4.4.1	Valores dos parâmetros obtidos para MAN-1 .....	90
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA FGE-1 .....	91
4.5.1	Coefficientes de correlação de Pearson para FGE-1 .....	93
5	AS FORMAS FGE-2 E FGE-4.....	97
5.1	A FORMA GEOMÉTRICA 2 (FGE-2).....	97
5.1.1	A elaboração do MFI-2, do MCO-2 e do MAN-2 .....	97
5.1.2	Comparação dos resultados obtidos para FGE-2.....	98
5.2	A FORMA GEOMÉTRICA 4 (FGE-4).....	102
5.2.1	A elaboração do MFI-4.....	102
5.2.2	A elaboração do MAN-4 .....	103
5.2.3	Identificação das propriedades acústicas da melamina para MCO-4.....	103
5.2.4	Comparação dos resultados obtidos nas diferentes modelagens da FGE-4.....	105
6	AS OUTRAS FORMAS GEOMÉTRICAS .....	109
6.1	A FORMA GEOMÉTRICA 3 (FGE-3).....	109
6.1.1	A elaboração do MCO-3 e do MAN-3 .....	109
6.1.2	Comparação dos resultados obtidos nas diferentes modelagens da FGE-3.....	110
6.2	FGE-5 E OS PROCESSO DE SIMPLIFICAÇÃO GEOMÉTRICA.....	113
6.2.1	Comparação dos resultados obtidos nas diferentes modelagens da FGE-5.....	114
6.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-6.....	118
6.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-7.....	121
6.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-8.....	125
6.6	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-9.....	128
6.7	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-10.....	132
6.8	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-11.....	135
6.9	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS MODELAGENS DA FGE-12.....	139
6.10	ANALISE GLOBAL DOS RESULTADOS .....	142
6.11	OS PERCALÇOS SUPERADOS DURANTE O PROCESSO EXPERIMENTAL DA PESQUISA .....	147
7	CONCLUSÕES.....	149
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151
	APÊNDICE A – CONFIGURAÇÕES DE MFI-1, MAN-1 E MCO-1.....	153
	APÊNDICE B – CONFIGURAÇÕES DE MFI-2, MAN-2 E MCO-2.....	155
	APÊNDICE C – CONFIGURAÇÕES DE MFI-3, MAN-3 E MCO-3.....	159
	APÊNDICE D – CONFIGURAÇÕES DE MFI-4, MAN-4 E MCO-4.....	163
	APÊNDICE E – CONFIGURAÇÕES DE MFI-5, MAN-5 E MCO-5.....	167
	APÊNDICE F – CONFIGURAÇÕES DE MFI-6, MAN-6 E MCO-6.....	171
	APÊNDICE G – CONFIGURAÇÕES DE MFI-7, MAN-7 E MCO-7.....	175
	APÊNDICE H – CONFIGURAÇÕES DE MFI-8, MAN-8 E MCO-8.....	179
	APÊNDICE I – CONFIGURAÇÕES DE MFI-9, MAN-9 E MCO-9.....	183
	APÊNDICE J – CONFIGURAÇÕES DE MFI-10, MAN-10 E MCO-10.....	187



<b>APÊNDICE K – CONFIGURAÇÕES DE MFI-11, MAN-11 E MCO-11 .....</b>	<b>191</b>
<b>APÊNDICE L – CONFIGURAÇÕES DE MFI-12, MAN-12 E MCO-12.....</b>	<b>195</b>
<b>APÊNDICE M – TENTATIVA DE USO DE UMA FONTE SONORA AL- TERNATIVA .....</b>	<b>199</b>
<b>APÊNDICE N – PROJETO DA FONTE SONORA ALTERNATIVA .....</b>	<b>205</b>
<b>ANEXO A – DATASHEET FONTE XMINI.....</b>	<b>209</b>
<b>ANEXO B – DATASHEET MICROFONE .....</b>	<b>211</b>
<b>ANEXO C – DATASHEET DRIVE .....</b>	<b>213</b>
<b>ANEXO D – DATASHEET PLACA DE ÁUDIO (ENTRADAS).....</b>	<b>215</b>
<b>ANEXO E – DATASHEET PLACA DE ÁUDIO (SAÍDAS).....</b>	<b>217</b>
<b>ANEXO F – DATASHEET AMPLIFICADOR.....</b>	<b>219</b>

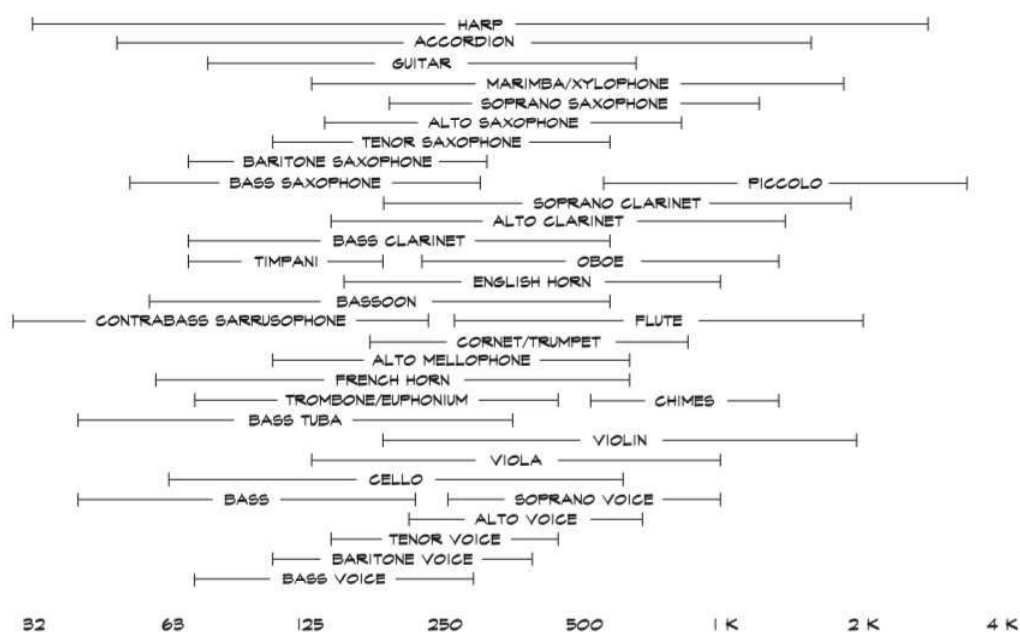


# 1 INTRODUÇÃO

O som é um dos principais meios de comunicação entre os seres vivos. Os seres humanos tem a capacidade de escutar sons com frequências que variam de 20 [Hz] a 20000 [Hz] com pressões sonoras que variam de 20 [ $\mu$ Pa] a 20 [Pa] (KUTTRUFF, 2017). A forma como cada ser humano é afetado pelos sons do cotidiano é alvo de pesquisas da psicoacústica. A psicoacústica estuda, entre diversas linhas de pesquisa, por meio de observações experimentais controladas, como os seres humanos (selecionados previamente) reagem quando são submetidos a um determinado estímulo sonoro. Quando um ser humano sente-se desconfortável com uma percepção auditiva, a esse som é atribuído o nome ruído. A percepção de um som agradável ou desagradável é subjetivo a cada ser humano. O que para muitos pode ser ruído indesejado, para outros pode ser um som agradável e desejado. Os resultados das pesquisas na área da psicoacústica formam a base para a compreensão de como o ser humano percebe os sons e ruídos que os cercam.

Nos mais diversos ambientes, a compreensão de como esses sons e ruídos se propagam e afetam os seres humanos é de fundamental importância. Na concepção de um projeto acústico-arquitetônico de um teatro, de um auditório ou de uma sala de aula, por exemplo, as características construtivas e as composições materiais que realcem as boas sensações acústicas e, que permitam um uso confortável do ambiente, devem ser empregadas.

Figura 1.1 – Frequências fundamentais em que alguns instrumentos musicais trabalham.



Fonte: (LONG, 2006).

O projetista deve sempre pensar no conforto do usuário em cada ambiente. Salas de aula requerem um cuidado acústico especial em sons com frequências entre 80 [Hz] e 4000

[Hz], frequências estas que estão ligadas a inteligibilidade da fala humana. Para ambientes destinados à prática musical, essa faixa de frequência é a faixa de percepção do ouvido humano 20 [Hz] a 20000 [Hz], devido a grande variedade de instrumentos e composições instrumentais que originarão diferentes sensações auditivas. Na Figura 1.1, retirada do livro (LONG, 2006) podem ser visualizadas as faixas de frequências fundamentais que alguns instrumentos emitem ao serem tocados.

Existem diversos tipos de salas acústicas e com diferentes usos, estúdios de gravação de fala e de música, salas de controle de estúdios de gravação, auditórios, salas de apresentações artísticas como teatros e salas de concerto. Um exemplo de sala de concerto é a Sala São Paulo, mostrada na Figura 1.2. Ela é uma sala de concertos onde ocorrem apresentações sinfônicas e de câmara. A sala São Paulo faz parte do Centro Cultural Júlio Prestes, na antiga Estação Júlio Prestes, uma histórica estação ferroviária da cidade de São Paulo - SP (OSESP, 2020).

Figura 1.2 – Sala São Paulo, exemplo de sala estudada pelo campo da acústica de salas.

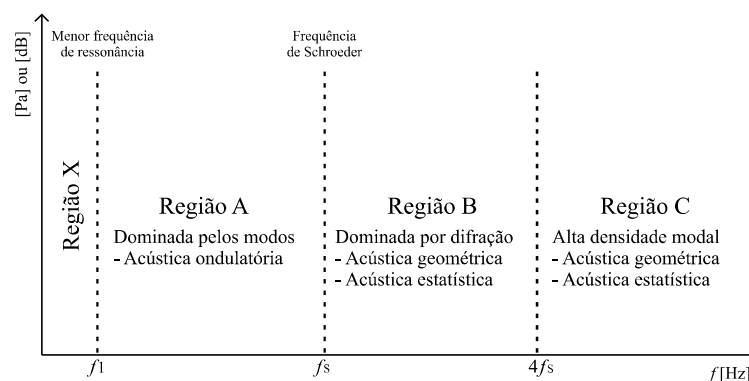


Fonte: [www.salasaopaulo.art.br](http://www.salasaopaulo.art.br).

A grande variedade de uso que as salas acústicas podem ter, imputam uma atenção especial. Em uma sala, diferentes faixas de frequências precisam ser analisadas com abordagens diferentes pelos projetistas, dependendo da geometria e das dimensões da sala analisada. O fator limitante, que define qual a abordagem é mais adequada para cada faixa de frequência de análise, é a Frequência de Schroeder ( $f_s$ ), calculada com uso da Equação 3.4. A Frequência de Schroeder é calculada considerando o volume e o tempo de reverberação da sala e, sugere uma região, a partir da qual, a densidade modal é considerada elevada (BRANDÃO, 2016). O espectro sonoro em uma sala pode ser dividido por faixas de frequências, assim como representado na Figura 1.3. Na figura, também pode ser visualizada a frequência que identifica a primeira ressonância de uma sala ( $f_1$ ). Frequências situadas abaixo de ( $f_1$ ) não conseguem se manifestar dentro de uma sala, devido a incapacidade de suporte acústico da sala.

Ainda de acordo com (BRANDÃO, 2016), as faixas de frequências das Regiões B e C da

Figura 1.3 – Subdivisões de um espectro e suas abordagens de estudo.



Fonte: Adaptado de (BRANDÃO, 2016).

Figura 1.3, cuja a frequência limitante entre as duas regiões é uma relação de aproximadamente 4 vezes a Frequência de Schroeder, são respectivamente dominadas pelos efeitos da difração e pelos efeitos da alta densidade modal. Ambas, além de poderem ser analisadas por métodos geométricos, podem ser analisadas por meio de uma análise estatística mais simplificada, graças aos avanços dos estudos realizados por diversos autores, como o precursor da acústica estatística Wallace Clement Sabine (1868 - 1919).

A análise do comportamento acústico de uma sala na faixa de frequências delimitada pela região A, requer a utilização de outras ferramentas. Uma forma de analisar essa região é com o uso de metodologias baseadas na solução da equação da onda. Segundo (BRANDÃO, 2016), a solução da equação da onda levará a uma solução exata do campo acústico da sala. Ainda segundo o autor, soluções analíticas estão disponíveis apenas para geometrias simplificadas (geometria retangular "caixa de sapato" ou "shoebbox"). Em casos, mais realistas métodos numéricos mais complexos são necessários.

Uma alternativa a aplicação de soluções analíticas ou numéricas, é o uso de modelos em escala, para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos. O uso de modelos em escala é uma tradição desde o período da Renascença (LIROLA et al., 2017). Começando o século XVII na Grã-Bretanha, Philibert de l'Orme (1510-1570) em sua obra *Le Premier Tomé de l'Architecture* descreve alguns meios para o desenvolvimento de modelos em escala de edifícios. O período que compreende o início do século XVII e o início do século XX é marcado pela crescimento do uso dos modelos arquitetônicos, sofrendo influências de vários arquitetos e culminando no chamado model boom.

A partir da difusão da utilização de modelos em escala, duas metodologias de aplicação coexistiram. A primeira delas é o modelo figurativo, utilizado na arquitetura para a representação física de uma construção. A segunda, por sua vez, é o modelo funcional, utilizado nas diversas áreas da engenharia (LIROLA et al., 2017).

A prototipagem rápida (impressão em 3D), tecnologia desenvolvida pelo americano Chuck Hull em 1984, aliada a atual disponibilidade e variedade de materiais que podem ser usa-

dos nas impressoras 3D, estão aprimorando a utilização dos modelos em escala. Em reportagem elaborada pelo jornalista Jô Santucci e publicada na revista número 127 (setembro/outubro de 2018) do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul (CREA-RS), é citado que, um dos pilares da quarta revolução industrial, que as indústrias passam atualmente, a chamada Indústria 4.0, é justamente a incorporação no uso cotidiano da prototipagem rápida (impressão 3D). A Figura 1.5, mostra uma maquete impressa por essa tecnologia.

Na reportagem o engenheiro Eduardo Setton (professor IV do centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, coordenador-geral do Laboratório de Computação Científica e Visualização e presidente da Fundação para Estudos Avançados e Tecnologias Sociais) afirma ao jornalista Jô Santucci que a impressão em 3D já é uma realidade e trará um impacto para a economia de muitos países. Ainda segundo Setton, em pouquíssimo tempo, as pessoas estarão baixando arquivos de peças e coisas mais simples e, imprimindo em casa, ao invés de comprar o produto.

Estudos e projetos de acústica de salas são um uso prático de modelos em escala reduzida, que poderão ser impressos usando essa tecnologia. Esses modelos são elaborados para validar pesquisas, experimentos e verificar grandes projetos, onde o som é especialmente relevante, como auditórios, salas de concerto (Figura 1.2), salas de conferência ou salas com geometria complexa, onde uma análise de seu comportamento acústico por modelos computacionais ou por meio da metodologia clássica de cálculo, que faz uso das equações descritas na Seção 3.4, necessitariam de um grande custo computacional/temporal de análise. Para otimização e pesquisa em modelos em escala, são utilizados dispositivos como fontes eletrostáticas e microfones (LIROLA et al., 2017). O uso de modelos computacionais permitem uma reprodução mais controlada do ambiente estudado, com um total controle das configurações de absorção acústica dos materiais empregados nas simulações. Outro aspecto que pode ser controlado em uma modelagem computacional é o ruído de fundo. Em uma sala real, elementos como portas e janelas também podem influenciar negativamente em uma experimentação, deixando de isolar o som externo à sala, aumentando o ruído de fundo e deixando as medições que irão compor o experimento, suscetíveis sons externos. Assim, o uso da modelagem em escala aliada a tecnologia de prototipagem rápida seguirá sendo um caminho de análise e validação de projetos e pesquisas. Modelos em escala continuarão sendo usados por pesquisadores e projetistas de acústica de salas, como alternativa e, complementar, aos modelos elaborados sobre a ótica de abordagens analíticas de geometrias retangulares bem como, alternativa aos ainda custosos (temporal e monetário) modelos computacionais.

A modelagem computacional, principalmente baseada nos métodos de elementos finitos, em inglês *Finite Element Method* (FEM), aborda de maneira muito eficiente os problemas relacionados a acústica de salas. Porém, problemas relacionados com as condições de contorno do modelo (discretização da malha) e o alto custo para aquisição de softwares que implementam essa metodologia em suas análises dificultam seu uso em larga escala. (PAPADAKIS, 2017) mostra, em sua dissertação de mestrado que, diversos autores indicam para a discretiza-

ção da malha, o uso de pelo menos a dimensão de 1/4 a 1/10 do menor comprimento de onda estudado. Em salas de pequeno porte, em que a Frequência Schroeder ( $f_S$ ) (também nominada como frequência de corte), está associada a frequências mais altas, uma análise com uso do FEM, pode ser por vezes demorada, devido ao tempo necessário em se processar a estrutura de malha criada, levando o projetista a procurar maneiras mais viáveis de validarem seus projetos.

O presente trabalho trata do tema acústica de salas e aborda de maneira mais direta, o campo acústico das frequências que se situam abaixo da Frequência de Schroeder (Região A da Figura 1.3), em salas de pequenas dimensões. Salas estas que tornam, os problemas acústicos relacionados a acústica modal (baixas frequências), mais evidentes para profissionais, pesquisadores, projetistas e usuários. A pesquisa se dá por meio de modelagem em escala reduzida, de salas com dimensões equiparadas com a de um *home studio*, como o intuito de supor um problema real vivenciado por um projetista: como abordar as baixas frequências em um ambiente com pequenas dimensões.

A presente pesquisa comparou, em baixas frequências, os parâmetros acústicos mais importantes, obtidos pela medição de modelos retangulares em escala reduzida, com os parâmetros acústicos obtidos por outras abordagens de análise, como a modelagem computacional em FEM e a modelagem analítica. A presente pesquisa comparou também, os parâmetros acústicos obtidos por meio de modelagem computacional de modelos simulados em escala reduzida e, com geometrias não retangulares, com os parâmetros acústicos obtidos a partir de aproximações da geometria real a uma sala retangular.

O presente trabalho visa trazer luz às seguintes questões: (i) como a inserção de objetos, as alterações geométricas e alteração das características de absorção acústica de superfícies influenciam no comportamento dos parâmetros acústicos em baixas frequências; (ii) como projetistas podem usar simplificações geométricas tornando um modelo realista de sala não retangular para uma sala retangular de dimensões médias, para que modelos analíticos mais simples, desenvolvidos para salas retangulares possam ser usados; (iii) como o projetista pode usar outros meios disponíveis de análise como: a elaboração de modelos físicos em escala reduzida e elaboração de modelos virtuais em FEM, para descrever o comportamento acústico das baixas frequências em salas.

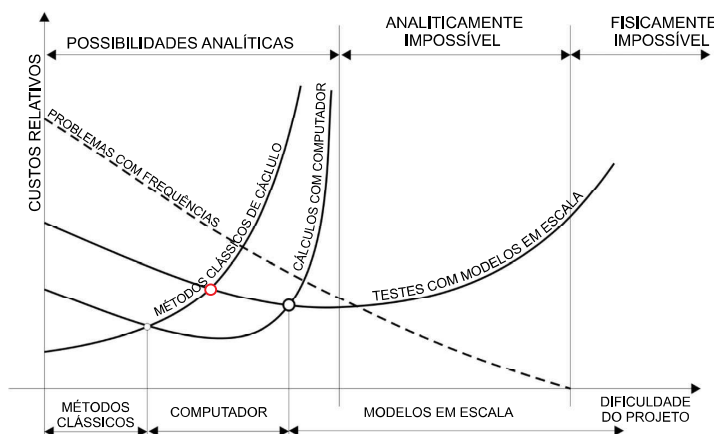
## 1.1 JUSTIFICATIVA

A justificativa para a execução deste trabalho se dá pois, a caracterização do campo sonoro em salas destinadas a fala como salas de aula, salas de conferência, teatros, auditórios, salas destinadas a música como, estúdios de gravação e salas de concerto, sempre foram de interesse na área da acústica. Em salas de escuta crítica, como por exemplo as salas de gravação e salas de mixagem de estúdios, é de suma importância a caracterização do campo acústico em baixas frequências (região A da Figura 1.3). Negligenciar o comportamento das frequên-

cias modais pode influenciar negativamente na qualidade acústica desses ambientes, comprometendo a performance sonora dentro desses espaços. Em 1992 a rádio *British Broadcasting Corporation* (BBC) de Londres apresentava essa preocupação. Em artigo publicado no mesmo ano pelo autor (WALKER, 1992), a emissora relata problemas que os comunicadores tiveram, com a percepção do som em baixas frequências, a medida que os mesmos trocavam de estúdio para gravação de distintos formatos de programas. (FAZENDA, 2004) também evidencia a importância das baixas frequências em espaços de escuta crítica. Em sua pesquisa de doutorado, ele avaliou de forma subjetiva, como o amortecimento dos modos acústicos podem influenciar na percepção acústica e na qualidade acústica desses ambientes.

Outra justificativa, para a presente pesquisa, está formulada com base no princípio mostrado pelo diagrama apresentado por (LIROLA et al., 2017) em seu trabalho. Nesse diagrama é notório que, para uma certa dificuldade projetual (ponto em que a curva que representa a os custos relativos a metodologia clássica de cálculo intercepta a curva que representa os custos relativos aos testes com modelo em escala - círculo em destaque da Figura 1.4), uma análise por meio de modelos computacionais é relativamente menos custosa.

Figura 1.4 – Comparação entre os custos relativos e metodologias de análise.



Fonte: Adaptado de (LIROLA et al., 2017).

É também notório que, à medida que a dificuldade projetual diminui, (porção anterior ao círculo em destaque da Figura 1.4), as metodologias clássicas de cálculo são igual ou, relativamente menos custosas, que outras abordagens. A medida que a dificuldade projetual aumenta, fica evidenciado também que, o uso de modelos em escala torna-se menos custosos que outras meios de análise. Assim, uma pesquisa que investigue diferentes metodologias de análise, para a aquisição dos principais parâmetros acústicos descritores do comportamento acústico de uma sala é de grande importância.

O autor (BRANDÃO, 2016) cita em sua obra que, para uma sala com geometria não retangular, pode-se obter uma análise mais simplificada para Região A (da Figura 1.3, usando uma aproximação e transformando uma sala não retangular em uma sala retangular com valores dimensionais médios. Não está claro porém, até que ponto essas simplificações e aproximações

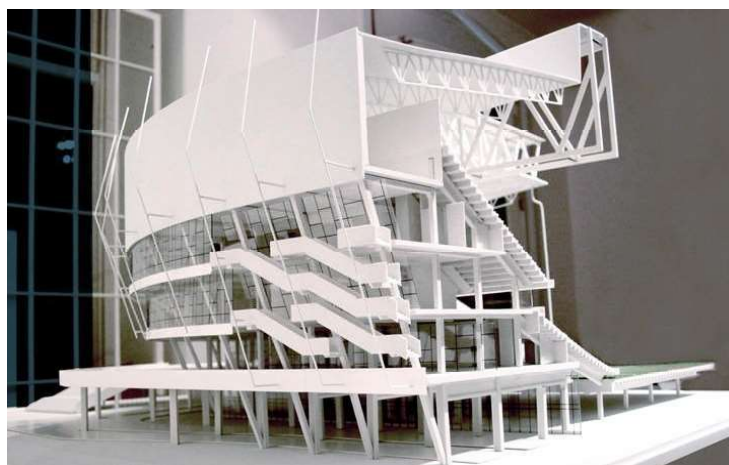


são válidas. Assim, poderá ser de grande importância também, analisar diferentes geometrias de salas e até mesmo diferentes inserções de geometrias em uma sala, para compreender e estabelecer uma referência limítrofe entre o uso da metodologia clássica e outras metodologias.

A modelagem por meio de modelos funcionais em escala reduzida ainda é de grande importância na elaboração de projetos. Principalmente onde a análise do campo acústico de ambientes, por outras metodologias de análise, precisam ser validadas. É notório que a evolução de sistemas de processamento computacionais impulsionaram a evolução sistemas periféricos. Impressoras que imprimem em 3D, como a maquete impressa exposta na Figura 1.5, estão se tornando cada vez mais comuns. Com a grande variedade de materiais disponíveis atualmente, já há a possibilidade de impressão em escala reduzida, de grandes construções, com grande fidelidade de detalhes geométricos. Em poucos anos, projetista de salas acústicas poderão imprimir seu projeto em 3D e avaliar detalhes, inserir e retirar materiais dentro dos ambientes impressos em 3D, com o intuito de validar e aprimorar seu projeto. Assim, torna-se evidente a necessidade de se compreender mais sobre a modelagem em escala, compreender sua instrumentação, quais fontes e quais microfones são mais adequados e, compreender até mesmo qual a escala de redução ideal na hora de construir um modelo em escala reduzida.

Outro motivo para o uso do modelo em escala é a validação experimental dos modelos computacionais em um ambiente controlado. Medições em baixas frequências em ambientes em escala real são bastante difíceis. Uma dificuldade é a baixa relação sinal- ruído na medição. Isso ocorre porque, em escala real, uma faixa típica de frequências de excitação vai de 20 [Hz] a 200 [Hz]. Com um modelo em escala de redução (1:10) essa faixa vai dos 200 [Hz] aos 2000 [Hz] e fica numa faixa em que a maior parte das fontes sonoras consegue excitar um pequeno recinto.

Figura 1.5 – Imagem de maquete impressa por tecnologia de impressão em 3D.



Fonte: <https://www.hometeka.com.br/pro/7-coisas-incriveis-que-a-impressao-3d-ja-faz-pela-arquitetura>.

Desenvolver um projeto de acústica de salas não é tarefa simples. Por esse motivo, o projetista deve buscar sempre alternativas para garantir uma boa qualidade acústica de seu pro-

jeto. Garantir uma convergência de resultados obtidos, sob a ótica de diferentes metodologias de análise, é um caminho promissor. A execução deste trabalho poderá gerar informações para que profissionais com interesse na área de acústica de salas possam aprofundar seu conhecimentos.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A pesquisa exposta nesse documento está organizada em 7 capítulos. O primeiro destes é o capítulo de introdução. A introdução situa o leitor a cerca da importância, as justificativas e as motivações que guiam a execução da pesquisa. Os objetivos da pesquisa são mostrados ao leitor na seguinte seção, parte integrante do primeiro capítulo. Todos os capítulos e os assuntos neles abordados são:

- Capítulo 1, introduz o assunto pesquisado, a importância e os objetivos a serem alcançados com esta pesquisa;
- Capítulo 2, mostra as etapas seguidas para o desenvolvimento da pesquisa;
- Capítulo 3, em suas seções e subseções estão apresentadas os equacionamentos e teorias usadas no decorrer da pesquisa;
- Capítulo 4 apresenta as formas geométricas estudadas, apresenta o modelo físico construído e avaliado com medições acústicas. O capítulo apresenta a concepção dos modelos computacional em FEM e analítico em linguagem para *software* Matlab e, mostra ainda as comparações dos resultados obtidos com essas metodologias de análise;
- Capítulo 5, explicita as adaptações feitas no modelo físico construído e mostrado no Capítulo 4, criando duas novas formas geométricas. O campo acústica destas formas geométricas foi avaliado e os resultados obtidos nas avaliações, também são apresentados neste capítulo;
- Capítulo 6 mostra os resultados obtidos quando os modelos apresentados no Capítulo 4 são replicados para avaliar as demais formas geométricas estudadas;
- Capítulo 7 apresenta as conclusões possíveis diante o exposto na pesquisa.

### 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

A presente pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de estudar, compreender e avaliar as limitações e a aplicabilidade do modelo analítico desenvolvido para salas retangulares de paredes rígidas à salas com diferentes geometrias, após simplificações geométricas, tornando virtualmente salas prismáticas não retangulares, em salas retangulares com dimensões médias. De maneira mais objetiva esta pesquisa tem por objetivos específicos:

- Construção e caracterização do campo sonoro de modelos físicos em escala reduzida, em proporção de redução (1:8) e posteriormente, obter a caracterização acústica dos modelos construídos, por meio de medições da resposta impulsiva, obtida por uma varredura senoidal, para posterior cálculo dos principais parâmetros acústicos: Tempos de reverberação, ( $T_{20}$ ) e ( $T_{30}$ ), Early Decay Time (EDT), Clareza ( $C_{80}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e Tempo central (Ts);
- Construção e teste de uma fonte sonora alternativa, com sistema de monitoramento da velocidade de volume injetada nas medições dos modelos construídos;
- Desenvolvimento e implementação de um modelo analítico, em linguagem de programação para Matlab, capaz de caracterizar o comportamento acústico de salas retangulares e calcular os parâmetros acústicos ( $T_{20}$ ) e ( $T_{30}$ ), Early Decay Time (EDT), Clareza ( $C_{80}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e Tempo central (Ts);
- Desenvolvimento de modelos computacionais, capazes de descrever o comportamento acústico de salas com geometrias retangulares e não retangulares, elaborados em software que faz uso do método de elementos finitos (FEM), para obtenção das funções de resposta em frequência e posterior cálculo dos parâmetros acústicos ( $T_{20}$ ) e ( $T_{30}$ ), Early Decay Time (EDT), Clareza ( $C_{80}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e Tempo central (Ts);
- Cálculo dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ), para atribuição da similaridade existente entre as funções de resposta em frequência (FRF), entre respostas ao impulso (RI) e entre as integrais cumulativas invertidas (ICI), obtidas nos modelos físicos, computacionais e analíticos, usados para descrever as formas geométricas avaliadas;
- Comparação e análise dos resultados obtidos.



## 2 METODOLOGIA

A presente pesquisa, que tem como objetivo, estudar as limitações do uso de um modelo analítico desenvolvido com base nas equações clássicas (usadas para descrever o comportamento acústico de salas retangulares e paredes rígidas), quando esse modelo é usado para descrever geometrias não retangulares, pós simplificações geométricas. As limitações são investigadas comparando os resultados obtidos com o uso do modelo analítico com os resultados obtidos com outras metodologias de análise. Esta pesquisa foi desenvolvida seguindo algumas etapas necessárias. Estas etapas de desenvolvimento estão elencadas nos itens que se seguem:

- A primeira etapa desta pesquisa, foi constituída na escolha das formas geométricas, de possíveis salas acústicas que foram avaliadas. A escolha dessas geometrias, bem como os critérios adotados para esse processo de escolha estão descritos na Seção 4.1.
- A segunda etapa da pesquisa foi constituída na construção (descrita na Seção 4.2) de um modelo físico, representativo de uma forma geométrica de geometria retangular. Esse modelo foi construído em chapas de MDF. A caracterização do campo acústico desse modelo, por medição da resposta ao impulso, forneceu parte dos dados de entrada das outras metodologias de análise, conforme descrito nas Seções 4.3 e 4.4.
- A terceira etapa da pesquisa foi constituída na tentativa de construção de uma fonte sonora alternativa (descrita no Apêndice M), capaz de excitar acusticamente o modelo construído em MDF e capaz de fornecer, via sistema de monitoramento, o valor da velocidade de volume injetada durante o processo de medição do modelo. Essa fonte foi substituída pela fonte sonora descrita na Subseção 4.2.6, devido aos erros provenientes de processo de medição.
- Para a quarta etapa, duas adaptações (respectivamente descritas nas Subseções 5.1.1 e 5.2.1) foram feitas no modelo construído em MDF. O objetivo destas adaptações foi o de constituir dois novos campos acústicos e, conseqüentemente, dois novos modelos físicos, reaproveitando o modelo construído e dispendendo menos recursos. Esse dois modelos também foram caracterizados por medição acústica das repostas ao impulso.
- A quinta etapa da pesquisa foi constituída na elaboração de um modelo analítico (descrito na Seção 4.4) baseado nas equações clássicas (descritas na Seção 3.4), capaz de descrever o comportamento acústico de uma geometria retangular de sala e, com a possibilidade de ser aplicado a formas geométricas não retangulares, após simplificações geométricas. Essas formas geométricas retangulares e não retangulares estão descritas na Seção 4.1.
- A sexta etapa foi fundamentada na constituição de modelos computacionais baseados em FEM (descritos na Seção 4.3), criados para descrever o comportamento acústico das distintas formas geométricas descritas na Seção 4.1.

- A sétima etapa da presente pesquisa, comparou os resultados obtidos para os principais parâmetros acústicos ( $T_{20}$ ) e ( $T_{30}$ ), Early Decay Time (EDT), Clareza ( $C_{80}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e Tempo central ( $T_s$ ), obtidos nas distintas abordagens, analítica, computacional e física (quando possível), usadas para descrever acusticamente as geometrias descritas na Seção 4.1.
- A oitava etapa calculou e comparou a similaridade, com base na correlação ( $r$ ), descrita na Seção 3.8, existente entre as funções de resposta em frequência (FRF), entre as curvas de decaimento (na forma das integrais cumulativas invertidas ICI) e, entre as respostas ao impulso (RI) obtidas nas diferentes metodologias: analítica, computacional e física (quando possível), usadas para descrever acusticamente as formas geométricas descritas na Seção 4.1.

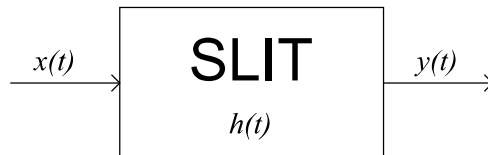
### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados ao leitor todos os fundamentos teóricos usados no desenvolvimento da presente pesquisa. Serão apresentados os fundamentos necessários para a aquisição das respostas ao impulso, que descrevem o comportamento do campo acústico dos modelos que serão caracterizados pelas medições. Serão apresentadas as equações usadas para a elaboração dos modelos analíticos, que visam prever analiticamente o comportamento acústico das geometrias avaliadas. Serão apresentados também, os fundamentos necessários para elaboração dos modelos computacionais desenvolvidos sob a regência dos métodos de elementos finitos, que por sua vez, também visam prever o comportamento acústico das geometrias estudadas. A fundamentação teórica por trás do cálculo dos parâmetros objetivos obtidos, nas diferentes abordagens, que descrevem e/ou prevem objetivamente o comportamento acústico das geometrias estudadas é apresentada nesse capítulo. Os conceitos que orientam o cálculo dos coeficientes de correlação, que por sua vez indicam a similaridade dos dados obtidos, antes da aplicação dos conceitos de parametrização, também são apresentados ao leitor, nas seguintes seções.

#### 3.1 RESPOSTA AO IMPULSO E SUA MEDIÇÃO

A configuração sala-fonte-receptor pode ser considerada um sistema linear e invariante no Tempo (SLIT), desde que as características da sala (propriedades do ar, geometria e materiais aplicados) não se alterem com o tempo e que as características da fonte e do receptor sejam lineares.

Figura 3.1 – Esquema representativo de um Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT).



Fonte: Adaptado de (BRANDÃO, 2016).

É possível demonstrar que, em sistemas desse tipo, a resposta ao impulso é suficiente para descrever todas as características do SLIT. Também é possível demonstrar que, se uma fonte emite um sinal  $x(t)$  qualquer, o sinal recebido pelo receptor  $y(t)$  é dado pela integral de convolução (Equação 3.1), em que o sinal  $(*)$  denota a operação de convolução (adaptado de (BRANDÃO, 2016)).

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau. \quad (3.1)$$

A Equação (3.1) representa, no domínio do tempo, a relação entre o sinal emitido pela fonte  $x(t)$ , a resposta impulsiva  $h(t)$  do SLIT sala-fonte-receptor e o sinal obtido pelo receptor  $y(t)$ . Pode-se expressar essa relação também no domínio da frequência por meio do teorema da convolução, em que, caso as Transformadas de Fourier dos sinais  $x(t)$ ,  $y(t)$  e  $h(t)$  sejam, respectivamente,  $X(j\omega)$ ,  $Y(j\omega)$  e  $H(j\omega)$  o teorema da convolução pode ser expresso por:

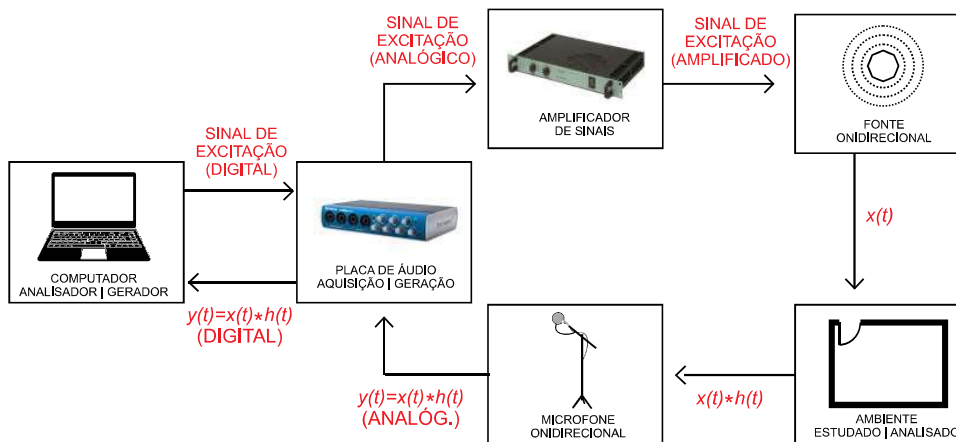
$$Y(j\omega) = X(j\omega) H(j\omega), \quad (3.2)$$

em que,  $(\omega = 2\pi f)$  e a Transformada de Fourier de  $h(t)$  pode ser calculada por meio da equação 3.3:

$$H(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (3.3)$$

A instrumentação necessária para a aquisição de uma resposta ao impulso requer, em suma, um gerador de sinais, um amplificador, uma fonte sonora onidirecional (ter as mesmas propriedades em todas as direções de emissão), microfone, placa de aquisição de sinais e um computador para gerar o sinal de excitação e posterior processamento e análise dos dados. A Figura 3.2 mostra de maneira esquemática o fluxograma de aquisição.

Figura 3.2 – Esquema representativo da cadeia de aquisição de uma resposta impulsiva.



Fonte: Arquivo pessoal.

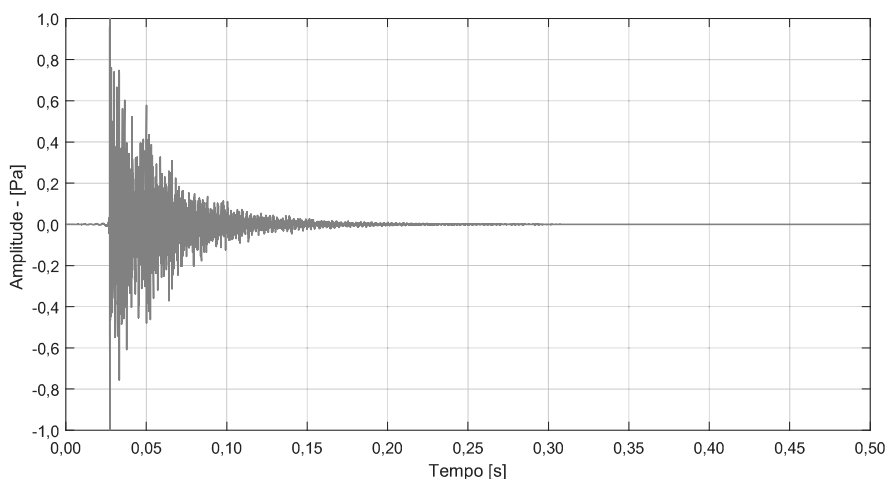
### 3.2 RESPOSTA AO IMPULSO E RESPOSTA EM FREQUÊNCIA TÍPICA DE UMA SALA

A forma mais atual de caracterizar o campo acústico de um ambiente construído é por meio da medição da resposta ao impulso desse ambiente, seguindo a cadeia de medição mostrada na Figura 3.2. Os aspectos de uma resposta ao impulso medida é similar a Figura 3.3, em que, a amplitude da pressão sonora medida é plotada em função do tempo. A resposta em



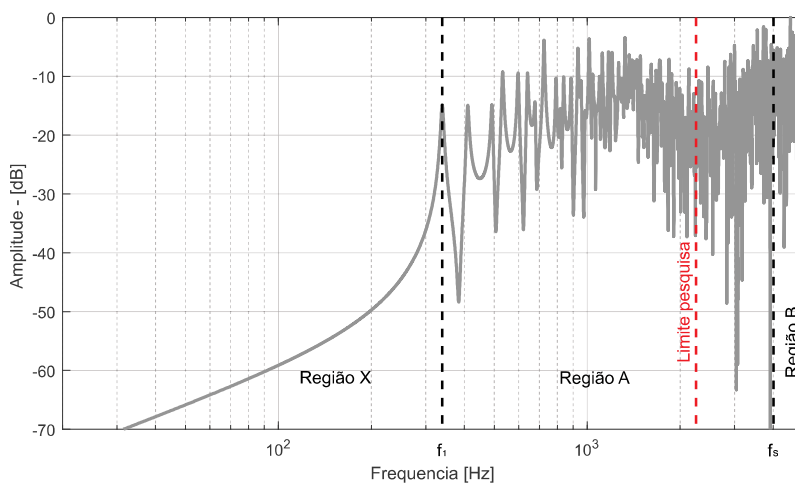
frequência típica de um ambiente medido, que pode ser calculada com o uso da Equação 3.3, por sua vez, pode ser visualizada na Figura 3.4.

Figura 3.3 – Resposta ao impulso típica de uma sala.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 3.4 – Resposta ao impulso típica de uma sala.



Fonte: Arquivo pessoal.

Observando a Figura 3.4 é possível identificar as Regiões A, de baixa densidade modal e B, de alta densidade modal. As formas de se avaliar/estudar essas regiões, de alta e de baixa densidade modal, são citadas no capítulo de introdução desse trabalho. Essas duas regiões são separadas pela identificação da Frequência Schroeder. Esse limite de regiões indica que, para frequências maiores que a Frequência de Schroeder, haverá a identificação de muitos modos acústicos para uma pequena variação espectral, dificultando a identificação dos mesmos. O cálculo dessa frequência limite é instruído conforme a seguinte seção.

### 3.3 FREQUÊNCIA DE SCHROEDER

A Frequência de Schoroeder é a frequência que limita as regiões de alta densidade modal B e baixa densidade modal A, mostrados na Figura 1.3. Ela está associada a capacidade de identificação modal de uma sala. Como o número de modos em uma sala cresce com o cubo da frequência, a partir de uma dada frequência começa a ficar difícil identificá-los. Esse limite entre identificação e não identificação, frequência onde encontram-se, aproximadamente, três frequências modais dentro da largura de banda de uma ressonância, (VIGRAN, 2008), é estimado pela Frequência de Schoroeder ( $f_s$ ). Essa frequência pode ser calculada por

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}, \quad (3.4)$$

em que  $T_{60}$  é tempo de reverberação da sala em [s] e  $V$  é o volume da sala em [m<sup>3</sup>].

### 3.4 MODELO ANALÍTICO (MAN) PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS

Na presente seção, são apresentadas todas as teorias e os equacionamentos usados para a elaboração do modelo analítico, descritor do comportamento acústico em baixas frequências de salas retangulares. O modelo analítico desenvolvido é usado, na presente pesquisa, para descrever o comportamento acústico das formas geométricas retangulares estudadas. O modelo é usado também, após simplificações geométricas de "retangularização", para descrever as salas que não possuem uma forma geométrica retangular.

#### 3.4.1 Cálculo dos modos acústicos

Em seu livro, (TICHY, 2014) indica que, para uma sala retangular de paredes rígidas as frequências de ressonância ou também, frequências naturais ou ainda frequências modais, podem ser calculadas posterior manipulações da equação da onda, através da equação:

$$fn = \frac{c_0}{2} \sqrt{\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2}}, \quad (3.5)$$

em que ( $c_0$ ), representa a velocidade do som no meio, em [m/s], os índices ( $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$ ) representam a ordem dos modos nas respectivas direções  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  e  $\hat{z}$  e são números naturais inteiros, positivos ou nulos, porém, pelo menos um deles, deve ser não nulo (BRANDÃO, 2016).

Em seu trabalho (MEISSNER, 2017) indica para o cálculo da variação espacial da forma

modal, em salas retangulares levemente amortecidas, a seguinte equação:

$$\tilde{\Psi}_{n_x, y, z} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{n_x} \varepsilon_{n_y} \varepsilon_{n_z}}{V}} \cos\left(\frac{n_x \pi}{L_x} x\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{L_y} y\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{L_z} z\right), \quad (3.6)$$

em que os valores das constantes  $\varepsilon_{n_x, y, z}$  são  $\varepsilon_n = 1$  se o valor do índice modal  $n = 0$  e  $\varepsilon_n = 2$  se os valores dos índices modais forem  $n > 0$ . Assim, ao se calcular a forma modal para um modo axial, para um modo tangencial e para um modo oblíquo, em uma sala cúbica com dimensões de 3 metros, o termo que contém a radiciação da equação anterior assume, respectivamente as seguintes formas:

$$\tilde{\Psi}_{n_x, y, z} = \sqrt{\frac{2.1.1}{9}},$$

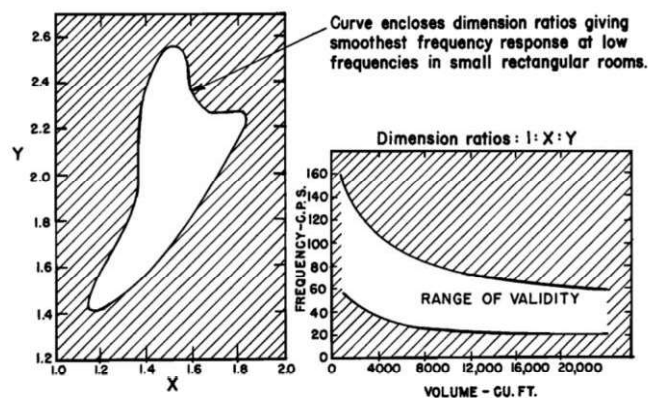
$$\tilde{\Psi}_{n_x, y, z} = \sqrt{\frac{2.2.1}{9}},$$

$$\tilde{\Psi}_{n_x, y, z} = \sqrt{\frac{2.2.2}{9}}.$$

### 3.4.2 Distribuição modal: Critérios de Bolt

O primeiro passo para a elaboração de um projeto acústico-arquitetônico é definir as dimensões do ambiente a ser projetado. A escolha de dimensões para uma sala, que não favoreçam uma boa distribuição modal pode prejudicar a qualidade acústica desse ambiente. Alguns trabalhos, já consagrados, relacionados a acústica de salas podem auxiliar projetista no design dos ambientes. Um deles é a pesquisa desenvolvida por (BOLT, 1946).

Figura 3.5 – Proporções ideais de Bolt para as dimensões de uma sala.



Fonte: Retirado de (BOLT, 1946).

É possível visualizar, no diagrama da Figura 3.5 algumas relações proporcionais que, se

adotadas em projeto, auxiliam na distribuição dos modos acústicos. Tendo como design base uma sala retangular com três dimensões bem definidas,  $Y$  representa o valor encontrado na proporção entre, a maior dimensão do ambiente e a menor dimensão do ambiente ( $L_x/L_z$ ). Por sua vez, a proporção  $X$  é estabelecida entre, a segunda maior dimensão e a menor dimensão do ambiente ( $L_y/L_z$ ).

### 3.4.3 Distribuição modal: Critérios de Bonello

Outra forma de garantir uma boa distribuição modal é seguindo os critérios estipulados por (BONELLO, 1981), que estabelecem:

- o número de modos por banda de 1/3 de oitava deve crescer monotonicamente, ou seja, uma banda superior deve apresentar mais modos que uma banda inferior, ou pelo menos o mesmo número de modos; e
- não devem haver modos coincidentes em uma mesma banda de terço de oitava, e se houver, essa banda deve conter 5 ou mais modos.

A densidade modal, calculada por meio da Equação 3.7, em torno da frequência  $f$  estima o número de modos em uma faixa de frequências  $f$  a  $f + df$  e é obtida com a Equação (3.7). Nela,  $S = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z)$  é a área superficial da sala,  $V = L_x L_y L_z$  é o volume da sala e  $L = 4(L_x + L_y + L_z)$  é o perímetro da sala

$$n(f) = \frac{4\pi V}{c_0^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c_0^2} f + \frac{L}{8c_0}. \quad (3.7)$$

### 3.4.4 Pressão sonora causada por uma fonte pontual

Quando uma fonte sonora está presente em uma sala, a Equação de Helmholtz deve considerar um termo fonte e se torna,

$$\nabla^2 \tilde{P}(\vec{r}) + k_0^2 \tilde{P}(\vec{r}) = j\omega \rho_0 q(\vec{r}_0), \quad (3.8)$$

em que o termo  $k_0$  é o número de onda ( $2\pi f/c$ ) da frequência radiada pela fonte sonora;  $\tilde{P}(\vec{r})$  é a amplitude complexa da pressão sonora no ponto  $\vec{r}$  e para a frequência  $\omega$ ;  $\rho_0$  é a densidade do ar em [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]; e  $q(\vec{r}_0)$  é um termo que representa a radiação da fonte posicionada em  $\vec{r}_0$ , podendo ser representado a partir de uma combinação linear de todos os modos da sala. Com essas considerações, é possível demonstrar que:

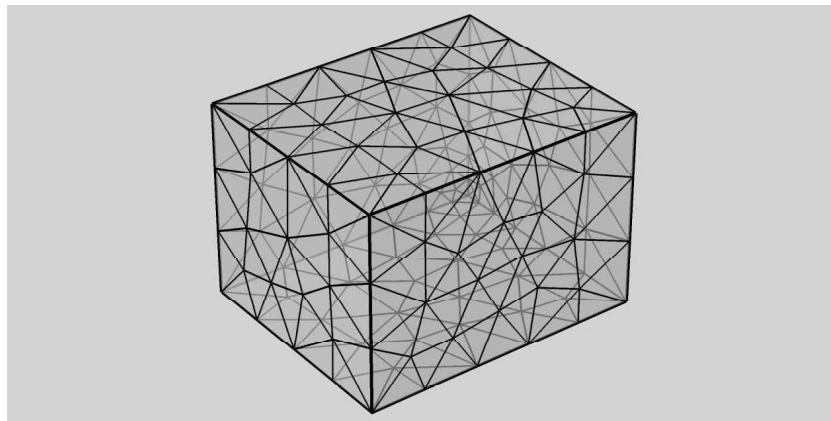
$$\tilde{P}(\vec{r}, \vec{r}_0) = \frac{j\omega \rho_0 \tilde{Q}(\omega)}{V} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tilde{\Psi}_n(\vec{r}) \tilde{\Psi}_n(\vec{r}_0)}{k_0^2 - k_n^2 - 2jk_n \frac{\eta}{c_0}}, \quad (3.9)$$

em que  $Q(\omega)$ , é a amplitude complexa da velocidade de volume da fonte em  $[\text{m}^3/\text{s}]$ ;  $k_n$  é o número de onda do  $n$ -ésimo modo.  $\eta = 6,91/T_{60}$  é um termo de amortecimento associado ao tempo de reverberação.  $\psi(\vec{r})$  e  $\psi(\vec{r}_0)$  representam as formas modais associadas ao receptor e a fonte, respectivamente.

### 3.5 MODELO COMPUTACIONAL (MCO) PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS

O Método de Elementos Finitos (FEM), sigla que surge do nome em inglês *Finite Element Method*, é um método para resolver equações diferenciais, que consiste em discretizar o sistema analisado em vários pequenos elementos com geometria conhecida. Os elementos possuem nós nos quais quantidades de interesse serão calculadas. Às superfícies dos elementos e aos nós podem-se aplicar condições de contorno desejadas (e.g. impedância de superfície).

Figura 3.6 – Exemplo de malha tetraédrica criada com *software* de elementos finitos.



Fonte: Arquivo pessoal.

O volume da sala é dividido em pequenos elementos e o campo de pressão pode então ser expresso, como uma combinação linear, da função de forma polinomial ( $N$ ) e dos valores discretos de pressão modal, conforme a equação:

$$p(x) = \sum_{i=1}^m N_i \Phi(x), \quad (3.10)$$

em que  $N_i$ , é a função de forma associada ao  $i$ -ésimo nó e  $\Phi(x)$  é o valor aproximado de pressão naquele nó. Incorporando a aproximação devido a Equação (3.10), na equação integral de Galerkin, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$[K - j\rho_0\omega C - 2\omega^2 M](p) = j\rho_0\omega(F), \quad (3.11)$$

em que são introduzindo os conceitos de massa acústica ( $M_{ij}$ ), rigidez acústica ( $k_{ij}$ ), amorteci-

mento acústico ( $C_{ij}$ ) e força acústica ( $F_j$ ), dados pelas seguintes equações:

$$K_{ij} = \int_V \nabla N_i \nabla N_j, dV \quad (3.12)$$

$$M_{ij} = \int_V \frac{N_i N_j}{e^2} dV, \quad (3.13)$$

$$C_{ij} = \int_{s_3} N_i N_j A_n dS, \quad (3.14)$$

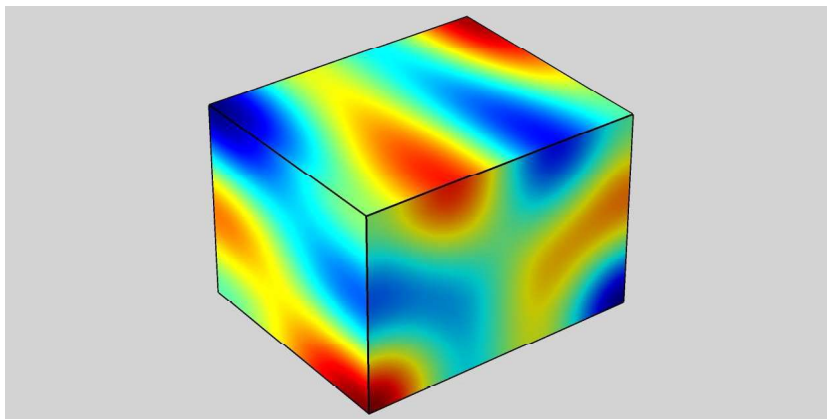
$$F_{ij} = \int_{s_2} N_i N_j V_n dS. \quad (3.15)$$

De modo similar ao problema dinâmico estrutural, a extração de autovalores ( $\omega_i$ ) e autovetores ( $\Phi_i$ ) reais é possível fazendo-se C e F nulos na Equação (3.11), obtendo-se a seguinte equação:

$$[[K] - \omega^2 [M]] [p] = 0, \quad (3.16)$$

que aceita soluções não-nulas ( $p$ ) = ( $\Phi_i$ ) para valores da frequência  $\omega = \omega_i$  denominados de frequências de ressonâncias (GERGES, 2000). A Figura 3.6 mostra um exemplo de uma malha tetraédrica criada para uma análise em elementos finitos e a Figura 3.7 mostra a distribuição de pressão, de um modo acústico, encontrado por uma simulação que se utiliza do método de elementos finitos.

Figura 3.7 – Exemplo de campo de pressão calculado com FEM.



Fonte: Arquivo pessoal.

### 3.6 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO E IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE

Se uma onda plana atingir um plano infinito, uma onda refletida se originará do plano amplitude e fase diferem da onda incidente (KUTTRUFF, 2017; BRANDÃO, 2016). As mudanças de amplitude e fase que ocorrem durante a reflexão de uma onda são expressas pelo coeficiente de reflexão complexo, assim como mostra a equação:

$$V_p = |V_p| e^{i\varphi}. \quad (3.17)$$

O valor absoluto de  $V_p$ , bem como seu ângulo de fase ( $\varphi$ ), dependem da frequência e da direção da onda incidente. A intensidade de uma onda plana é proporcional ao quadrado da amplitude da pressão. Portanto, a intensidade da onda refletida é menor por um fator  $|V_p|^2$  do que a da onda incidente e a fração  $1 - |V_p|^2$  da energia incidente, é perdida durante a reflexão. Essa quantidade é chamada de coeficiente de absorção e dada por:

$$\alpha = 1 - |V_p|^2. \quad (3.18)$$

As propriedades acústicas de uma superfície são descritas pelos coeficientes de reflexão, coeficientes de absorção e impedâncias acústicas. Dentro do conceito de impedância acústica, dois tipos coexistem: a impedância acústica característica ( $Z_c$ ), que está ligada ao meio que o som se propaga e a impedância acústica de superfície ( $Z_s$ ), que é uma característica da relação existente entre a quantidade complexa da pressão sonora incidente ( $\tilde{p}_0$ ) sobre uma superfície e o valor complexo da velocidade de partícula, tomada na direção normal, ( $\tilde{u}_0$ ) na interface meio-superfície. A equação seguinte mostra essa relação:

$$Z_s = \frac{\tilde{p}_0}{\tilde{u}_0}. \quad (3.19)$$

Cada meio de propagação sonora possui sua impedância característica, que é definida pelo produto da densidade característica do meio  $\rho$ , que, para o ar é  $\rho_0 = 1,21 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  e a velocidade de propagação do som nesse meio ( $c$ ) que, para o ar é  $c_0 = 343 \text{ [m/s]}$  à uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Essa impedância característica pode ser calculada com a seguinte equação:

$$Z_c = \rho c. \quad (3.20)$$

A quantidade resultante da relação existente entre a impedância de superfície e a impedância característica do ar é chamada de impedância acústica de superfície normalizada, sendo seu valor descrito de forma adimensional ([-]) e calculada com a seguinte equação:

$$Z_{s,n} = \frac{Z_s}{\rho_0 c_0}. \quad (3.21)$$

Uma forma de quantificar uma impedância acústica de superfície é determinando a pressão sonora incidente e a velocidade de partícula na interface meio-superfície, resultantes da in-

teração entre um som e uma superfície. Assumindo uma onda plana incidente a um ângulo  $\theta$  em relação a normal, a impedância de superfície pode ser obtida em relação ao coeficiente de reflexão, pela seguinte equação:

$$\frac{Z_s}{\rho_0 c_0} \cos(\theta) = \frac{1 + V_p}{1 - V_p}. \quad (3.22)$$

Segundo (KUTTRUFF, 2017), uma maneira de correlacionar a impedância de superfície com o coeficiente de absorção de uma superfície, considerando ondas planas, é por meio da Equação 3.23 seguinte, onde o valor de  $(\theta)$  corresponde ao ângulo de incidência:

$$\alpha = \frac{4\text{Re}(Z_{s,n})\cos(\theta)}{|Z_{s,n}|^2\cos(\theta) + 2\text{Re}(Z_{s,n})\cos(\theta) + 1}. \quad (3.23)$$

O autor (PAPADAKIS, 2017), em seu trabalho, relaciona o coeficiente de absorção acústica com a impedância de superfície com base na Equação 3.24. Para o uso dessa equação deve ser considerada que a impedância acústica é independente do ângulo de incidência e que as ondas incidem sobre a superfície no ângulo  $\theta = 0$ ,

$$Z_s = \rho_0 c_0 \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \alpha}}. \quad (3.24)$$

Entretanto, a realidade é que as ondas incidentes podem assumir diferentes ângulos de incidência e a Equação 3.25 tenta reproduzir de forma mais fiel a existente entre coeficiente de absorção por incidência difusa e impedância de superfície,

$$Z_s = \frac{\rho_0 c_0}{\cos(\theta)} \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \alpha}}. \quad (3.25)$$

### 3.6.1 Formas de determinar a impedância de superfície ( $Z_s$ )

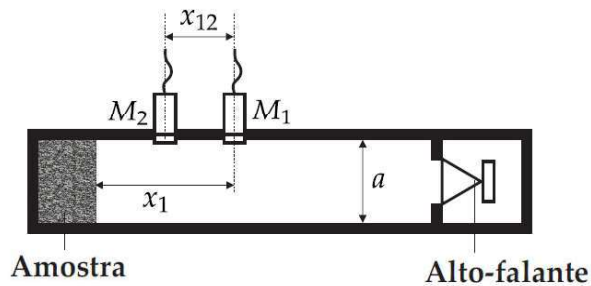
Duas formas de obter os valores referentes as impedâncias de superfície de um material, estão descritos nas normas Internacionais ISO 10354-1:1996 - *Acoustics Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 1: Method using standing wave ratio* (ISO:10354-1, 1996) e na sua segunda parte ISO-10354-2:1998 *Acoustics Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 2: Transfer-function method* (ISO:10354-2, 1996). A primeira delas orienta sobre a obtenção de  $Z_s$ , utilizando-se de um tubo de dimensão conhecida em que, em uma das extremidades (terminação rígida) é alocada uma amostra do material a ser analisado e, na outra extremidade, é alocado um dispositivo de reprodução sonora (alto-falante). Essa metodologia faz-se valer do campo acústico formado pelas ondas planas incidentes e refletidas dentro do tubo, que geram uma onda estacionária. Por meio de microfones instalados no tubo, os sinais senoidais emitidos pelo alto falante são captados pelos microfones e posterior processamento, pode-se obter os



módulos dos coeficientes de reflexão. Porém essa metodologia de obtenção é temporalmente custosa e reque que tubo seja muito longo para se operar em faixas de frequência muito baixas (p. ex.,  $L > 2,70$  [m]) para medir a 100 Hz. A segunda metodologia será mostrada com mais detalhes na subseção seguinte.

A segunda parte da norma (a ISO-10354-2:1998) orienta sobre a utilização de ruídos de banda larga. A montagem do aparato de medição pode ser visto na Figura 3.8. Ao alto-falante presente no aparato, é fornecido um sinal, que idealmente deve ter a magnitude do espectro uniforme, um ruído branco ou uma varredura de senos, por exemplos. As ondas que são emitidas pelo alto-falante, podem ser consideradas planas, a uma certa distância do mesmo e, a Função Resposta em Frequência (FRF) entre os microfones (Figura 3.8), é usada para calcular a impedância acústica de superfície da amostra por incidência normal. A medição é relativamente rápida e requer menores dimensões de tubo, se comparados com a metodologia descrita na parte 1 da norma.

Figura 3.8 – Representação de um corte longitudinal mostrando a montagem de um tubo de impedância.



Fonte: Retirado de (BRANDÃO, 2016).

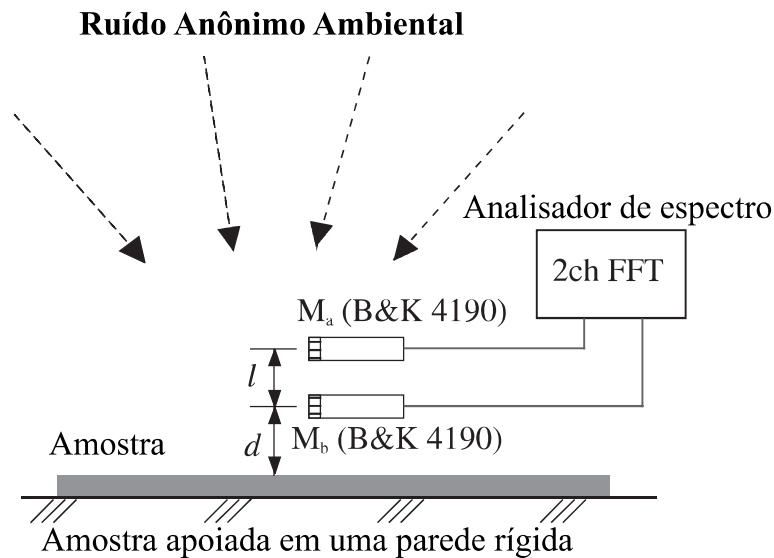
Os princípios matemáticos para a obtenção dos coeficientes de absorção e impedância, também estão descritos na norma ISO-10354-2:1998. Sendo as amplitudes complexas das pressões sonoras nos microfones  $M_1$  e  $M_2$  descritas respectivamente como  $\tilde{P}_1$  e  $\tilde{P}_2$  e a FRF entre eles como  $H(f) = \tilde{P}_1/\tilde{P}_2$ , o coeficiente de reflexão é dado por:

$$V_p = \frac{H(f) - e^{-jk_0x_{12}}}{e^{jk_0x_{12}} - H(f)}. \quad (3.26)$$

A caracterização das impedâncias de superfície e dos coeficientes de absorção dos materiais, tem sua importância na acústica de salas, na previsão do campo acústico de um ambiente em projetos e na adequação dos ambientes já construídos. Segundo (TAKAHASHI; OTSURU; TOMIKU, 2003), em particular, a impedância da superfície dos materiais é indispensável para prever campos sonoros em salas com métodos numéricos. Portanto, numerosos métodos foram proposto para medir as características de absorção dos materiais. No entanto, alguns problemas permanecem: por exemplo, limitação do método em baixas frequências, medição de materiais

de fraca absorção acústica, inúmeros e complicados equipamentos usados *in situ*, posicionamento da fonte sonora, microfones, amostra, etc. Devido a esses fatos o autor propõe, uma técnica de medição que é baseada na medição da função de transferência de pressão entre dois microfones usando um analisador de espectro.

Figura 3.9 – Representação da microfonação segundo a técnica de medição em situ.



Fonte: Adaptado de (TAKAHASHI; OTSURU; TOMIKU, 2003).

A Figura 3.9 (retirada do artigo do autor) mostra que dois microfones em \$M\_a\$ e \$M\_b\$. A distância \$d\$ da superfície do material é de cerca de 10 [mm]; o espaço \$l\$ entre dois microfones é de 13 [mm]. A função de transferência \$H\_{ab}(\omega)\$ entre \$p\_a(\omega)\$ e \$p\_b(\omega)\$ em \$M\_a\$ e \$M\_b\$ é medida por meio de um analisador FFT. Com a suposição de onda plana e incidência normal, a impedância de superfície normalizada é dada como,

$$Z(\omega) = \frac{H_{ab}(\omega)(1 - e^{2jk(l+d)}) - e^{jkl}(1 - e^{2jkd})}{H_{ab}(\omega)(1 + e^{2jk(l+d)}) - e^{jkl}(1 + e^{2jkd})}, \quad (3.27)$$

em que \$k\$ é o número de onda. Nesta técnica, uma característica distintiva é que o ruído ambiental existente no campo sonoro é empregado como fonte e fundamentalmente, um alto-falante não é necessário. Os autores chamam esse ruído de "ruído ambiental anônimo", que indica que o ruído não excita modos distintos.

### 3.7 PARÂMETROS OBJETIVOS

Esta seção descreve a cerca dos parâmetros acústicos objetivos usados neste trabalho. Segundo (BRANDÃO, 2016), um parâmetro objetivo é um número que visa atribuir um aspecto quantitativo a uma sensação subjetiva.

### 3.7.1 Tempo de reverberação (TR)

O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para o nível de pressão sonora em uma sala decair em 60 dB em relação ao nível de pressão sonora em seu estado estacionário. Isso representa uma mudança na intensidade do som de 60 dB, (EVEREST, 2001). Este é o mais famoso dos parâmetros objetivos e o mais antigo também, (BRANDÃO, 2016). Uma das mais consagradas formas de se calcular o tempo de reverberação de uma sala é em posse da Equação (3.28), obtida pelos experimentos e estudos de Wallace Sabine. Nessa equação  $V$  representa o volume da sala,  $S$  representa a área superficial das superfícies internas da sala e  $\tilde{\alpha} = \sum S_i \alpha_i / S$  representa uma média ponderada dos coeficientes de absorção das superfícies da sala,

$$T_{60,S} = \frac{0,161.V}{S.\tilde{\alpha}}. \quad (3.28)$$

Ao incluir o termo que representa o coeficiente de absorção sonoro do ar ( $m$ ), a equação para o cálculo do tempo de reverberação de Sabine ( $T_{60,S}$ ) assume seguinte a forma:

$$T_{60,S} = \frac{0,161.V}{S.\tilde{\alpha} + 4mV}. \quad (3.29)$$

Posteriormente a Sabine, outros autores propuseram equações diferentes para o cálculo do tempo de reverberação de uma sala. O equacionamento proposto por Sabine tende a um valor finito dado por  $T_{60,S} = 0,161V/S$  e no entanto, a medida que o coeficiente de absorção médio tende a 1 o tempo de reverberação deveria tender para zero. Assim, por volta de 1930 surge a Equação 3.30 proposta por Eyring (já incluído o termo de absorção do ar  $m$ ):

$$T_{60,E} = \frac{0,161.V}{-S.\ln(1 - \tilde{\alpha}) + 4mV}. \quad (3.30)$$

### 3.7.2 Medição do Tempo de reverberação (TR)

A partir da definição de tempo de reverberação, sabe-se que esse parâmetro mede o tempo necessário para que o nível de pressão sonora (NPS), da resposta ao impulso, decaia 60 dB, em relação ao seu valor máximo (dado para o estado estacionário ou som direto). Porém, para estimar o tempo de reverberação a partir da resposta ao impulso é necessário o uso do artifício chamado Integral Cumulativa Invertida (ICI), definida inicialmente por Manfred Schroeder, e mostrana nesta pesquisa pela equação seguinte:

$$E(t) = 10 \log \left( \int_{\infty}^t h_{\tau}^2(\tau) d\tau \right). \quad (3.31)$$

A integral cumulativa invertida pode apresentar comportamentos não lineares de decaimento em determinadas circunstâncias, principalmente quando existe elevado ruído de fundo

em medições acústicas. Nessas condições, faz-se necessária a utilização de uma reta ajustada para parte linear do decaimento. Essa reta ajustada, definida pela Equação (3.32), pode ser usada para definir o tempo de reverberação, por meio de uma extrapolação dos tempos necessários para que a energia sonora decaia entre -5 [dB] e -25 [dB] ou -35 [dB], os respectivos  $T_{20}$  e  $T_{30}$ :

$$De_{\log}(t) = a_1 t + a_2. \quad (3.32)$$

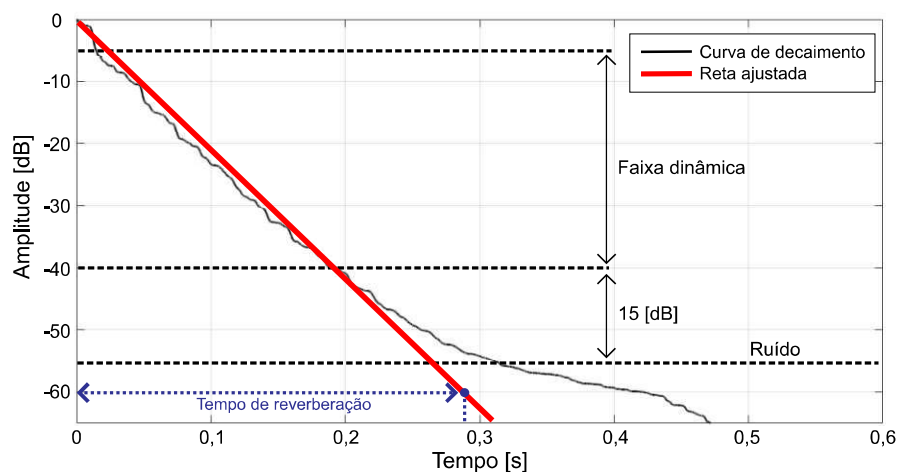
Geralmente, a medição do tempo de reverberação, inicia-se a -5 [dB] do estado estacionário da curva de decaimento, desprezando a faixa das primeiras reflexões e, idealmente deve ir até 15 dB acima do ruído de fundo, limitando a faixa dinâmica de medição. Assim  $T_{20}$  e  $T_{30}$  são definidos pela seguintes equações:

$$T_{20} = 60 \frac{t_{-25} - t_{-5}}{5 - (-25)}, \quad (3.33)$$

$$T_{30} = 60 \frac{t_{-35} - t_{-5}}{5 - (-25)}. \quad (3.34)$$

A Figura 3.10, mostra a reta ajustada aplicada a uma curva decaimento obtida pela integral cumulativa invertida, e como se comporta a faixa dinâmica de avaliação o tempo de reverberação.

Figura 3.10 – Figura representando uma curva de decaimento e sua faixa dinâmica.



Fonte: Arquivo pessoal.

É importante ressaltar que, para uma mesma posição de fonte sonora, receptores posicionados em diferentes locais de uma sala, irão apresentar curvas de decaimento diferentes. Conseqüentemente, eles irão apresentar diferentes tempos de reverberação. O *just noticeable difference* (jnd) de cada parâmetro objetivo define a faixa de variação acima da qual tem-se uma percepção sonora da mudança. Para o TR o jnd é de 5 [%].

### 3.7.3 Early Decay Time (EDT)

De forma similar ao  $T_{20}$  e  $T_{30}$  o EDT (Tempo de decaimento precoce, em tradução literal) é uma medida do tempo de reverberação, porém levando-se em conta uma faixa dinâmica que vai do valor máximo da reta ajustada 0 dB até -10 dB. Essa faixa dinâmica considera os efeitos das primeiras reflexões. O EDT foi sugerido inicialmente como um parâmetro que se correlacionava melhor com a experiência subjetiva de reverberação. A equação para o cálculo do EDT é mostrado pela Equação (3.35), seguinte:

$$\text{EDT} = 60 \frac{t_{(-10)} - t_0}{0 - (-10)}. \quad (3.35)$$

O EDT é bastante influenciado pelos níveis relativos e distribuição temporal das primeiras reflexões. Dessa forma, esse parâmetro é consideravelmente dependente da configuração fonte-receptor na sala, o que faz com que ele tenha maior variação ao longo do recinto que o  $T_{60}$ . No entanto o jnd para o EDT, também é de 5%. Essa variação, proveniente da configuração fonte-receptor pode ser ainda mais acentuada para as baixas frequências, em virtude de as primeiras reflexões serem ainda mais erráticas nessas faixas de frequência.

### 3.7.4 Clareza e Definição

Os termos definição e clareza, estão associados a parâmetros acústicos que descrevem balanços energéticos da resposta ao impulso. O parâmetro clareza é uma relação entre a energia contida no intervalo de tempo (limitado entre 0 e 50 ou 80 milissegundos) que compreende a chegada do som direto e as primeiras reflexões ao receptor e, a energia contidas nas reflexões que chegam ao receptor, após esse intervalo de tempo (cauda reverberante). O uso de dois intervalos de tempo (0-50 e 0-80 milissegundos) está, por sua vez, associado à avaliação que será feita. Para avaliar salas destinadas a fala usa-se 50 [ms] e para salas destinadas a música usa-se o valor de 80 [ms]. O parâmetro clareza é expresso em decibel [dB], Assim, tem-se que:

$$C_{50} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{0,05} h^2(t) dt}{\int_{0,05}^{\infty} h^2(t) dt} \right], \quad (3.36)$$

$$C_{80} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{0,08} h^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} h^2(t) dt} \right]. \quad (3.37)$$

De maneira análoga, o parâmetro definição também expressa uma relação energética. Porém, essa relação se dá entre a energia contida no intervalo de tempo correspondente as primeiras reflexões e a energia contida em toda a resposta ao impulso e, essa relação é expressa

em escala linear. Dessa forma:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}, \quad (3.38)$$

$$D_{80} = \frac{\int_0^{0,08} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}. \quad (3.39)$$

Valores positivos ( $> 0$  [dB]) para o parâmetro clareza indicam que a região das primeiras reflexões apresentam mais energia que o restante da resposta ao impulso (cauda reverberante). Valores negativos ( $< 0$  [dB]) para o parâmetro indicam que, existe mais energia na cauda reverberante da resposta ao impulso do que nas primeiras reflexões. Por sua vez, valores de definição acima de (0,5) indicam que a energia da resposta ao impulso está concentrada no intervalo de tempo das primeiras reflexões e, valores de definição abaixo de (0,5) indicam que a cauda reverberante possui mais energia.

Valores adequados de ( $C_{80}$ ) indicam que a execução rápida de notas musicais são facilmente compreendidas em uma sala. Já, valores adequados de ( $D_{50}$ ) podem indicar que existe uma boa inteligibilidade da fala em salas. Os parâmetros ( $C_{80}$ ) e ( $D_{50}$ ) são os mais comumente acionados quando estuda-se a relação sala-música e sala-fala, respectivamente.

Resumidamente, os parâmetros ( $D_{50}$ ) e ( $C_{80}$ ) descrevem uma relação de porcentagem ou acúmulo energético existente em frações iniciais da duração da resposta ao impulso, em função de toda, ou parte, da duração da resposta ao impulso de uma sala. Em salas com tamanhos reais, essas frações iniciais correspondem, respectivamente, aos 50 e 80 milissegundos iniciais da resposta ao impulso. Como toda a presente pesquisa, está fundamentada em avaliações de formas geométricas de salas, representadas em suas escalas reduzidas (proporção de redução de 1:8), essas frações iniciais de tempo, usadas no cálculo de ( $D_{50}$ ) e ( $C_{80}$ ), também sofreram uma redução em proporção de (1:8). Assim, foi mantida a nomenclatura dos parâmetros com ( $D_{50}$ ) e ( $C_{80}$ ), porém eles representam, na verdade as relações energético-temporais de ( $D_{50/8}$ ) e ( $C_{80/8}$ ), ou ainda ( $D_{6,25}$ ) e ( $C_{10}$ ).

### 3.7.5 Tempo central ( $T_s$ )

O  $T_s$  [s] pode ser interpretado como o centro de gravidade da energia de uma resposta ao impulso. A sua vantagem em relação aos parâmetros clareza e definição está no fato de não existir um limite abrupto entre as primeiras reflexões e a cauda reverberante. Dessa forma, a equação que define esse parâmetro é

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}. \quad (3.40)$$

Um valor pequeno de  $T_s$  corresponde a uma resposta ao impulso em que grande parte

de sua energia está concentrada nas primeiras reflexões e, valores elevados de  $T_s$  indicam que a cauda reverberante possui mais energia.

### 3.8 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO AMOSTRAL DE PEARSON

O coeficiente de correlação amostral de Pearson, segundo (MARTINS, 2014), representado por  $r$ , é uma medida da direção e do grau de associação linear entre duas variáveis. Se representarmos por  $(x,y) = (X_i, Y_i)$ , com  $i = 1, \dots, n$ , uma amostra de dados bi-variados, o coeficiente de correlação amostral de Pearson calcula-se a partir da seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.41)$$

em que,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.42)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.43)$$

ou seja, o coeficiente de correlação  $r$  para o par de variáveis  $(x,y)$  é o quociente entre a covariância amostral das variáveis  $x$  e  $y$  e o produto dos desvios padrões respetivos:

$$r = \frac{\text{Cov}(x,y)}{s_x s_y}. \quad (3.44)$$

Ainda segundo a autora, o coeficiente de correlação só mede a intensidade com que duas variáveis se associam e, quanto maior for o valor de  $r$  em módulo, maior será o grau de associação linear entre as variáveis. (FIGUEIREDO; JÚNIOR, 2009) apresenta em seu trabalho uma classificação, oriunda do trabalho de outros autores, em que, dependendo do valor de  $r$  existe um grau de associação. Se valor apresentado para  $r$  está entre (0,10 até 0,30) o grau de associação é considerado *fraco*. Se o valor de  $r$  está entre (0,40 até 0,6) é considerada uma associação *moderada* e se o valor de  $r$  estiver entre (0,70 até 1) o grau de associação entre as variáveis é considerada *forte*.

### 3.9 OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE VOLUME NA SAÍDA DE TUBOS

Para que a propagação sonora possa ser considerada plana, em um duto, existindo apenas propagação sonora ao longo da direção longitudinal do tubo, algumas premissas devem ser adotadas. Em seu trabalho, (ROSSETTO, 2001) mostra que o primeiro modo não planar que ocorre na frequência  $f_u$  que pode ser calculado pela equação:

$$f_u = \frac{101}{a}, \quad (3.45)$$

em que  $a$  representa o raio do tubo em metros.

A equação da onda de Helmholtz, em coordenadas cartesianas, pode ser escrita através da equação que se segue

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \kappa_0^2 p = 0, \quad (3.46)$$

em que  $p$  é a pressão sonora em Pascal [Pa] e  $\kappa_0 = \omega/c_0$  é o número de onda [1/m], assumindo que o meio condutor seja o ar e que a velocidade do som no ar é  $c_0 = 343$  [m/s]. Adotando-se as premissas, assumindo que a onda sonora se propaga de forma plana, sem perdas no interior do tubo e assumindo-se também a linearidade acústica, a equação da onda assume a forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (3.47)$$

Adotando uma solução harmônica do tipo  $p(x,t) = p(x)e^{j\omega t}$  chegamos a equação de Helmholtz em 1D:

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + k_0^2 p(x) = 0. \quad (3.48)$$

A solução geral da equação de Helmholtz em 1D é expressa por:

$$p(\omega) = A(\omega)e^{-jk_0x} + B(\omega)e^{jk_0x}. \quad (3.49)$$

Supondo a referência ( $x = 0$ ) no microfone 1 e sendo  $\Delta_1$  a distância entre os microfones Figura (3.11) a pressões sonoras nos microfones 1 e 2 serão respectivamente:

$$p_1(\omega) = A(\omega) + B(\omega), \quad (3.50)$$

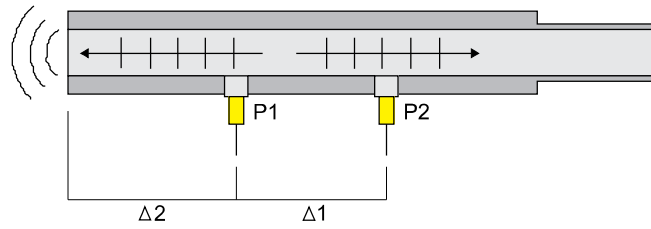
$$p_2(\omega) = A(\omega)e^{jk_0\Delta_1} + B(\omega)e^{-jk_0\Delta_1}. \quad (3.51)$$

As amplitudes de onda são calculadas por:

$$B(\omega) = \frac{p_1 e^{jk_0\Delta_1} - p_2(\omega)}{2j \sin(k_0\Delta_1)}, \quad (3.52)$$



Figura 3.11 – Esquema de aparato usado para medição da velocidade de volume de sons na saída de tubos.



Fonte: Adaptado de (ROSSETTO, 2001).

$$A(\omega) = \frac{p_2(\omega) - p_1 e^{-jk_0 \Delta_1}}{2j \sin(k_0 \Delta_1)}. \quad (3.53)$$

Sendo  $\Delta_2$  a distância do microfone 1 até a saída do tubo, a pressão sonora na saída do tubo pode ser deduzida através de:

$$p_{\text{saída}}(\omega) = A(\omega)e^{-jk_0 \Delta_2} + B(\omega)e^{jk_0 \Delta_2}. \quad (3.54)$$

A velocidade de partícula na saída do tubo, por sua vez, pode ser encontrada através da derivada da equação anterior:

$$u(\omega) = \frac{1}{\rho c_0} [A(\omega)e^{-jk_0 \Delta_2} - B(\omega)e^{jk_0 \Delta_2}]. \quad (3.55)$$

Uma vez encontrada a velocidade de partícula  $u(\omega)$  no extremidade final do tubo, pode-se calcular a velocidade de volume  $Q(\omega)$ , que será inserida dentro do modelo em escala reduzida, multiplicando esse valor pela área da seção transversal interna da saída tubo  $Q(\omega) = u(\omega)2\pi a^2$ .



## 4 AS FORMAS GEOMÉTRICAS ESTUDADAS E, A ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO, DOS MODELOS DE ANÁLISE

### 4.1 AS FORMAS GEOMÉTRICAS ESTUDADAS

A presente pesquisa compara duas formas distintas de avaliar as baixas frequências em 12 formas geométricas distintas de possíveis formatos de salas acústicas. Um dos 12 modelos é uma sala de referência. Esta sala, com formato retangular, tipo "caixa de sapato", possui as dimensões internas: comprimento  $L_x = 4,06$  [m], largura  $L_y = 3,36$  [m] e altura de  $L_z = 2,80$  [m]. Sua área em planta é de  $13,64$  [m<sup>2</sup>] e seu volume é de  $39,20$  [m<sup>3</sup>]. O volume desta sala se enquadraria, segundo (TICHY, 2014), em volumes apresentados por salas típicas de pequenos estúdios e salas de ensaio (entre  $5$  e  $50$  m<sup>3</sup>). Assim, a partir desta sala tipo caixa de sapato, foram criadas 11 outras formas geométricas, não muito diferentes em área (planta) e volume (diferenças não superiores à 11%) do modelo base "caixa de sapato". Para cada uma das outras 11 formas geométricas foi imposta alguma alteração, seja essa alteração a inclinação das paredes laterais ou a inserção de um material absorvedor acústico. A única característica geométrica que não foi alterada nos 11 modelos criados foi a altura. Piso e teto de todas as formas geométricas estudadas são paralelos entre si, de maneira que o volume das salas origina-se de uma extrusão do formato de sua área de piso.

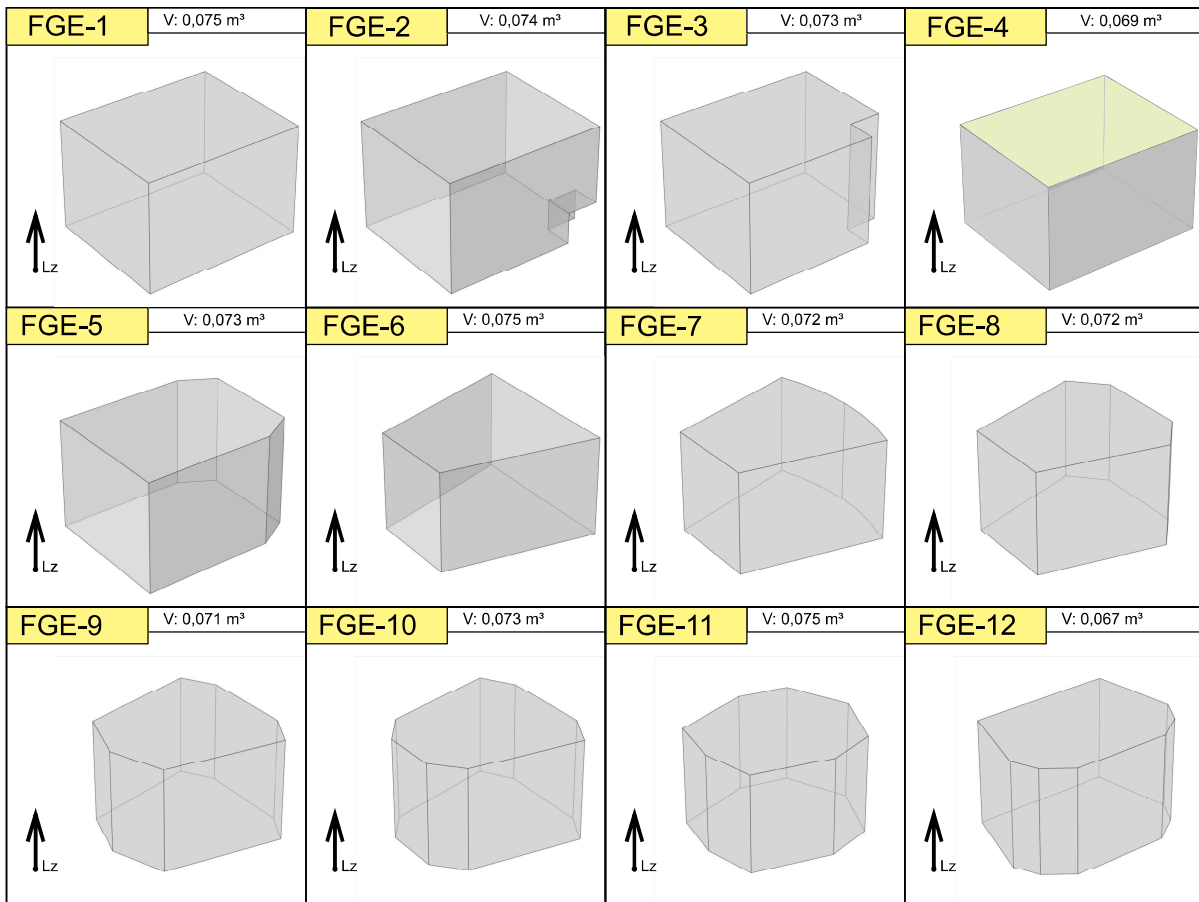
Estas 12 formas geométricas serão referenciadas a partir desse ponto como FGE, sendo FGE representativo de "forma geométrica", seguido de um numeral, que irá identificar a forma geométrica da sala. Assim, para a forma geométrica base tipo "caixa de sapato" a referência será FGE-1. A Figura 4.1 mostra as 12 FGEs em suas vistas isométricas.

A primeira forma de avaliação (quando possível) das 12 possíveis formas geométricas de salas, é por meio de medições acústicas. A segunda forma de avaliação das FGEs é com o uso de modelos computacionais em *software* que usa o métodos de elementos finitos. Esses modelos computacionais serão referenciados a partir desse ponto por MCO, de modelo computacional, seguido pelo numeral que irá referenciar qual é a forma geométrica que esse modelo está representando. O modelo computacional criado para representar o formato "caixa de sapato", por exemplo, é referenciado como MCO-1.

A terceira metodologia é a elaboração de modelos analíticos de cálculo, que descrevem o campo acústico das 12 FGEs, após uma simplificação geométrica em que, salas não retangulares são aproximadas geometricamente para salas retangulares. Os 12 modelos analíticos elaborados, serão referenciados, a partir desse ponto, como MAN, de modelo analítico, seguido do numeral que indica qual forma geométrica de sala ele representa. MAN-1, representará o modelo analítico criado para a forma geométrica FGE-1.

Convencionou-se que os 12 modelos estudados teriam as mesmas características de

Figura 4.1 – Representação dos volumes das formas geométricas estudadas.



Fonte: Arquivo pessoal.

absorção acústica para as baixas frequências. O que vai diferenciar em cada metodologia é como essa informação é inserida no modelo respectivo. Nos modelos computacionais (MCOs), essa informação foi inserida sob a forma de impedância de superfície. Nos modelos analíticos (MANs), essa informação foi inserida sob a forma do termo  $\eta$  presente na Equação (3.9). Estando todos os modelos criados com volumes e absorção acústica similares, é possível avaliar a influência que as geometrias das salas exercem sobre essas metodologias e qual é a mais indicada para descrever o comportamento acústico em baixas frequências de salas com pequenas dimensões.

Medições em um modelo físico de escala reduzida, em proporção de redução de (1:8), foram tomadas para obter os dados de entrada, que foram usados nos modelos computacionais e analíticos. As medições tomadas serviram também para avaliar a convergência de resultados simulados, e validar os MCOs e MANs frente os resultados obtidos nas medições.

A forma geométrica escolhida para ser representada por um modelo físico foi a FGE-1. A escolha por FGE-1 se dá por ela possuir um formato retangular, com solução MAN e MCO de fácil comparação. Essa escolha exclui a influência, em uma não convergência de resultados, o fato de o formato da sala passar por um processo de simplificação geométrica, antes de ser

avaliado em MAN-1. Porém, a construção e posterior medição de um modelo físico em tamanho real com as dimensões de FGE-1, embora que pequenas, se comparadas a de grandes teatros ou auditórios, demandaria um recurso inexistente para essa pesquisa. Assim, optou-se por avaliar FGE-1 e as outras 11 possíveis formas geométricas de salas, em suas formas reduzidas, em escala de redução de (1:8). Dessa forma a construção de um, ou mais, modelos físicos para validação dessas metodologias demandaria menos recurso. Os modelos físicos construídos, a partir desse ponto, serão referenciados como MFI, de modelo físico, seguido do numeral que corresponde a forma geométrica de sala avaliada. Para o modelo físico da FGE-1 teremos o respectivo MFI-1. As dimensões internas do MFI-1 construído são:  $L_x = 0,508$  [m],  $L_y = 0,420$  [m] e  $L_z = 0,350$  [m]. Seu volume interno é  $V = 0,075$  [m<sup>3</sup>] e a soma das áreas das superfícies internas é de  $S = 1,079$  [m<sup>2</sup>].

Sendo o recurso existente para a pesquisa limitado, optou-se por construir o MFI-1, com um material relativamente barato e fácil de trabalhar: chapas de MDF (*Medium-Density Fiberboard*). Assim, foi convencionado que todas as 12 formas geométricas tinham, a mesma configuração de absorção acústica que o MDF. Ou seja, a absorção acústica das paredes, pisos e tetos, das 12 formas geométricas, terão inicialmente, a mesma absorção acústica que as chapas de MDF, em suas bandas de frequências correspondentes. Os coeficientes de absorção acústica do MDF, usados nessa pesquisa estão inicialmente estimados na Seção 4.2.3 e posteriormente caracterizados com base nos dados obtidos na medição do MFI-1, na Seção 4.3.

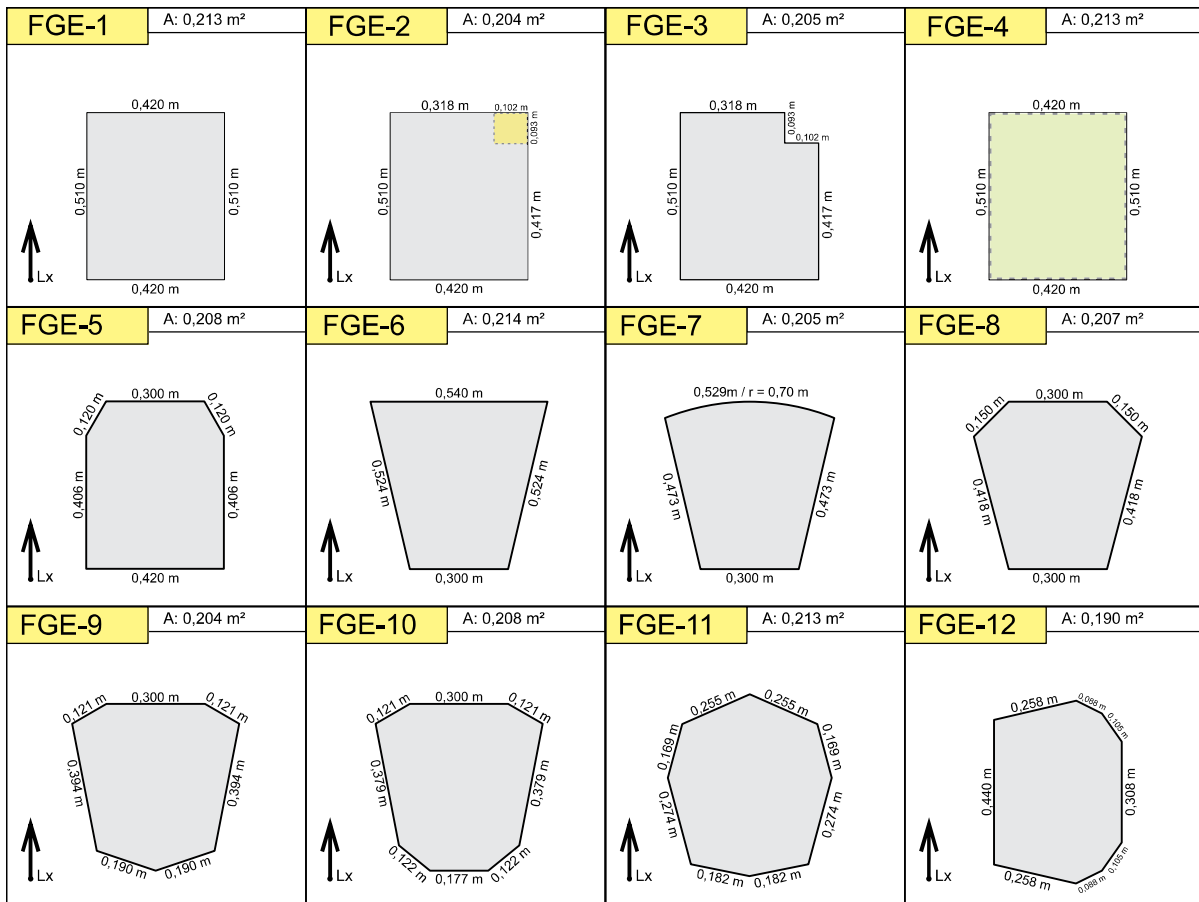
A Figura 4.1 mostra em suas vistas isométricas, as 12 formas geométricas de salas criadas (em escala reduzida) para essa pesquisa, bem como seus respectivos volumes, descritos na figura em metros cúbicos [m<sup>3</sup>]. A Figura 4.2 por sua vez, mostra em planta, as formas geométricas mostradas na Figura 4.1 em perspectiva volumétrica. A Figura 4.2 mostra ainda, as áreas de piso em [m<sup>2</sup>], que cada uma dessas formas geométricas de salas possuem.

Outros dois modelos físicos foram construídos/elaborados de maneira a reaproveitar os materiais empregados na construção do MFI-1. O primeiro deles é o MFI-2, referente a FGE-2. Nesse reaproveitamento, uma geometria cúbica, feita de MDF, é inserida em dos vértices do MFI-1. O segundo deles é o MFI-4, representativo da FGE-4, em que uma chapa de melamina, com 2,5 [cm] de espessura é fixada em toda a área do teto do MFI-1, configurando um novo campo acústico e conseqüentemente a nova forma geométrica avaliada. Os dados de absorção, da melamina são apresentados na Seção 5.2.3 do presente trabalho. Os resultados obtidos na medição do MFI-4 construído/reaproveitado, também servirá como forma de validação dos métodos e dados de entrada usados nos modelos computacionais e analíticos empregados nesta pesquisa. O Quadro 4.1 mostra um resumo das formas geométricas estudadas e quais os metodologias usadas para descreve-las.

Os próximos capítulos irão apresentar, com mais detalhes, a construção dos modelos físicos, suas características, os instrumentos usados nas medições acústicas e os resultados obtidos nessas medições. Os próximos capítulos também tratarão, de como foram concebidos os modelos computacionais e os modelos analíticos usados nessa pesquisa, bem como os resulta-

dos obtidos com o uso dessas metodologias, para as diferentes formas geométricas estudadas.

Figura 4.2 – Representação das áreas (em planta), das formas geométricas estudadas.



Fonte: Arquivo pessoal.

Quadro 4.1 – Relação de modelos elaborados para descrever o comportamento acústico das respectivas formas geométricas.

FORMA GEOMÉTRICA	MODELOS CRIADOS		
FGE-1	MFI-1	MCO-1	MAN-1
FGE-2	MFI-2	MCO-2	MAN-2
FGE-3	*	MCO-3	MAN-3
FGE-4	MFI-4	MCO-4	MAN-4
FGE-5	*	MCO-5	MAN-5
FGE-6	*	MCO-6	MAN-6
FGE-7	*	MCO-7	MAN-7
FGE-8	*	MCO-8	MAN-8
FGE-9	*	MCO-9	MAN-9
FGE-10	*	MCO-10	MAN-10
FGE-11	*	MCO-11	MAN-11
FGE-12	*	MCO-12	MAN-12

Fonte: Arquivo pessoal.

## 4.2 O MFI-1 CONSTRUÍDO PARA REPRESENTAR A FGE-1

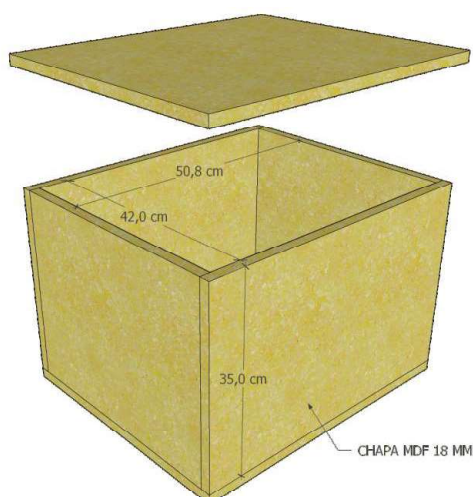
O modelo físico MFI-1 foi concebido para representar de maneira física a FGE-1. O MFI-1 foi construído com chapas de MDF (*Medium-Density Fiberboard*) que são placas de fibra de madeira de média densidade, com espessura de 18 mm e densidade de aproximadamente 715 [kg/m<sup>3</sup>]. O MFI-1 construído pode ser visualizado na Figura 4.3 e a representação de suas dimensões internas na Figura 4.4.

Figura 4.3 – Modelo físico MFI-1 construído.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.4 – Dimensões internas do modelo construído MFI-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

O MFI-1 foi concebido como um instrumento de validação dos outros modelos de análise. Existindo uma aproximação dos resultados encontrados na avaliação de MCO-1 e MAN-1 com os resultados obtidos na medição de MFI-1, podemos assumir que os modelos MCO-1 e

MAN-1 são representativos do comportamento do campo acústico do MFI-1. Um aspecto importante considerado na concepção da FGE-1, é o de que, as dimensões adotadas para  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  se enquadram nos critérios de boa distribuição modal.

#### 4.2.1 MFI-1 e os critérios de boa distribuição modal de Bolt

As dimensões escolhidas para a FGE-1 e conseqüentemente para modelos MFI-1, MCO-1 e MAN-1, além de serem compatíveis com um possível ambiente acústico (se consideradas as proporções de ampliação), estão fundamentadas nos critérios de uniformidade da distribuição dos modos no espectro. Este critério indica que, para a existência de uma boa distribuição modal e para que não haja o acúmulo modal em uma determinada frequência, as dimensões devem situar-se dentro da área destacada da Figura 3.5. Assim, assumindo que a maior dimensão do modelo em escala da sala é 0,51 [m] e a menor dimensão é 0,35 [m], obtêm-se a primeira relação de proporção, descrita nos critérios de Bolt como:

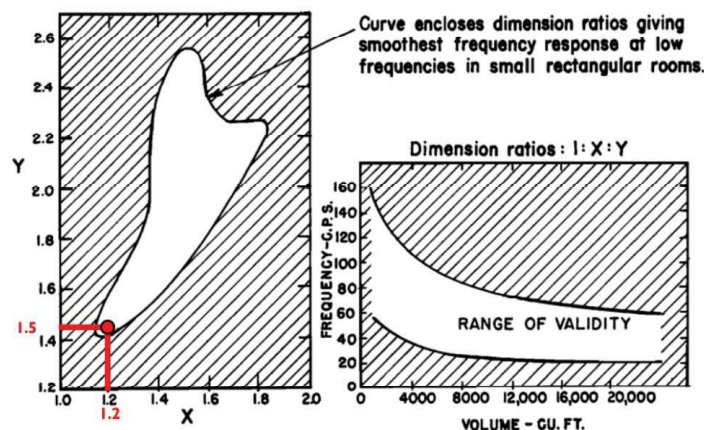
$$Y = \frac{L_x}{L_z} = \frac{0,51}{0,35} = 1,45. \quad (4.1)$$

Por sua vez assumindo a segunda maior dimensão da sala como 0,42 [m] e, novamente a menor dimensão de 0,35 [m], obtêm-se a segunda relação de proporção, descrita nos critérios de Bolt como:

$$X = \frac{L_y}{L_z} = \frac{0,42}{0,35} = 1,2. \quad (4.2)$$

Situando os valores das proporções calculadas na Figura 3.5, destaca-se que, de fato, as dimensões adotadas para a FGE-1 e por correspondência do seus modelos MFI-1, MCO-1 e MAN-1 estão de acordo com os critérios de Bolt.

Figura 4.5 – Proporções do modelo construído, segundo os critérios de Bolt.

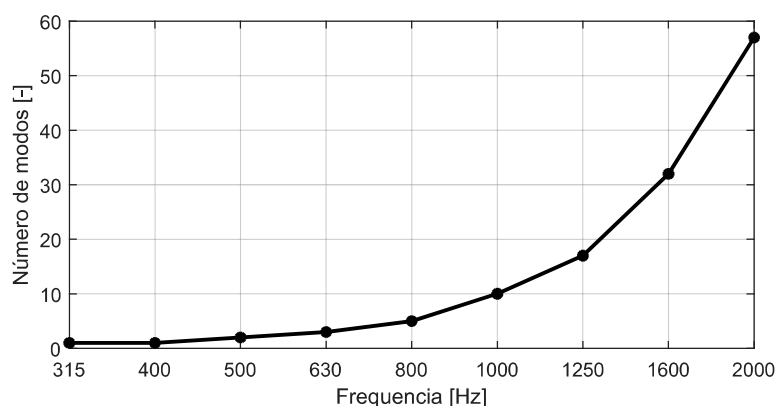




#### 4.2.2 O MFI-1 e os critérios de boa distribuição modal de Bonello

A Figura 4.6 apresenta o número de modos, calculados por banda de 1/3 de oitava, com o uso da Equação (3.7) para o MFI-1. Nessa figura é possível verificar o atendimento do primeiro critério de Bonello: o crescimento monotônico do número de modos por banda de frequência.

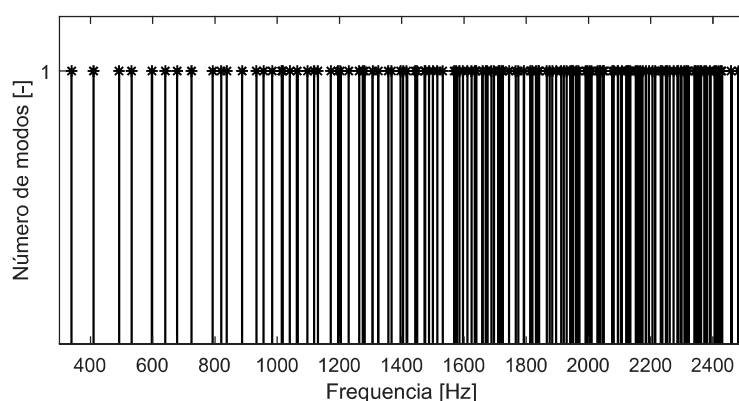
Figura 4.6 – Crescimento exponencial do número de modos em função da banda de frequência.



Fonte: Arquivo pessoal.

As figuras seguintes explicitam o atendimento do segundo critério de Bonello. Critério esse da não coincidência das frequências modais. Porém, para explicitar tais frequências, primeiramente houve a necessidade de calcular-las, com o uso da Equação (3.5). A Figura 4.7 mostra as frequências modais calculadas, dispostas em função de sua posição no espectro.

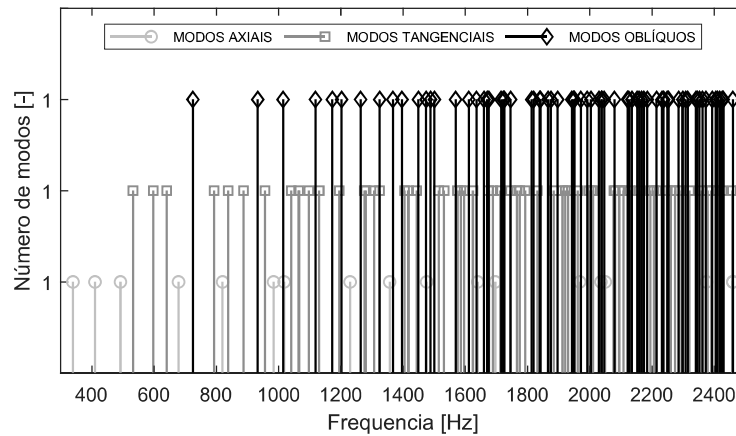
Figura 4.7 – Distribuição modal do MFI-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 4.8, por sua vez, mostra as frequências modais calculadas, dispostas em função de sua posição no espectro, separadas em função de sua forma modal. Na figura, os modos axiais, os modos tangenciais e os modos oblíquos podem ser visualizados separadamente. As linhas verticais nas presentes as figuras 4.6 e 4.7, indicam a presença de 1 modo por frequência modal.

Figura 4.8 – Distribuição modal por forma do MFI-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

O atendimento do segundo critério de Bonello é constatado na visualização das Figuras 4.7 e 4.8, porém, para as mais altas frequências mostradas na figura, não fica nítida a existência da não sobreposição de modos que, devido a resolução da imagem, sobrepõem as linhas verticais de identificação das frequências modais. Essa dúvida é esclarecida quando uma aproximação é feita sobre a região da Figura 4.8, ficando evidente dessa maneira que, mesmo aparentando existir uma sobreposição modal naquela região, a aproximação (*zoom*) mostra que as frequências não se sobrepõem. As frequências modais calculadas estão representadas nas Figuras 4.7 e 4.8, truncadas com limite superior em 2500 [Hz] (próxima da frequência de Schroeder inicialmente estimada na Seção 4.2.4). A Tabela 4.1 apresenta as primeiras 10 frequências modais calculadas e os seus índices modais correspondentes.

Tabela 4.1 – Frequências modais iniciais calculadas.

Frequência Modal [Hz]	Forma Moda	Índices Modais		
		$n_x$	$n_y$	$n_z$
339,58	Axial	1	0	0
409,93	Axial	0	1	0
491,91	Axial	0	0	1
531,04	Tangencial	1	1	0
596,61	Tangencial	1	0	1
640,33	Tangencial	0	1	1
675,18	Axial	2	0	0
723,87	Oblíquo	1	1	1
789,88	Tangencial	2	1	0
819,86	Axial	0	2	0

Fonte: Arquivo pessoal.

### 4.2.3 Estimativa do tempo de reverberação do MFI-1

O material usado na concepção do MFI-1 é o MDF de 18 mm de espessura e densidade de aproximadamente 715 [kg/m<sup>3</sup>]. O MDF é fabricado a partir de fibras de madeira, em geral madeira de pinus e/ou eucalipto, aglutinadas com resinas sintéticas por meio de temperatura e pressão e, com acabamento dado através de lixamentos e polimentos, para regularizar as chapas. Esse processo implica em diferentes configurações finais de material, dependendo do fabricante, processo de aglutinação, porcentagem e tipo da resina aplicada. Essa diferença por sua vez, pode resultar em diferentes coeficientes de absorção acústica. Assim, optou-se por buscar na literatura, coeficientes de absorção sonora representativos do MDF.

O autor (JEON et al., 2009) apresenta coeficientes de absorção de chapas de MDF com 15 mm de espessura e sem acabamento (pintura ou massa de acabamento). Os coeficientes de absorção, medidos em uma câmara reverberante, variam de  $\alpha = 0,04$  para 125 [Hz] até a  $\alpha = 0,18$ , para 4000 [Hz]. Assim, adotou-se como uma estimativa inicial de coeficiente de absorção médio global de  $\alpha_w = 0,11$ .

A partir dessa estimativa inicial de coeficiente de absorção, outras estimativas puderam ser feitas, como a estimativa inicial de tempo de reverberação. Utilizando para o cálculo, a Equação de Sabine mostrada na Equação 3.28, em que o valor adotado para  $S = 1,079$  [m<sup>2</sup>] e ( $\alpha = \alpha_w = 0,11$ ), obteve-se um tempo de reverberação global estimado em 0,10 [s]:

$$T_{60,S} = \frac{0,161 \cdot (0,0747)}{1,079 \cdot (0,10)} = 0,10s. \quad (4.3)$$

Essa estimativa inicial de tempo de reverberação foi feita para se avaliar o limite superior da faixa de frequência que será analisada na presente pesquisa. Como o objetivo da pesquisa é avaliar a região de frequências correspondente ao intervalo do primeiro modo e a Frequência de Schroeder, a estimativa do tempo de reverberação faz-se necessária para o cálculo dessa frequência.

### 4.2.4 Estimativa da frequência de Schroeder para MFI-1

A estimativa da frequência de Schroeder, com base no tempo de reverberação estimado  $T_{60,S} = 0,10$  [s] e com auxílio da Equação (3.4), indica uma frequência de aproximadamente  $f_S = 2332,38$  [Hz].

$$f_S = 2000 \sqrt{\frac{0,10}{0,0747}} = 2332,38\text{Hz}$$

Dessa forma, foi adotada a faixa de frequência de análise entre 20 [Hz] e o limite superior da banda de 1/3 de oitava da frequência central em 2000 [Hz] (aproximadamente 2250 [Hz]), para todas as abordagens usadas no presente estudo: MANs, MCOs e MFIs.

#### 4.2.5 O sinal de excitação

A norma (ISO:3383-2, 2009) *Acoustics - Measurement of roomacoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms* apresenta, em seu item 5.3.1 que, a resposta ao impulso de uma posição de fonte para uma posição de receptor em uma sala é uma quantidade bem definida, que pode ser medida de várias maneiras (por exemplo, usando tiros de pistola, impulsos de centelha de descarga elétrica, explosões de ruído, ou sinais *Maximum-Length Sequence* - MLS). Ainda no mesmo item, a mesma indica que, não é o objetivo excluir qualquer outro método que possa produzir a resposta correta ao impulso. Assim, para o sinal de excitação usado nesse trabalho, foi selecionado o *Exponential Sine Sweep* - ESS. Segundo (GUIDORZI et al., 2015), o sinal ESS tem algumas vantagens sobre outros sinais de excitação, como o amplamente usado MLS. Duas dessas vantagens estão em uma melhor relação entre o sinal de excitação e o ruído de fundo (SNR) e, além disso, o ESS possui uma rejeição mais robusta as não linearidades.

O sinal de excitação foi gerado através do *software* Matlab, mais especificamente através de um *toolbox* de código livre para Matlab, usado em medições acústicas e processamentos de sinais, desenvolvido pelo Institute of Technical Acoustics de Aachen, chamado ITA-Toolbox. (DIETRICH et al., 2012). O sinal de análise executado, possui uma taxa de amostragem de 44100 [Hz], para um total de 131072 amostras e duração de 2,9722 segundos.

A resposta em frequência do modelo construído também foi obtida com auxílio do ITA-Toolbox. O pós processamento e cálculo dos parâmetros acústicos, foi realizado por meio de rotinas desenvolvidas em código Matlab para a presente pesquisa. Essas rotinas estão disponíveis mediante solicitação, em contato com o autor.

#### 4.2.6 A fonte sonora

Foi utilizado como fonte sonora uma caixa de som portátil de marca X-mini (mostrada na Figura 4.9). Em suma, a fonte sonora é composta por um alto-falante com diâmetro 40 mm, acoplado a um sistema que permite a regulagem dimensional. Suas especificações técnicas estão disponíveis no Anexo A do presente trabalho. (FONSECA, 2013) utilizou em sua pesquisa de doutorado o mesmo modelo de fonte. Em seu trabalho, medições foram feitas em câmara anecoica, com o objetivo de aferir a direcionalidade e a resposta em frequência desta fonte.

A resposta em frequência medida em câmara anecoica (Figura 4.10) mostra uma resposta em frequência relativamente plana entre 500 [Hz] e 2500 [Hz]. É nessa faixa de frequências, em que a fonte sonora apresenta um comportamento relativamente plano, que está situada as frequências avaliadas nessa pesquisa.

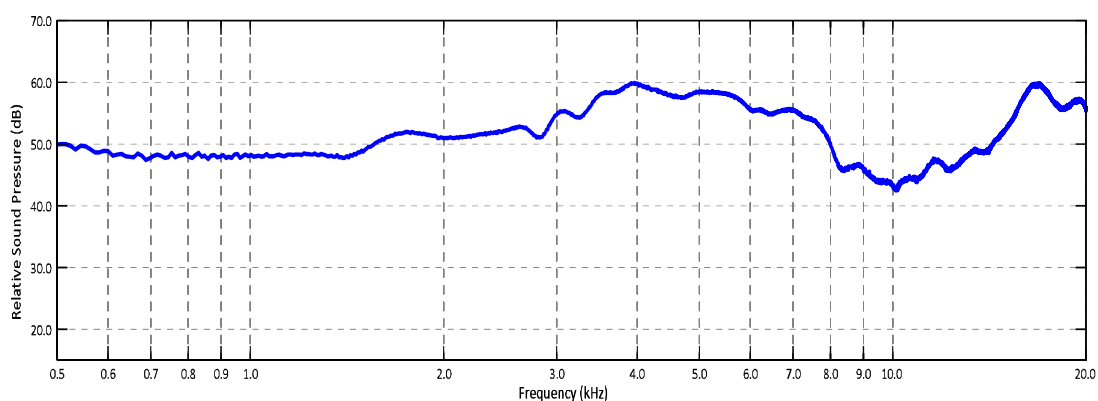
Em sua pesquisa (FONSECA, 2013) avaliou ainda, a direcionalidade da fonte X-mini. As medições usadas para a caracterização da direcionalidade da fonte, também foram feitas em câmara anecoica. O gráfico polar plano mostrado na Figura 4.11 indica uma certa onidi-

Figura 4.9 – Fonte sonora usada nas medições.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.10 – Resposta em frequência da fonte usada nas medições.

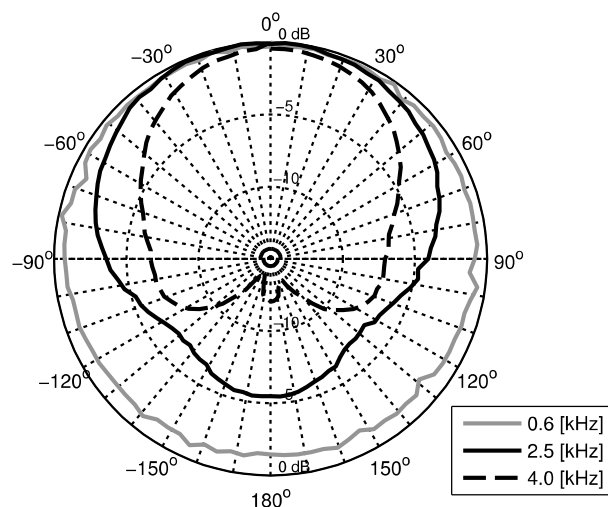


Fonte: Adaptado de (FONSECA, 2013).

recionalidade, para o fonte x-mini usada na presente pesquisa e caracterizada por (FONSECA, 2013), entre as frequências de 600 e 2500 Hz. Dessa forma, a faixa de frequências em que a fonte sonora apresenta uma certa onidirecionalidade, também estão sintonizadas com a faixa de frequência de análise dessa pesquisa.

Além de apresentar uma resposta em frequência relativamente plana e uma considerável omnidirecionalidade até 2500 Hz, a opção por essa fonte sonora, como aparato de emissão e excitação na medição do modelo construído está relacionada com suas dimensões, que visam minimizar os efeitos de absorção e difração acústica, que por ventura possam ocorrer, devido a inserção dos equipamentos de medição no modelo.

Figura 4.11 – Direcionalidade da fonte sonora usada nas medições.



Fonte: Adaptado de (FONSECA, 2013).

#### 4.2.7 Os microfones de captação de sinais

O modelo dos microfones utilizados nas medições é o modelo WM-61A da empresa Panasonic, mostrado na Figura 4.12. Segundo (WUNDERLICH, 2018), esse modelo de microfone não é projetado especificamente como instrumento de medição, sendo mais usual na indústria do áudio. Contudo, com alguns cuidados de processamento de sinais, pode ser utilizado em medições acústicas como instrumentação de baixo custo.

Figura 4.12 – Modelo de microfone usado nas medições.

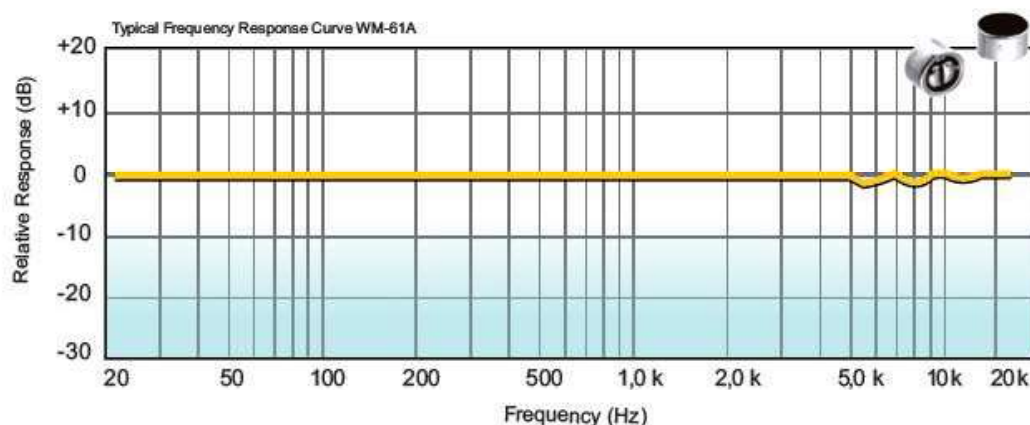


Fonte: Arquivo pessoal.

O microfone WM-61A possui cerca de 6 milímetros de diâmetro sem sua capsula de proteção e cerca de 8 milímetros, quando inserido em um *housing* de proteção. O modelo apresenta uma resposta em frequência (Figura 4.13), significativamente plana e sem muitas

alterações, até a faixa de 5000 Hertz, estando adequado a faixa de medições usada no presente estudo de (entre 20 e 2250 Hz). Mais detalhes das especificações do microfone no Anexo B desse trabalho.

Figura 4.13 – Resposta em frequência típica do microfone Panasonic WM-61A.



Fonte: Retirado de (ZORZO et al., 2018).

#### 4.2.8 A placa de áudio utilizada

O modelo Audiobox 44VSL de placa de áudio usada nas medições, tem como fabricante a empresa *PreSonus Audio Electronics*. Esse modelo possui resposta em frequência de 20 a 22000 Hertz. Outras especificações técnicas podem ser visualizadas no Anexo C, ou no manual técnico, que pode ser adquirido fazendo-se o *download* no site da empresa.

Figura 4.14 – Modelo de placa de áudio usada nas medições.



Fonte: Arquivo pessoal. Manual disponível em: [www.presonus.com](http://www.presonus.com).

#### 4.2.9 Posicionamento de fonte e microfone

O Quadro 1, presente no item 4.3.1 da norma (ISO:3383-2, 2009) e no presente trabalho, mostrado na Figura 4.15, indica o número mínimo de posições de medição para obter uma cobertura adequada em uma sala. Devido a dificuldade de alteração das posições de fonte na medição do modelo construído, optou-se em ter apenas uma posição de fonte. As posições de receptores adotadas na medição da presente pesquisa, totalizam o número de 8. Obtendo-se assim, 8 combinações de fonte-receptor. Esse número de posições de fonte e receptores e, conseqüentemente, combinações fonte-receptor, indicam segundo a norma ISO citada, uma condição tipificada como *Survey* ou pesquisa.

Figura 4.15 – Mínimo de posições e medições indicados pela norma (ISO:3383-2, 2009).

	Survey	Engineering <sup>a</sup>	Precision
Source-microphone combinations	2	6	12
Source-positions <sup>b</sup>	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Microphone-positions <sup>c</sup>	≥ 2	≥ 2	≥ 3
No. decays in each position (interrupted noise method)	1	2	3

<sup>a</sup> When the result is used for a correction term to other engineering-level measurements, only one source-position and three microphone-positions are required.

<sup>b</sup> For the interrupted noise method uncorrelated sources may be used simultaneously.

<sup>c</sup> For the interrupted noise method and when the result is used for a correction term a rotating microphone boom may be used instead of multiple microphone-positions.

Fonte: Retirado de (ISO:3383-2, 2009).

As posições de fonte e microfones são expressos na Tabelas 4.2. Na tabela é possível identificar a altura adotada para o posicionamento dos microfones. Das oito posições de microfone, sete possuem como coordenada  $z$  (altura), a medida de 0,175 metros (17,5 centímetros). Isso se deve ao fato da dificuldade em se manter livre do contato das superfícies do modelo construído, o cabo que liga a placa de áudio ao microfone instalado em um tripé de câmera de filmagem, adaptado para o acoplamento do microfone e mostrado na Figura 4.16. Esse cuidado se deve ao fato de ser uma tentativa de eliminar do processo de medição, possíveis interferências provocadas pelas vibrações das superfícies do modelo e que possam atingir o cabo do microfone. Outras medidas foram adotadas, como enrolar os cabos em materiais porosos, no ponto de contato de transpasse (externo-interno) das superfícies do modelo, afim de minimizar o problema.

Uma representação dos posicionamentos de fonte e receptores, inseridos no modelo, com relação ao plano  $xy$  (planta baixa) e a representação dos posicionamentos dos mesmos com relação ao plano  $xz$  (vista longitudinal), pode ser visto na Figura 4.17 e com mais detalhes no Apêndice A do presente trabalho.

Para cada combinação fonte-receptor de posicionamento de medição, foram captadas 10 medições da resposta ao impulso. O processamento dessas 10 medições é feito pelo ITA-



Toolbox, sendo que o vetor contendo o sinal de saída desse processamento, expressa o valor médio dessas 10 medições. A Figura 4.18 apresenta o sinal de saída de um desses processamentos, correspondente a resposta ao impulso medida em uma combinação fonte receptor. Nessa figura é possível observar que existe um distanciamento entre o início do sinal e pico de amplitude máxima. Este distanciamento é decorrente da chegada do som direto (som emitido pela fonte sonora, que viaja pelo meio e chega ao receptor sem ser refletido por alguma superfície), ao microfone.

Tabela 4.2 – Posições de fonte e receptores adotados.

Item	Coordenadas		
	Coord. x (m)	Coord. y (m)	Coord. z (m)
Fonte	0,040	0,040	0,040
Receptor: PT - 1	0,448	0,385	0,175
Receptor: PT - 2	0,368	0,170	0,175
Receptor: PT - 3	0,228	0,310	0,175
Receptor: PT - 4	0,253	0,210	0,175
Receptor: PT - 5	0,313	0,045	0,175
Receptor: PT - 6	0,100	0,350	0,175
Receptor: PT - 7	0,135	0,210	0,175
Receptor: PT - 8	0,498	0,410	0,010

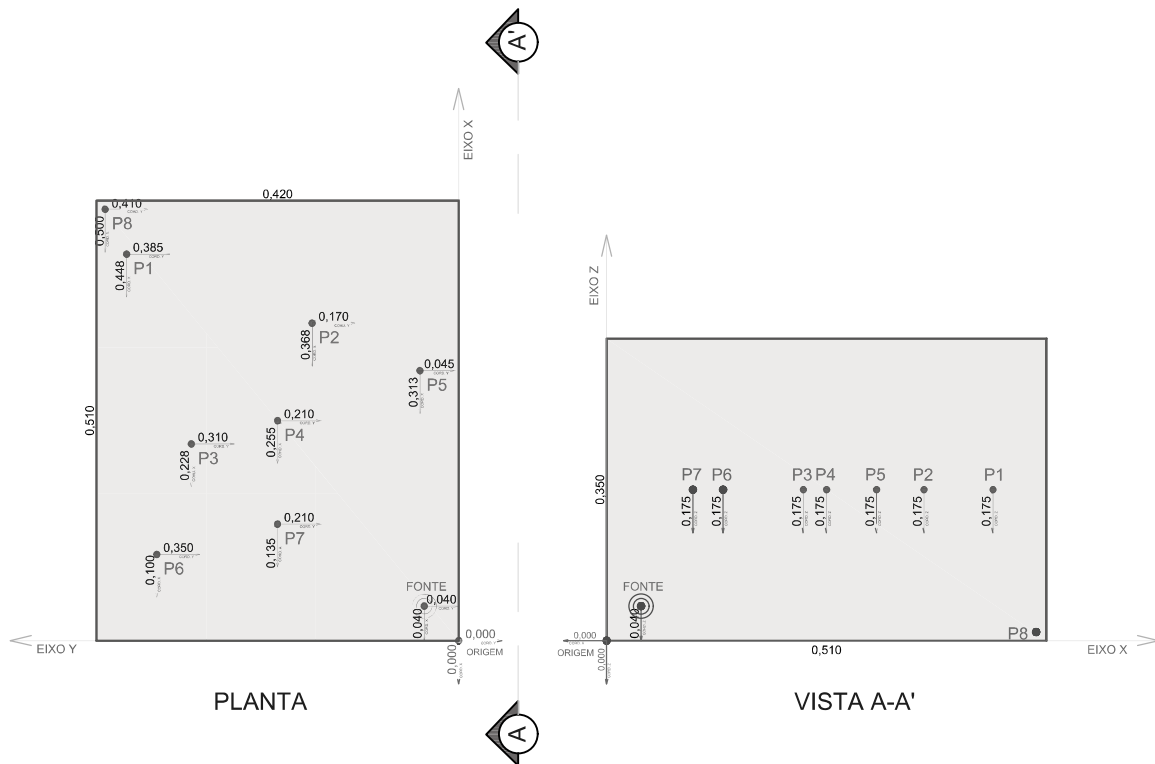
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.16 – Tripé usado para posicionar microfone durante a medição.



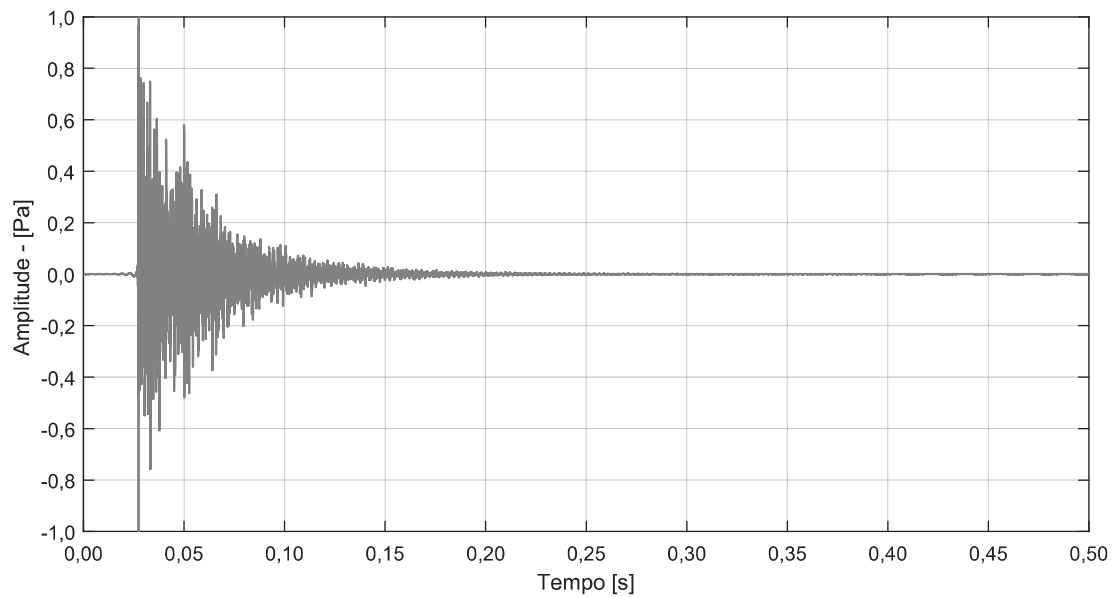
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.17 – Representação dos posicionamento de fonte e receptores em planta e vista longitudinal.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.18 – Resposta ao impulso sem a desconsideração do tempo de resposta da placa e do tempo chegada do som direto aos receptores.



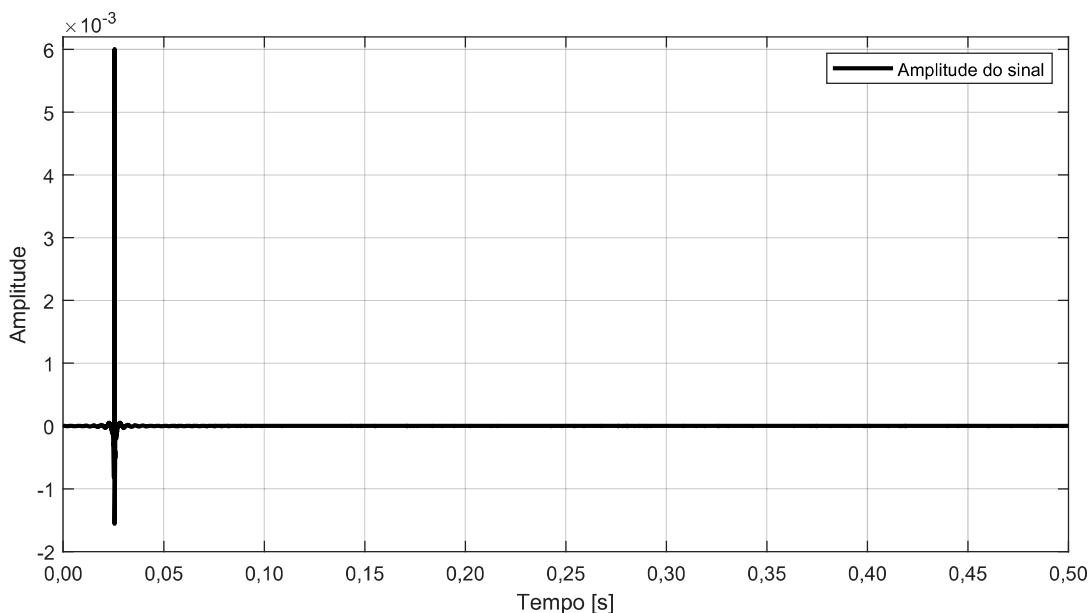
Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.2.10 Desconsiderando os tempos de resposta da placa e chegada do som direto

Para se estabelecer qual era o tempo de resposta da placa, para que o mesmo pudesse ser desconsiderado do sinal da resposta ao impulso obtido na medição, utilizou-se de um método usado em processamento de sinais chamado "*bypass*". Nesse método, o cabo que conduz o sinal da porta de saída da placa de áudio é conectado diretamente na porta de entrada da mesma. Porta essa que, receberia o sinal captado no microfone. Assim, o sinal de saída é transmitido direto a entrada do sistema, podendo-se obter o tempo resposta da placa. Para a placa usada nas medições o tempo de resposta foi de aproximadamente 25 milissegundos, visualizado na Figura 4.19.

O tempo correspondente entre o início da emissão do som pela fonte sonora e o momento em que o receptor começa a captar os sons emitidos pela fonte e, que chegam de maneira direta, também foi desconsiderado da medição. A desconsideração do tempo de resposta da placa e do tempo de chegada do som direto está relacionado com a influência prejudicial que esses tempos exercem no cálculo dos parâmetros acústicos. A não desconsideração dos mesmos altera os valores encontrados para os parâmetros calculados com base na reta ajustada da curva de decaimento, uma vez que, a reta se inicia com o início do decaimento de energia calculada pela integral cumulativa invertida.

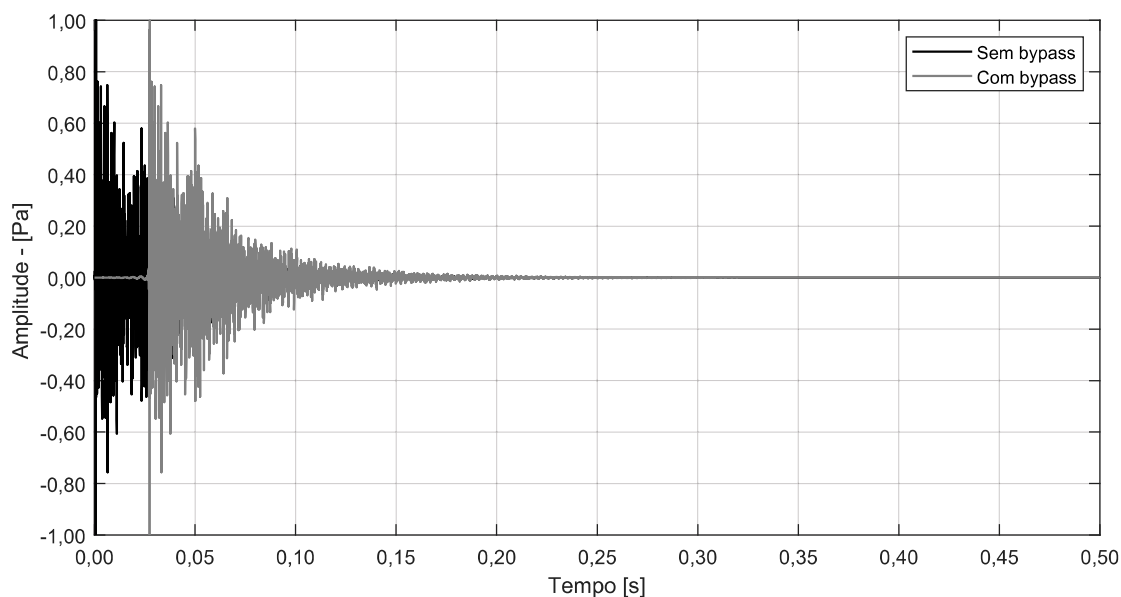
Figura 4.19 – Tempo de resposta da placa medido.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 4.20 mostra o translado temporal que existe em uma resposta ao impulso desconsiderando os tempos de chegada do som direto e resposta da placa (em preto) e a resposta ao impulso medida mantendo esses tempos (cinza).

Figura 4.20 – Comparação entre sinais medidos, com e sem as descon siderações de tempo de resposta da placa e tempo chegada do som direto.



Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.2.11 Parâmetros acústicos obtidos na medição do MFI-1

A caracterização acústica de uma sala por meio da obtenção e avaliação dos seus principais parâmetros acústicos inicia-se com a obtenção das respostas impulsivas em determinados pontos de medição. A partir das respostas ao impulso medidas, um pós-processamento pôde ser aplicado, filtrando-as em largura de banda (e.g., 1/3 de oitava) e calculando as curvas de decaimento e os parâmetros desejados e necessários, para descrever o comportamento acústico do ambiente estudado. Esse processo de filtragem dos sinais obtidos foi executado com os filtros passa-banda presentes no *ITA-Toolbox*. Aos sinais de saída, já filtrados, foram aplicadas as equacionamentos descritos na revisão bibliográfica da presente pesquisa, para o cálculo dos parâmetros acústicos. As medições desta pesquisa foram feitas com as condições de umidade relativa do ar em 62% e com temperatura do ambiente em 20° Celsius. A característica de temperatura do ambiente, foi considerada na elaboração do MAN-1 e do MCO-1.

Decidiu-se não avaliar os parâmetros acústicos que dependeriam de medições ou avaliações adicionais como, o fator de força ( $G$ ), que depende de medições obtidas em campo livre e distanciamento de fonte-receptor de 10 metros. Assim, os parâmetros ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $C_{80}$ ), ( $D_{50}$ ) e ( $T_s$ ) foram calculados e são apresentados em banda de 1/3 de oitava para cada ponto de medição e são apresentados na Tabela 4.3. Os valores médios em banda (média dos oito pontos de medição) e valor média global ( $W$  - média das 9 bandas) também são apresentados na Tabela 4.3.

O tabela apresenta um valor global de tempo de reverberação próximo dos 0,3 segundos. Isso indica que a Frequência de Schroeder, passa a ter valor aproximado de 4008 Hz. Contudo,

Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros obtidos na medição do modelo.

Frequência Central Banda	Valor Médio Parâmetros					
	EDT [s]	$T_{20}$ [s]	$T_{30}$ [s]	$D_{50}$ [-]	$C_{80}$ [dB]	$T_s$ [s]
315 Hz	0,252	0,274	0,319	0,938	17,683	0,021
400 Hz	0,297	0,379	0,412	0,878	14,796	0,023
500 Hz	0,128	0,219	0,286	0,983	26,122	0,011
630 Hz	0,190	0,228	0,244	0,961	22,713	0,014
800 Hz	0,276	0,324	0,323	0,905	15,713	0,023
1000 Hz	0,216	0,230	0,241	0,966	22,823	0,015
1,25 kHz	0,273	0,269	0,276	0,933	18,523	0,018
1,6 kHz	0,276	0,314	0,322	0,906	17,012	0,022
2 kHz	0,223	0,248	0,261	0,948	20,643	0,017
<i>W</i>	0,237	0,276	0,298	0,935	19,559	0,018

Fonte: Arquivo pessoal.

o limite superior de análise do presente trabalho, (frequência superior da banda de 1/3 de oitava, com frequência central em 2000 Hz), foi mantido. A alteração do limite superior de análise da pesquisa acarretaria em muito acréscimo temporal e computacional de avaliação nos modelos computacionais e analíticos de análise.

Outras informações obtidas serão apresentadas na Seção 4.5. Na respectiva seção, os dados obtidos nos diferentes modelos de análise da FGE-1 (MFI-1, MCO-1 e MAN-1), são comparados com a finalidade de validar MCO-1 e MAN-1.

#### 4.3 O MCO-1 CRIADO PARA REPRESENTAR A FGE-1

A concepção do MCO-1 foi realizada em um software que faz uso do método de elementos finitos, (*Finite Element Method* - FEM). Esse método consiste na resolução de equações diferenciais, que visam discretizar, no domínio da frequência, o sistema sob análise em vários elementos de malha. Assim, um ambiente estudado é subdividido em um número finito "n" de elementos, com geometria (retangular, triangular ou tetraédrica) e dimensões que, são geralmente, definidas a partir da maior frequência de análise pré-estabelecida. As dimensões desses elementos são, geralmente estabelecidas em conformidade com a dimensão do comprimento de onda, da maior frequência da análise. Em seu trabalho (PAPADAKIS, 2017), cita literaturas e como essas literaturas estabelecem as dimensões máximas desses elementos. Em geral existe uma tendência nos estudos apresentados a usar, como a maior dimensão do elemento de malha, uma relação de 1/6 a 1/12 do comprimento de onda, da maior frequência de análise. Ou seja, se a maior frequência de análise é 2250 Hz, em geral usa-se como maior dimensão do elemento de malha, dimensões entre 1,27 e 2,54 centímetros.

Em específico, para o FGE-1, a maior dimensão dos dos elementos (estabelecidos como tetraédricos) criados para compor a malha que representará a FGE-1 é de 1,91 [cm]. Porém,

mesmo o modelo tendo pequenas dimensões, uma análise computacional de uma malha com dimensões tão pequenas é exaustivamente custosa. Assim, optou-se por subdividir a simulação do MCO-1 em 9 etapas. Uma para cada banda de 1/3 de oitava estudada. A malha criada em cada etapa seguiu a relação de 1/8, do maior comprimento de onda de analisado na etapa. A Tabela 4.4 mostra como ficaram configuradas as simulações em função das frequências analisadas, dimensões máximas dos elementos criados e o número total de elementos criados para cada etapa de simulação.

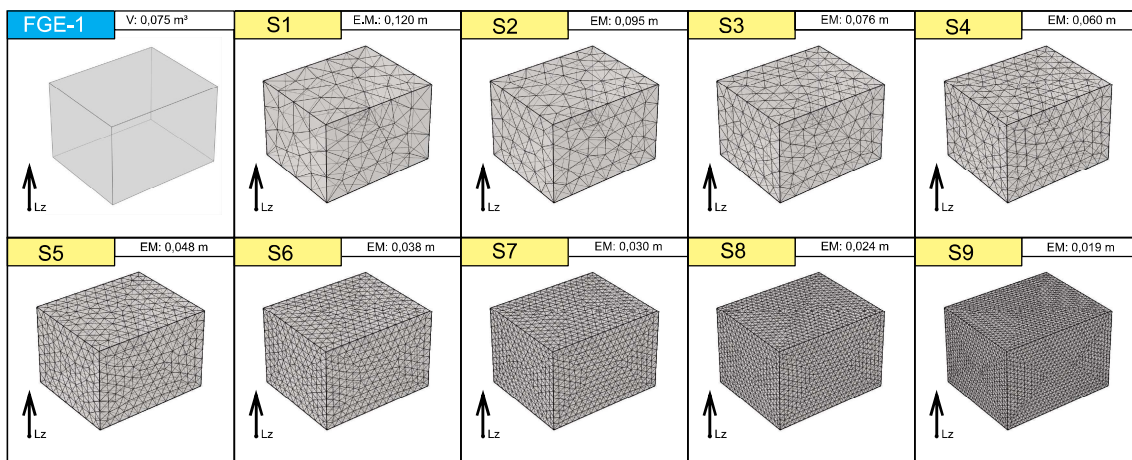
Tabela 4.4 – Limites em frequência e dimensões dos elementos de malha das etapas de simulação do modelo computacional desenvolvido.

Etapa de Simulação	Limite Superior Frequência [Hz]	Elemento de Malha [m]	Número Total de Elementos [-]
Etapa 1 (S1)	357,50	0,120	770
Etapa 2 (S2)	450,00	0,095	1499
Etapa 3 (S3)	565,00	0,076	4548
Etapa 4 (S4)	715,00	0,060	5616
Etapa 5 (S5)	900,00	0,048	11023
Etapa 6 (S6)	1125,00	0,038	22679
Etapa 7 (S7)	1425,00	0,030	46381
Etapa 8 (S8)	1800,00	0,024	91050
Etapa 9 (S9)	2250,00	0,019	185794

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 4.21 mostra como ficaram as malhas criadas em função das dimensões dos elementos de malha (EM - descritos na figura) das 9 etapas de simulação do MCO-1, representativo da FGE-1.

Figura 4.21 – Malhas criadas nas etapas de simulação do MCO-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

O amortecimento modal, que no MAN-1 é inserido sob a forma do termo  $\eta$ , foi introduzido inicialmente no MCO-1, sob a forma de impedâncias de superfícies em valor de seu

módulo  $|Z_s|$ . Como para a construção do MFI-1 foi usado apenas um material (MDF), à todas as superfícies do MCO-1 foram atribuídas, as mesmas impedâncias de superfície em suas bandas de frequências respectivas. Essas impedâncias foram calculadas com base na estimativa de coeficientes de absorção sonora ( $\alpha$ ), obtidos na medição do tempo de reverberação medidos no MFI-1. A Tabela 4.5 mostra os valores obtidos para os valores dos coeficientes de absorção sonora ( $\alpha$ ) calculados com Equação (3.28) e, mostra também, os valores dos módulos das impedâncias de superfícies  $|Z_s|$  e os valores dos módulos das impedâncias de superfície normalizadas  $|Z_{s,n}|$  estimados com auxílio das Equações (3.23) e (3.21), em suas respectivas bandas.

Tabela 4.5 – Valores de  $\alpha$ ,  $|Z_{s,n}|$  e  $|Z_s|$ , calculados para os valores de  $T_{30}$  medidos no MFI-1.

Freq. Banda [Hz]	$T_{60}$ Medido [s]	$\alpha$ [-]	$ Z_{s,n} $ [-]	$ Z_s $ [Pa.s/m]
315	0,32	0,03	119,07	49415,77
400	0,41	0,02	158,51	65788,05
500	0,30	0,04	111,40	46233,71
630	0,24	0,04	92,14	38242,09
800	0,32	0,03	131,26	54476,35
1000	0,24	0,04	96,36	39992,09
1250	0,28	0,03	117,28	48674,84
1600	0,32	0,03	157,68	65442,67
2000	0,26	0,03	125,17	51949,50

Fonte: Arquivo pessoal.

Ao término da estimativa inicial da impedância de superfície, deu-se início as etapas de simulação do modelo, para a obtenção dos espectros em frequência de cada um dos pontos de análise descritos na Tabela 4.2. A fonte sonora foi introduzida no MCO-1 como uma forma pontual e com uma irradiação da velocidade de volume de  $5 \times 10^{-5}$  [m<sup>3</sup>/s]. A configuração de simulação do modelo seguiu as configurações expressa na Tabela 4.6.

#### 4.3.1 Curvas de decaimento obtidas para MCO-1 usando $|Z_s|$

Realizadas as 9 etapas de simulação descritas no Quadro 4.6, as respectivas frações de espectro obtidas, foram concatenadas de maneira a obter-se um único espectro. O passo em frequência dos espectros obtidos é de aproximadamente 0,3365 Hz. Isso faz com que a resposta ao impulso obtida, para cada um desses espectros, tenha a mesma taxa de amostragem da resposta ao impulso medida, 44100 Hz. De maneira análoga ao que aconteceu nas outras abordagens do presente estudo, as respostas ao impulso obtidas foram filtradas em banda de 1/3 de oitava (com o uso do *ITA-Toolbox*) e calculadas as respectivas curvas de decaimento com

Tabela 4.6 – Configurações iniciais de simulação do MCO-1.

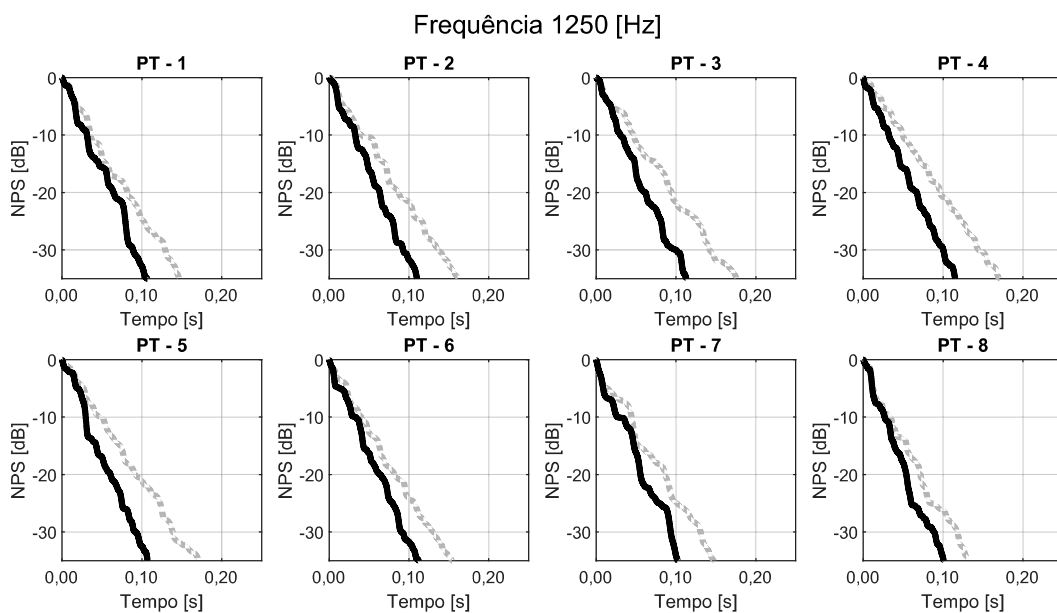
Etapa de Simulação	Limite Inferior [Hz]	Limite Superior [Hz]	Elemento de Malha [m]	Número Total de Elementos [-]	$ Z_s $ [Pa.s/m]
Etapa 1 (S1)	0,00	357,50	0,120	770	49415,77
Etapa 2 (S2)	357,50	450,00	0,095	1499	65788,05
Etapa 3 (S3)	450,00	565,00	0,076	4548	46233,71
Etapa 4 (S4)	715,00	715,00	0,060	5616	38242,09
Etapa 5 (S5)	715,00	900,00	0,048	11023	54476,35
Etapa 6 (S6)	900,00	1125,00	0,038	22679	39992,09
Etapa 7 (S7)	1125,00	1425,00	0,030	46381	48674,84
Etapa 8 (S8)	1425,00	1800,00	0,024	91050	65442,67
Etapa 9 (S9)	1800,00	2250,00	0,019	185794	51949,50

Fonte: Arquivo pessoal.

rotinas auxiliares de cálculo.

As curvas de decaimento obtidas nas simulações em que a impedância de superfície era inserida nas superfícies que compunham o MCO-1 sob sua forma modular (conforme Quadro 4.5), mostraram-se imprecisas em bandas de frequência acima da banda de 800 [Hz]. A Figura 4.22 mostra para a banda de 1250 Hz, por exemplo, que em todos os pontos de análise (Quadro 4.2) simulados, a comparação entre as curvas de decaimento obtidas por simulação do MCO-1 (curva preta) se mostraram distante da curvas de decaimento obtidas pela medição do MFI-1 (curva cinza tracejada).

Figura 4.22 – Decaimentos em 1250 Hz, obtidas em MFI-1 e MCO-1 com uso de  $|Z_s|$ .



Fonte: Arquivo pessoal.

A solução adotada para tentar corrigir esse fato foi, alterar nas simulações do MCO-1, os valores de impedância de superfície adotados, substituindo-os por valores complexos de



impedância de superfície. O valor do módulo da impedância de superfície pode ser expresso em função de sua parte real e imaginária. Assim, os valores complexos de impedância de superfície  $Z_s$  foram estimados de maneira a manterem seu valor absoluto. Esses novos valores de impedância formam a nova configuração de simulação, mostrada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Configuração de simulação com valores complexos de impedância de superfície.

Etapa de Simulação	Limite Inf. [Hz]	Limite Sup. [Hz]	Elemento de Malha [m]	N. Total Elementos [-]	$ Z_s $ [Pa s/m]
Etapa 1 (S1)	0,00	357,50	0,120	770	46922,27+ 6225,45j
Etapa 2 (S2)	357,50	450,00	0,095	1499	53043,24 + 33202,40j
Etapa 3 (S3)	450,00	565,00	0,076	4548	38990,63 + 20751,50j
Etapa 4 (S4)	715,00	715,00	0,060	5616	29897,83 + 20751,50j
Etapa 5 (S5)	715,00	900,00	0,048	11023	38167,06 + 33202,40j
Etapa 6 (S6)	900,00	1125,00	0,038	22679	30999,71 + 20751,50j
Etapa 7 (S7)	1125,00	1425,00	0,030	46381	31626,48 + 31127,25j
Etapa 8 (S8)	1425,00	1800,00	0,024	91050	40176,56 + 39427,85j
Etapa 9 (S9)	1800,00	2250,00	0,019	185794	32531,99 + 31127,25j

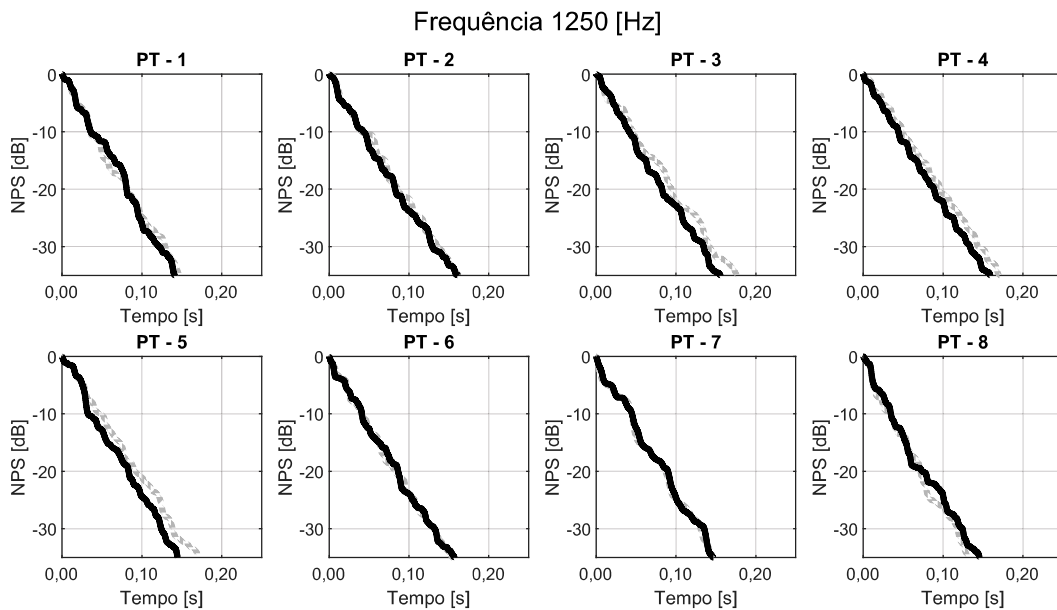
Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.3.2 Valores dos parâmetros obtidos para MCO-1 usando valores de $Z_s$ complexos

Após a repetição das 9 etapas que compõem as simulações do MCO-1 e após o pós processamento dos dados obtidos, as curvas de decaimento se mostraram mais ajustadas às curvas de decaimento medidas. A Figura 4.23, mostra o considerável ajuste que, o uso de valores complexos para a impedância de superfície, proporcionou aos decaimentos obtidos modelo computacional elaborado. Na figura é possível observar uma proximidade (para o decaimento na banda de 1250 Hz) entre curvas de decaimento obtidas na simulação do MCO-1 (curva preta) e as curvas de decaimento obtidas pela medição do MFI-1 (curva cinza tracejada), ambos elaborados para descrever a FGE-1.

Os parâmetros acústicos ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $C_{80}$ ), ( $D_{50}$ ) e (Ts) foram calculados, a partir das curvas de decaimentos e a partir das respostas ao impulso, obtidas nas simulações com valores complexos de impedância. Em resumo, são apresentados ao leitor em bandas de 1/3 de oitava e em valor médio global ( $W$ ), na Tabela 4.8.

A Tabela 4.9 mostra a proximidade dos valores coeficientes de absorção acústica ( $\alpha$ ) calculados pela equação de Sabine 3.28, com base nos tempos de reverberação obtidos na medição do MFI-1 e os valores coeficientes de absorção acústica ( $\alpha$ ) calculados pela Equação (3.23), com base nas impedâncias de superfície complexas usadas nas etapas das simulações do MCO-1. Essa proximidade entre os valores de ( $\alpha$ ) fortalece a representatividade do MCO-1 elaborado.

Figura 4.23 – Decaimentos em 1250 Hz, obtidas em MFI-1 e MCO-1 com uso de  $Z_s$  complexa.

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 4.8 – Valores médios dos parâmetros obtidos por simulação em FEM do modelo.

Frequência Central Banda	Valor Médio Parâmetros					
	EDT [s]	$T_{20}$ [s]	$T_{30}$ [s]	$D_{50}$ [-]	$C_{80}$ [dB]	$T_s$ [s]
315 Hz	0,240	0,276	0,316	0,938	17,575	0,020
400 Hz	0,306	0,379	0,417	0,878	14,712	0,022
500 Hz	0,171	0,234	0,261	0,967	22,757	0,013
630 Hz	0,218	0,235	0,241	0,955	21,357	0,016
800 Hz	0,327	0,308	0,302	0,875	14,786	0,024
1000 Hz	0,216	0,205	0,206	0,972	24,377	0,014
1.25 kHz	0,256	0,260	0,266	0,944	18,926	0,018
1.6 kHz	0,272	0,304	0,306	0,914	16,288	0,022
2 kHz	0,236	0,227	0,245	0,946	21,411	0,017
$W$	0,249	0,270	0,284	0,932	19,132	0,018

Fonte: Arquivo pessoal.

É notório que os valores de  $\alpha$  são similares. É notório também que ao se comparar os valores dos módulos da impedância de superfície normalizada das Tabelas 4.5 e 4.7 existe uma pequena diferença porém, as curvas de decaimento obtidas nas simulações de MCO-1 com valores complexos de  $Z_s$  se mostraram mais similares às curvas de decaimento obtidas nas medições do MFI-1 e, por esse motivo, nas simulações dos outros 11 modelos computacionais, que visam descrever as outras 11 formas geométricas, as impedâncias de superfície foram inseridas também, por meio de seus valores complexos.

Tabela 4.9 – Coeficientes ( $\alpha$ ) estimados com a Eq. 3.28 e o  $T_{60}$  e, coeficientes ( $\alpha$ ) calculados com a Eq. 3.23 para ( $Z_{s,n}$ ) estipulada.

Freq. Central Banda [Hz]	$Z_{s,n}$ [Pa.s/m]	$\alpha$ [-] Eq. 3.28	$ Z_{s,n} $ [Pa.s/m]	$\alpha$ [-] Eq. 3.23
315	113,508+15,00j	0,03	49415,77	0,03
400	127,806+80,00j	0,02	65788,05	0,03
500	93,947+50,00j	0,04	46233,71	0,03
630	72,038+50,00j	0,04	38242,09	0,04
800	91,962+80,00j	0,03	54476,35	0,02
1000	74,693+50,00j	0,04	39992,09	0,04
1250	76,203+75,00j	0,03	48674,84	0,03
1600	96,804+95,00j	0,03	65442,67	0,02
2000	78,328+75,00j	0,03	51949,50	0,03

Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.4 O MAN-1 ELABORADO PARA FGE-1

Toda a concepção da modelagem analítica foi feita em rotinas de cálculo, escritas com linguagem de programação *Matlab* e com suporte do *ITA-Toolbox*, usando as equações (3.5), (3.6) e (3.9), seguindo configurações de amostragem em frequência compatíveis com as configurações de amostragem usadas na medição. Dessa maneira, o espectro em frequência calculado tem como sua frequência inferior 0 [Hz] e como limite superior 22050 [Hz], com um passo de frequência de 0,336 [Hz], totalizando 65537 amostras em frequência. Isso faz com que a resposta ao impulso calculada tenha a mesma duração 2,9722 [s] e ao mesmo número de amostras (131072) da resposta ao impulso medida no MFI-1.

O termo amortecimento modal ( $\eta$ ), presente na Equação (3.9), está associado a um tempo de reverberação global médio ( $\eta = 6,91/T_{60}$ ). Porém, como pode ser visto no Quadro 4.3, o tempo de reverberação pode variar com a frequência. Então, para cada tempo de reverberação  $T_{30}$  expresso nesse quadro, foi calculado um termo ( $\eta$ ) associado. A Tabela 4.10 apresenta os valores referentes aos termos amortecimento modal calculados para os tempos de reverberação obtidos na medição do MFI-1, em banda de 1/3 de oitava.

Tabela 4.10 – Cálculo dos termos de amortecimento modal ( $\eta$ ) para os tempos de reverberação medidos em banda de 1/3 oitava.

Freq. [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,29	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$	21,69	16,76	24,13	28,35	21,39	28,63	25,03	21,43	26,43

Fonte: Arquivo pessoal.

Para cada ponto de análise do MFI-1 (Quadro 4.2), foram calculados nove espectros em frequência. Cada um desses espectros calculados levou em consideração um termo amorteci-

mento modal ( $\eta$ ) apresentado na Tabela 4.10. Assim, temos um espectro referente ao amortecimento modal ( $\eta$ ) para a banda de 315 Hz, outro espectro para o amortecimento modal para a banda de 400 Hz e assim, sucessivamente, para as nove bandas de análise. Após essa etapa, foi elaborado um único espectro contendo concatenações de partes de cada um dos 9 espectros anteriormente calculados, com seus respectivos termos de amortecimento ( $\eta$ ). Assim, para o primeiro espectro calculado com o termo ( $\eta = 21,69$ ) associado ao tempo de reverberação (0,32 segundos) da banda de 315 [Hz], obtido pela medição do MFI-1, utilizou-se a informação de pressão sonora calculada na faixa de frequência de 283,00 á 357,50 Hz. Essa lógica foi seguida até a frequência limite superior da banda de 1/3 de oitava, que possui frequência central de 2000 Hz. Ao final, obteve-se um único espectro concatenado para cada ponto de avaliação.

#### 4.4.1 Valores dos parâmetros obtidos para MAN-1

Em posse dos espectros que representam a resposta em frequência para cada ponto de análise, foi possível a obtenção das respectivas respostas ao impulso. De maneira análoga ao que aconteceu na manipulação das respostas ao impulso obtidas na medição MFI-1, os tempos referentes ao intervalo de tempo entre o início da emissão do sinal pela fonte sonora, (nesse caso analítico, uma convenção de sua posição e sua velocidade de volume  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ], inserida na equação) e a chegada do som direto aos receptores, foi calculado e descontado das respostas ao impulso obtidas para cada ponto.

As respostas ao impulso resultantes foram submetidas a um filtro passa bandas de 1/3 de oitava, as curvas de decaimento e os parâmetros acústicos foram calculados. Em resumo, são apresentados ao leitor em bandas de 1/3 de oitava e em valor médio global ( $W$ ), na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Valores médios dos parâmetros obtidos por avaliação analítica modelo.

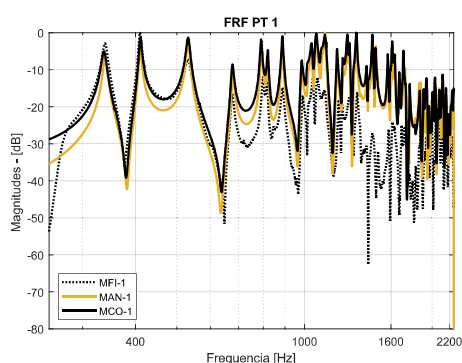
Frequência Central Banda	Valor Médio Parâmetros					
	EDT [s]	$T_{20}$ [s]	$T_{30}$ [s]	$D_{50}$ [-]	$C_{80}$ [dB]	$T_s$ [s]
315 Hz	0,301	0,335	0,343	0,885	13,924	0,026
400 Hz	0,335	0,410	0,440	0,858	13,669	0,024
500 Hz	0,243	0,297	0,321	0,920	17,966	0,018
630 Hz	0,236	0,246	0,248	0,950	20,406	0,016
800 Hz	0,344	0,317	0,314	0,861	13,867	0,025
1000 Hz	0,262	0,241	0,236	0,943	19,888	0,018
1.25 kHz	0,292	0,287	0,285	0,913	17,148	0,020
1.6 kHz	0,306	0,326	0,325	0,901	15,290	0,022
2 kHz	0,269	0,258	0,265	0,922	18,854	0,020
$W$	0,288	0,302	0,308	0,906	16,779	0,021

Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA FGE-1

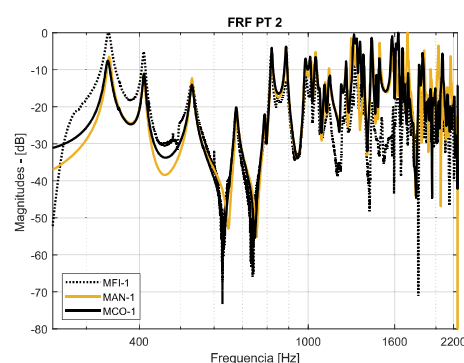
Na presente seção, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos pelas três metodologias de análise, MFI-1, MCO-1 e MAN-1 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica 1 FGE-1. Vale ressaltar que as condições de contorno inseridas em MCO-1 e MAN-1, visam descrever o campo acústico medido em MFI-1 e consequentemente para FGE-1. As funções de resposta em frequência (FRF) dos espectros obtidos com as diferentes metodologias de análise, para cada ponto de avaliação, são apresentados nas Figuras 4.24 até 4.31. Cada um dos três espectros presentes nos diagramas corresponde a uma metodologia de análise. Dessa maneira, ficam evidenciadas as semelhanças existentes nos espectros para cada ponto de avaliação. As outras figuras presentes nesta seção apresentam os resultados para os parâmetros acústicos, a saber: Figura 4.32 e Figura 4.33: tempos de reverberação ( $T_{20}$ ) e ( $T_{30}$ ), obtidos respectivamente, por meio do decaimento da faixa dinâmica de 20 dB e 30 dB; Figura 4.34 e Figura 4.35: compara os valores obtidos para o parâmetro de decaimento inicial EDT e compara os valores obtidos para o parâmetro de tempo central  $T_s$ ; Figura 4.36 e Figura 4.37: comparam os valores obtidos para o parâmetros de definição ( $D_{50}$ ) e para o parâmetros de clareza ( $C_{80}$ ).

Figura 4.24 – FRFs do PT-1 da FGE-1.



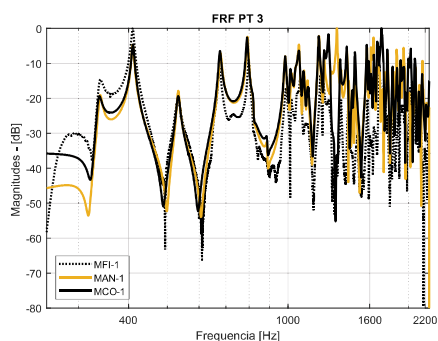
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.25 – FRFs do PT-2 da FGE-1.



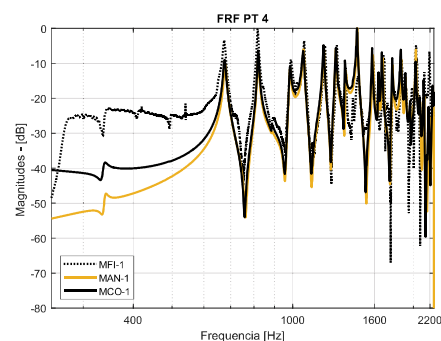
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.26 – FRFs do PT-3 da FGE-1.



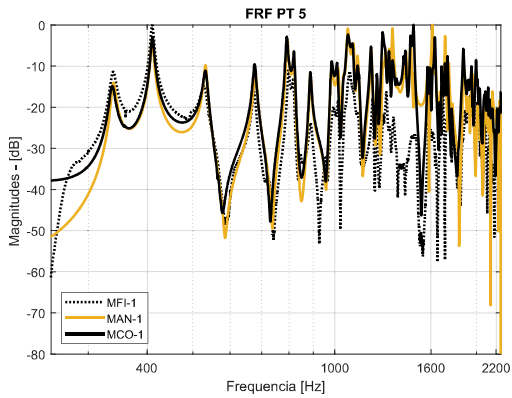
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.27 – FRFs do PT-4 da FGE-1.



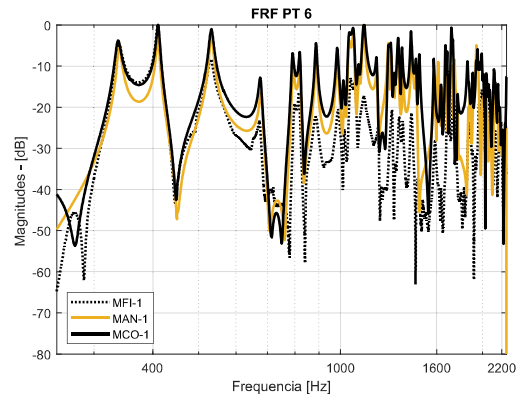
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.28 – FRFs do PT-5 da FGE-1.



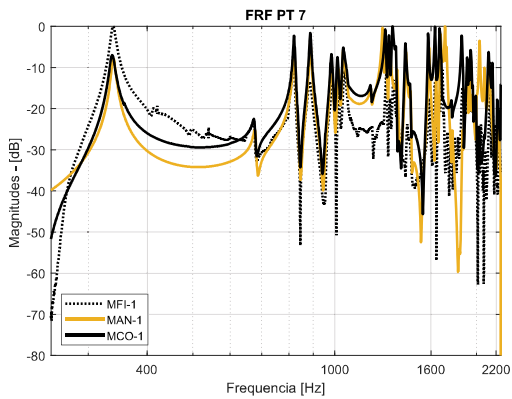
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.29 – FRFs do PT-6 da FGE-1.



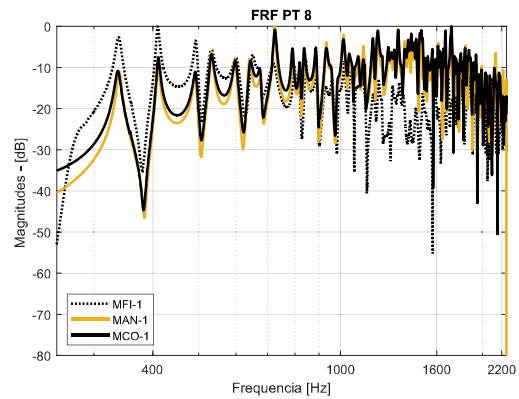
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.30 – FRFs do PT-7 da FGE-1.



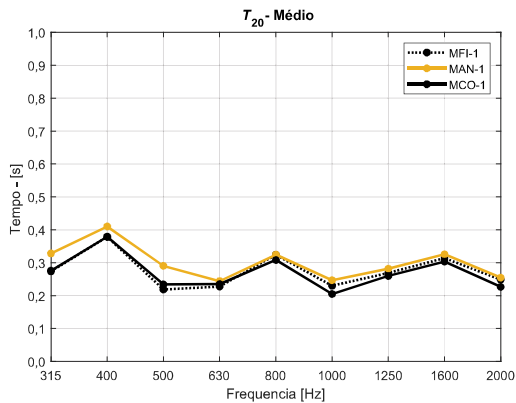
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.31 – FRFs do PT-8 da FGE-1.



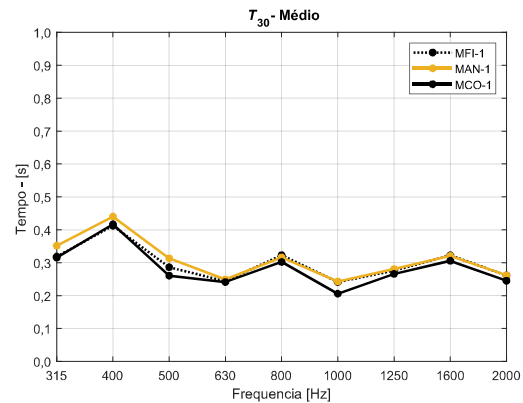
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.32 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-1.



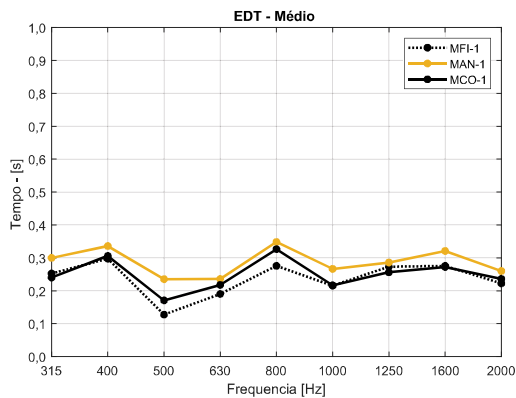
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.33 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-1.



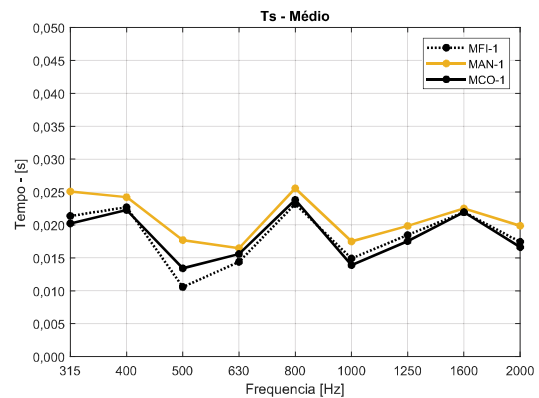
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.34 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-1.



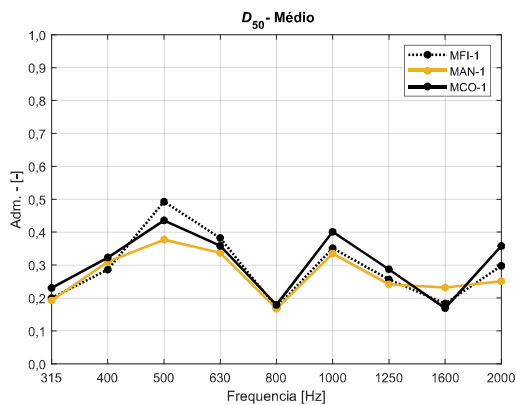
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.35 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-1.



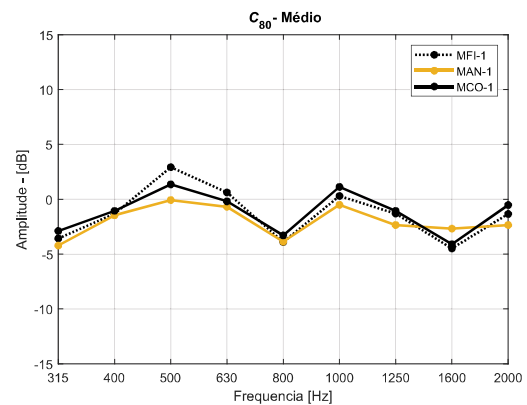
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.36 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.37 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

Todas as figuras apresentadas mostram uma convergência satisfatória de resultados, o que indica que as metodologias MCO-1 e MAN-1, usadas para descrever a FGE-1, são válidas, visto que, apresentam valores muito similares aos apresentados por MFI-1.

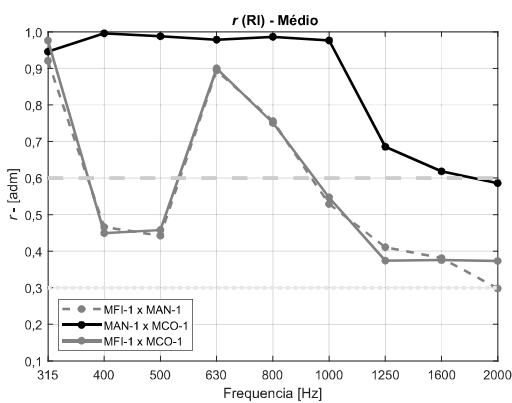
#### 4.5.1 Coeficientes de correlação de Pearson para FGE-1

Para reforçar essa validação uma avaliação adicional foi feita entre os resultados obtidos nas metodologias, considerando as respostas em frequência, considerando as respostas ao impulso e as curvas de decaimento. A similaridade entre as informações contidas em dois vetores de informações, foi aferida por meio cálculo dos coeficientes de correlação amostral de Pearson ( $r$  - Equação 3.41). Dependendo do valor obtido para o coeficiente de correlação, pôde-se

atribuir uma classificação. Quanto mais próximo de  $r = |1|$ , mais forte é associação e, quanto mais próximo de  $r = |0|$ , mais fraca é a associação entre as informações correlacionados.

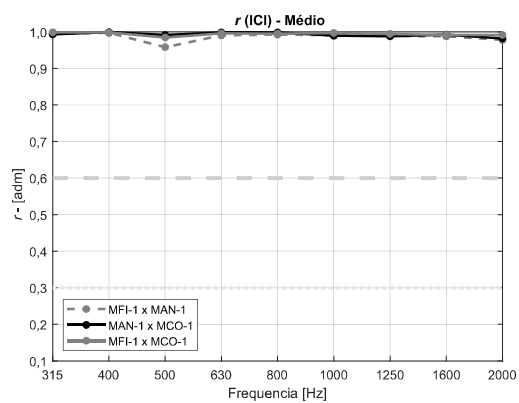
A Figura 4.38, apresenta os coeficientes de correlação médios (valor médio dos oito pontos de avaliação) em banda de 1/3 de oitava, calculados para avaliar a similaridade entre os vetores de informações que descrevem as respostas ao impulso (RI). De maneira similar, a Figura 4.39 apresenta os coeficientes de correlação médios (valor médio dos oito pontos de avaliação) em banda de 1/3 de oitava, calculados para avaliar a similaridade entre os vetores de informações que descrevem as curvas de decaimento, sob a forma da integral cumulativa invertida (ICI). Assim, pode ser aferido, por exemplo, o grau de correlação médio existente, para a banda com frequência central em 315 Hz, entre as respostas ao impulso filtradas em banda de 1/3 de oitava, obtidas por meio da medição do modelo (MFI-1) e por meio da simulação do modelo em FEM (MCO-1):  $r(\text{RI}) \text{ MFI-1} \times \text{MCO-1}$ , em que  $r = 0,976$ .

Figura 4.38 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-1.



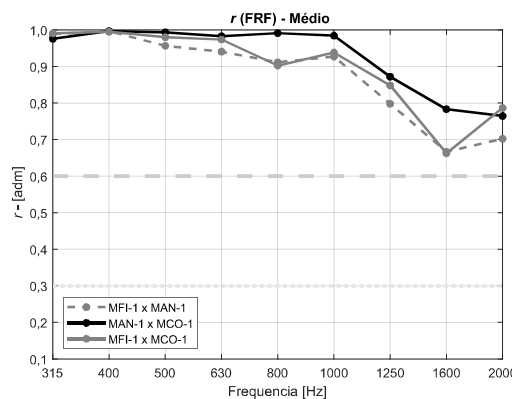
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.39 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 4.40 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-1.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 4.40, por sua vez, também indica uma forte correlação ( $r > 0,6$  - próximo de 1)



existente entre as (FRFs) obtidas nas diferentes metodologias de análise, com uma tendência de decréscimo acima de 1000 Hertz. Por meio da Figura 4.39 apresentada, pode ser visualizado que, os coeficientes de correlação ( $r$ ) oriundos da comparação entre as respostas ao impulso (RIs) medidas e simuladas (MFI-1 x MCO-1) e, medidas e calculadas (MFI-1 x MAN-1) apresentam, dependendo da banda de frequência, uma correlação variando entre forte ( $r > 0,6$ ) e média ( $0,3 < r < 0,6$ ). Por sua vez o coeficiente de correlação entre as respostas ao impulso calculadas e simuladas (MAN-1 x MCO-1) apresentam uma forte correlação. Isso indica que, das respostas ao impulso obtidas, as respostas ao impulso obtidas nas medições do MFI-1 são as mais discrepantes. Esse fato pode estar relacionado com uma certa similaridade existente na forma se obter as respostas ao impulso no MAN-1 e MCO-1 e que, mesmo se aproximando das respostas ao impulso medidas no MFI-1, não as representa com uma fidelidade total, tendo em vista as variabilidades que podem ocorrer em um processo de medição: posição da fonte, posição do receptor, vibrações no modelo construído durante excitação sonora, dentre outras.



## 5 AS FORMAS FGE-2 E FGE-4

### 5.1 A FORMA GEOMÉTRICA 2 (FGE-2)

A presente seção mostrará quais as características da FGE-2 e, como foram configurados os modelos MFI-2, MCO-2 e MAN-2. A seção mostrará ainda, todos os resultados obtidos para os parâmetros descritores do campo acústico desses modelos ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e (Ts), bem como os coeficientes de correlação ( $r$ ) calculados para a obtenção do grau de correlação entre as respostas ao impulso (RI), entre as curvas de decaimento (ICI) e também calculados para os espectros em frequência dos pontos de avaliação desses modelos (FRF).

#### 5.1.1 A elaboração do MFI-2, do MCO-2 e do MAN-2

Todas as formas geométricas concebidas e estudadas nessa pesquisa (Figura 4.1), como formas de possíveis salas acústicas, somente um modelo físico pode ser construído, o modelo físico (MFI-1), que representa a forma geométrica 1 (FGE-1). As formas geométricas FGE-2 e FGE-4 (que serão mostradas nas seguintes seções) foram concebidas de forma que, os seus representativos modelos físicos, pudessem de alguma forma reutilizar o modelo físico MFI-1. Assim, FGE-2 e seu respectivo modelo físico MFI-2, bem como FGE-4 e seu MFI-4, originaram-se de adaptações do MFI-1.

Para MFI-2, foi proposta a inserção de uma geometria cúbica em um dos cantos do MFI-1, como mostra a Figura 5.1. O cubo inserido no MFI-1 é feito de sobras do MDF utilizado para a construção das paredes do MFI-1. Assim, as faces do cubo possuem coeficientes de absorção acústica similares aos das paredes de MDF, permitindo que, na elaboração do modelo computacional em FEM, MCO-2, os valores de impedância superfície inseridos nas faces que compõem o cubo sejam os mesmos dos valores impostos as superfícies que compõem, piso, teto e paredes.

O posicionamento da fonte e receptores não foi alterada no MFI-2 e seguiu a mesma configuração do MFI-1. A distribuição das posições de fonte, microfones e o posicionamento do cubo podem ser visualizados no Apêndice B do presente trabalho. Devido aos fatos de que a redução do volume provocada pela inserção do cubo de MDF ser da ordem de 1,33% e, de que as características de absorção são muito similares a MFI-1, os dados de entrada inseridos no MAN-2 serão os mesmos usados no MAN-1. O Quadro B.1 visualizado no Apêndice B do presente trabalho, mostra a configuração de amortecimento modal ( $\eta$ ) inserida no MAN-2, usado para descrever o comportamento acústico da FGE-2.

Os dados de entrada do MCO-2 também são os mesmos do MCO-1. O Quadro B.2 visu-

Figura 5.1 – Configuração de montagem de fonte e receptor dentro do MFI-2.



Fonte: Arquivo pessoal.

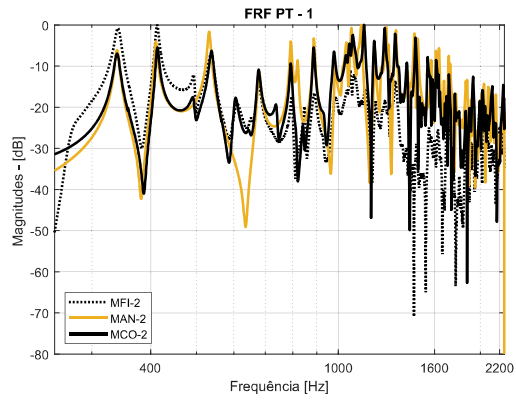
alocado no Apêndice B desse trabalho, resume as etapas de simulação, as dimensões de malha, as características de impedância de superfície e as superfícies as quais essas impedâncias foram atribuídas. O equivalente em coeficiente de absorção acústica das impedâncias de superfície usadas no MCO-2 (calculados com a Equação (3.23)) também é mostrado por banda de 1/3 de oitava analisada. O Quadro B.2 mostra ainda, o valor do somatório das áreas de superfícies internas ( $S$ ) do MCO-2 criado.

As configurações de tipo de sinal de excitação, duração do sinal, taxa de amostragem no tempo e amostragem em frequência usadas nas medições do MFI-2, são as mesmas usadas nas medições do MFI-1. A fonte sonora, a placa de áudio e o microfone, também são os mesmos usados na medição do MFI-1. Após as medições do MFI-2, das simulações do MCO-2, do término dos cálculos dos MAN-2 e dos processamentos dos dados obtidos nessas modelagens, os valores dos parâmetros acústicos ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $C_{80}$ ), ( $D_{50}$ ), ( $T_s$ ) e os valores dos coeficientes de correlação ( $r$ ), foram obtidos em banda de 1/3 de oitava e serão mostrados na seção seguinte.

### 5.1.2 Comparação dos resultados obtidos para FGE-2.

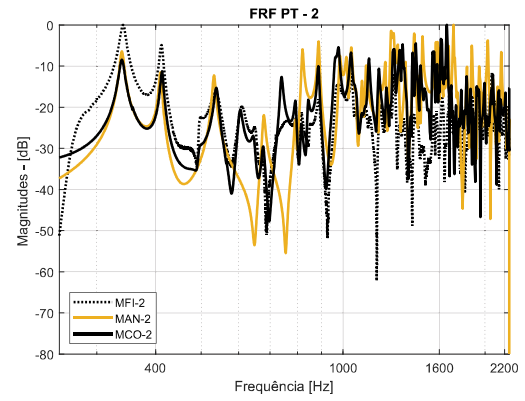
No presente capítulo, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas três metodologias de análise, MFI-2, MCO-2 e MAN-2 usadas para descrever o comportamento acústico da forma geométrica FGE-2. As Figuras de 5.2 à 5.9, mostram a sobreposição das FRFs obtidas nas três metodologias de análise usada para descrever a FGE-2, em seus 8 pontos de caracterização. Examinando de maneira mais detalhada essas FRFs, podem ser notadas pequenas disparidades nas posições dos picos de amplitude que caracterizam os modos acústicos. As FRFs obtidas por meio do MAN-2, são mais destoantes que as FRFs obtidas por meio do MFI-2 e MCO-2, que por sua vez, são mais similares entre si.

Figura 5.2 – FRFs do PT-1 da FGE-2.



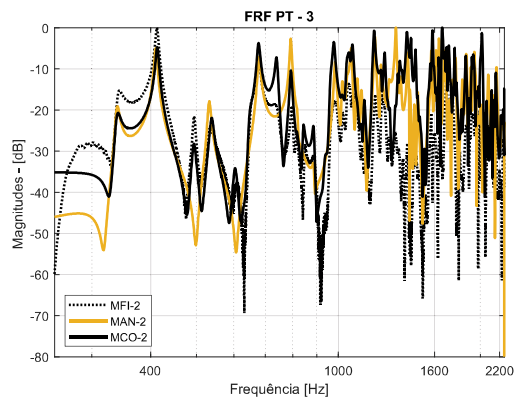
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.3 – FRFs do PT-2 da FGE-2.



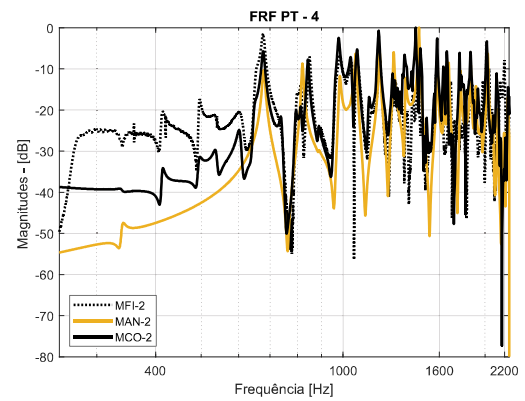
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.4 – FRFs do PT-3 da FGE-2.



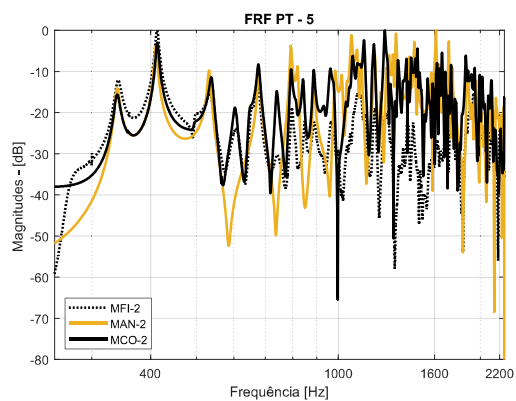
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.5 – FRFs do PT-4 da FGE-2.



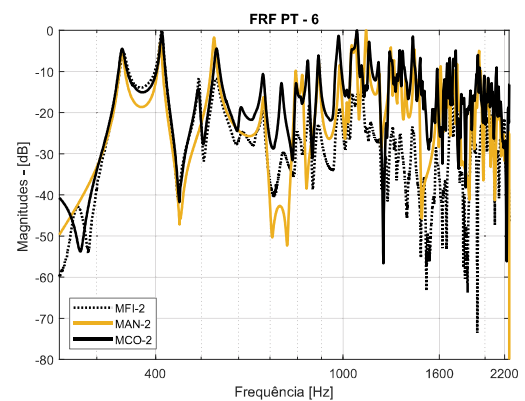
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.6 – FRFs do PT-5 da FGE-2.



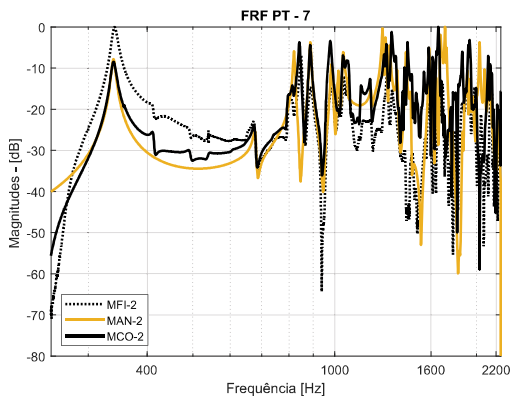
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.7 – FRFs do PT-6 da FGE-2.



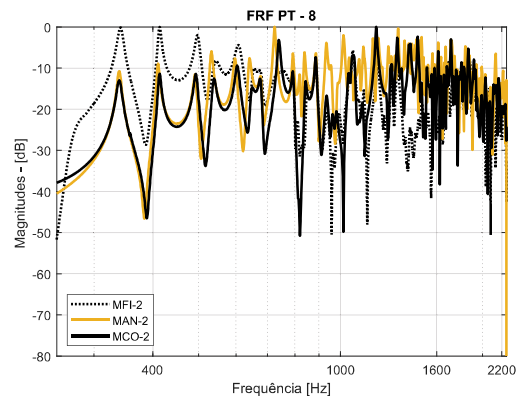
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.8 – FRFs do PT-7 da FGE-2.



Fonte: Arquivo pessoal.

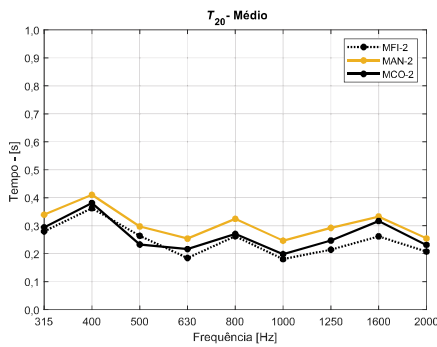
Figura 5.9 – FRFs do PT-8 da FGE-2.



Fonte: Arquivo pessoal.

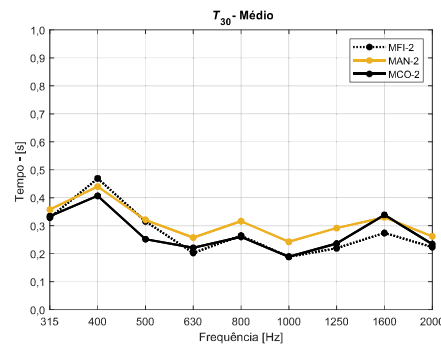
As Figuras de 5.10 à 5.15 apresentam, respectivamente, os parâmetros  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  e  $T_s$ . Nessas figuras, nenhuma grande alteração de valores é perceptível.

Figura 5.10 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-2.



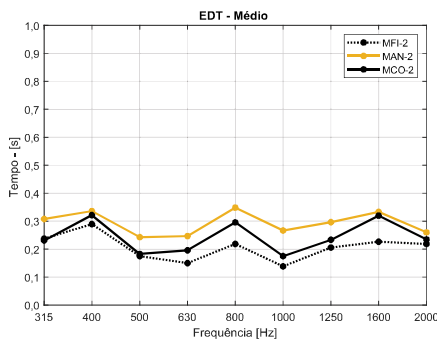
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.11 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-2.



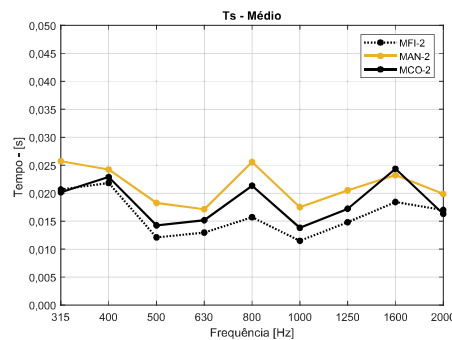
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.12 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-2.



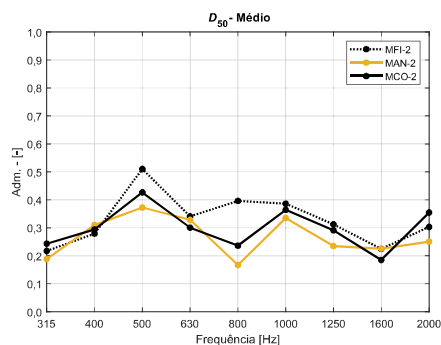
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.13 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-2.



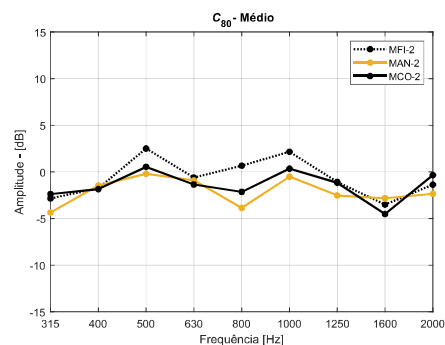
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.14 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-2.



Fonte: Arquivo pessoal.

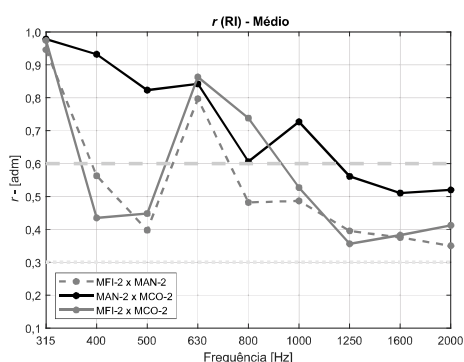
Figura 5.15 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-2.



Fonte: Arquivo pessoal.

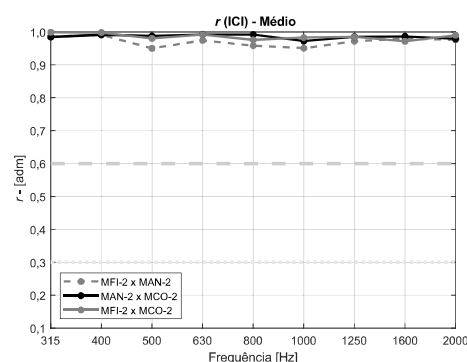
Ao analisar as Figuras 5.16, 5.17 e 5.18, que mostram as comparações de correlação ( $r$ ) obtidas, pode ser notado um decréscimo da similaridade, principalmente para a correlação das funções de resposta em frequência (FRFs) e das respostas ao impulso (RIs).

Figura 5.16 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-2.



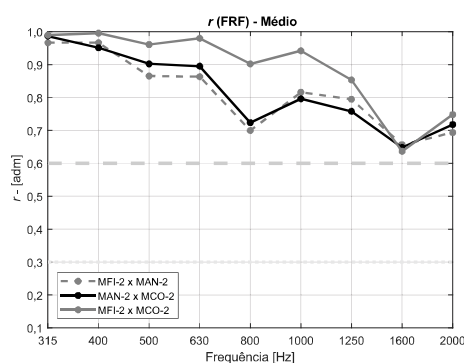
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.17 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-2.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.18 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-2.



Fonte: Arquivo pessoal.

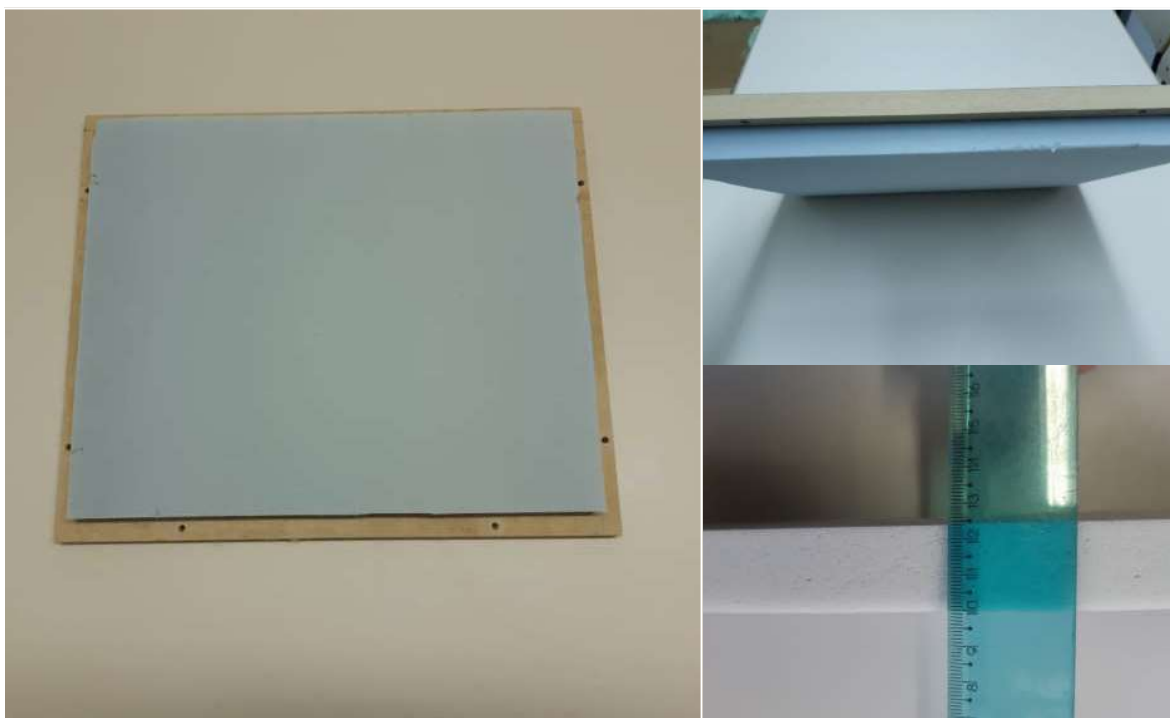
## 5.2 A FORMA GEOMÉTRICA 4 (FGE-4)

A presente seção mostrará quais as características da FGE-4, e como foram configurados os modelos MFI-4, MCO-4 e MAN-4. A seção mostrará ainda, todos os resultados obtidos para os parâmetros descritores do campo acústico desses modelos ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $D_{50}$ ) ( $C_{80}$ ) e (Ts), bem como os coeficientes de correlação ( $r$ ) calculados para a obtenção do grau de correlação entre as as respostas ao impulso (RI), entre os decaimentos (na forma da integral cumulativa invertida ICI) e também calculados para os espectros em frequência dos pontos de avaliação desses modelos (FRF).

### 5.2.1 A elaboração do MFI-4

O modelo físico MFI-4 foi construído usando o mesma lógica usada em MFI-2: a reutilização do MFI-1. Porém, nesta concepção, um novo material foi inserido dentro do modelo MFI-1 para constituir o MFI-4, a melamina. Esse material, amplamente estudado por diversos autores quanto da identificação de suas propriedade acústicas, foi aderido ao teto/tampa do MFI-1. Assim, com uma pequena alteração, foi possível criar um comportamento acústico diferente no interior do modelo. As demais superfícies do MFI-4, seguem as mesmas características de absorção acústica (provenientes do MDF) do MFI-1, visto que, não sofreram alterações. A Figura 5.19 mostra a instalação do material, com espessura de 2,5 cm, na tampa do MFI-4.

Figura 5.19 – Chapa de melamina aderida ao teto de FGE-1 para configurar FGE-4.





As configurações de tipo de sinal de excitação, duração do sinal, taxa de amostragem no tempo e amostragem em frequência usadas nas medições do MFI-4, são as mesmas usadas nas medições do MFI-1 e MFI-2. A fonte sonora, a placa de áudio e o microfone, também são os mesmos usados na medição do MFI-1 e MFI-2. As posições de fonte e receptores podem ser visualizadas com detalhes no arquivo MFI-4, presente no Apêndice D do presente trabalho.

### 5.2.2 A elaboração do MAN-4

Os tempos de reverberação medidos no interior do MFI-4, são apresentados na Tabela 5.1. Os termos de amortecimento modal ( $\eta$ ), calculados com base nos tempos de reverberação medidos no interior do MFI-4, e usados como fator de amortecimento modal no MAN-4, também são apresentados. As posições de fonte e receptores podem ser visualizados no Apêndice D desse trabalho. As demais configurações do MAN-4, são as mesmas utilizadas anteriormente.

Tabela 5.1 – Tempos de reverberação e amortecimentos modais usados no MAN-4.

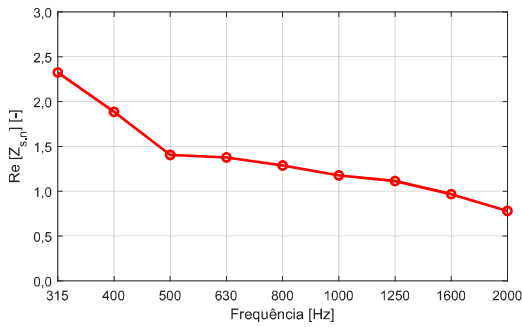
$(T_{60})$ e $(\eta)$	Banda 1/3 de oitava [Hz]									
	Usados MAN-4	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{60}$ [s]	0,22	0,24	0,16	0,18	0,13	0,08	0,08	0,10	0,09	
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	31,41	28,79	43,19	38,39	53,15	86,38	86,38	69,10	76,78	

Fonte: Arquivo pessoal.

### 5.2.3 Identificação das propriedades acústicas da melamina para MCO-4

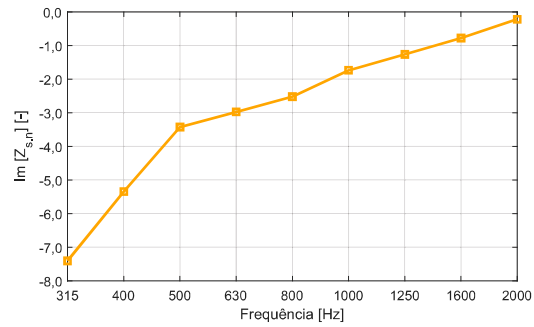
A identificação das propriedades acústicas da melamina, como coeficientes de absorção e impedâncias de superfície, é parte de um trabalho que ainda está em andamento, do autor Sidney V. Cândido da Universidade Federal de Santa Maria, RS - UFSM. O autor gentilmente, cedeu os dados colhidos até o presente momento, para que esses dados pudessem ser usados nas simulações da presente pesquisa. Em seu trabalho, Sidney faz a identificação das propriedades acústicas da melamina segundo a metodologia de medição em situ e com uso de ruído desconhecido, do autor (TAKAHASHI; OTSURU; TOMIKU, 2003), descrita na revisão bibliográfica do presente trabalho. Em suma, os valores de impedância de superfície normalizada, cedidos por Sidney, são apresentados em bandas de 1/3 de oitava nas Figuras 5.20 e 5.21. Já os coeficientes de absorção estimados com base na Equação (3.23), para os valores de impedância de superfície normalizadas e o módulo do valor da impedância normalizada, mostrados na Figura 5.22, são apresentados também, na Tabela 5.2.

Figura 5.20 – Parte real da  $Z_{s,n}$  medidas para a malamina.



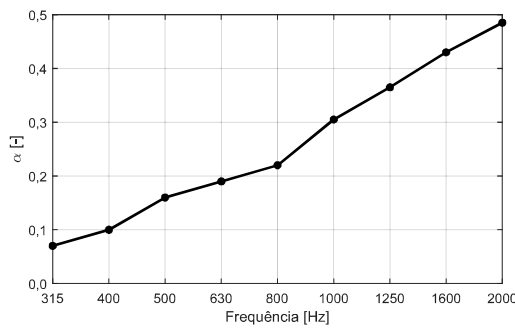
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.21 – Parte imaginária da  $Z_{s,n}$  medidas para a malamina.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.22 – Coeficientes de absorção  $\alpha$  calculados com base na Equação (3.23) para os valores de  $Z_{s,n}$  da melamina.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 5.2 – Valores de ( $Z_{s,n}$ ) usados nas simulações de MCO-4

Freq. Central Banda [Hz]	$Z_{s,n}$ [-]	$ Z_{s,n} $ [-]	$\alpha$ Eq. (3.23) [-]
315	2,33-7,41j	37,97	0,14
400	1,88-5,34j	17,94	0,20
500	1,41-3,43j	10,40	0,32
630	1,38-2,98j	8,41	0,38
800	1,29-2,52j	6,95	0,44
1000	1,18-1,74j	4,68	0,61
1250	1,11-1,26j	3,33	0,73
1600	0,97-0,78j	2,20	0,86
2000	0,78-0,22j	1,50	0,97

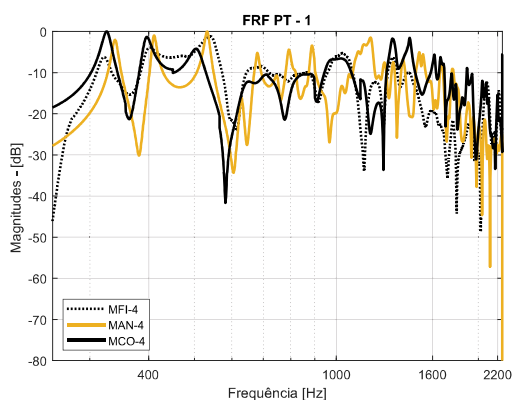
Fonte: Arquivo pessoal.

### 5.2.4 Comparação dos resultados obtidos nas diferentes modelagens da FGE-4.

No presente capítulo, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas três metodologias de análise, MFI-4, MCO-4 e MAN-4 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-4.

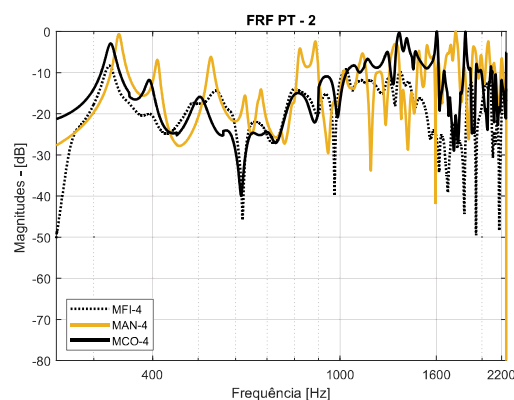
As Figuras de 5.23 à 5.30 apresentam as FRFs obtidas nas diferentes abordagens usadas para descrever o campo acústico da FGE-4. Nas sobreposições das FRFs, para todos os pontos de análise, é possível identificar que, o modelo analítico, mesmo contendo os fatores de amortecimento modal calculados com base nos tempos de reverberação medidos, não conseguiu representar o experimento de forma satisfatória. Os picos característicos dos modos acústicos são muito mais atenuados nos MCO-4 e MFI-4, que no MAN-4. Esse fato é bem visível nas sobreposições de FRFs para o ponto de análise PT - 7, da Figura 5.29, entre as frequências de 400 [Hz] e 1300 [Hz].

Figura 5.23 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-4.



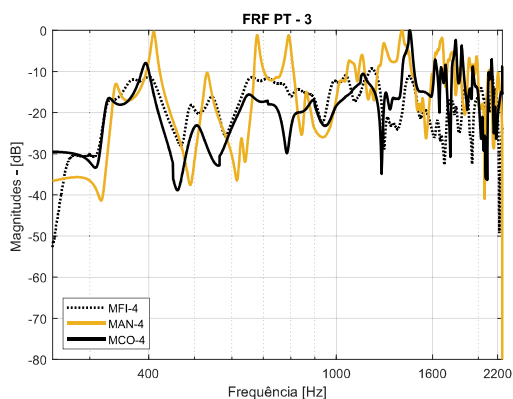
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.24 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-4.



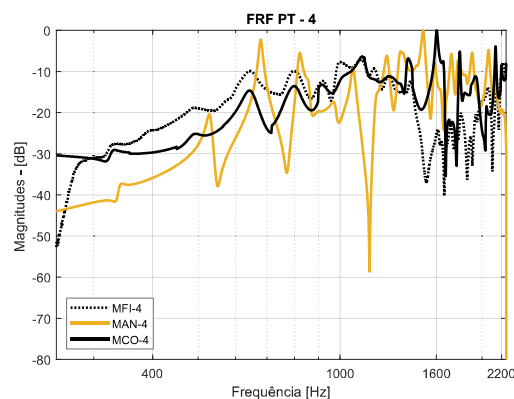
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.25 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-4.



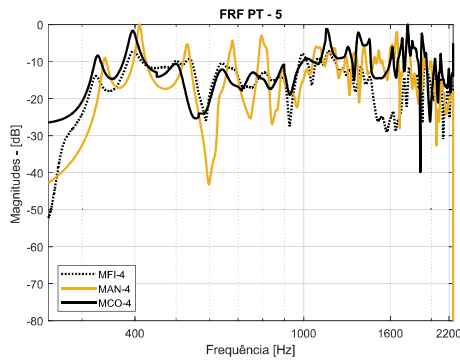
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.26 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-4.



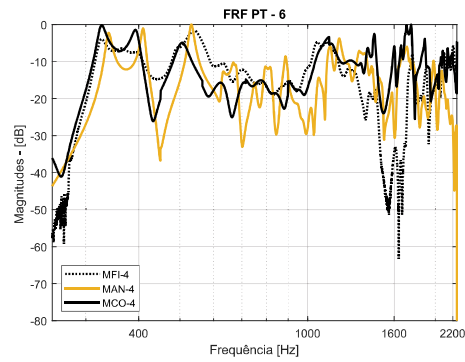
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.27 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-4.



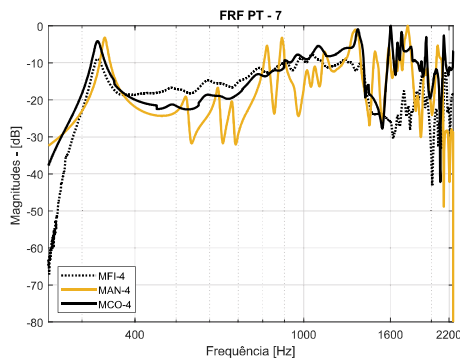
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.28 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-4.



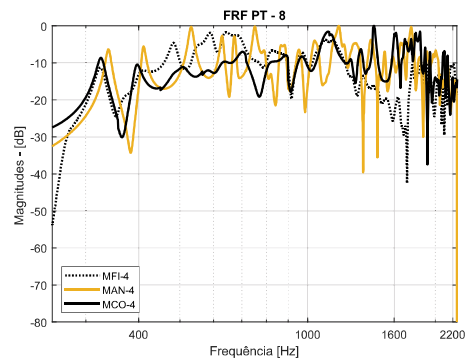
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.29 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-4.



Fonte: Arquivo pessoal.

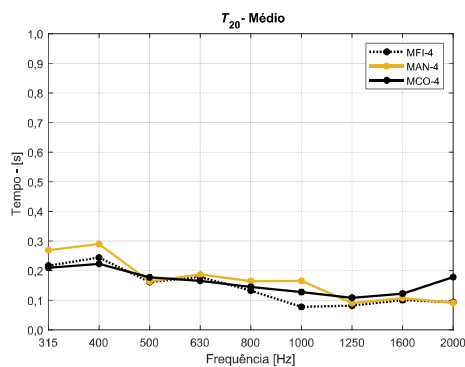
Figura 5.30 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-4.



Fonte: Arquivo pessoal.

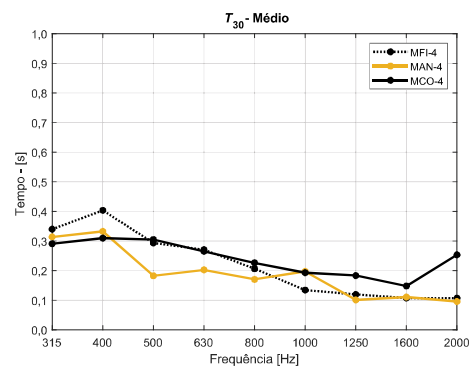
As figuras que se seguem mostram as sobreposições dos parâmetros ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e ( $T_s$ ) obtidos para FGE-4.

Figura 5.31 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-4.



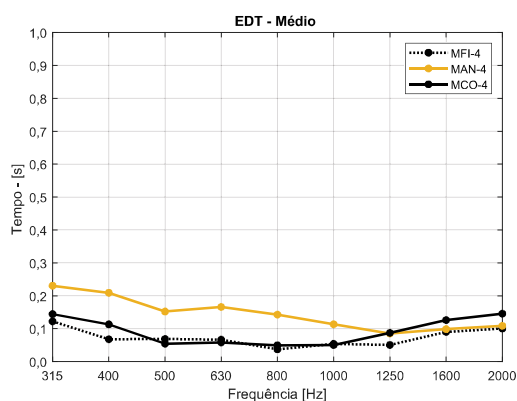
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.32 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-4.



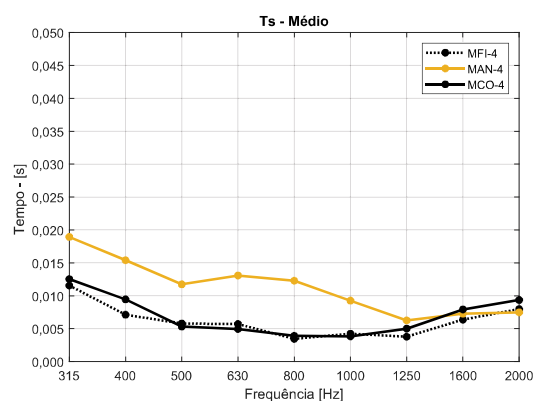
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.33 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-4.



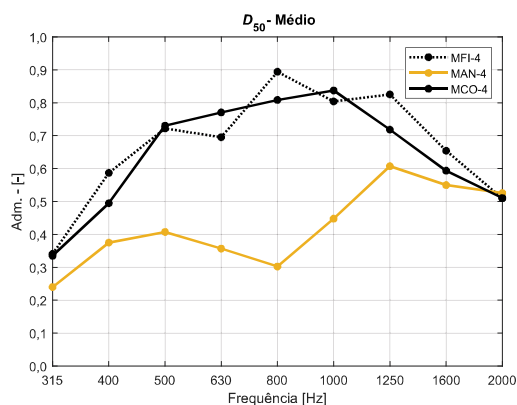
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.34 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-4.



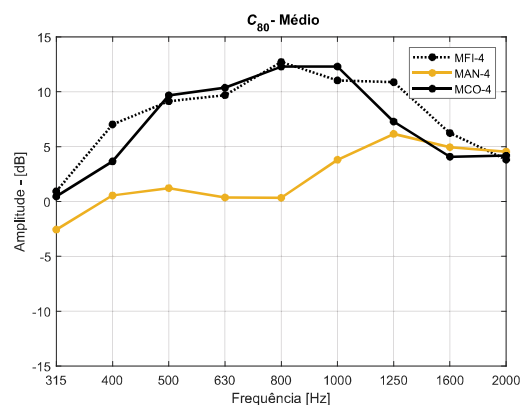
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.35 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-4.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.36 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-4.

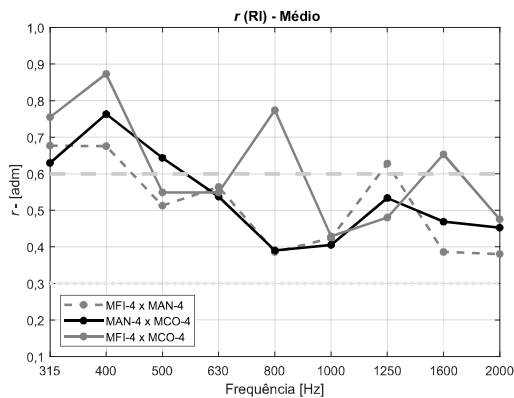


Fonte: Arquivo pessoal.

Por meio dos parâmetros apresentados nas figuras anteriores, é possível identificar que os parâmetros relacionados com as curvas de decaimento descritas pelas integrais cumulativas invertidas, ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ) e (EDT), mostram-se menos destoantes entre as três metodologias de análise. Porém, ao se avaliar os parâmetros que estão relacionados com as respostas ao impulso ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e ( $T_s$ ) é evidenciada uma maior diferença por parte dos dados obtidos no MAN-4.

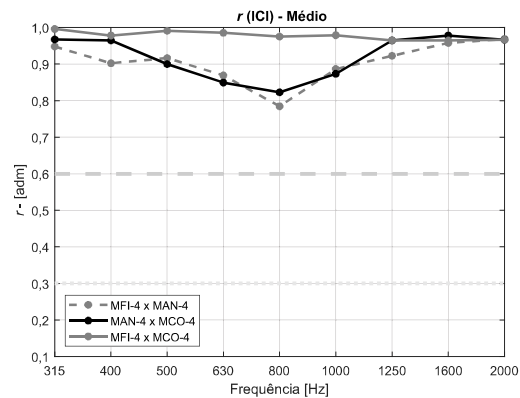
A avaliação dos coeficientes de correlação ( $r$ ) apresentados nas Figuras 5.37, 5.38 e 5.39, obtidos, mostram uma diminuição ainda mais acentuada. Os coeficientes de correlação calculados para as respostas ao impulso (RI) ficam, em sua maioria, caracterizados com uma média correlação. Para as curvas de decaimento (ICI) e (FRF) também são observadas diminuições do coeficiente de correlação e conseqüentemente da similaridade existente entre os dados.

Figura 5.37 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-4.



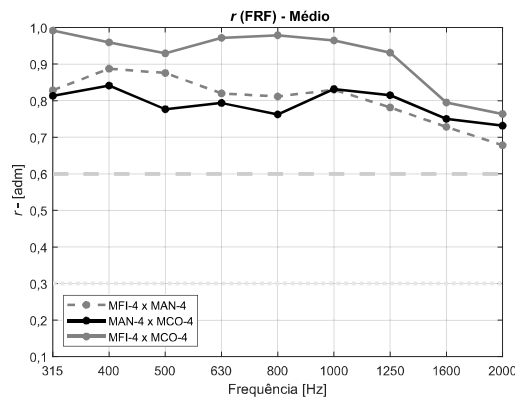
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.38 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-4.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.39 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-4.



Fonte: Arquivo pessoal.

Os próximos capítulos irão mostrar as comparações dos resultados obtidos nas avaliações dos modelos computacionais e analíticos usadas para descrever as formas geométricas FGE-3 e, de FGE-5 até FGE-12. A partir da FGE-4, todas as outras formas geométricas terão apenas alterações de forma geométrica e de posicionamento da fonte e dos receptores, sem alterações de absorção acústica ou alguma outra alteração que necessite um maior esclarecimento. Os dados de entrada que configuram as simulações em FEM para o MCO-3, para MCO-5 à MCO-12 e, as configurações de entrada que norteiam as rotinas analíticas MAN-3 e MAN-5 à MAN-12, estão presentes no Apêndice C e nos Apêndices E até L, do presente trabalho. As dimensões usadas nos modelos computacionais e analíticos de cada uma dessas abordagens e o posicionamento de fonte e receptores, também são mostradas nesses apêndices. A organização do layout desse trabalho, desta forma, visa condensar informações e tentar tornar a leitura do trabalho mais dinâmica.

## 6 AS OUTRAS FORMAS GEOMÉTRICAS

O presente capítulo é destinado a apresentar os resultados obtidos nas avaliações das formas geométricas, as quais não foi possível a construção de modelos físicos, para que pudessem ser avaliadas por medições dos campos acústicos. Sendo assim todas as formas geométricas, aqui apresentadas, foram avaliadas por meio dos modelos analíticos (MANs) e por meio dos modelos computacionais (MCOs) em elaborados em FEM. O presente capítulo mostra ainda, como foram feitas as simplificações geométricas usadas para simplificar as formas geométricas não retangulares de salas, que são mostradas a partir da Seção 6.2.

### 6.1 A FORMA GEOMÉTRICA 3 (FGE-3)

A presente seção mostrará quais as características da FGE-3, e como foram configurados os modelos MCO-3 e MAN-3. A seção mostrará ainda, todos os resultados obtidos para os parâmetros descritores do campo acústico desses modelos ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e (Ts), bem como os coeficientes de correlação ( $r$ ) calculados para a obtenção do grau de correlação entre as as respostas ao impulso (RI), entre os decaimentos (na forma da integral cumulativa invertida ICI) e também calculados para os espectros em frequência (FRFs) dos pontos de avaliação desses modelos.

#### 6.1.1 A elaboração do MCO-3 e do MAN-3

A FGE-3, foi concebida como uma alteração de FGE-2, onde a forma cubica inserida em FGE-2 agora, assume a forma de um prisma, com mesma área da base do cubo inserido em FGE-2 porém, com altura de 0,35 [m], ocupando toda a extensão da altura de FGE-3. A FGE-3 pode ser visualizada em perspectiva, nas Figuras (4.1) e (4.2). A FGE-3 não possui um modelo físico construído, estando a mesma representada apenas por seu modelo computacional MCO-3 e por seu modelo analítico MAN-3. O MCO-3 foi elaborado em *software* que faz uso do FEM, e sua geometria segue as dimensões exibidas no Apêndice C do presente trabalho. Na mesma representação é possível visualizar o posicionamento de fonte e receptores adotados nas 9 etapas de simulação. A fonte sonora no MCO-3 e em todos os modelos computacionais foi inserida sobre a forma pontual, com uma irradiação da velocidade de volume de  $5 \times 10^{-5}$  [m<sup>3</sup>/s]. As dimensões máximas de malha por etapa de simulação, as características de impedância de superfície, as superfícies as quais as impedâncias foram atribuídas e o equivalente em coeficiente de absorção acústica dessas impedâncias de superfície (calculados com a Equação (3.23)) também são mostrados no Quadro C.2 do Apêndice C. O quadro mostra ainda, o valor

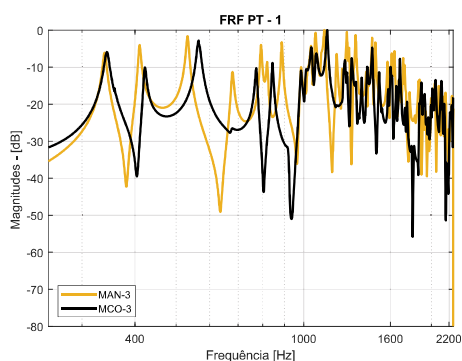
do somatório das áreas de superfícies internas ( $S$ ) do MCO-3 criado.

O MAN-3 por sua vez, foi criado com base nas dimensões da representação mostrada no Apêndice C do presente trabalho. É possível notar que o modelo retangular analisado em MAN-3, possui as mesmas configurações de fonte-receptor e as mesmas dimensões de MAN-1 e MAN-2. Isso se deve ao fato, de a área (em planta) e o volume da FGE-3 se alteram em cerca de 2,5 % da área e do volume de MAN-1. Outro ponto considerado está no fato de as faces permanecerem paralelas, sem alteração de distância, na maior parte de FGE-3. Assim, optou-se por usar a mesma configuração do MAN-1 para representar o MAN-3.

### 6.1.2 Comparação dos resultados obtidos nas diferentes modelagens da FGE-3.

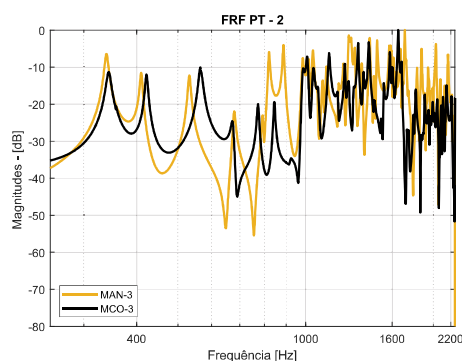
Após as simulações do MCO-3, após o término dos cálculos dos MAN-3 e após o término dos processamentos, os dados obtidos nessas modelagens, são apresentados nas figuras que se seguem. Nas FRFs apresentadas, Figuras 6.1 até 6.8, é possível identificar novamente a discordância dos picos de ressonância entre MAN-3 e MCO-3.

Figura 6.1 – FRFs do PT-1 da FGE-3.



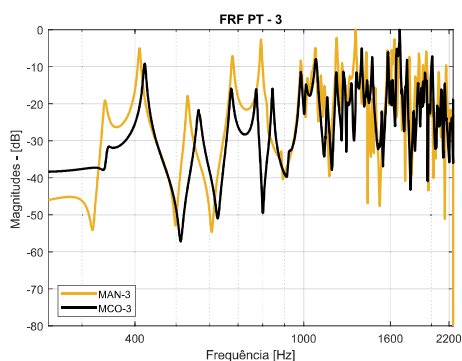
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.2 – FRFs do PT-2 da FGE-3.



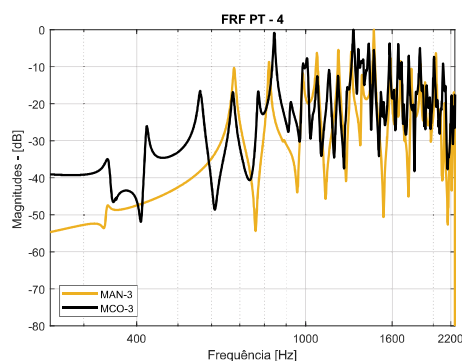
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.3 – FRFs do PT-3 da FGE-3.



Fonte: Arquivo pessoal.

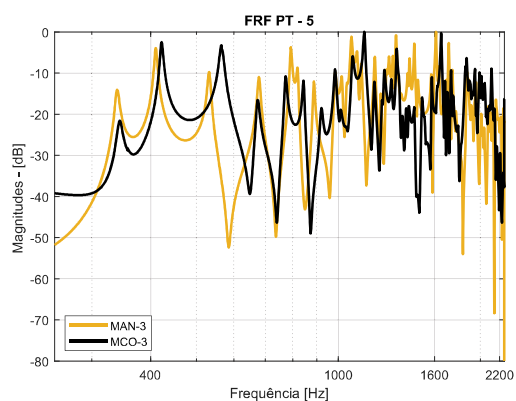
Figura 6.4 – FRFs do PT-4 da FGE-3.



Fonte: Arquivo pessoal.

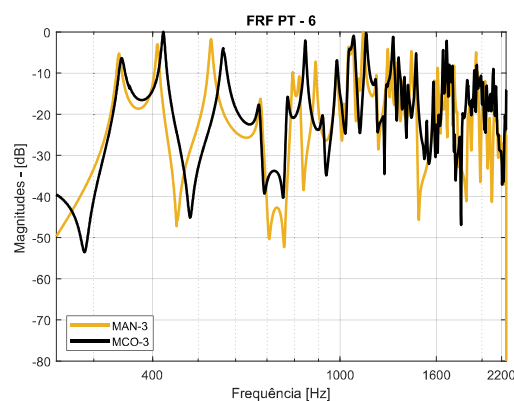


Figura 6.5 – FRFs do PT-5 da FGE-3.



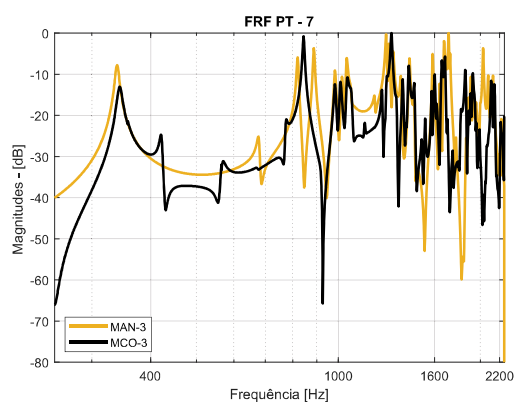
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.6 – FRFs do PT-6 da FGE-3.



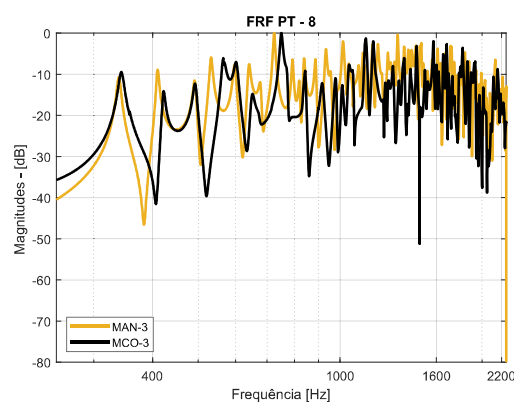
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.7 – FRFs do PT-7 da FGE-3.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.8 – FRFs do PT-8 da FGE-3.

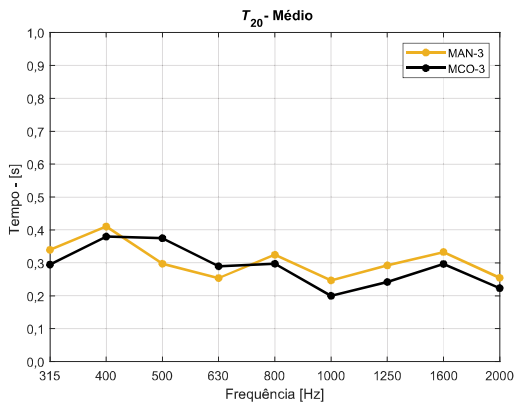


Fonte: Arquivo pessoal.

Os valores dos parâmetros acústicos ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $C_{80}$ ), ( $D_{50}$ ), ( $T_s$ ) e os valores dos coeficientes de correlação ( $r$ ), foram obtidos em banda de 1/3 de oitava e serão mostrados nas seguintes figuras. Os valores apresentados não indicam grandes diferenças nos valores dos parâmetros obtido por meio MAN-3 e MCO-3.

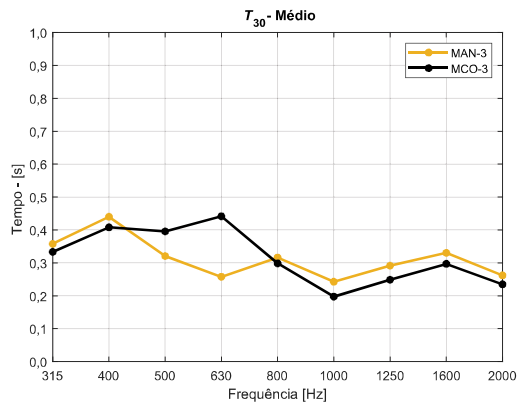
As comparações das correlações que indicam a similaridade das RIs (Figura 6.15), das ICIs (Figura 6.16) e das FRFs (Figura 6.17), entre as abordagens usadas para descrever a FGE-3. Nas figuras é possível identificar uma redução de grau de correlação, com maior redução para as FRFs e RIs. Dependendo da banda analisada, a correlação passa de forte para média.

Figura 6.9 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-3.



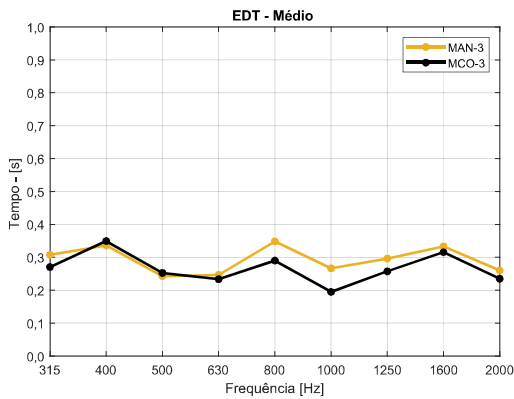
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.10 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-3.



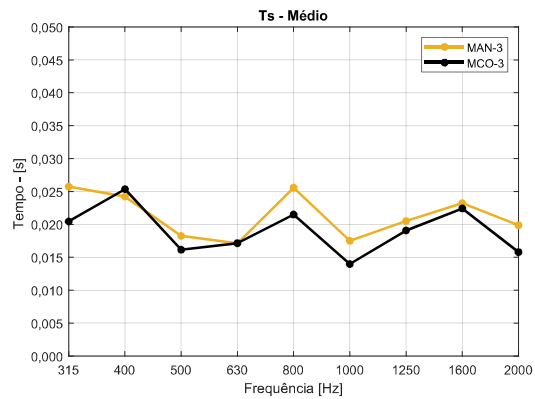
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.11 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-3.



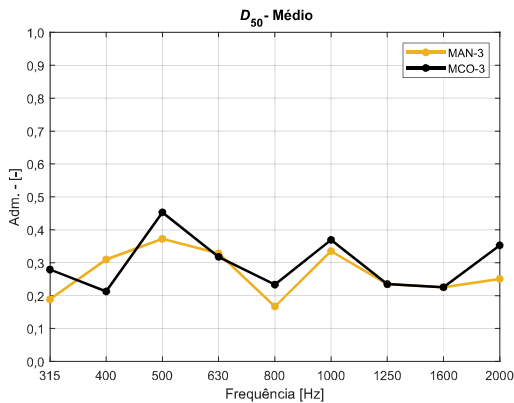
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.12 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-3.



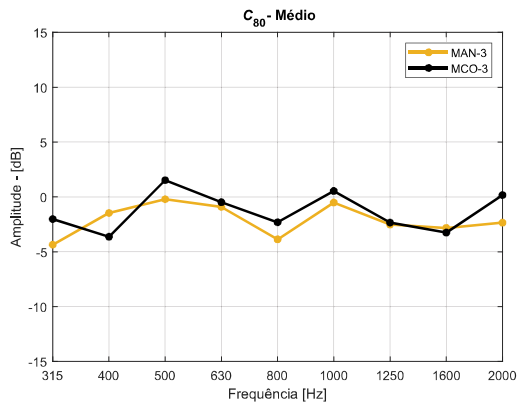
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.13 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-3.



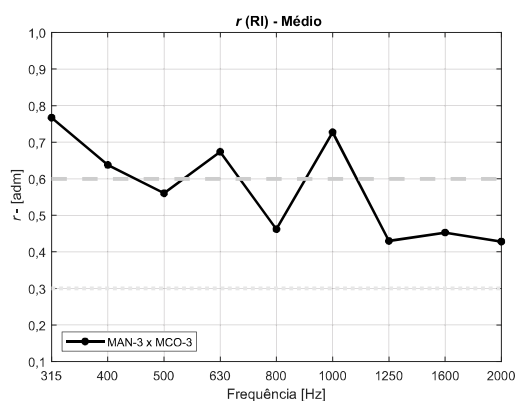
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.14 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-3.



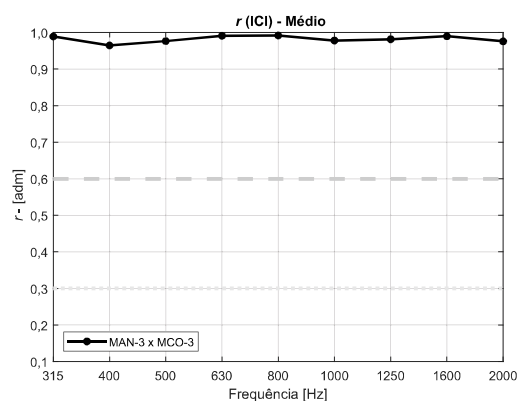
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.15 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-3.



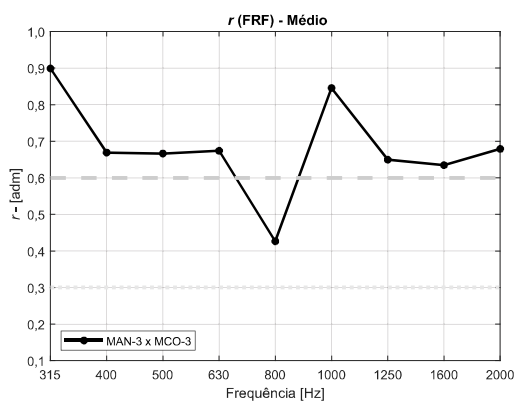
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.16 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-3.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.17 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-3.



Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.2 FGE-5 E OS PROCESSO DE SIMPLIFICAÇÃO GEOMÉTRICA

Os modelos analíticos MAN-5 até MAN-12, foram desenvolvidos para descrever o campo acústico das formas geométricas de FGE-5 até FGE-12. Ao se avaliar salas com geometrias que fogem do padrão retangular, alguma simplificação geométrica é necessária, para aproximá-las de uma sala retangular. Para a presente pesquisa essa simplificação, aqui chamada de "retangularização", foi estabelecida, para cada forma geométrica estudada, seguindo três critérios básicos: manter a área de piso (planta), manter o volume e manter a menor dimensão (altura ou pé direito) do modelo não retangular. Como as formas FGE-5, FGE-6, FGE-7 e FGE-8, são as que mais se assemelham a um retângulo (visualizando em planta), optou-se por manter a maior dimensão em planta ( $L_x = 0,508$  [m]), no processo de se estabelecer uma

geometria retangular. Como as menores dimensões das FGEs são iguais a ( $L_z = 0,350$  [m]), essa dimensão não se alterou nos modelos computacionais e analíticos, conforme pré estabelecido. A segunda maior dimensão em planta ( $L_y$ ) apresenta seu valor no resultado oriundo da divisão entre área em planta, de cada forma geométrica, pelo valor da sua maior dimensão ( $L_x$ ), assim, o valor adotado para as dimensões internas do MAN-5, por exemplo são:  $L_x = 0,508$  [m],  $L_z = 0,35$  [m] e  $L_y = 0,208/0,508$  [m] ou  $L_y = 0,408$  [m]. Os valores dessas dimensões, estão apresentados em MAN-5 do Apêndice E.

Já para as FGE-9 à FGE-12, foram atribuídos valores médios para  $L_x$  e  $L_y$ , e ajustados até que, o valor da área (em planta), da forma geométrica respectiva, fosse igual a multiplicação dos valores de  $L_x$  e  $L_y$  do modelo analítico, mantendo áreas e volumes iguais nos modelos computacionais e analíticos, visto que o valor de  $L_z$ , de maneira pré estabelecida, não se alteraria nas diferentes formas de avaliação. A Tabela 6.1 mostra como ficaram as áreas (em planta) e os volumes simulados nos modelos computacionais e as dimensões de  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  usadas nos modelos analíticos para cada forma geométrica estudada.

Tabela 6.1 – Áreas, volumes dos modelos computacionais que nortearam as dimensões dos modelos analíticos.

FGE-i	MCO-i		MAN-i				
	$S_p$ [m <sup>2</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$L_x$ [m]	$L_y$ [m]	$L_z$ [m]	$S_p$ [m <sup>2</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]
FGE-1	0,213	0,075	0,508	0,420	0,350	0,213	0,075
FGE-2	0,204	0,074	0,508	0,420	0,350	0,213	0,075
FGE-3	0,205	0,073	0,508	0,420	0,350	0,213	0,075
FGE-4	0,213	0,069	0,508	0,420	0,325	0,213	0,069
FGE-5	0,208	0,073	0,510	0,408	0,350	0,208	0,073
FGE-6	0,214	0,075	0,510	0,420	0,350	0,214	0,075
FGE-7	0,205	0,072	0,510	0,402	0,350	0,205	0,072
FGE-8	0,207	0,072	0,510	0,406	0,350	0,207	0,072
FGE-9	0,204	0,071	0,483	0,422	0,350	0,204	0,071
FGE-10	0,208	0,073	0,483	0,430	0,350	0,208	0,073
FGE-11	0,213	0,075	0,506	0,420	0,350	0,213	0,074
FGE-12	0,190	0,067	0,488	0,390	0,350	0,190	0,067

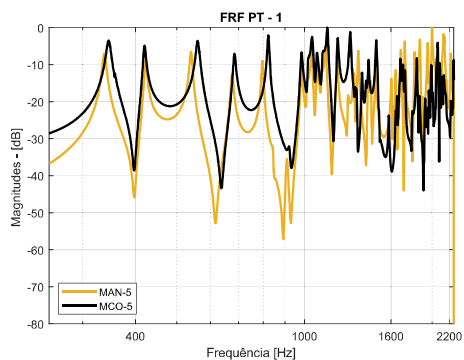
Fonte: Arquivo pessoal.

### 6.2.1 Comparação dos resultados obtidos nas diferentes modelagens da FGE-5.

No presente capítulo serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-5 e MAN-5 usadas para descrever o comportamento acústico da forma geométrica FGE-5. As Figuras 6.18 à 6.25 apresentam as sobreposições das FRFs obtidas em MAN-5 e MCO-5. O fato da FGE-5 ser uma geometria quase retangular, faz com que as FRFs sejam bem similares porém, é de fácil identificar que, para alguns pontos de avali-

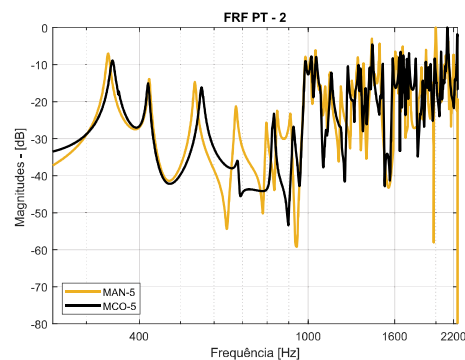
ação (caso da faixa de frequências entre 500 [Hz] e 600 [Hz] do ponto de avaliação PT - 3), o MAN-5 indique a presença de uma ressonância não indicada por MCO-5.

Figura 6.18 – FRFs do PT-1 da FGE-5.



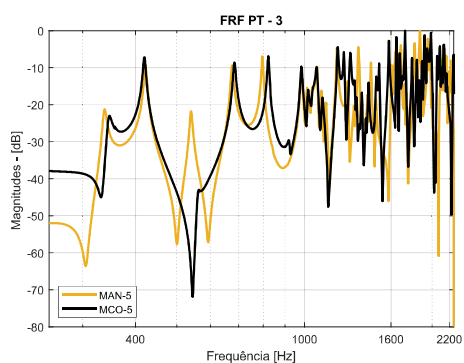
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.19 – FRFs do PT-2 da FGE-5.



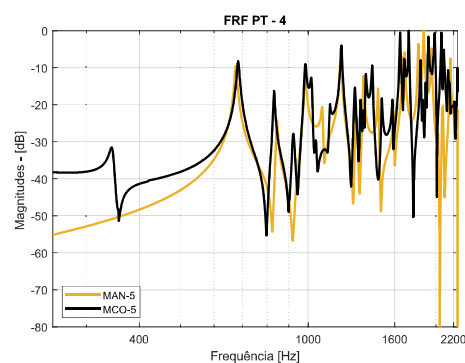
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.20 – FRFs do PT-3 da FGE-5.



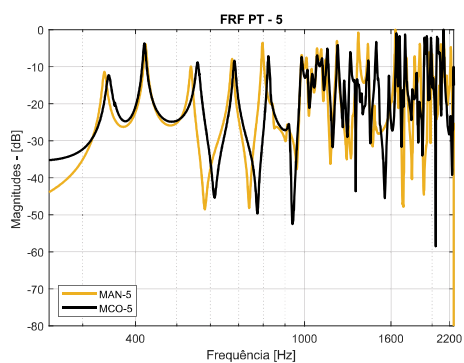
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.21 – FRFs do PT-4 da FGE-5.



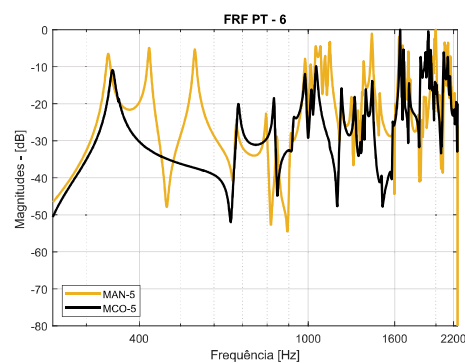
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.22 – FRFs do PT-5 da FGE-5.



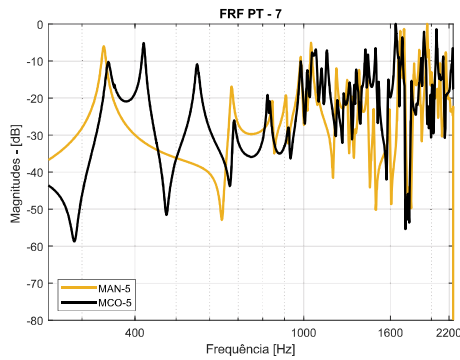
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.23 – FRFs do PT-6 da FGE-5.



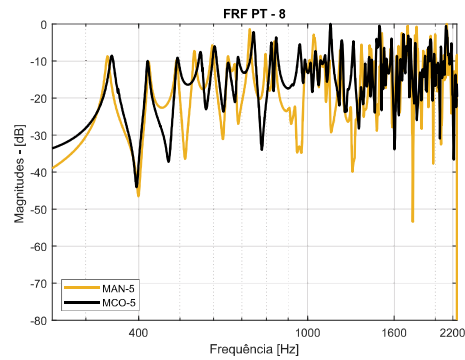
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.24 – FRFs do PT-7 da FGE-5.



Fonte: Arquivo pessoal.

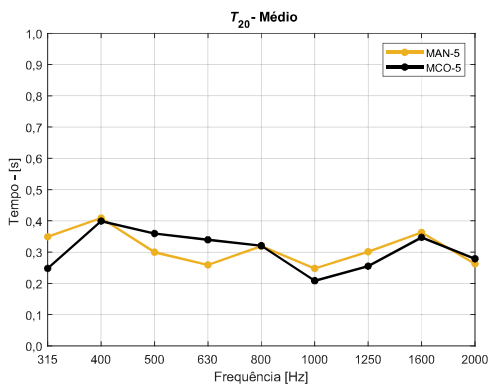
Figura 6.25 – FRFs do PT-8 da FGE-5.



Fonte: Arquivo pessoal.

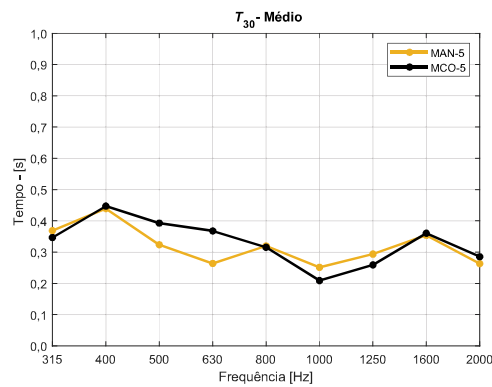
As comparações entre os parâmetros acústicos obtidos em MAN-5 e MCO-5 (Figuras 6.26 à 6.31) não apresentam grandes variações. Por outro lado as Figuras 6.32, 6.33 e 6.34 indiciam redução do coeficiente de correlação. Sendo essa diminuição mais uma vez, mais notória nos coeficientes que correlacionam as respostas ao impulso (RI) obtidas.

Figura 6.26 – Parâmetro  $T_{20}$  médio FGE-5.



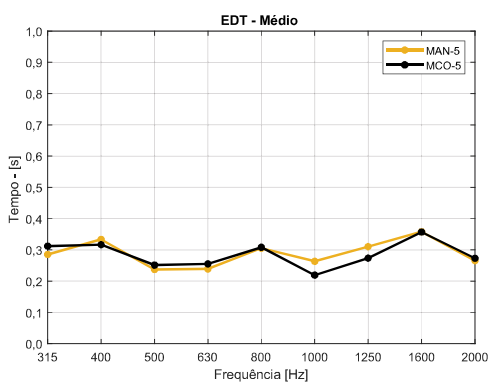
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.27 – Parâmetro  $T_{30}$  médio FGE-5.



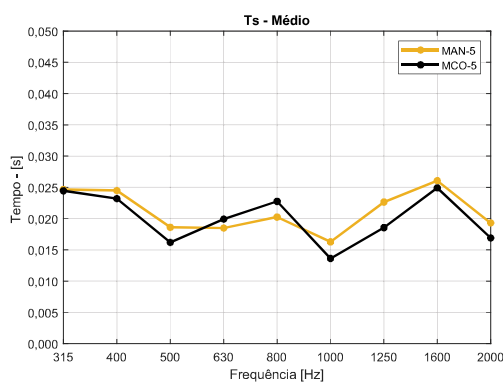
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.28 – Parâmetro EDT médio FGE-5.



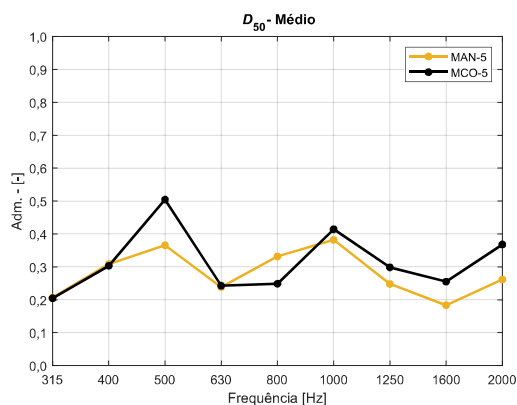
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.29 – Parâmetro  $T_s$  médio FGE-5.



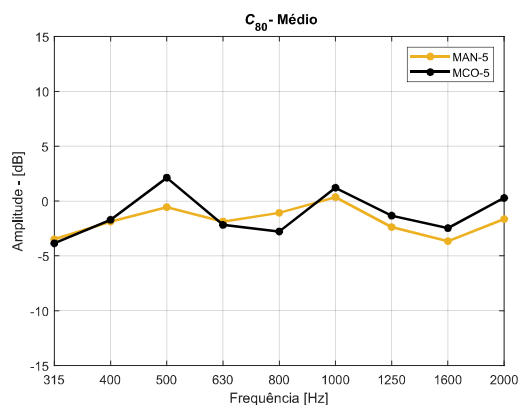
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.30 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-5.



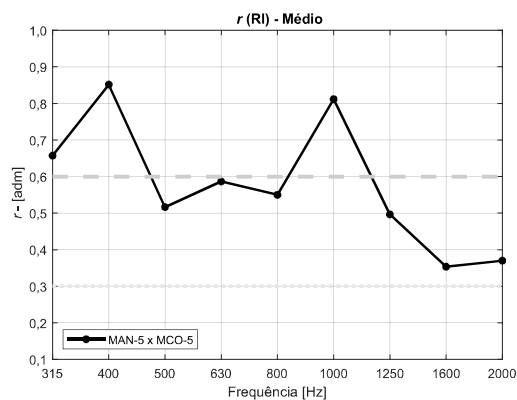
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.31 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-5.



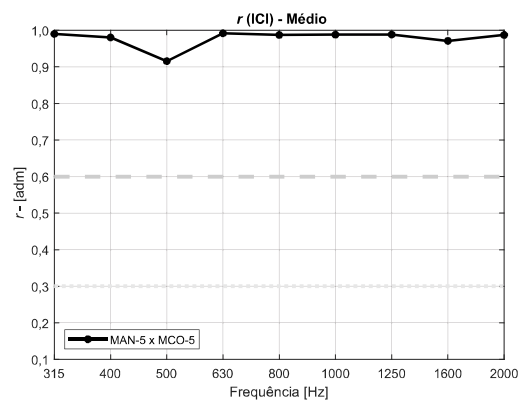
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.32 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-5.



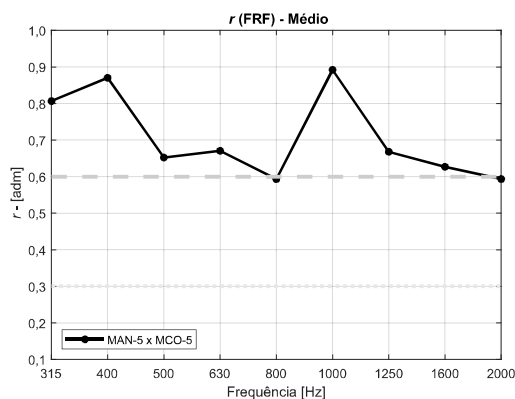
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.33 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-5.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.34 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-5.



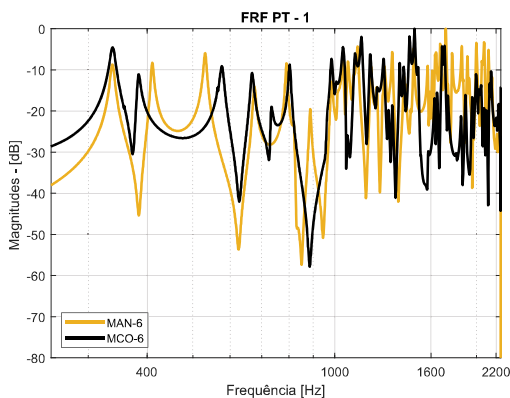
Fonte: Arquivo pessoal.

### 6.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-6.

Na presente seção, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-6 e MAN-6 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-6. Nas FRFs mostradas nas Figuras 6.35 e 6.42 mais uma vez, é notória a não concordância das ressonâncias.

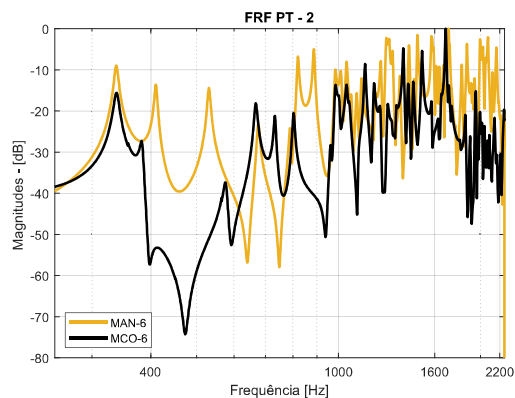
Dentre parâmetros obtidos com o uso do MAN-6 e MCO-6 e mostrados nas figuras seguintes, os que se relacionam com tempos de decaimentos ( $T_{20}$ ,  $T_{30}$  e EDT) apresentam valores mais próximos. Os parâmetros que se relacionam com os balanços energéticos ( $C_{80}$ ,  $D_{50}$  e  $T_s$ ), tem, nas bandas de mais alta frequência, maior concordância e, nas de mais baixa frequência, uma pior concordância.

Figura 6.35 – FRFs do PT-1 da FGE-6.



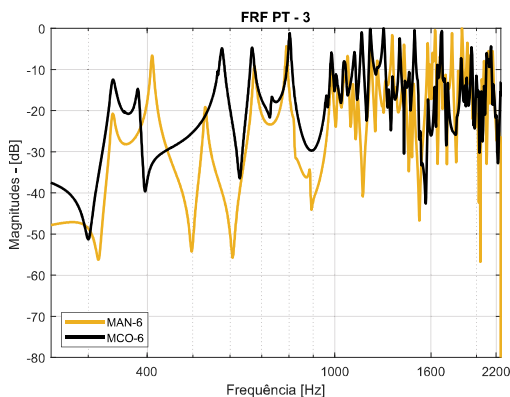
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.36 – FRFs do PT-2 da FGE-6.



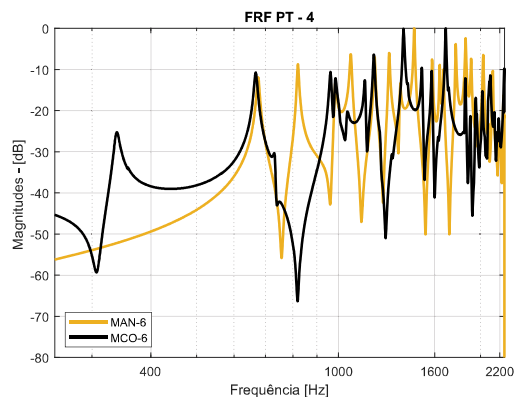
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.37 – FRFs do PT-3 da FGE-6.



Fonte: Arquivo pessoal.

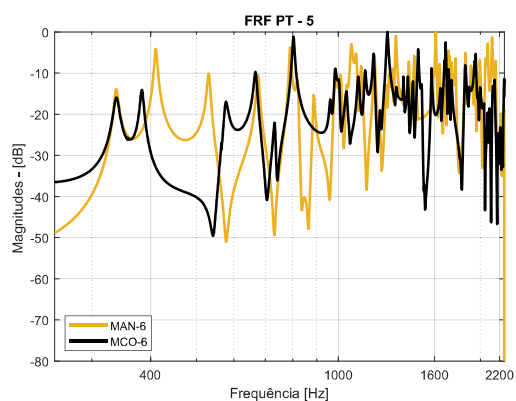
Figura 6.38 – FRFs do PT-4 da FGE-6.



Fonte: Arquivo pessoal.

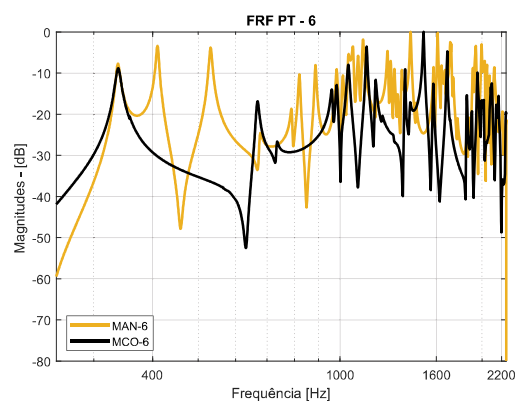


Figura 6.39 – FRFs do PT-5 da FGE-6.



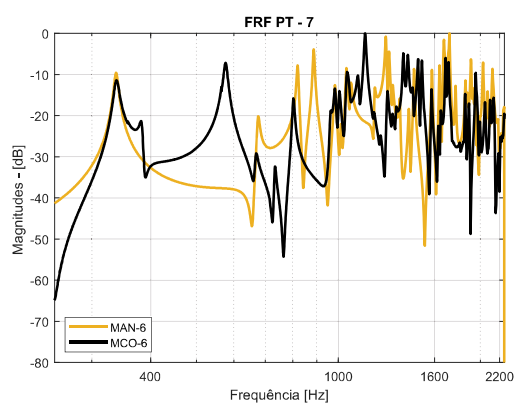
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.40 – FRFs do PT-6 da FGE-6.



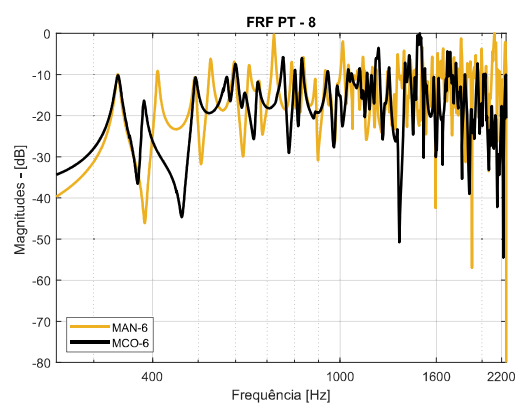
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.41 – FRFs do PT-7 da FGE-6.

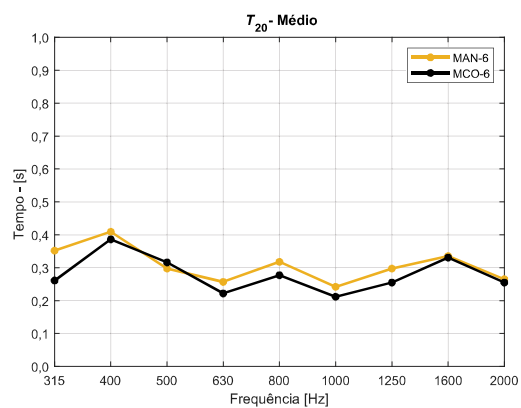


Fonte: Arquivo pessoal.

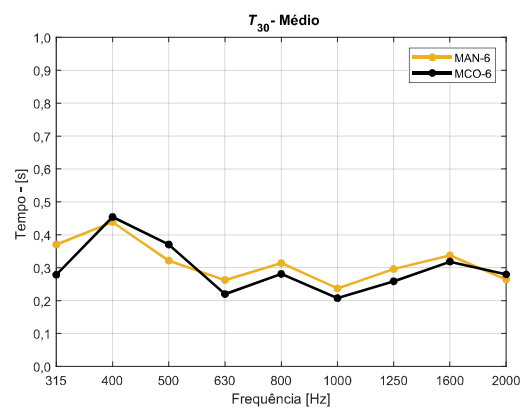
Figura 6.42 – FRFs do PT-8 da FGE-6.



Fonte: Arquivo pessoal.

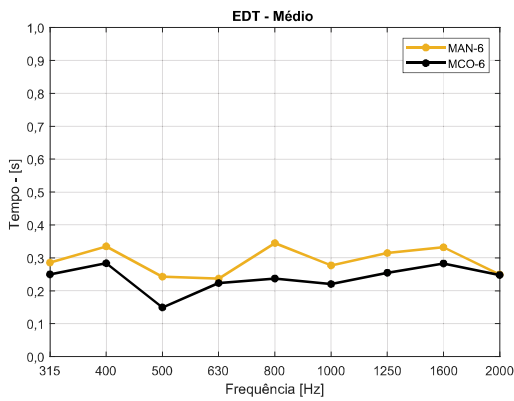
Figura 6.43 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-6.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.44 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-6.

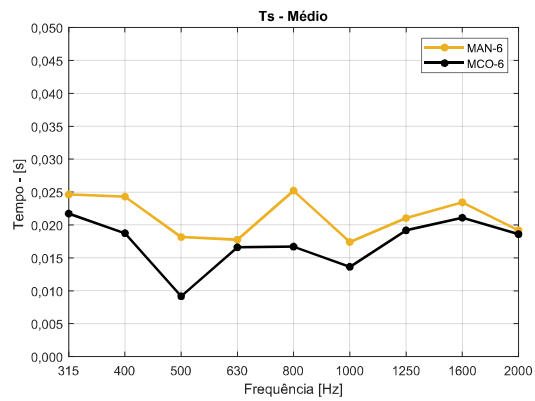
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.45 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-6.



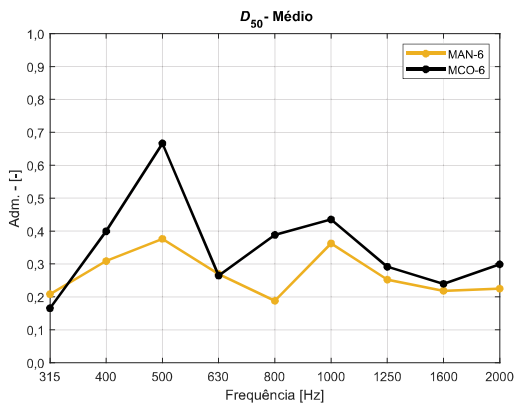
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.46 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-6.



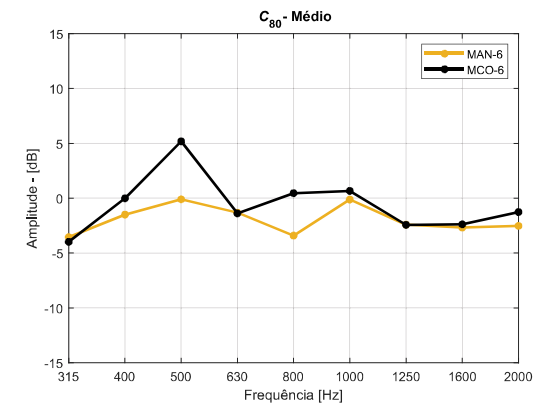
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.47 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-6.



Fonte: Arquivo pessoal.

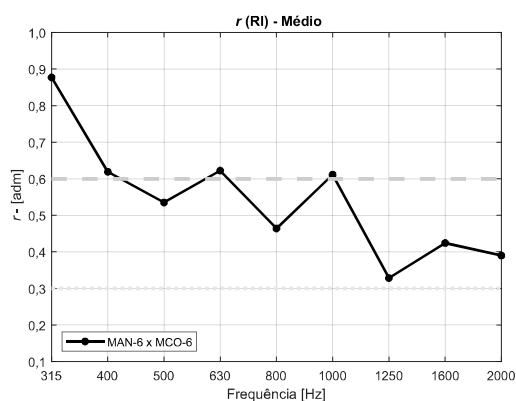
Figura 6.48 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-6.



Fonte: Arquivo pessoal.

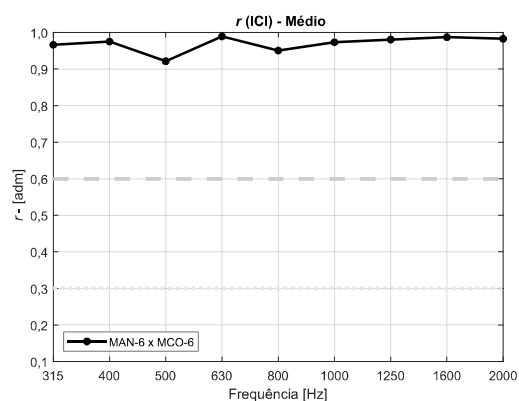
Nas correlações apresentadas nas Figuras 6.49, 6.50 e 6.51, para MAN-6 e MCO-6, a que mais se destaca é a Figura 6.49. É notório que a correlação das respostas ao impulso diminuiu a ponto de, em quase todas as 9 bandas de análise, apresentar uma correlação mediana. Nas correlações apresentadas, quando são comparadas as ICIs, mais uma vez pode ser visualizado que a similaridade possui uma classificação muito alta. As correlações das FRFs MCO-6 e MAN-6 mostram-se em sua maioria, com uma correlação alta porém, transitando com algumas classificações medianas, dependendo da banda de frequência analisada.

Figura 6.49 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-6.



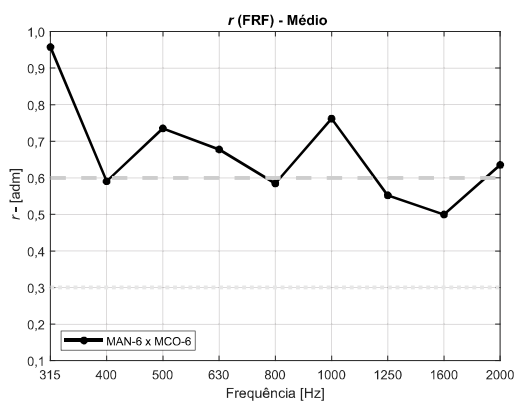
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.50 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-6.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.51 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-6.



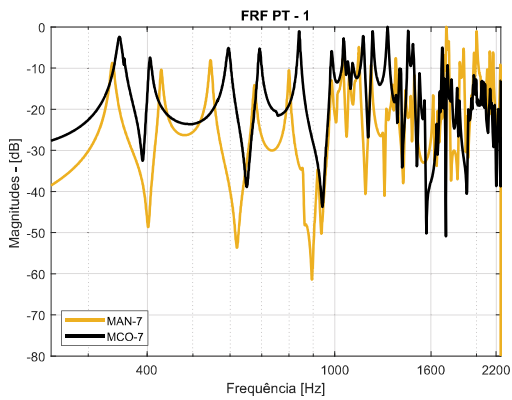
Fonte: Arquivo pessoal.

#### 6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-7.

Na presente seção, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-7 e MAN-7 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-7.

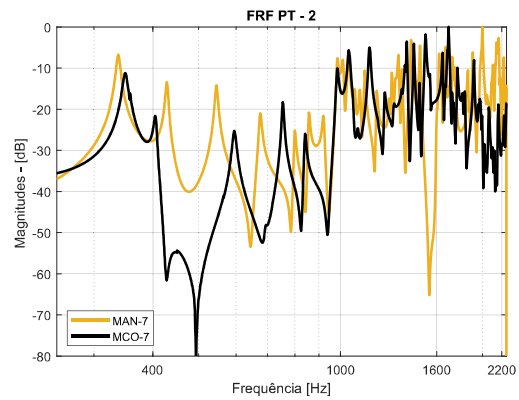
As FRFs apresentadas nas Figuras 6.52 à 6.59 continuam mostrando um padrão de não compatibilidade de ressonâncias. Os parâmetros acústicos obtidos nas duas metodologias de análise repetem o padrão dos parâmetros obtidos para FGE-6, valores de ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ) e (EDT), mais similares e, ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e (Ts) com maior diferença nas mais baixas frequências.

Figura 6.52 – FRFs do PT-1 da FGE-7.



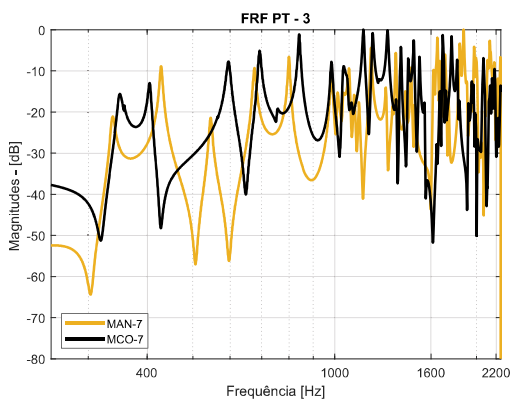
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.53 – FRFs do PT-2 da FGE-7.



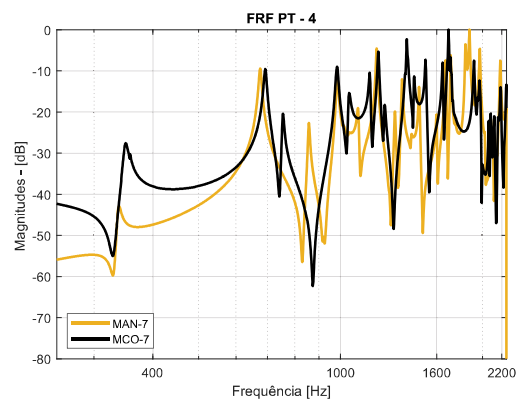
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.54 – FRFs do PT-3 da FGE-7.



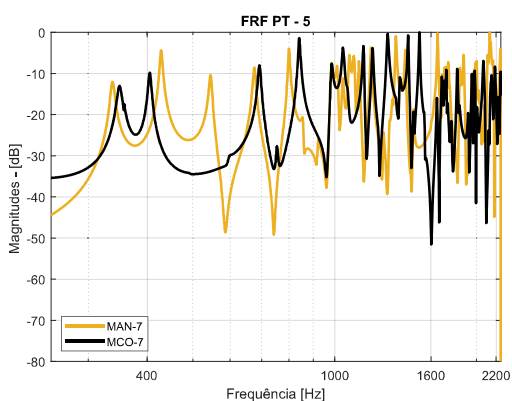
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.55 – FRFs do PT-4 da FGE-7.



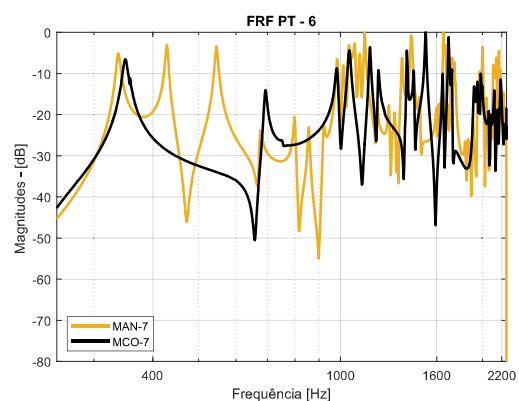
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.56 – FRFs do PT-5 da FGE-7.



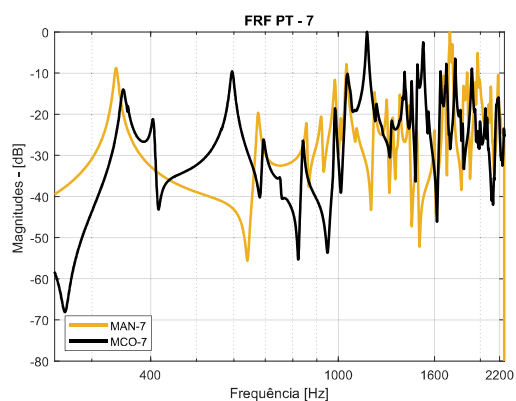
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.57 – FRFs do PT-6 da FGE-7.



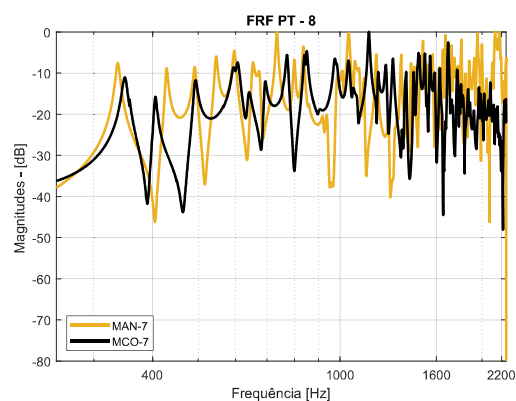
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.58 – FRFs do PT-7 da FGE-7.

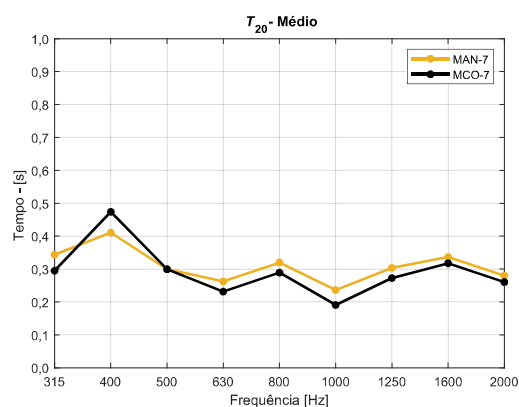


Fonte: Arquivo pessoal.

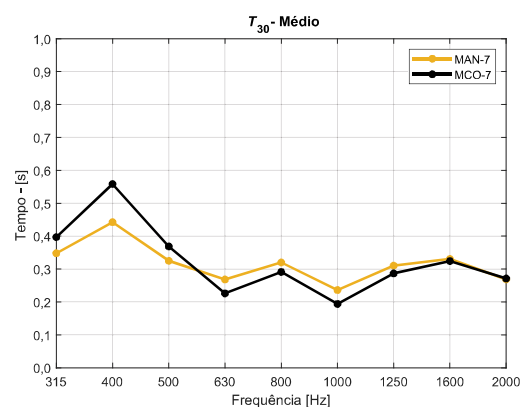
Figura 6.59 – FRFs do PT-8 da FGE-7.



Fonte: Arquivo pessoal.

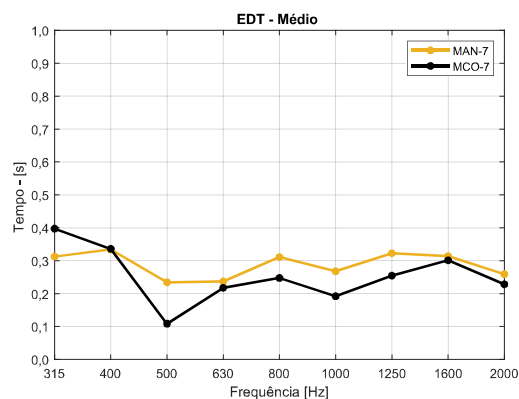
Figura 6.60 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-7.

Fonte: Arquivo pessoal.

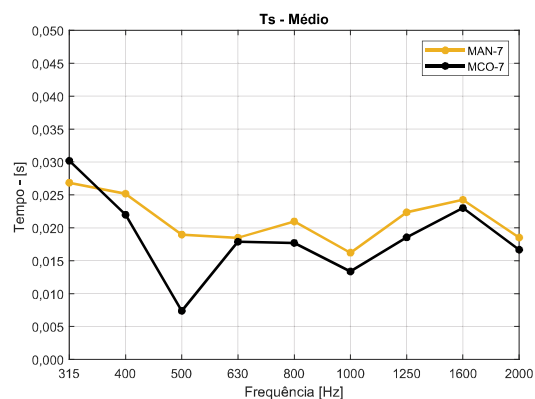
Figura 6.61 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-7.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.62 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-7.

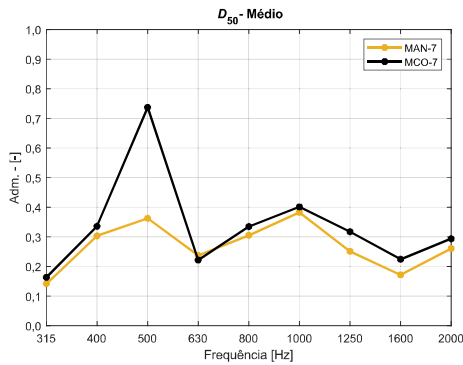


Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.63 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-7.

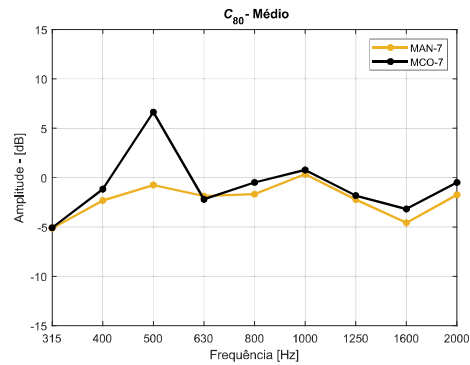
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.64 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-7.



Fonte: Arquivo pessoal.

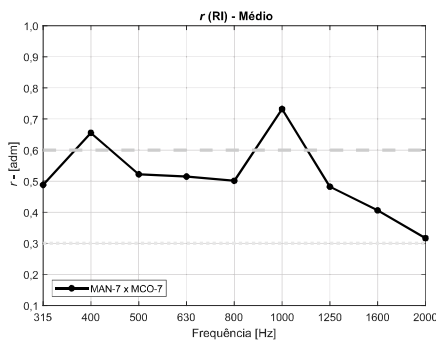
Figura 6.65 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-7.



Fonte: Arquivo pessoal.

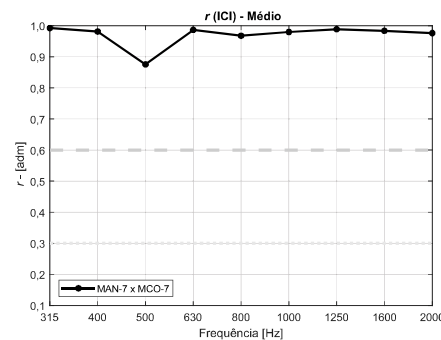
Nas correlações apresentadas pelas Figuras nas 6.66, 6.67 e 6.68, para MAN-7 e MCO-7, novamente a que mais se destaca é a que apresenta as correlações das respostas ao impulso, Figura 6.66. É notório que a correlação das respostas ao impulso diminuíram a ponto de, das 9 bandas de análise, apenas duas apresentam uma correlação forte correlação.

Figura 6.66 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-7.



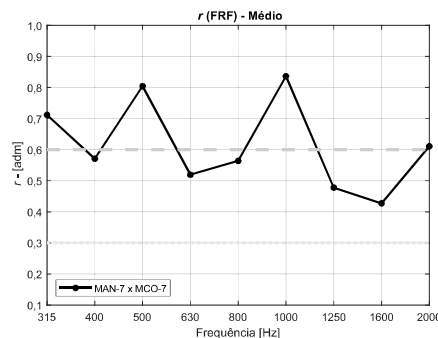
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.67 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-7.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.68 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-7.

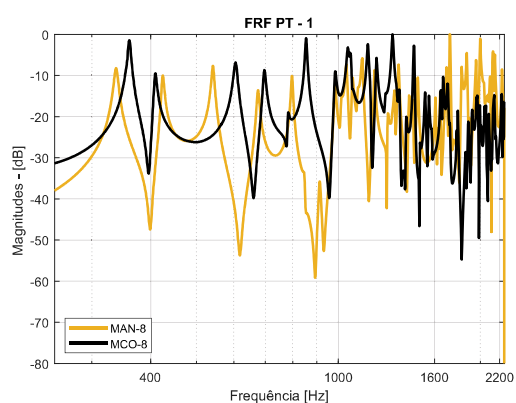


Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-8.

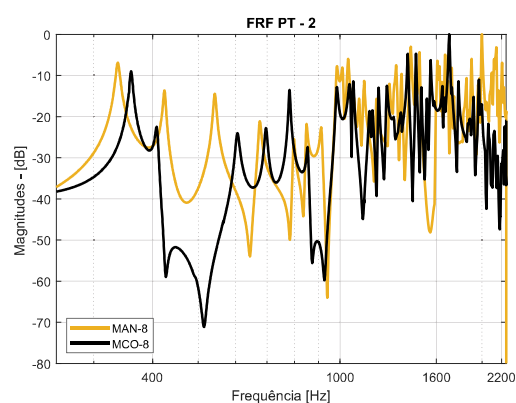
Na presente seção, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-8 e MAN-8 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-8. As FRFs apresentadas nas Figuras 6.69 até 6.76 continuam mostrando um padrão de não compatibilidade de ressonâncias, em algumas faixas de frequências.

Figura 6.69 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-8.



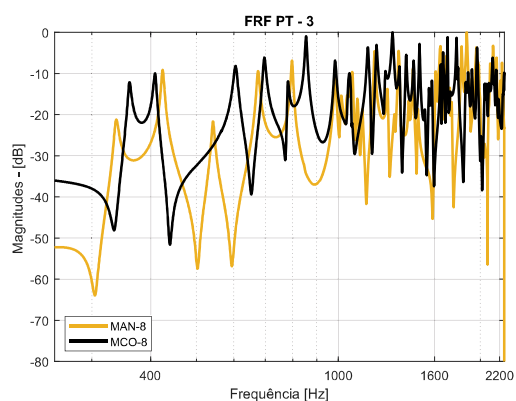
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.70 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-8.



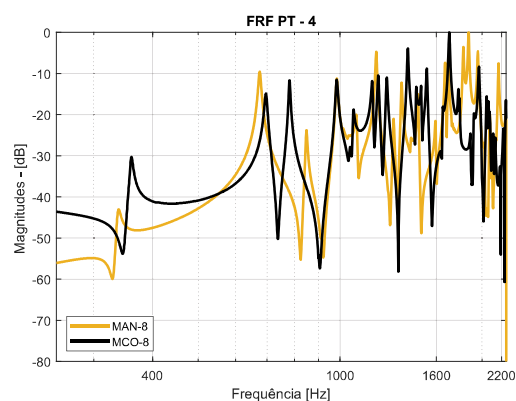
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.71 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-8.



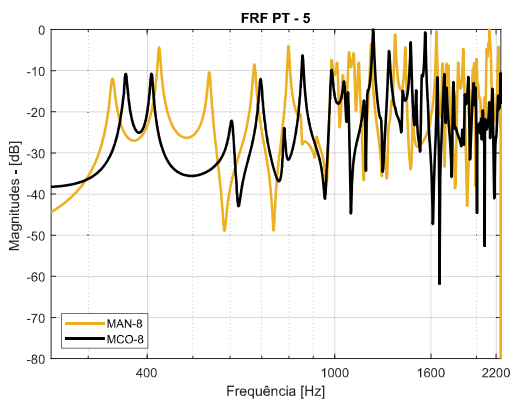
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.72 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-8.



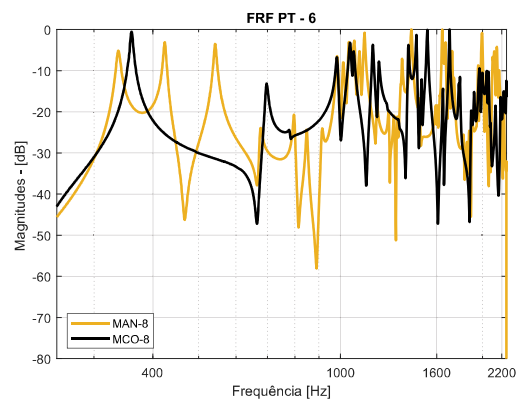
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.73 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-8.



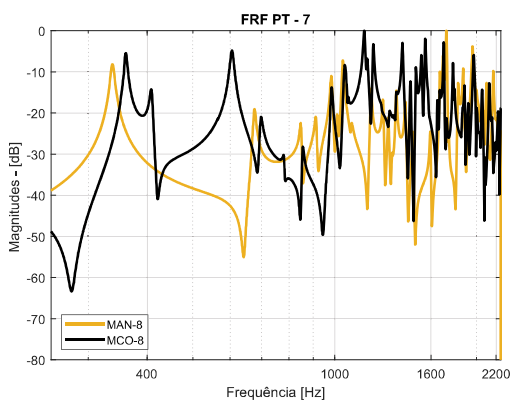
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.74 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-8.



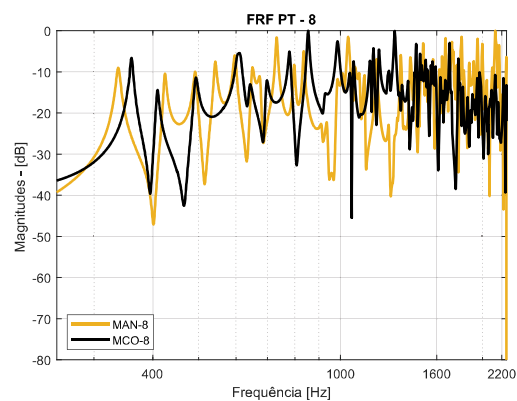
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.75 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-8.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.76 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-8.



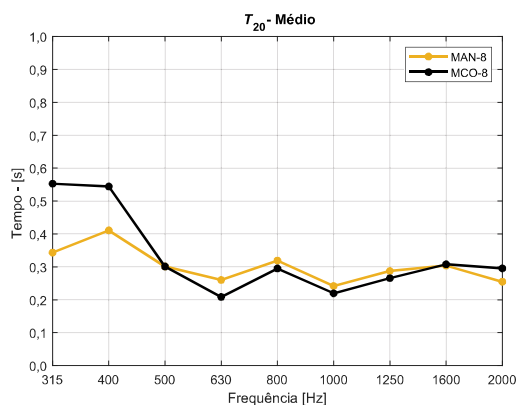
Fonte: Arquivo pessoal.

Os parâmetros acústicos obtidos nas duas metodologias de análise repetem o padrão dos parâmetros obtidos para FGEs anteriores, valores de  $(T_{20})$ ,  $(T_{30})$  e  $(EDT)$ , similares e  $(D_{50})$ ,  $(C_{80})$  e  $(T_s)$  com maior diferença nas mais baixas frequências.

Nas correlações apresentadas nas Figuras 6.83, 6.84 e 6.85 para MAN-8 e MCO-8, mais uma vez, a que mais se destaca é a que apresenta as correlações da resposta ao impulso, Figura 6.83. Novamente é notório que a correlação das respostas ao impulso diminuíram a ponto de, das 9 bandas de análise, apenas duas apresentam uma correlação forte correlação, agora já bem próximas do limite entre forte e media correlação.

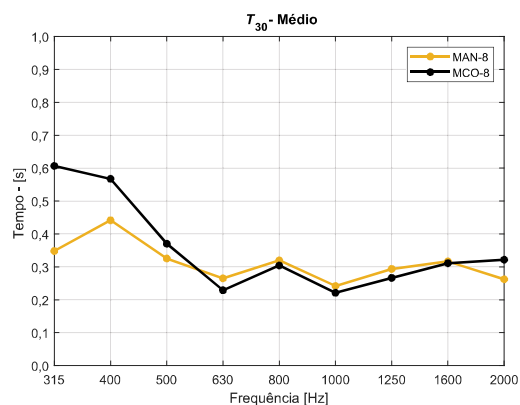


Figura 6.77 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-8.



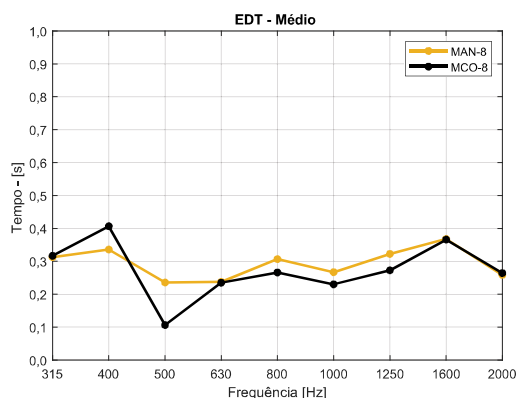
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.78 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-8.



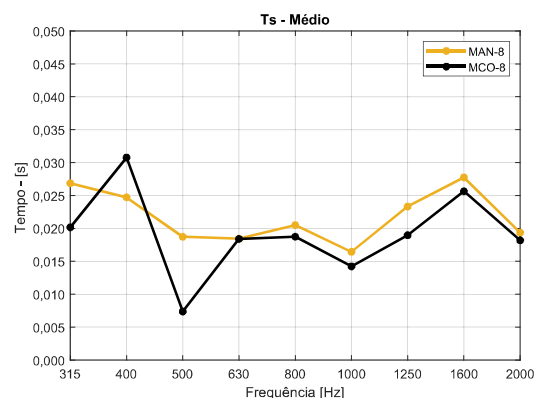
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.79 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-8.



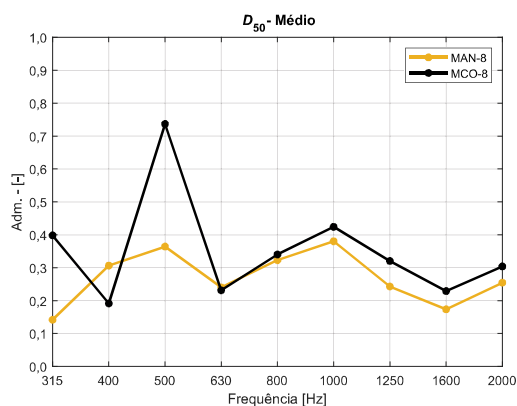
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.80 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-8.



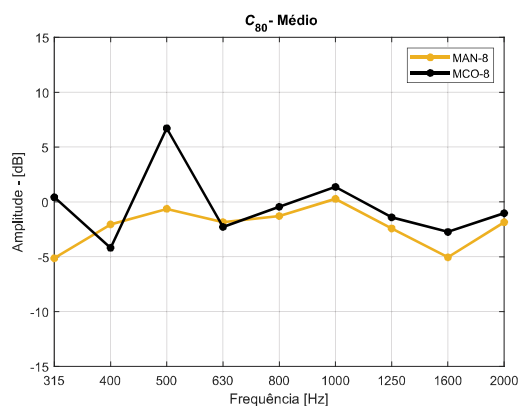
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.81 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-8.



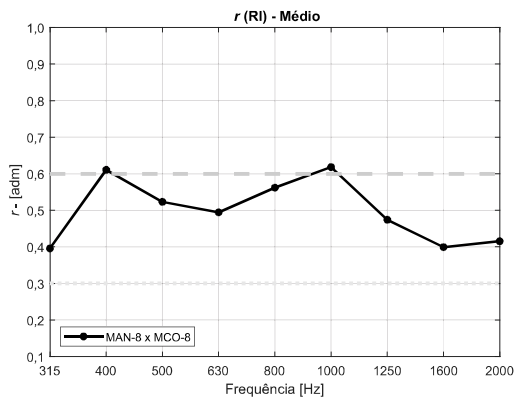
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.82 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-8.



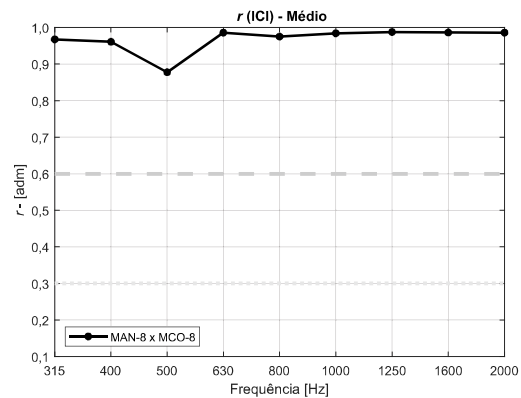
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.83 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-8.



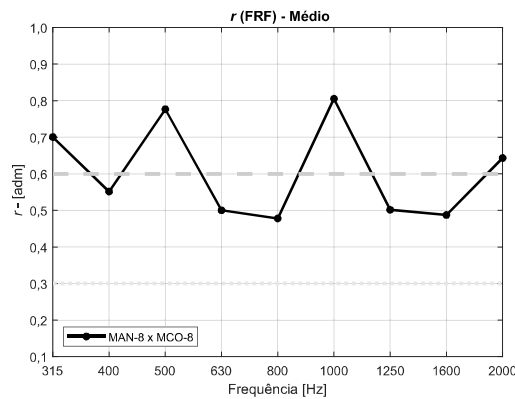
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.84 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-8.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.85 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-8.



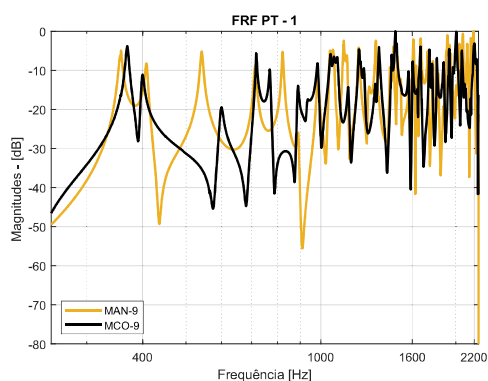
Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-9.

No presente capítulo, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-9 e MAN-9 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-9. As FRFs apresentadas nas Figuras 6.86 até 6.93 continuam mostrando um padrão de não compatibilidade de ressonâncias, em algumas faixas de frequências. Os parâmetros acústicos obtidos nas duas metodologias de análise repetem o padrão dos parâmetros obtidos anteriormente, porém agora valores de ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ) e (EDT), com pequenas alterações e ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e ( $T_s$ ) com uma diferença ainda maior nas mais baixas frequências. As correlações apresentadas nas figuras 6.100, 6.101 e 6.102, para MAN-9 e

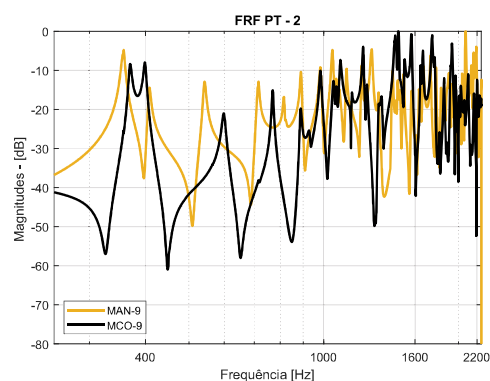
MCO-9, mais uma vez, a que mais se destaca é a que apresenta as correlações da resposta ao impulso, Figura 6.100. A correlação das respostas ao impulso diminuíram a valores próximos do limite superior de uma fraca correlação, em algumas bandas de frequência.

Figura 6.86 – FRFs do PT-1 da FGE-9.



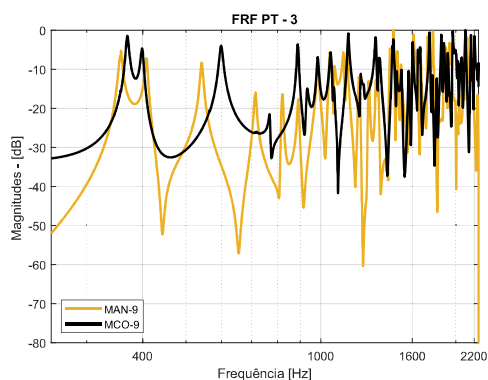
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.87 – FRFs do PT-2 da FGE-9.



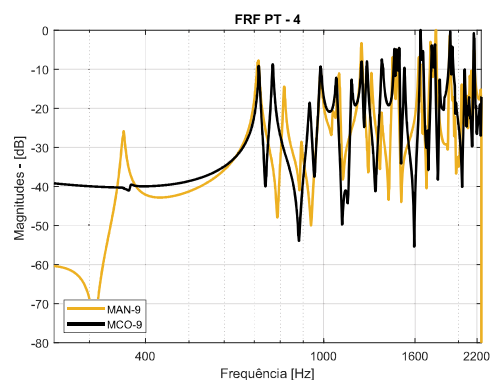
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.88 – FRFs do PT-3 da FGE-9.



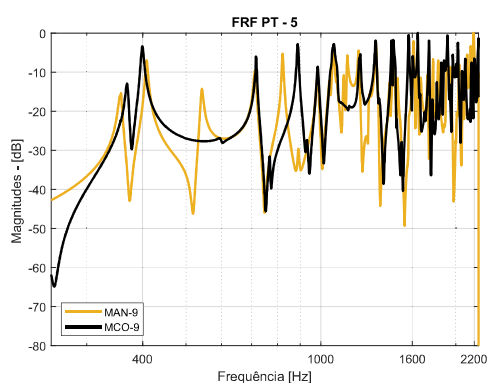
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.89 – FRFs do PT-4 da FGE-9.



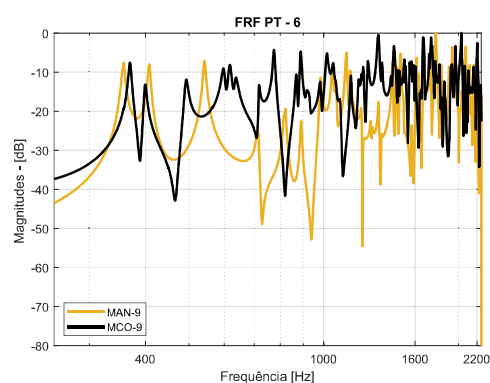
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.90 – FRFs do PT-5 da FGE-9.



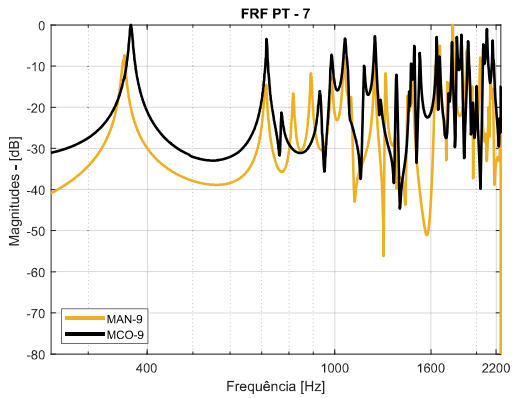
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.91 – FRFs do PT-6 da FGE-9.



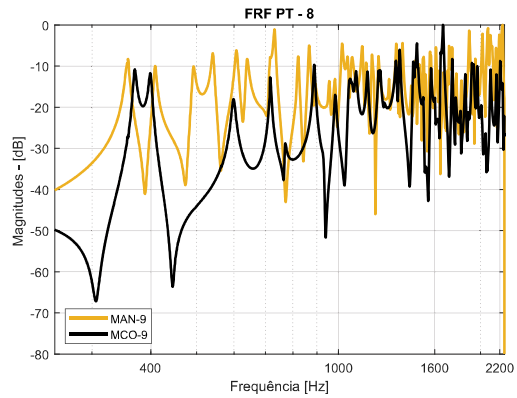
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.92 – FRFs do PT-7 da FGE-9.



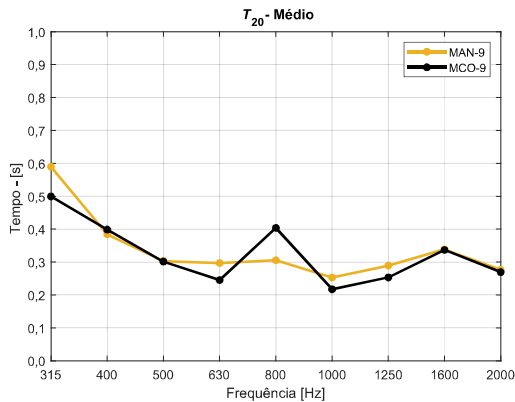
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.93 – FRFs do PT-8 da FGE-9.



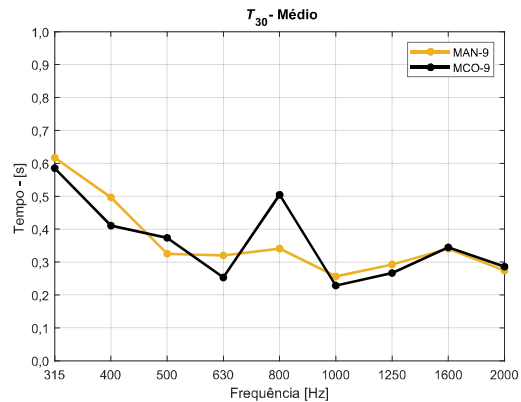
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.94 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-9.



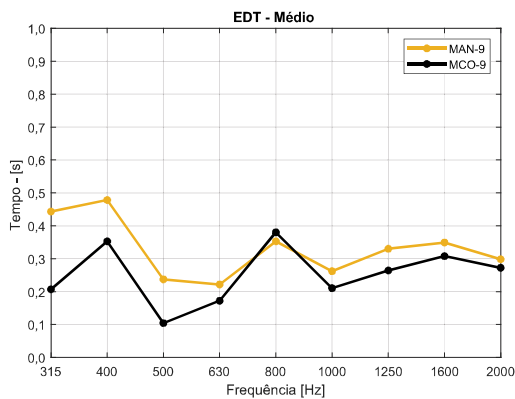
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.95 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-9.



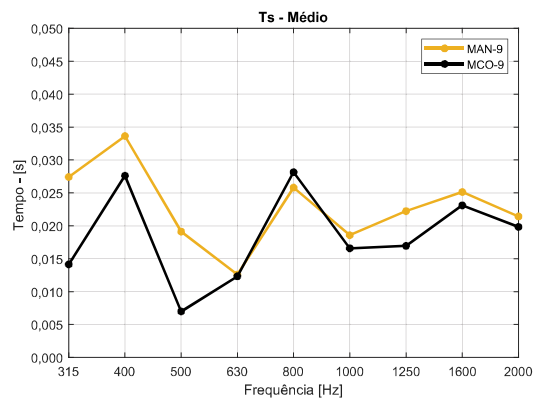
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.96 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-9.



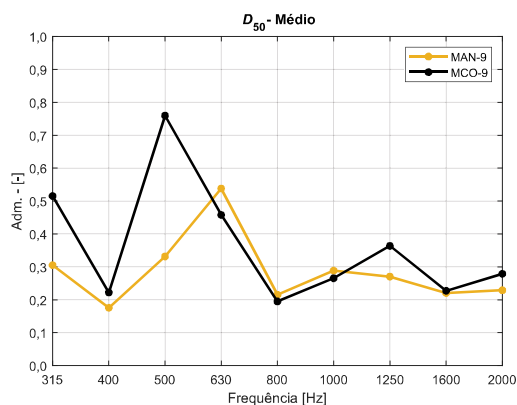
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.97 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-9.



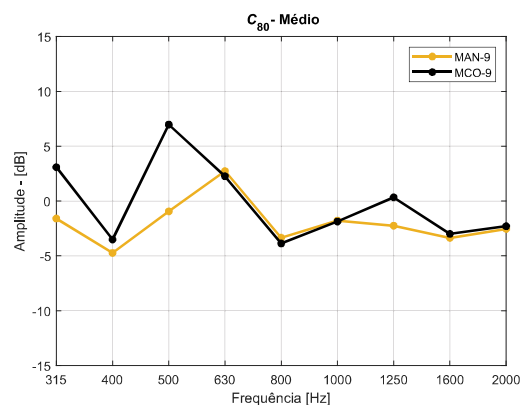
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.98 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-9.



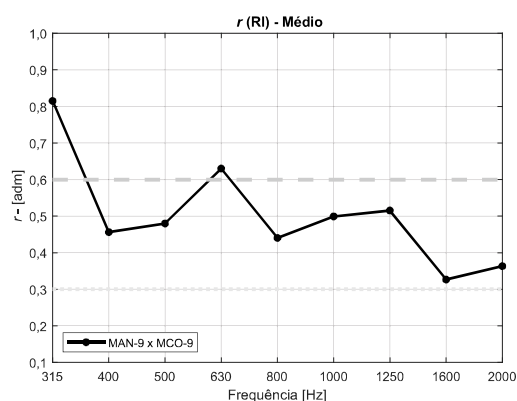
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.99 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-9.



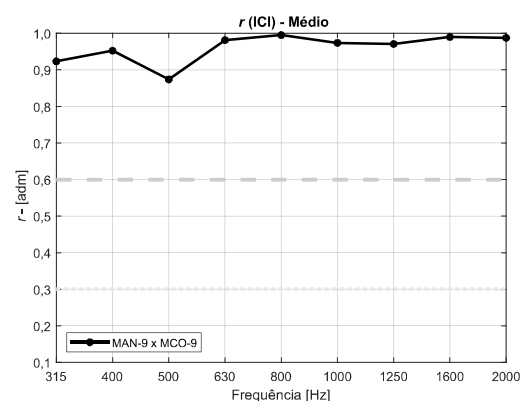
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.100 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-9.



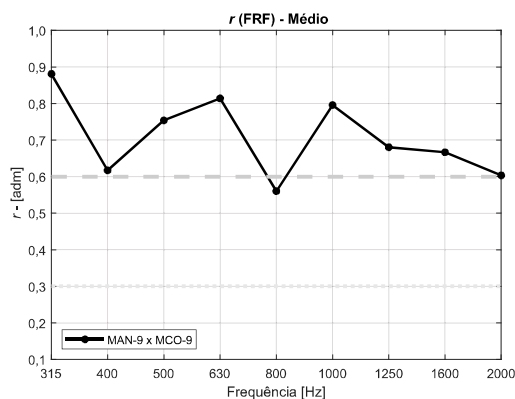
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.101 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-9.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.102 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-9.

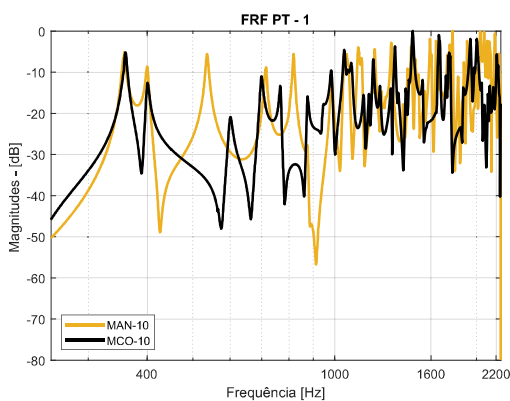


Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-10.

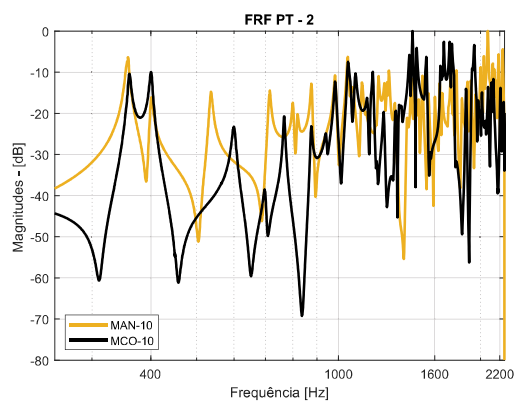
No presente capítulo, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-10 e MAN-10 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-10. As FRFs apresentadas nas Figuras 6.103 à 6.110 continuam mostrando o mesmo padrão das comparações anteriores, de não compatibilidade de ressonâncias, em algumas faixas de frequências. Os parâmetros acústicos obtidos nas duas metodologias de análise repetem o padrão dos parâmetros obtidos anteriormente, com valores de ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ) e (EDT), com pequenas alterações e ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e ( $T_s$ ) com uma diferença ainda maior nas mais baixas frequências.

Figura 6.103 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-10.



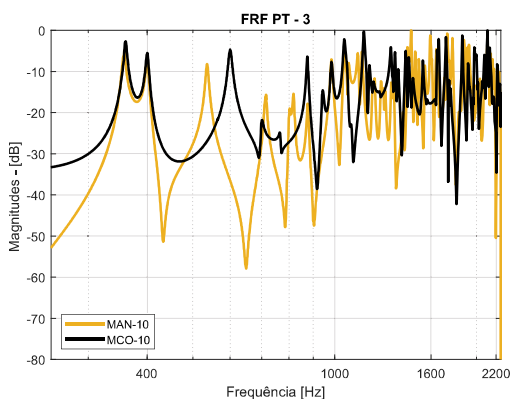
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.104 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-10.



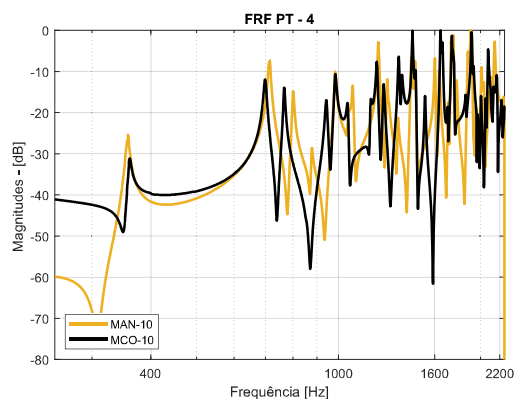
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.105 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-10.



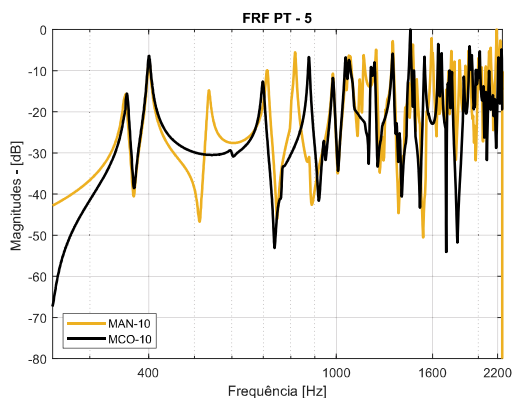
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.106 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-10.



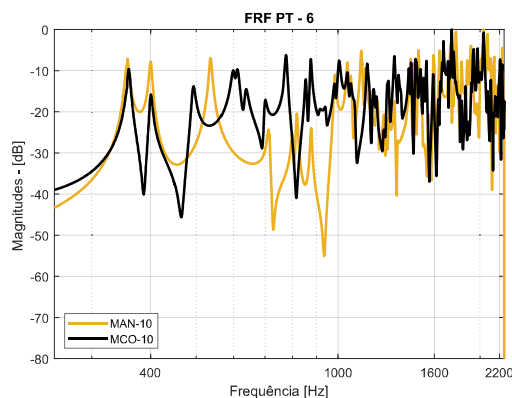
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.107 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-10.



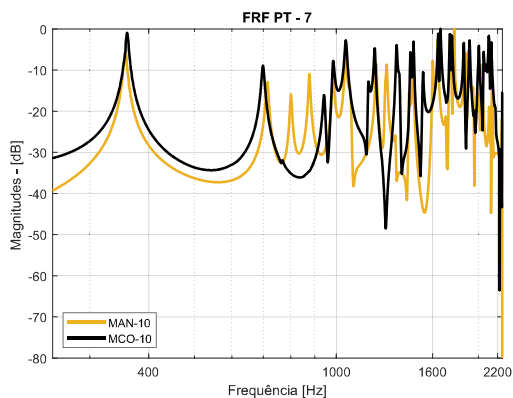
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.108 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-10.



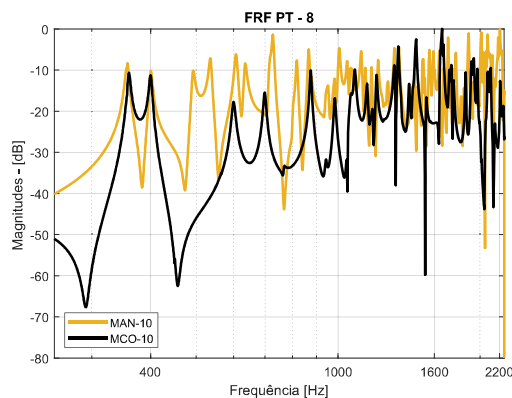
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.109 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-10.



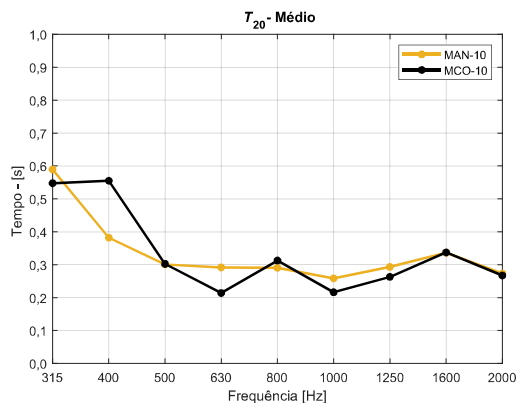
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.110 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-10.



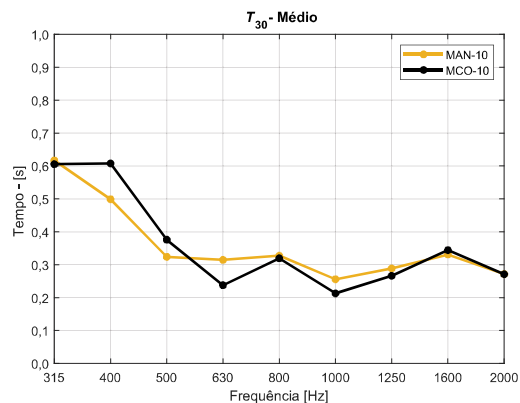
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.111 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-10.



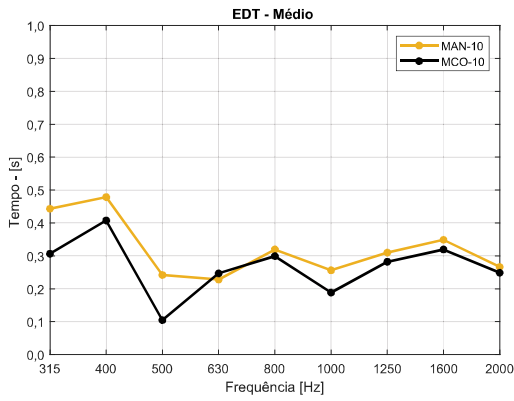
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.112 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-10.



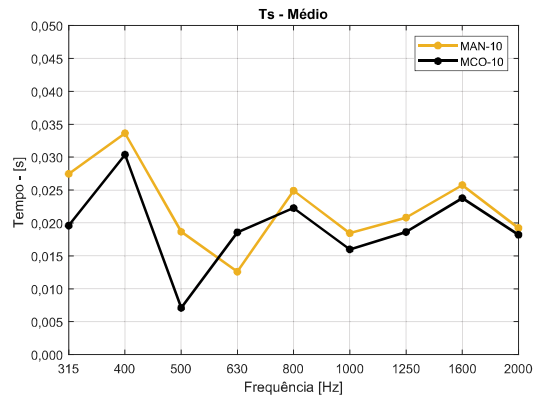
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.113 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-10.



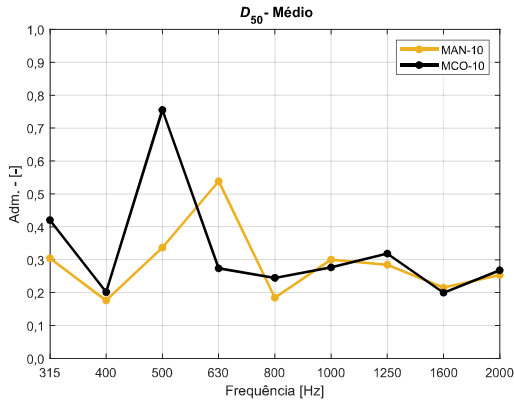
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.114 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-10.



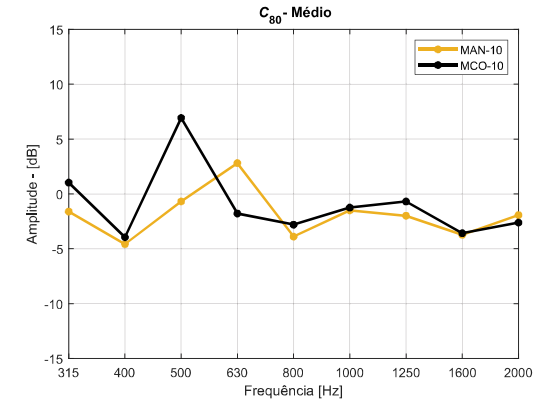
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.115 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-10.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.116 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-10.

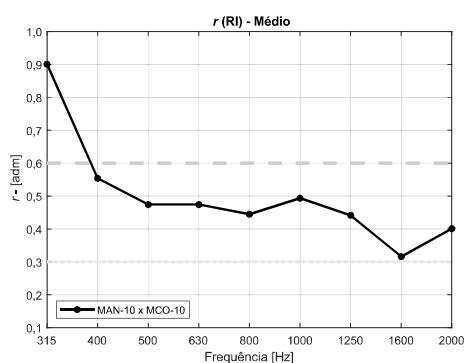


Fonte: Arquivo pessoal.

Nas correlações apresentadas pelas Figuras 6.117 e 6.118, 6.119, para MAN-10 e MCO-10, mais uma vez, se destaca a que apresenta as correlações da resposta ao impulso, Figura 6.117. As correlações das RIs apresentam, exceto para a primeira banda de análise, classificação de média correlação, com a banda de 1600 [Hz], tocando o limite superior da faixa de fraca correlação.

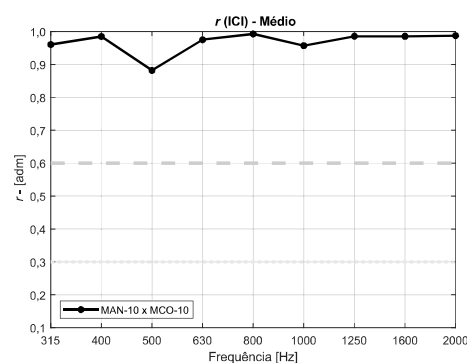


Figura 6.117 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-10.



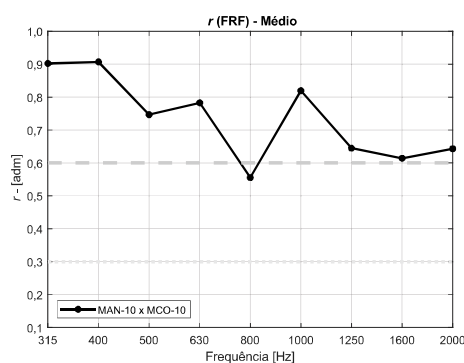
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.118 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-10.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.119 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-10.

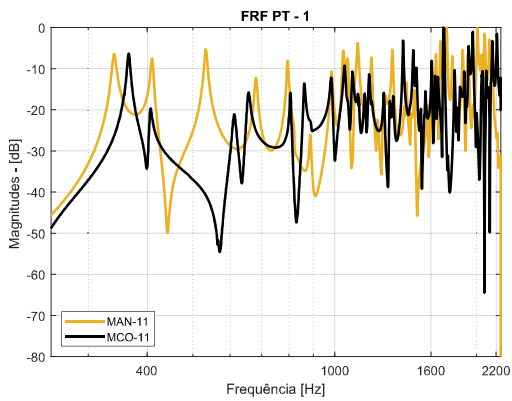


Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.8 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS DIFERENTES MODELAGENS DA FGE-11.

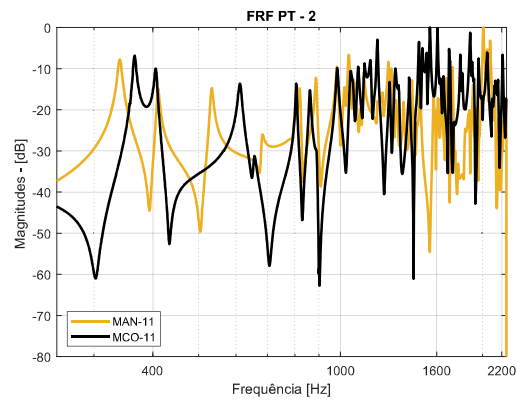
No presente capítulo, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-11 e MAN-11 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-11. As FRFs apresentadas nas figuras 6.120 à 6.127 mostram também, o mesmo padrão das comparações anteriores, de não compatibilidade de ressonâncias, em algumas faixas de frequências. Os parâmetros acústicos obtidos nas duas metodologias de análise repetem o padrão dos parâmetros obtidos anteriormente, valores de ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ) e (EDT), com pequenas alterações e ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e (Ts) com uma diferença ainda maior nas mais baixas frequências. Nas correlações apresentadas pelas figuras 6.134, 6.135 e 6.136, para MAN-11 e MCO-11, mais uma vez, se destaca a que apresenta as correlações da resposta ao impulso, Figura 6.134, que agora, todas as bandas apresentam uma média correlação.

Figura 6.120 – FRFs obtidas para o PT-1 da FGE-11.



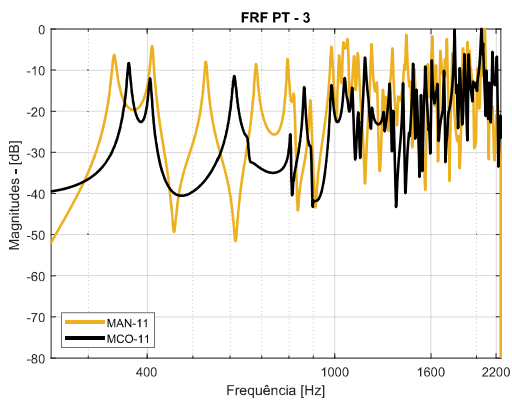
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.121 – FRFs obtidas para o PT-2 da FGE-11.



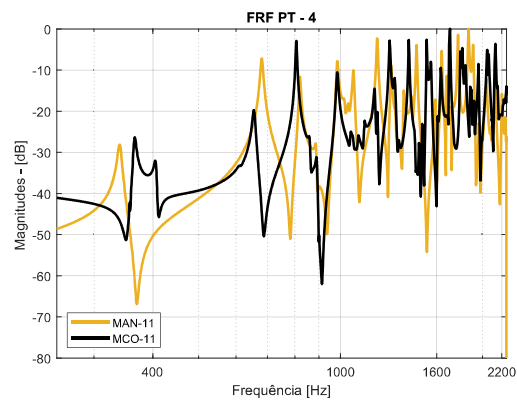
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.122 – FRFs obtidas para o PT-3 da FGE-11.



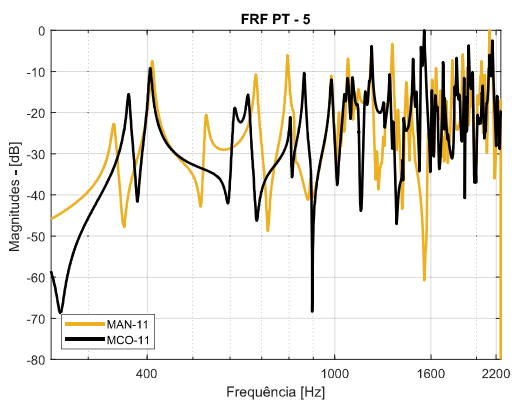
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.123 – FRFs obtidas para o PT-4 da FGE-11.



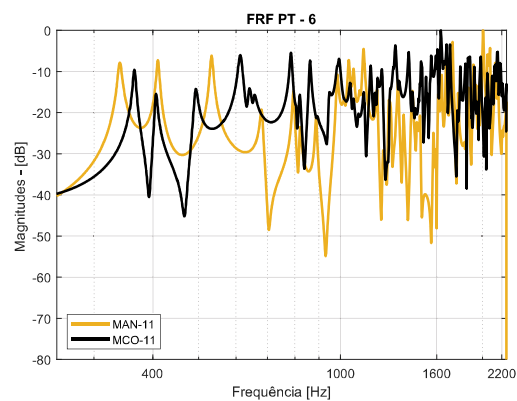
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.124 – FRFs obtidas para o PT-5 da FGE-11.



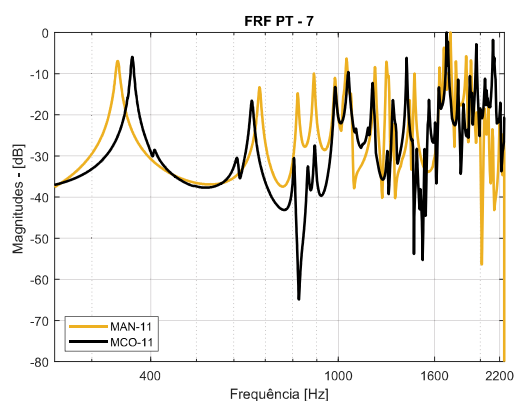
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.125 – FRFs obtidas para o PT-6 da FGE-11.



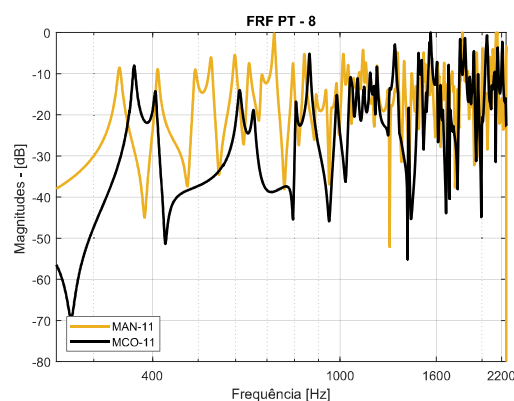
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.126 – FRFs obtidas para o PT-7 da FGE-11.



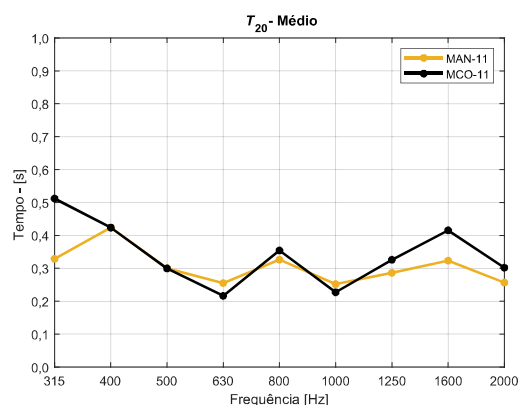
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.127 – FRFs obtidas para o PT-8 da FGE-11.



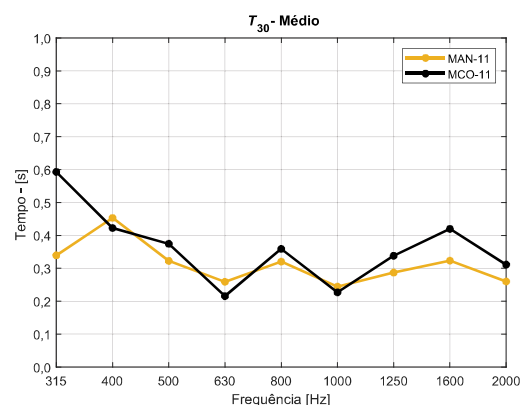
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.128 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-11.



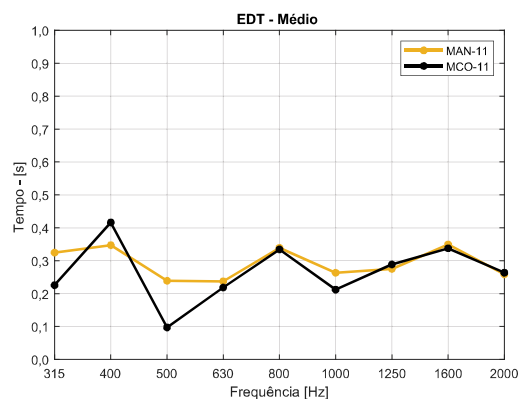
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.129 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-11.



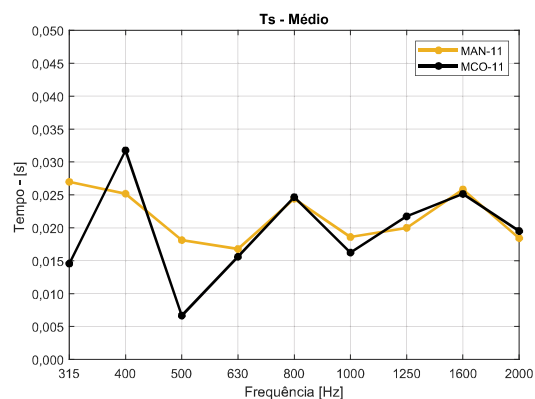
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.130 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-11.



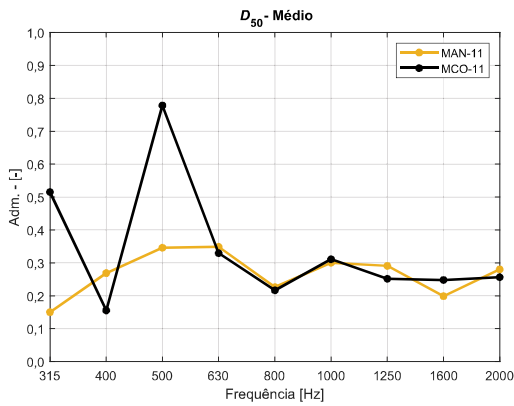
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.131 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-11.



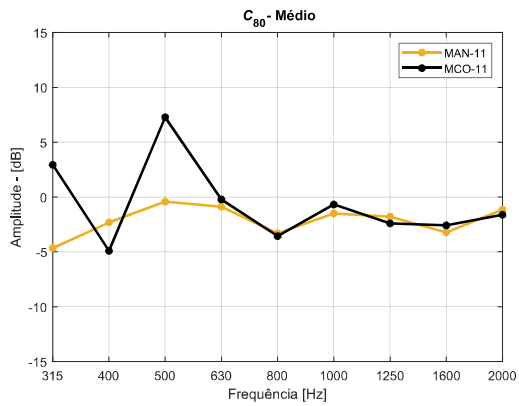
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.132 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-11.



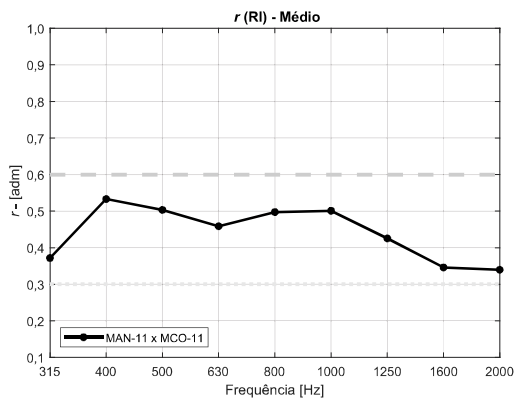
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.133 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-11.



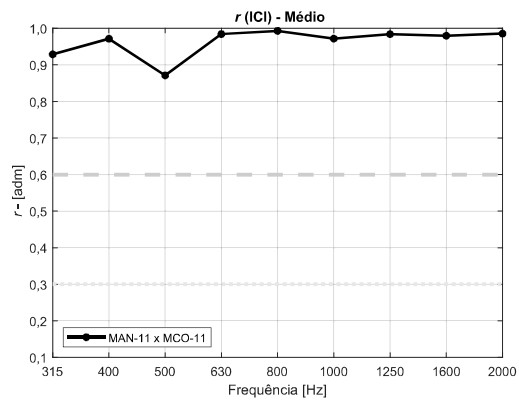
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.134 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-11.



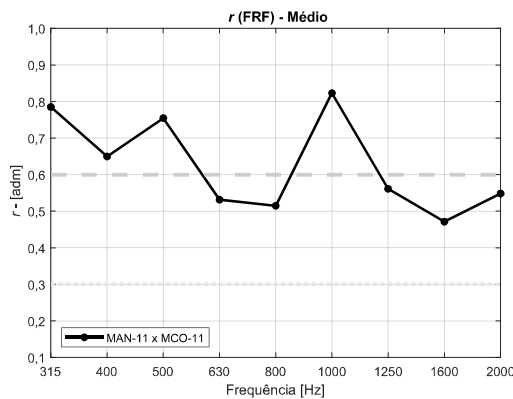
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.135 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-11.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.136 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-11.

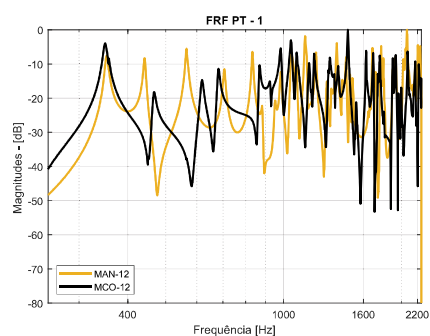


Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.9 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS MODELAGENS DA FGE-12.

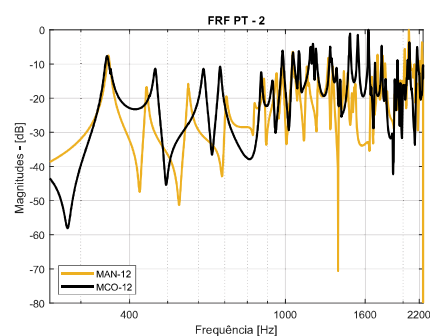
Na presente seção, serão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nas duas metodologias de análise, MCO-12 e MAN-12 usadas para descrever o possível comportamento acústico da forma geométrica FGE-12. As FRFs apresentadas nas Figuras 6.137 à 6.144 mostram também, o mesmo padrão das comparações anteriores, de não compatibilidade de ressonâncias, em algumas faixas de frequências.

Figura 6.137 – FRFs do PT-1 da FGE-12.



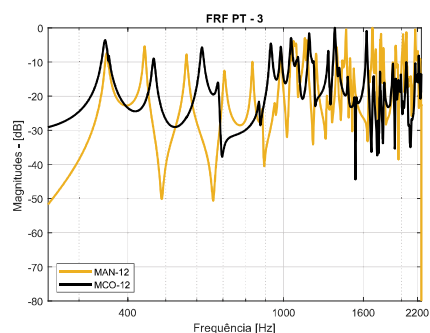
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.138 – FRFs do PT-2 da FGE-12.



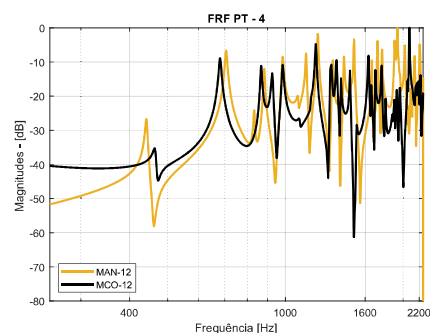
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.139 – FRFs do PT-3 da FGE-12.



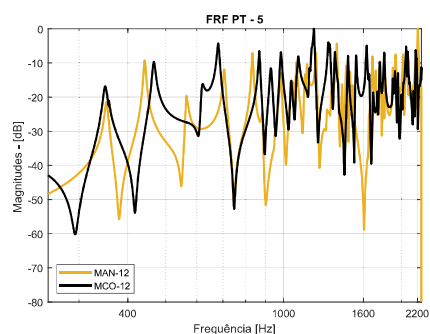
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.140 – FRFs do PT-4 da FGE-12.



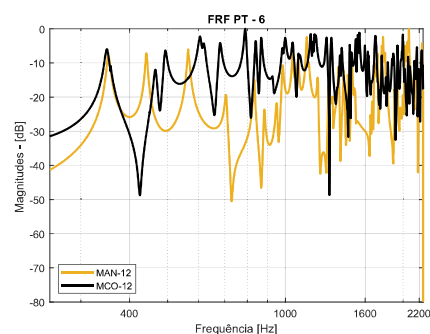
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.141 – FRFs do PT-5 da FGE-12.



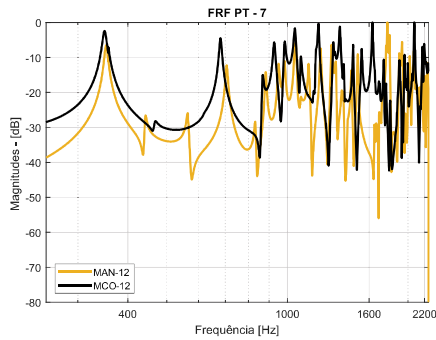
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.142 – FRFs do PT-6 da FGE-12.



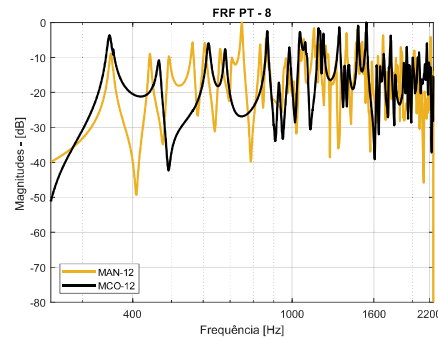
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.143 – FRFs do PT-7 da FGE-12.



Fonte: Arquivo pessoal.

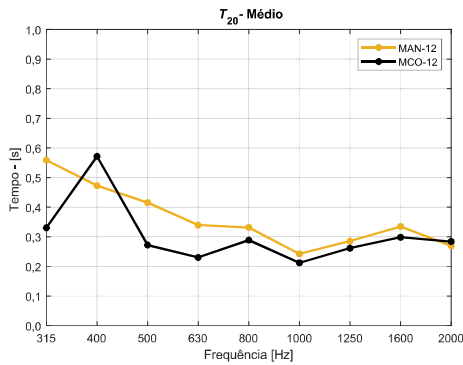
Figura 6.144 – FRFs do PT-8 da FGE-12.



Fonte: Arquivo pessoal.

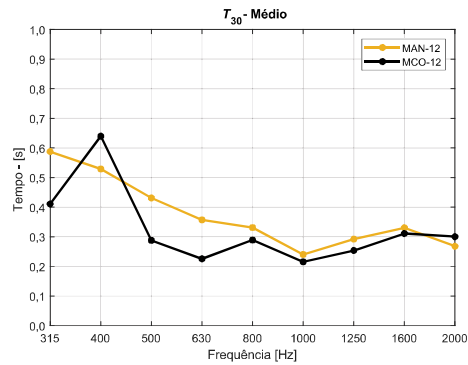
Os parâmetros acústicos obtidos nas duas metodologias de análise, apresentam valores de ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ) e (EDT), com maiores alterações nas baixas frequências e com os parâmetros ( $D_{50}$ ), ( $C_{80}$ ) e ( $T_s$ ) com uma diferença em todas as bandas de análise.

Figura 6.145 – Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios obtidos para FGE-12.



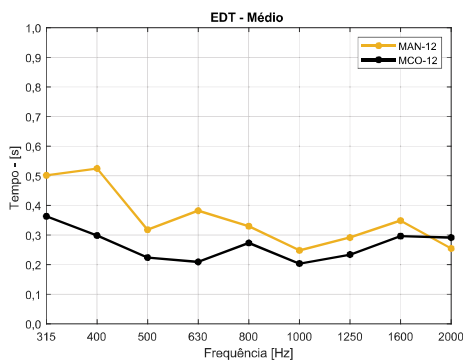
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.146 – Tempos de reverberação  $T_{30}$  médios obtidos para FGE-12.



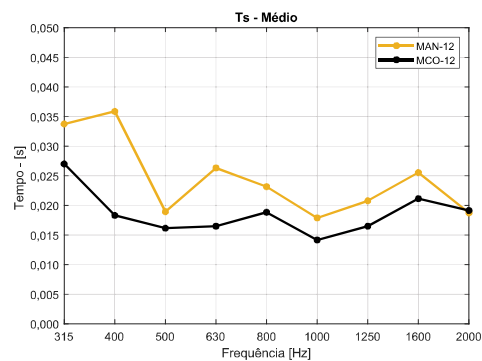
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.147 – Tempos de decaimento inicial EDT médios obtidos para FGE-12.



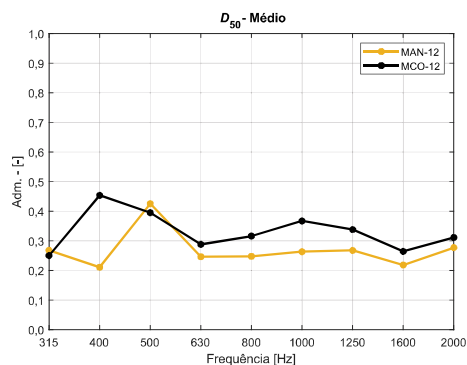
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.148 – Tempo central  $T_s$  médios obtidos para FGE-12.



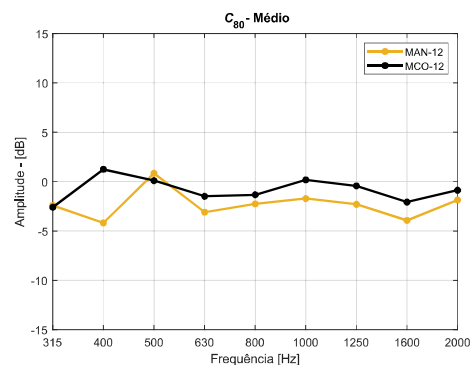
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.149 – Valores parâmetro definição  $D_{50}$  médios obtidos para FGE-12.



Fonte: Arquivo pessoal.

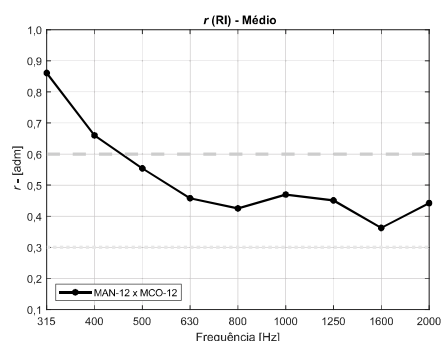
Figura 6.150 – Valores parâmetro clareza  $C_{80}$  médios obtidos para FGE-12.



Fonte: Arquivo pessoal.

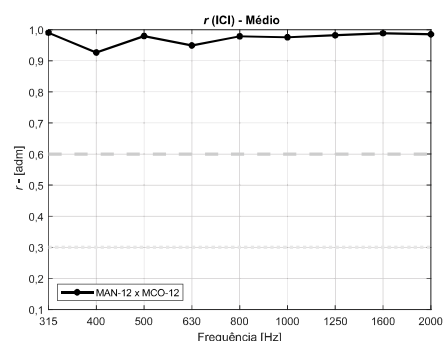
As correlações apresentadas pelas figuras 6.151, 6.152 e 6.153, para MAN-12 e MCO-12, apresentam um aumento dos valores das correlações obtidas ao ponto de algumas bandas retornarem para a classificação de forte correlação, principalmente quando de analisa os coeficientes de correlação para as respostas ao impulso, Figura 6.151.

Figura 6.151 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para RIs obtidas para FGE-12.



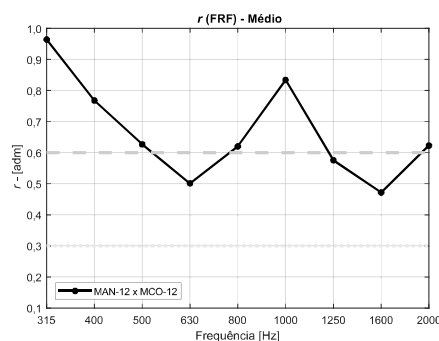
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.152 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para ICIs obtidas para FGE-12.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.153 – Coeficientes ( $r$ ) calculados para FRFs obtidas para FGE-12.



Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.10 ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS

Após todos os dados e comparações apresentadas, algumas características marcantes são evidenciadas. A primeira característica marcante é a existência de uma concordância maior, independente da forma geométrica estudada, entre os parâmetros  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  e EDT, obtidos a partir das curvas de decaimento dos MANs e MCOs. Essa concordância é evidenciada também, quando são comparados os coeficientes de correlação médios por banda de 1/3 de oitava, calculados para avaliar a similaridade das curvas de decaimento obtidas para os MANs e MCOs das 12 FGEs.

As figuras 6.154, 6.155 e 6.156 mostram uma grande similaridade das curvas de decaimento (na forma das integrais cumulativas invertidas ICIs). Os coeficientes de correlação ( $r$ ), quando comparadas as ICIs dos MANs e MCOs das respectivas FGEs, são muito próximos do valor máximo (1,0), indicando uma alta similaridade. A menor similaridade ocorre para o MAN-4 (sala retangular com melamina no teto - Figura 6.154), com um fator de correlação mínimo em torno de 0,8 para a banda de 800 [Hz]. Isso provavelmente se deve a baixa representatividade do fator de amortecimento  $\eta$  usados, visto que, os MANs, foram desenvolvidos para representar salas com superfícies (teto, piso e paredes) com pouca absorção acústicas. A FGE-4 se distancia de um ambiente levemente amortecido, com o emprego da melamina em seu teto, tornando-a uma geometria com bastante absorção acústica.

Figura 6.154 – Coeficiente  $r$ , calculados com base nas ICIs de FGE-1 à FGE-4.

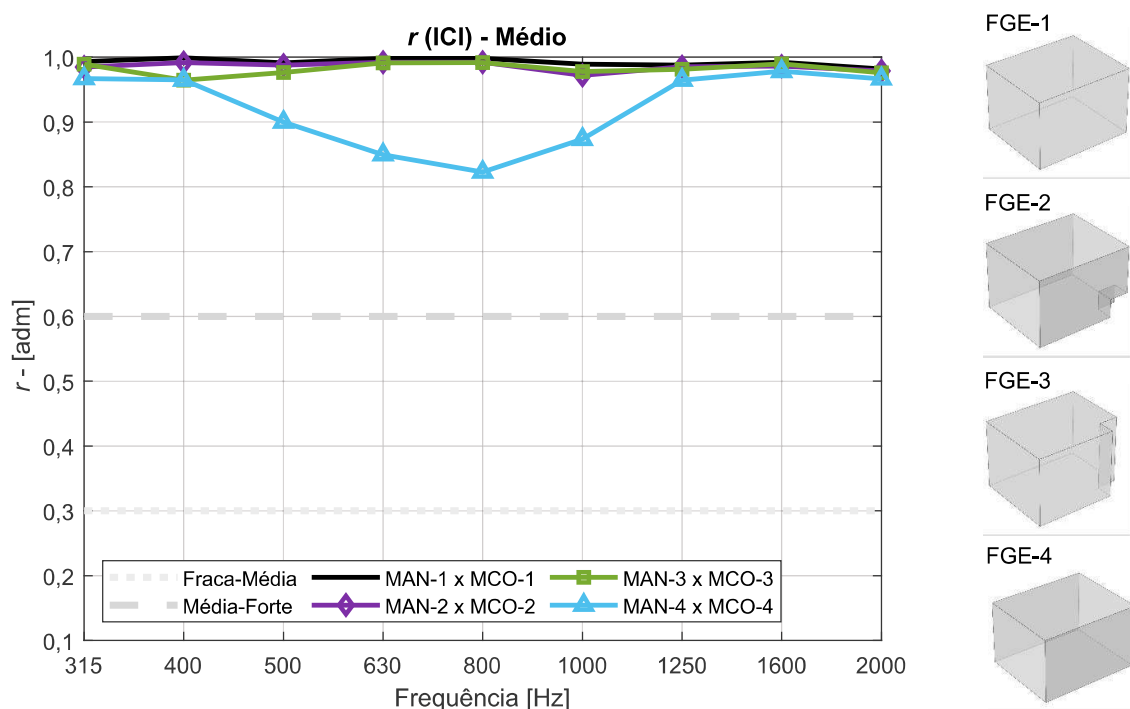
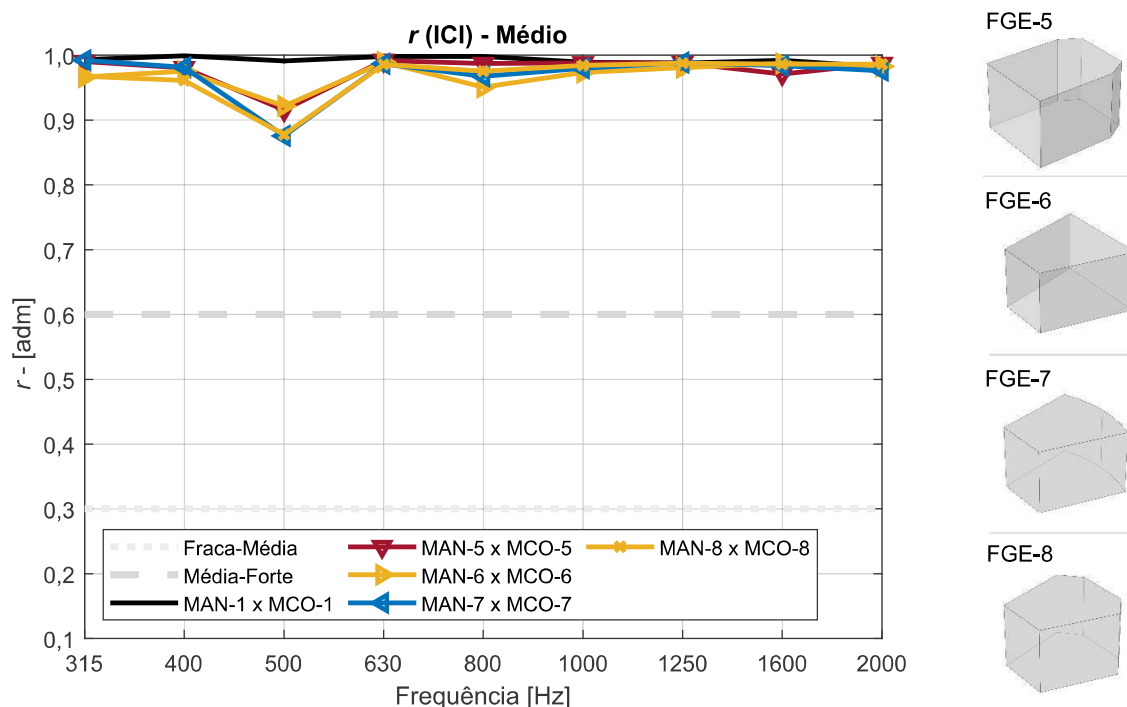
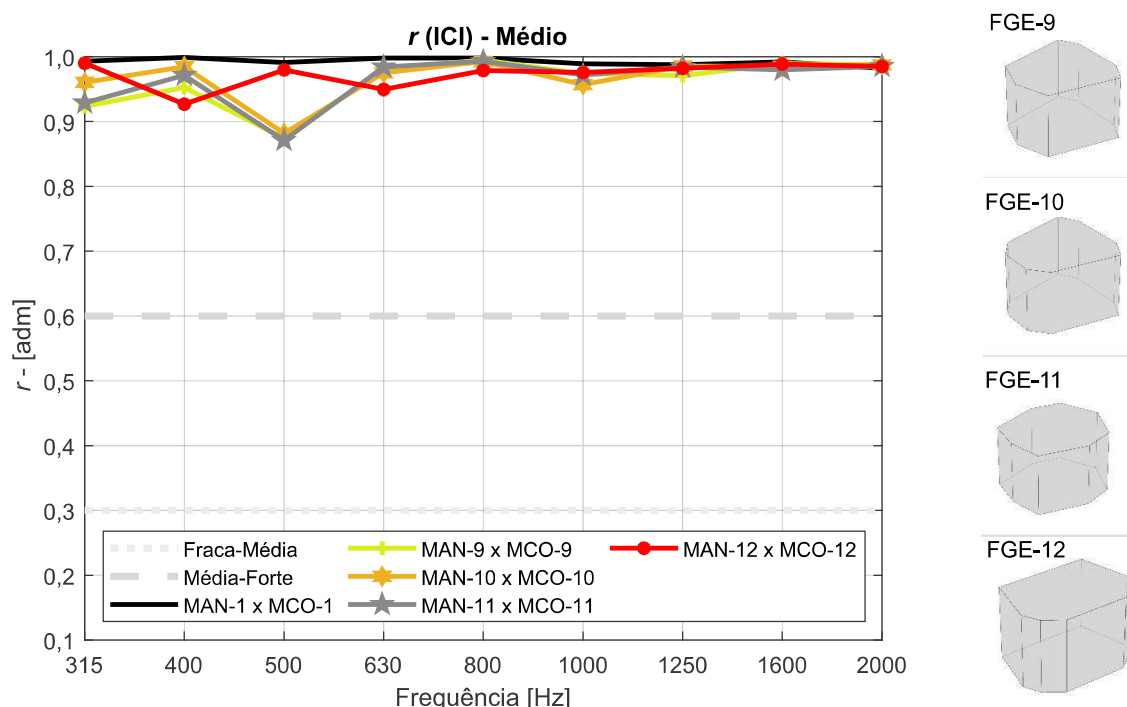




Figura 6.155 – Coeficiente  $r$ , calculados com base nas ICIs de FGE-5 à FGE-8.

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.156 – Coeficiente  $r$ , calculados com base nas ICIs de FGE-9 à FGE-12.

Fonte: Arquivo pessoal.

A segunda característica evidenciada, está relacionada com os parâmetros acústicos que são obtidos com base nas respostas ao impulso. Para algumas formas geométricas estudadas os resultados dos parâmetros  $D_{50}$ ,  $C_{80}$  e  $T_s$  obtidos pelos MCOs e os valores desses parâmetros obtidos pelos MANs, mostraram-se com um certo distanciamento dos valores médios, especialmente nas frequências mais baixas.

Quando são analisadas as Figuras 6.157, 6.158 e 6.159, pode-se observar que, a medida que os formatos das salas vão se tornando menos retangulares, a similaridade entre as respostas ao impulso obtidas pelos MCOs e pelos MANs vão se tornando menores. Isso é um indicativo de que, os detalhes das respostas ao impulso, não são tão bem representados pelos MANs, embora as curvas de decaimento o sejam. Esta característica se reflete nos parâmetros acústicos que lidam com o balanço energético da resposta ao impulso. O fato dos detalhes das RIs não serem bem representados podem levar a um desbalanço na energia das primeiras reflexões e da cauda reverberante. Além disso, os limites de 10 [ms] e 6,25 [ms], usados na pesquisa para o cálculo de  $C_{80}$  e  $D_{50}$ , podem ser deveras elevados para um cálculo representativo em uma sala de tão pequeno porte e este aspecto requer uma revisão mais cuidadosa no futuro. Além do potencial desbalanço energético nas RIs, a não representatividade dos detalhes leva a grandes diferenças subjetivas em um processo de auralização.

Figura 6.157 – Coeficiente  $r$ , calculados com base nas RIs para as 4 formas geométricas mais retangulares.

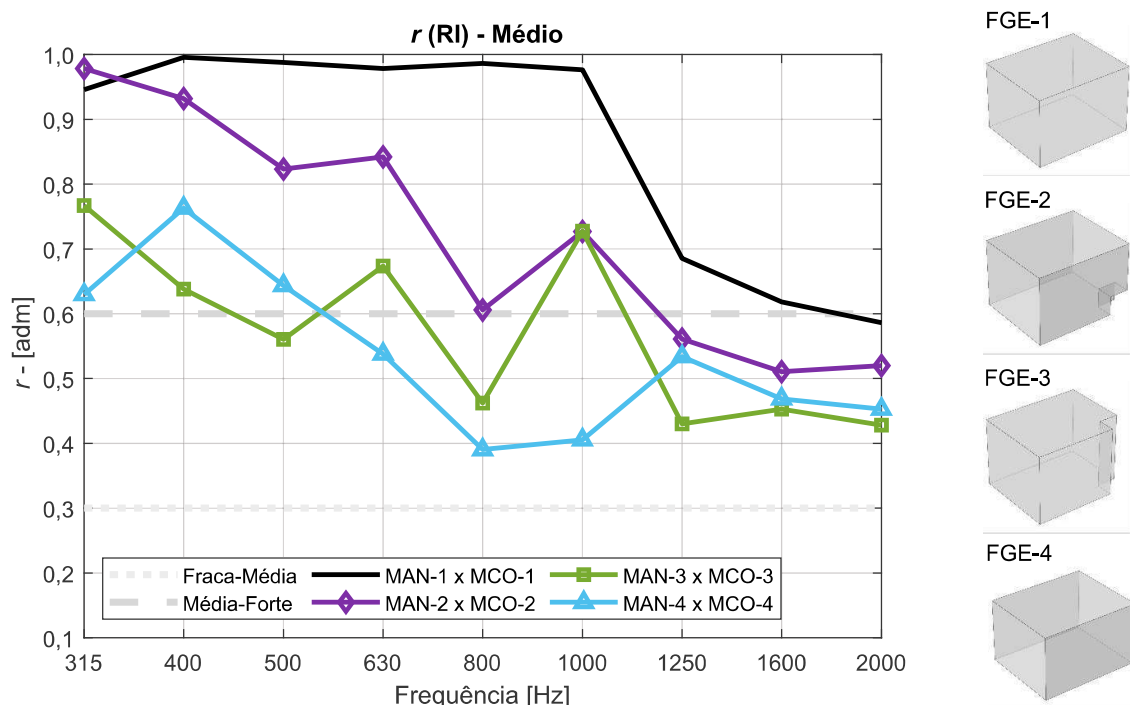
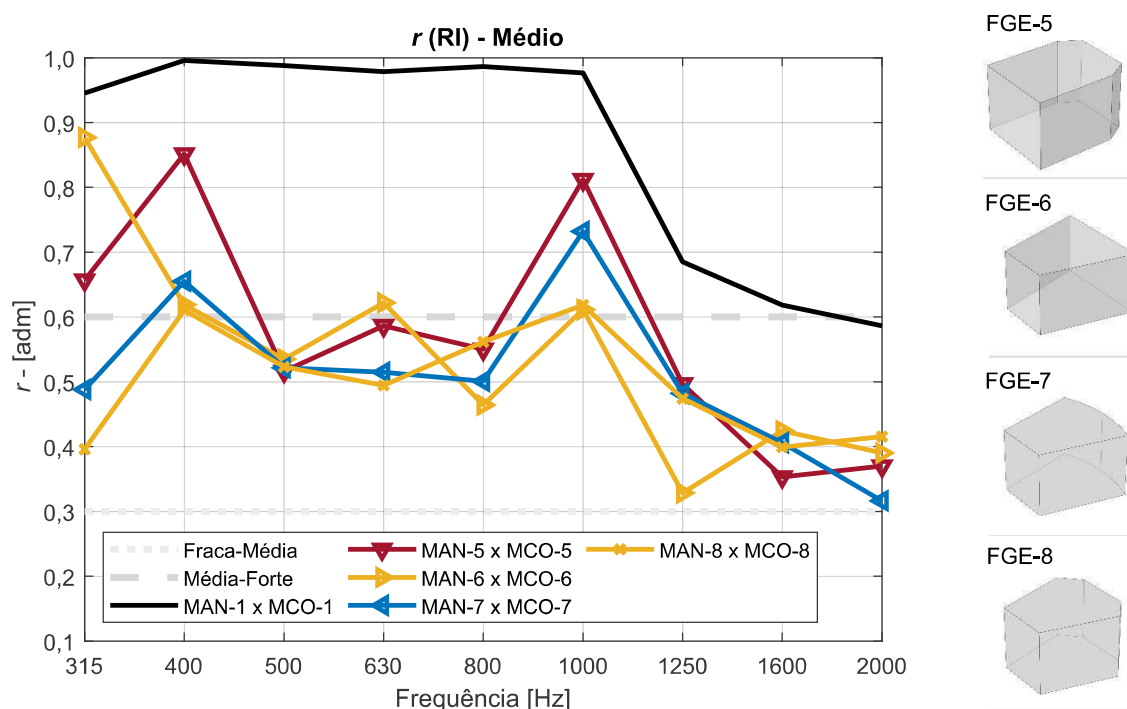
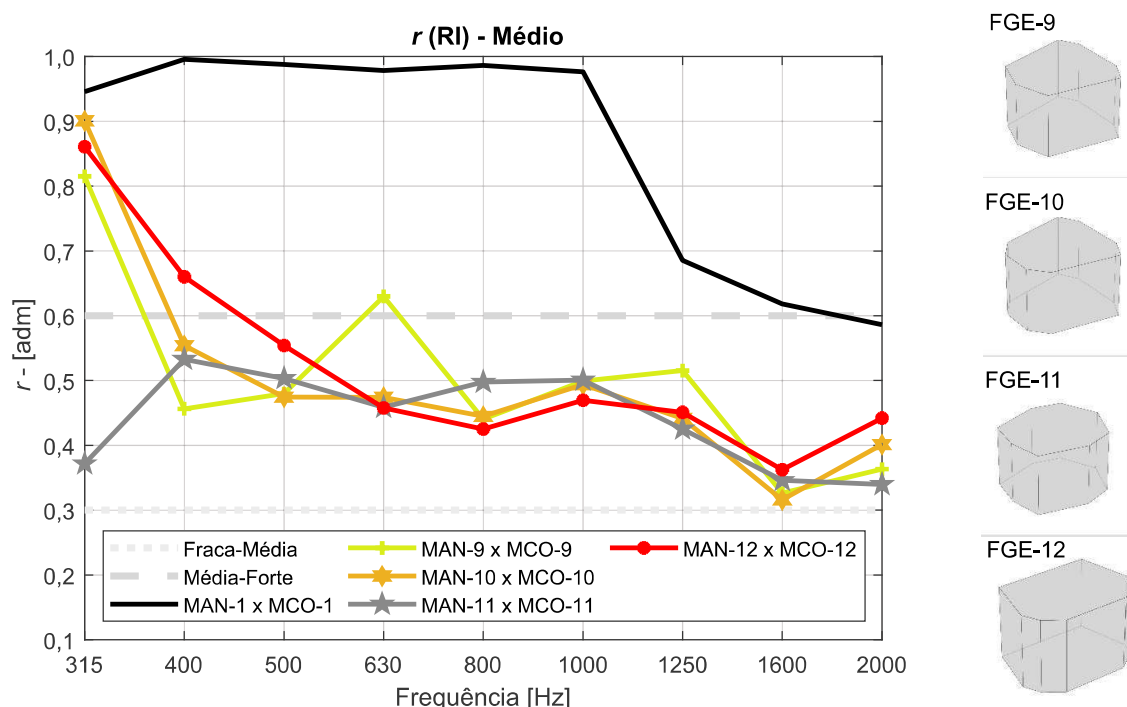


Figura 6.158 – Coeficiente  $r$ , calculados com base nas RIs para as 4 formas geométricas pouco alteradas.



Fonte: Arquivo pessoal.

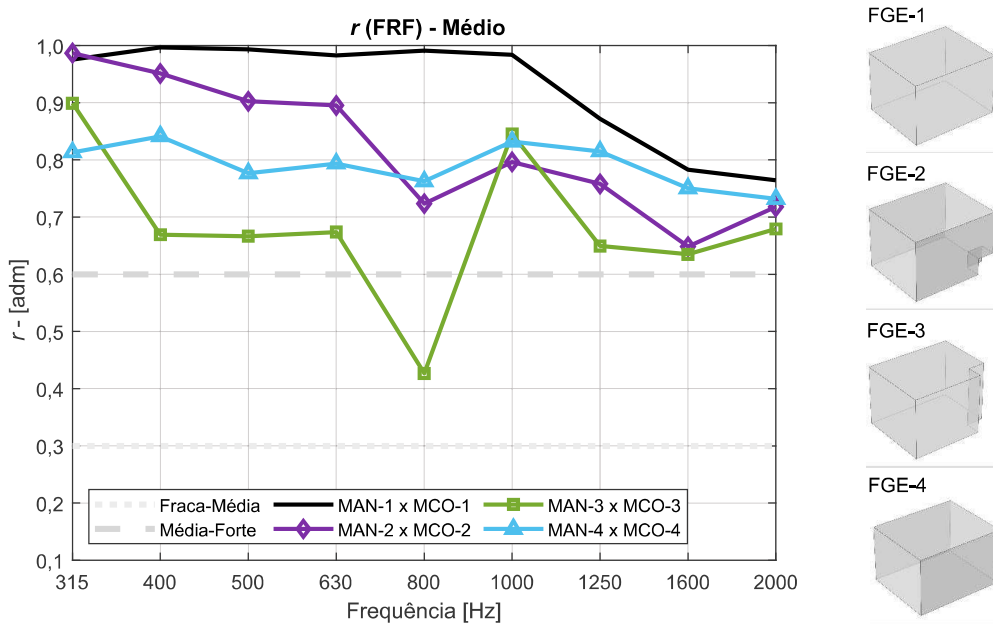
Figura 6.159 – Coeficiente  $r$ , calculados com base nas RIs para as 4 formas geométricas menos retangulares.



Fonte: Arquivo pessoal.

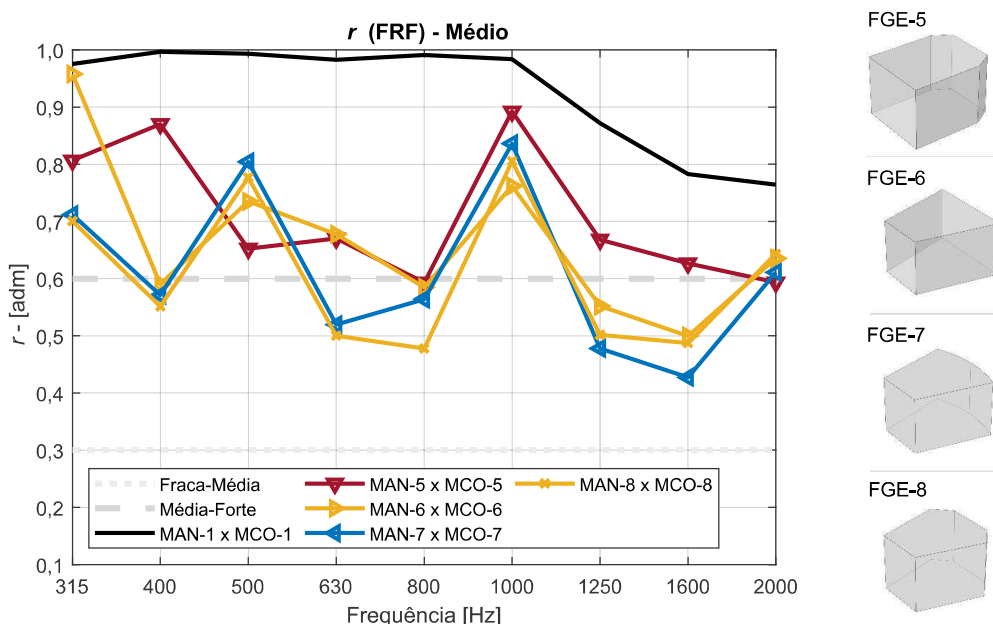
As figuras que se seguem 6.160, 6.161 e 6.162, mostram a similaridade estabelecida para as FRFs, calculados com base nos coeficientes de correlação  $r$ , para as formas geométricas estudadas. As figuras indicam pequenas alterações de valores de  $r$ , dependendo da faixa de frequências analisadas, porém, existe uma tendência dos valores de  $r$  permanecerem próximos do limite de divisor entre uma forte e média similaridade  $r = 0,8$ .

Figura 6.160 – Coeficiente  $r$ , com base nas FRFs das 4 formas geométricas mais retangulares.



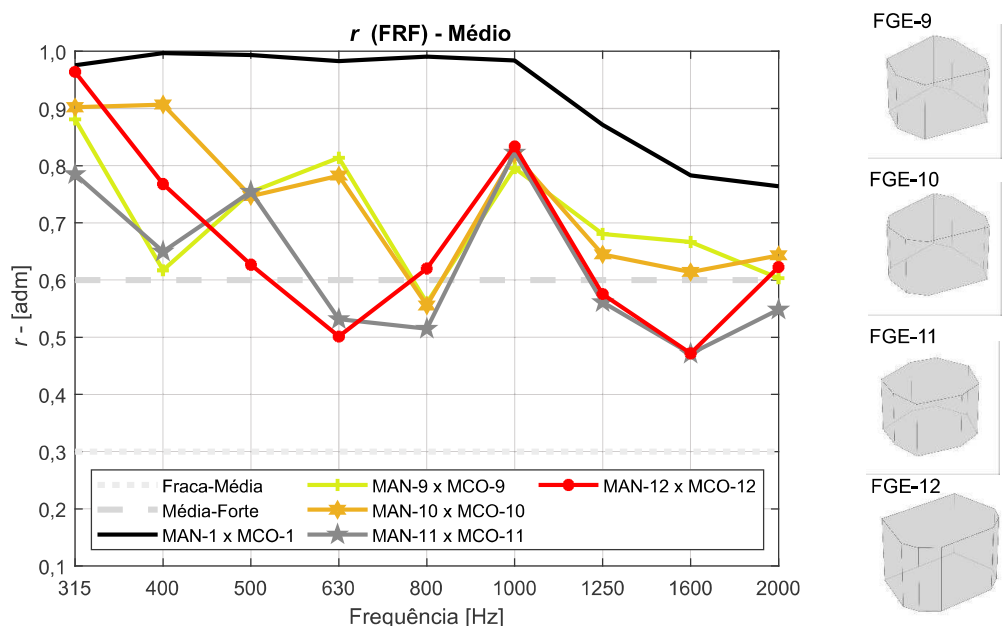
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.161 – Coeficiente  $r$ , com base nas FRFs para as 4 formas geométricas pouco alteradas.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6.162 – Coeficiente  $r$ , com base nas FRFs para as 4 formas geométricas menos retangulares.



Fonte: Arquivo pessoal.

## 6.11 OS PERCALÇOS SUPERADOS DURANTE O PROCESSO EXPERIMENTAL DA PESQUISA

Durante a etapa experimental da pesquisa contratempos e dificuldades surgiram. A principal dificuldade surgiu na concepção da fonte sonora com monitoramento da velocidade de volume. Como já citado anteriormente, erros como, a não compatibilidade das frequências modais entre, a FRF medida com uso dessa fonte alternativa e a FRF do modelo analítico e, valores muito diferentes entre os parâmetros acústicos foram superados.

Os motivos que causaram essas diferenças e erros não foram investigados com maior aprofundamento, pois essa investigação poderia tomar muito tempo e mudar o foco dessa pesquisa. Uma suposição, sobre os motivos que estariam ocasionando esses erros, foi fundamentada na possibilidade de existência de vibrações excessivas no sistema fonte-modelo. Ao se examinar a Figura M.4 é possível observar que em algumas faixas de frequências, as frequências modais medidas (picos da curva preta) não estão sintonizadas com as frequências modais calculadas (linhas verticais cinzas). Esse fato pode estar associado a presença de vibrações nas chapas de MDF, usadas na construção do MFI-1, causadas pelo acoplamento da extremidade de saída do tubo, do monitorador da velocidade de volume e as chapas de MDF. Supostamente essa vibrações estariam alterado o comportamento de vibração da cavidade de ar do modelo e influenciando nos resultados.

Uma solução combinada foi adotada para tentar contornar esse problema, a troca da fonte sonora associada com o uso de materiais sono-absorventes (lã de pet) no entorno do modelo físico, para tentar mitigar a influência dessas possíveis vibrações excessivas. A Figura 6.163 mostra como ficou a montagem do MFI-1 após a troca da fonte e uso dos materiais em uma tentativa de conter essas vibrações.

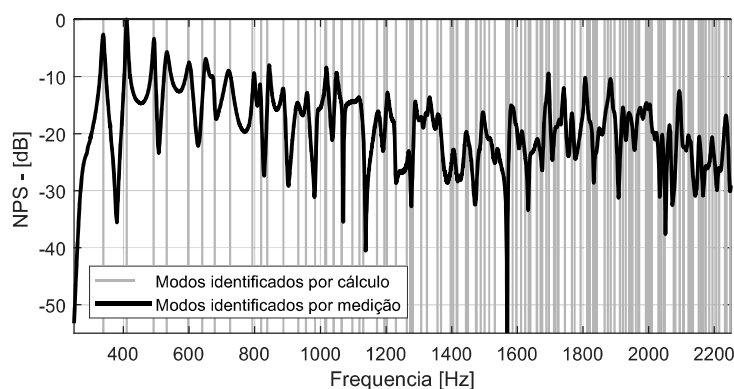
Figura 6.163 – Modelo físico MFI-1 construído com ajustes após contratempos iniciais.



Fonte: Arquivo pessoal.

A solução adotada aparentemente, surtiu efeito. A identificação, por medição, das frequências modais foi muito mais próxima das frequências modais calculadas, como pode ser visto na Figura 6.164. Ao se comparar os valores dos parâmetros acústicos obtidos com as duas fontes usadas (Quadro M.1 para a fonte alternativa e Quadro 4.3 para a fonte X-mini), os valores obtidos com a fonte X-mini, principalmente para o tempo de reverberação, estão mais próximos do que foi inicialmente estimado para o modelo MFI-1 investigado, do que os valores de tempo de reverberação obtidos com o uso da fonte alternativa.

Figura 6.164 – Sobreposição das frequências modais identificadas por medição e por meio de cálculo.



Fonte: Arquivo pessoal.

## 7 CONCLUSÕES

A presente pesquisa avaliou o campo acústico, em baixas frequências, de formatos retangulares e não retangulares de salas, com o auxílio de experimentos elaborados em escala reduzida com proporção de redução de (1:8). A construção de um modelo físico (MFI-1) em escala reduzida, representativo de uma sala retangular, serviu como validador do modelo analítico (MAN-1) e computacional (MCO-1), também elaborados para descrever a (FGE-1). A proximidade dos valores dos parâmetros ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), EDT, ( $C_{80}$ ), ( $D_{50}$ ) e Ts obtidos com as 3 metodologias de análise, garantiram a replicabilidade destas metodologias (MAN, MCO e quando possível MFI), para as outras FGEs avaliadas.

Essa pesquisa também analisou o grau de similaridade, por meio dos coeficientes de correlação  $r$ , das funções de resposta em frequência (FRF), das curvas de decaimento, em suas formas de integrais cumulativas invertidas (ICI) e, das respostas ao impulso (RI) obtidas nas (quando possível) 3 distintas formas de avaliar as formas geométricas estudadas. Com base em todos os dados apresentados nesta pesquisa é possível identificar que, nos dados obtidos para as formas geométricas FGE-1, FGE-2 e FGE-4, existe de uma correlação mais forte entre as (RI) obtidas nos MFIs e as respectivas (RI) obtidas nos MCOs. Esse fato torna os MCOs a referência de análise, pois são mais precisos para descrever os campos acústicos das FGEs estudadas.

Diante das comparações expostas, identifica-se que, a medida que as formas geométricas vão se alterando e, se distanciando de uma forma retangular, a correlação existente entre as respostas ao impulso (RI) obtida pelos modelos computacionais em FEM (MCOs) e obtidas pelos modelos analíticos (MANs), vão diminuindo. Essa diminuição da similaridade indicada pelo coeficiente de correlação  $r$ , pode estar ligada ao fato de que os modelos analíticos MANs, não conseguem representar de forma precisa o campo acústico de salas com geometrias não retangulares, mesmo com as simplificações geométricas adotadas. Esse fato pode estar relacionado também ao distanciamento de valores encontrados, principalmente nas mais baixas frequências, para os parâmetros que estão mais intimamente ligados as RIs ( $C_{80}$ ), ( $D_{50}$ ) e Ts), a medida que as FGEs vão se distanciando de formatos retangulares.

Outro fato notório ao longo do presente texto é que, mesmo com o distanciamento de formas retangulares das FGEs avaliadas, os índices de correlação  $r$  são altos para as curvas de decaimento obtidas pelos (MCOs) quando correlacionadas com as curvas de decaimento obtidas pelos (MANs). Consequentemente, são mais próximos os valores encontrados para parâmetros relacionados com as curvas de decaimento, como o ( $T_{20}$ ), o ( $T_{30}$ ) e o EDT, para os MCOs e os MANs.

Os coeficientes de correlação  $r$  obtidos para as correlações entre as FRFs dos modelos MANs e MCOs, indicaram uma diminuição da similaridade ao passo que as FGEs se distanciam de um formato retangular porém, essa diminuição é menos acentuada e os valores das correlações tendem a permanecer em um faixa de valores entre  $r = 0,45$  e  $r = 0,85$ , dependendo da

banda de frequência.

Para projetistas de salas acústicas fica evidenciado que, quanto mais crítica a sala acústica projetada ou estudada, melhor precisará ser a ferramenta de análise para as baixas frequências e melhores deverão ser os dados de entrada fornecidos a essas metodologias de análise. O uso de modelos analíticos, como os usados na pesquisa, para descrever o comportamento acústico em baixas frequências de salas não retangulares após simplificação geométrica, é útil em análises de tempo de reverberação, em curvas de decaimento e em outros parâmetros acústicos com algumas limitações. Para outras análises, metodologias mais precisas deverão ser empregadas.

Ficam como sugestões para trabalhos futuro uma investigação mais aprofundada sobre os parâmetros de entrada usados, principalmente para os métodos que usam FEM para descrever o campo acústico em baixas frequências e, avaliar quais as influências subjetivas que as diferentes metodologias de analisar as baixas frequências em salas acústicas, podem ocorrer, quando não são consideradas as limitações dos modelos de análise.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLT, R. H. Note on normal frequency statistics for rectangular rooms. **The Journal of the Acoustical Society of America - JASA**, JASA, v. 18, n. 1, p. 130–133, July 1946.

BONELLO, O. J. A new criterion for the distribution of normal room modes. **The Journal of the Audio Engineering Society - AES**, The Journal of the Audio Engineering Society - AES, v. 29, n. 9, September 1981.

BRANDÃO, E. **Acústica de Salas Projeto e Modelagem**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Blucher, 2016. 286 p.

DIETRICH, P. et al. Ita-toolbox – an open and source matlab and toolbox for acousticians. In: 38TH GERMAN ANNUAL CONFERENCE ON ACOUSTICS - DAGA 2012, 2012. 2012. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/233762454\\_ITA-Toolbox\\_--\\_An\\_Open\\_Source\\_MATLAB\\_Toolbox\\_for\\_Acousticians](https://www.researchgate.net/publication/233762454_ITA-Toolbox_--_An_Open_Source_MATLAB_Toolbox_for_Acousticians)>.

EVEREST, F. A. **The master hand book of acoustics**. 4. ed. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001. 615 p.

FAZENDA, B. **Perception of room modes in critical listening spaces**. 2004. 224 f. Dissertação — University of Salford, Salford, UK, 2004.

FIGUEIREDO, D. B.; JÚNIOR, J. A. da S. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de pearson (r). **Revista Política Hoje**, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, v. 18, n. 1, p. 20, 2009. Acessado em 24 junho 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3852/3156>>.

FONSECA, W. D. **Beamforming considerando difração acústica em superfícies cilíndricas**. 2013. 393 f. Tese — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, Brasil, 2013.

GERGES, S. N. Y. Estado da arte para solução dos problemas vibroacústica por métodos numéricos. In: SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA, 31., 2000, Madrid - Espanha. **Congresos Españoles de Acústica TECNIAACÚSTICA**. Madrid - Espanha, 2000. Disponível em: <[http://ftp.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones\\_4340at003.pdf](http://ftp.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4340at003.pdf)>.

GUIDORZI, P. et al. Impulse responses measured with mls or swept-sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters. **6th International Building Physics Conference, IBPC**, Elsevier BV, v. 78, p. 1611–1616, 2015.

HARMAN INTERNATIONAL INDUSTRIES, INCORPORATED. **Especificações Técnicas Driver de Compressão D405 TRIO - JBL by HARMAN**. [S.l.], 2011. 2 p. Acessado em 27 de setembro de 2018. Disponível em: <<https://www.jbl.com.br/som-externo-e-trio-drivers/D405+TRIO>>.

ISO:10354-1. **Acoustics Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 1: Method using standing wave ratio**. Switzerland: [s.n.], 1996. 22 p.

ISO:10354-2. **Acoustics Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 2: Transfer-function method**. Switzerland: [s.n.], 1996. 22 p.

ISO:3383-2. **Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms**. Switzerland: [s.n.], 2009. 34 p.

JEON, J. Y. et al. Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model test. **Applied Acoustics**, Elsevier BV, v. 70, n. 4, p. 615–625, apr 2009.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics - Sixth edition**. 6. ed. Boca Raton, USA: Taylor & Francis e-Library, 2017. 303 p.

LIROLA, J. M. et al. A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies. **Energy and Buildings**, Elsevier BV, v. 142, p. 72–110, may 2017.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. 1. ed. Nova Jersey, EUA: Elsevier Academic Press, 2006. 845 p.

MARTINS, M. E. G. Coeficiente de correlação amostral. **Revista de Ciência Elementar**, Casa das ciências - Edulog fundação Belmiro de Azevedo, Volume 2, n. 2, p. 2, 2014.

MEISSNER, M. Acoustics of small rectangular rooms: Analytical and numerical determination of reverberation parameters. **Applied Acoustics**, Elsevier BV, v. 120, p. 111–119, may 2017.

OSESP. **A Sala São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo - SP, 2020. Acessado em 24 junho 2020. Disponível em: <<http://www.salasaopaulo.art.br/paginadinamica.aspx?pagina=asalasaopaulo>>.

PAPADAKIS, N. M. **Application of Finite Element Method for Estimation of Acoustic Parameters**. 2017. 201 f. Tese (Ph.D. Thesis) — Technical University of Crete - School of Production Engineering & Management, Chania - Greece, 2017.

ROSSETTO, G. D. **Contribution to the theory and practice of experimental acoustical modal analysis**. 2001. 147 f. Dissertação — Universidade de Campinas, Campinas - SP, Brasil, 2001.

TAKAHASHI, Y.; OTSURU, T.; TOMIKU, R. In situ measurements of absorption characteristics using two microphones and environmental anonymous noise. **Acoustical Science and Technology**, Acoustical Society of Japan, v. 24, n. 6, p. 382–385, November 2003.

TICHY, M. K. J. **Acoustics Of Small Rooms**. 1. ed. New York, EUA: Taylor & Francis Group, 2014. 845 p.

VIGRAN, T. E. **Building Acoustics**. 1. ed. New York, EUA: Taylor & Francis e-Library, 2008. 363 p.

WALKER, R. Low-frequency room responses: Part 1 - background and qualitative considerations. **The British Broadcasting Corporation - BBC**, Research Department Report, p. 20, 1992. Acessado em 24 junho 2020.

WUNDERLICH, P. **Desenvolvimento de um calibrador de resposta relativa para transdutores eletroacústicos**. 2018. 134 f. — Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS, Brasil, 2018.

ZORZO, A. et al. Comparison between a digital and an analog active noise control system for headphones. In: **EUROPEAN ACOUSTICS ASSOCIATION**, 11., 2018, Creta - Grécia. **European Congress and Exposition on Noise Control Engineering**. Creta - Grécia, 2018. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/325846900>>.

## APÊNDICE A – CONFIGURAÇÕES DE MFI-1, MAN-1 E MCO-1

Quadro A.1 – Tempos de reverberação obtidos na medição do MFI-1.

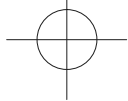
Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26

Quadro A.2 – Tempos de reverberação usados no MAN-1.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro A.3 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-1.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,080$ [m <sup>2</sup> ]	

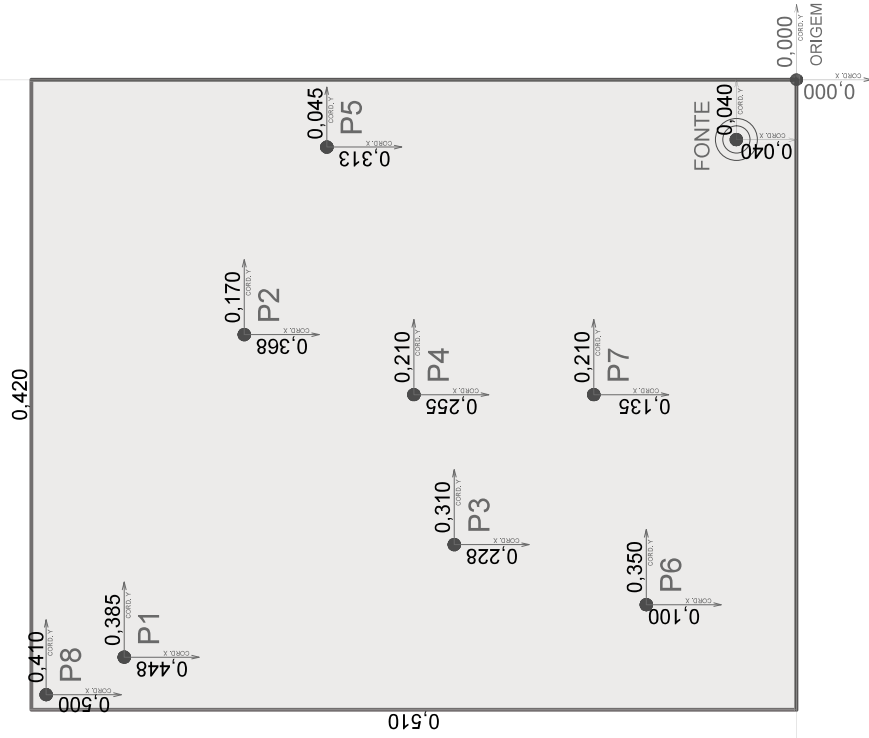


# MCO-1 : MAN-1 : MFI-1

ESCALA (1:5)

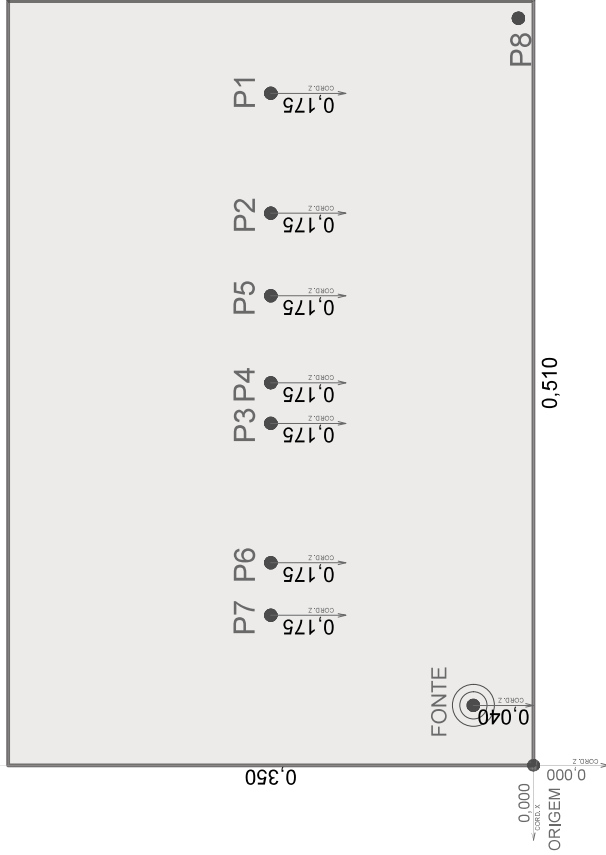


EIXO X



# PLANTA

EIXO Z



# VISTA A-A'

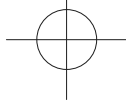
## APÊNDICE B – CONFIGURAÇÕES DE MFI-2, MAN-2 E MCO-2

Quadro B.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-2.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

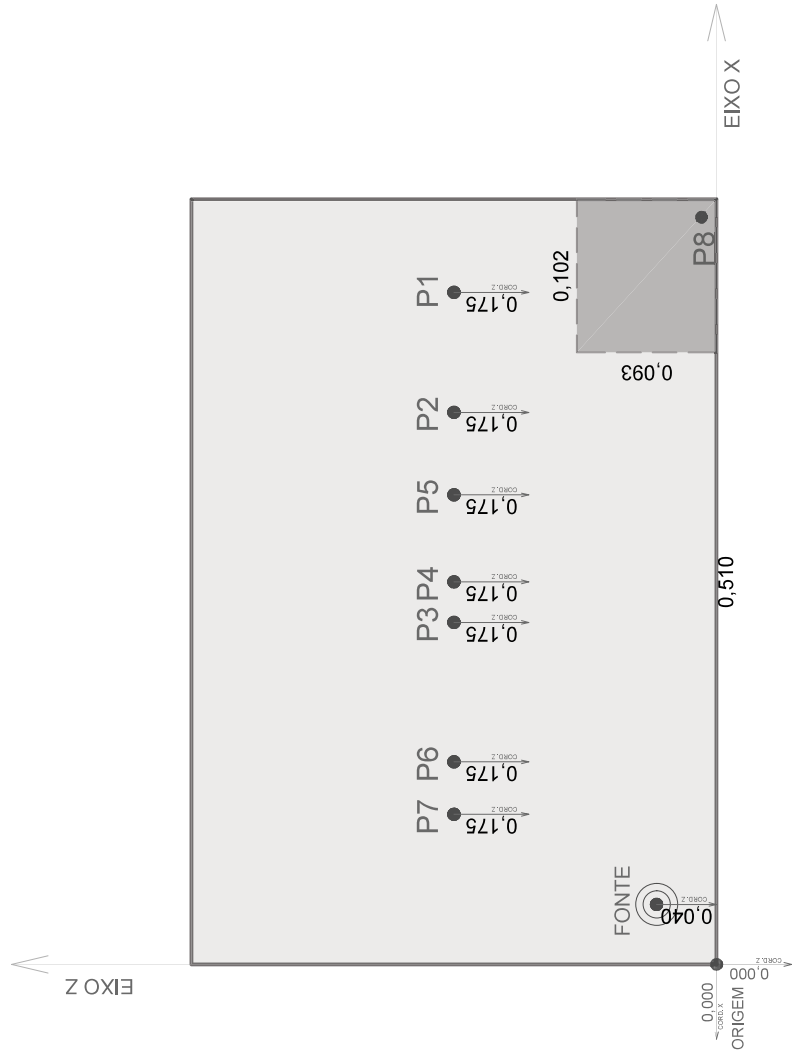
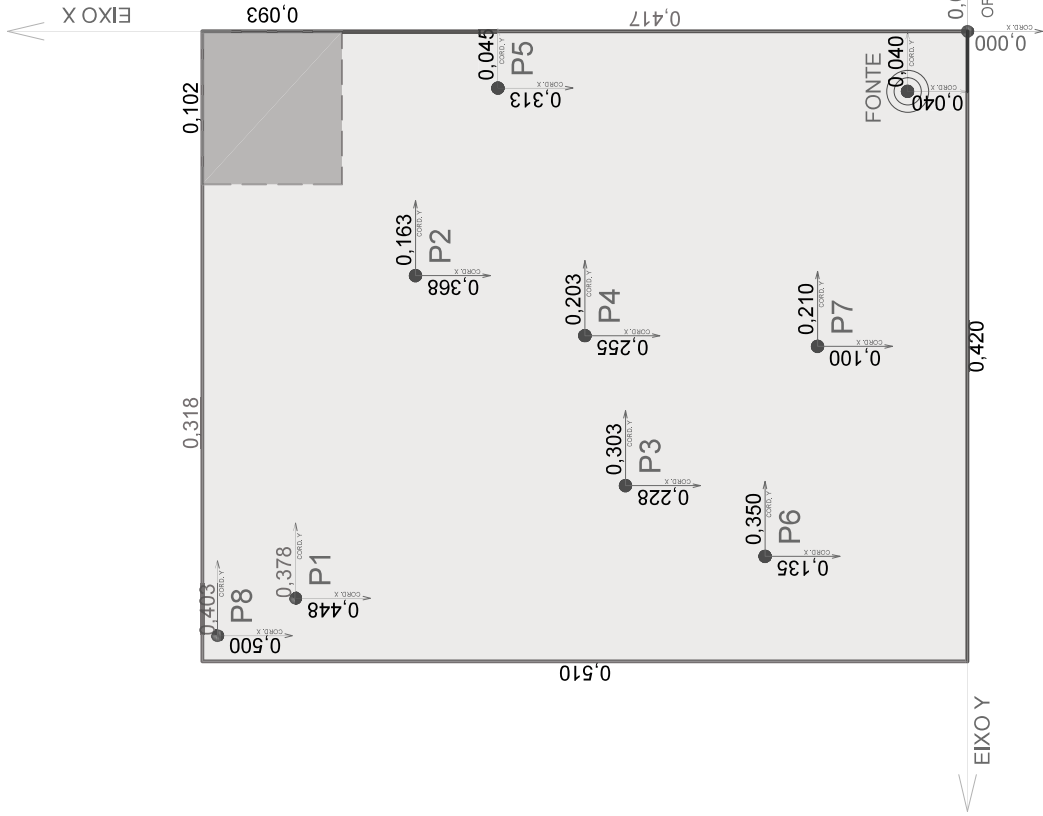
Quadro B.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-2.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,080$ [m <sup>2</sup> ]	



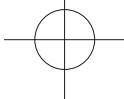
# MCO-2 : MFI-2

ESCALA (1:5)

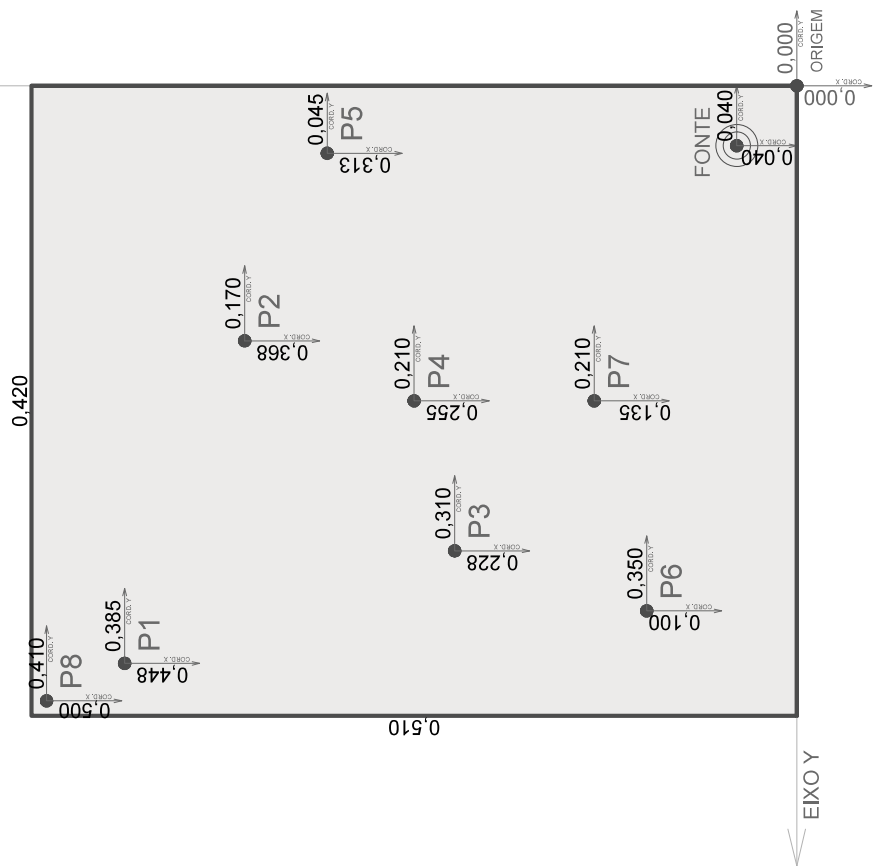


# MAN-2

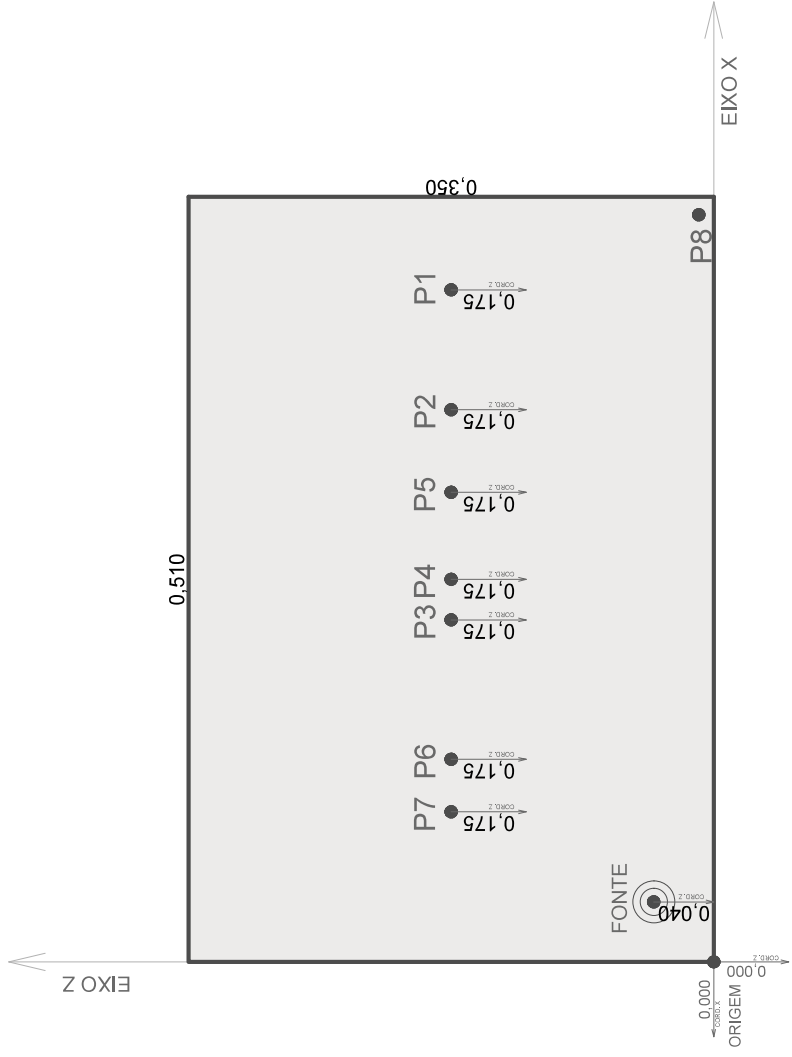
ESCALA (1:5)



EIXO X



EIXO Z







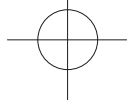
## APÊNDICE C – CONFIGURAÇÕES DE MFI-3, MAN-3 E MCO-3

Quadro C.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-3.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro C.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-3.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,062$ [m <sup>2</sup> ]	

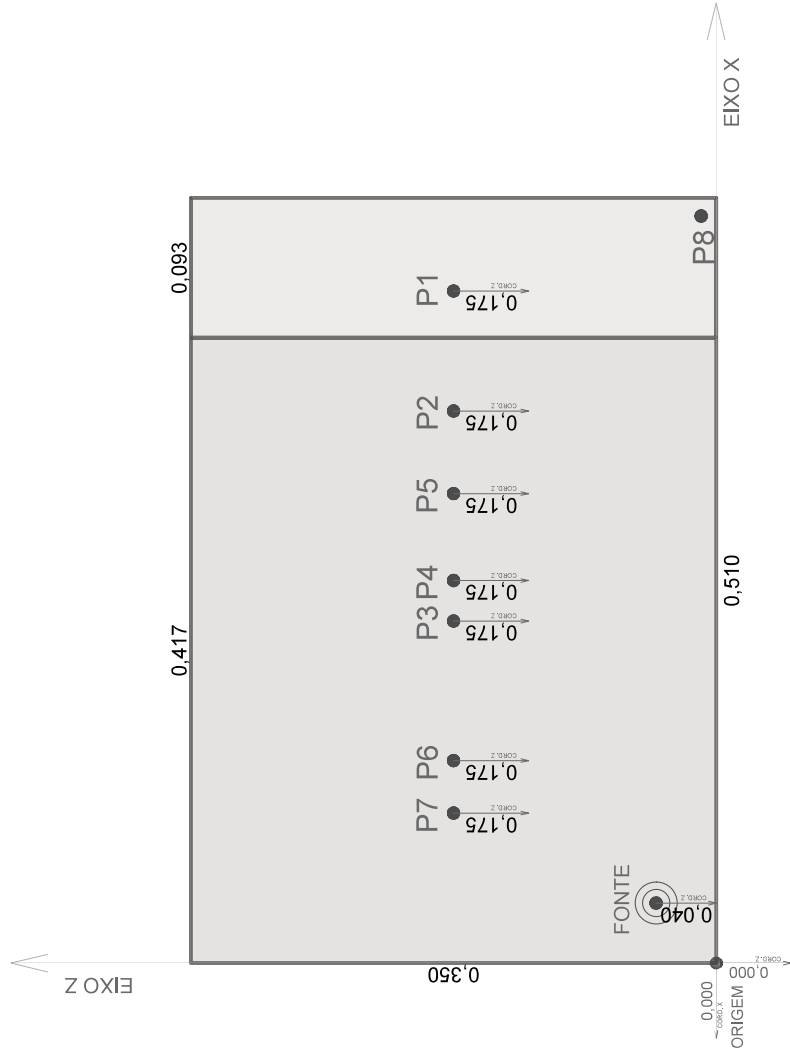
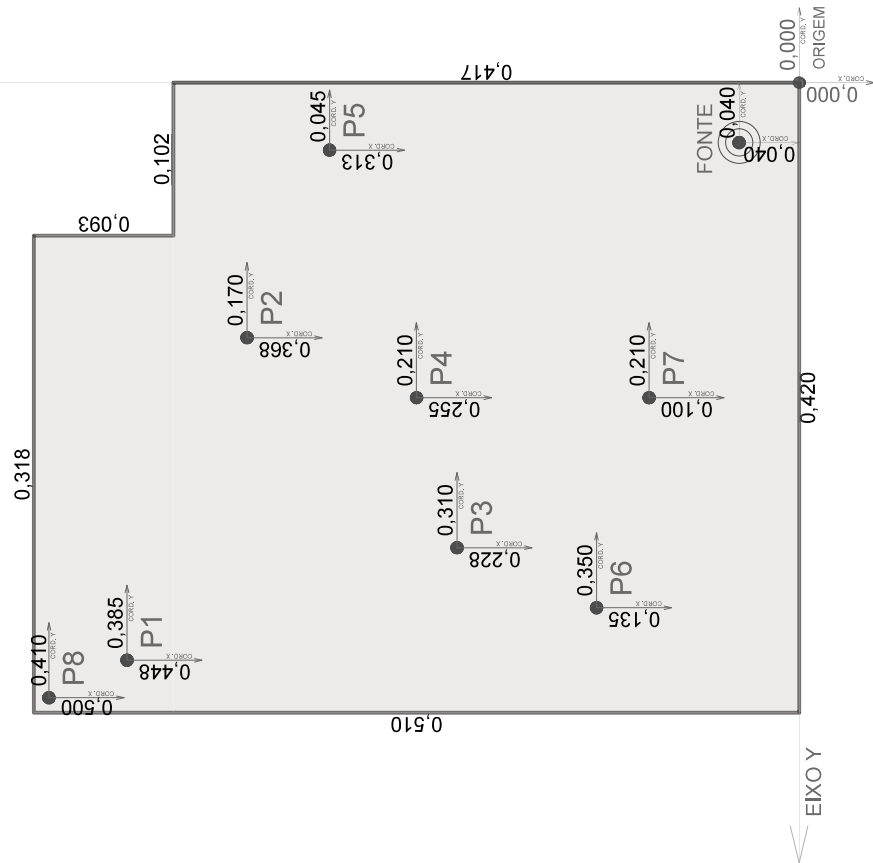


MCO-3

ESCALA (1:5)

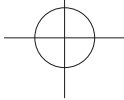


EIXO X



EIXO X

EIXO Y

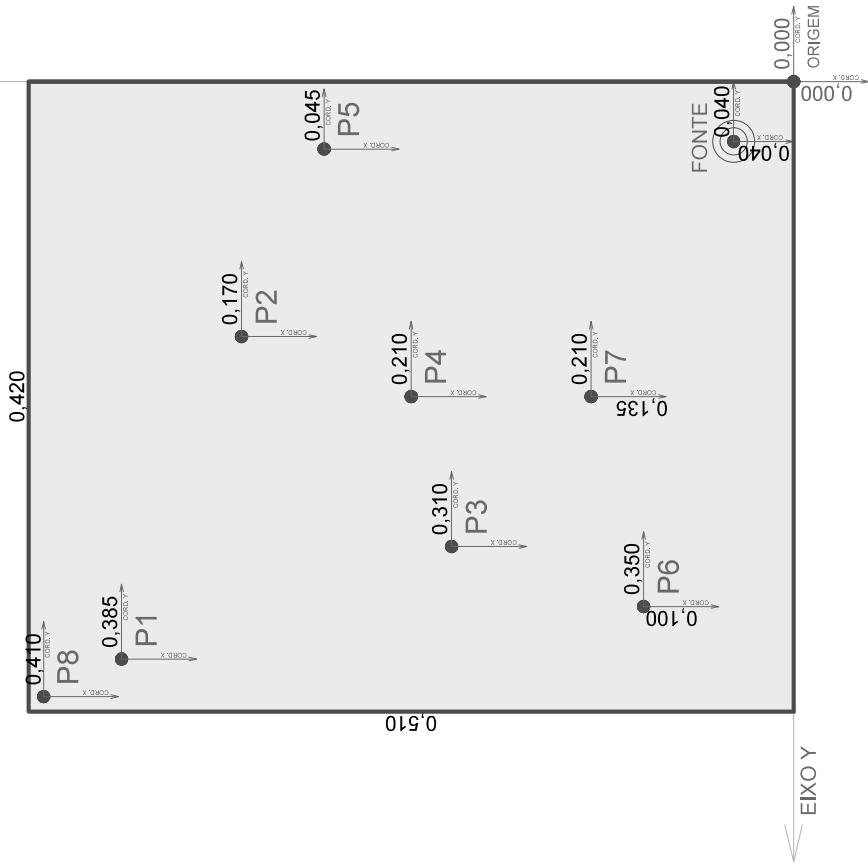


MAN-3

ESCALA (1:5)



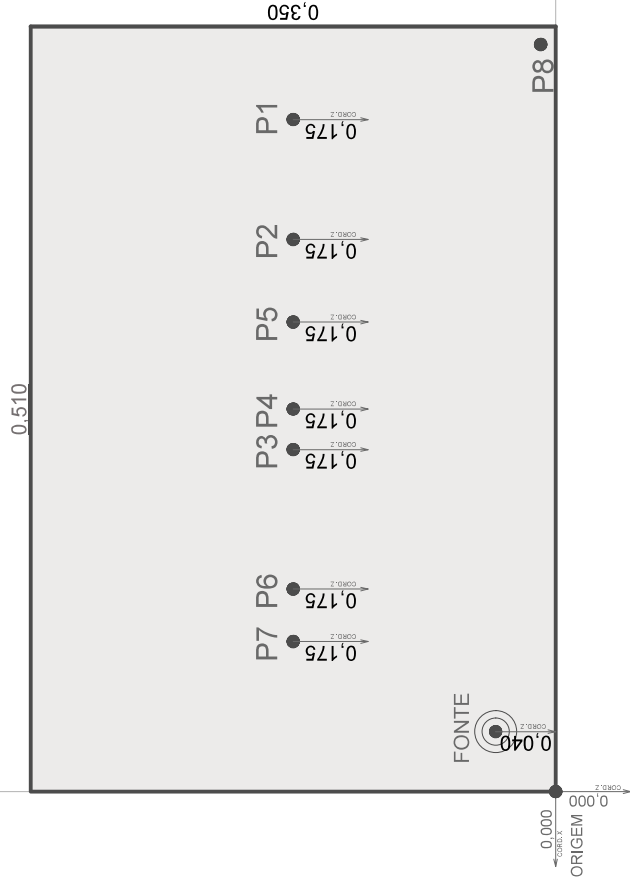
EIXO X



PLANTA

VISTA A-A'

EIXO Z





## APÊNDICE D – CONFIGURAÇÕES DE MFI-4, MAN-4 E MCO-4

Quadro D.1 – Tempos de reverberação obtidos na medição do MFI-4.

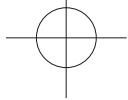
Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{60}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26

Quadro D.2 – Tempos de reverberação usados no MAN-4.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,22	0,24	0,16	0,18	0,13	0,08	0,08	0,10	0,09
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	31,41	28,79	43,19	38,39	53,15	86,38	86,38	69,10	76,78

Quadro D.3 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-4.

Freq. Central Banda (1/3)	Etapa Simulada	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes
		965,01-3074,13j	0,10	Teto
400 Hz	S2	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes
		782,22-2217,50j	0,20	Teto
500 Hz	S3	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes
		583,14-1421,94j	0,32	Teto
630 Hz	S4	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes
		571,48-1234,92j	0,38	Teto
800 Hz	S5	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes
		533,80-1046,02j	0,44	Teto
1 kHz	S6	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes
		488,33-785,25j	0,58	Teto
1.25 kHz	S7	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes
		437,92-524,48j	0,71	Teto
1.6 kHz	S8	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes
		401,42-322,61j	0,86	Teto
2 kHz	S9	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes
		258,90-90,83j	0,96	Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes):			$S = 0,865$ [m <sup>2</sup> ]	
Soma das áreas de superfície de (Teto):			$S = 0,214$ [m <sup>2</sup> ]	

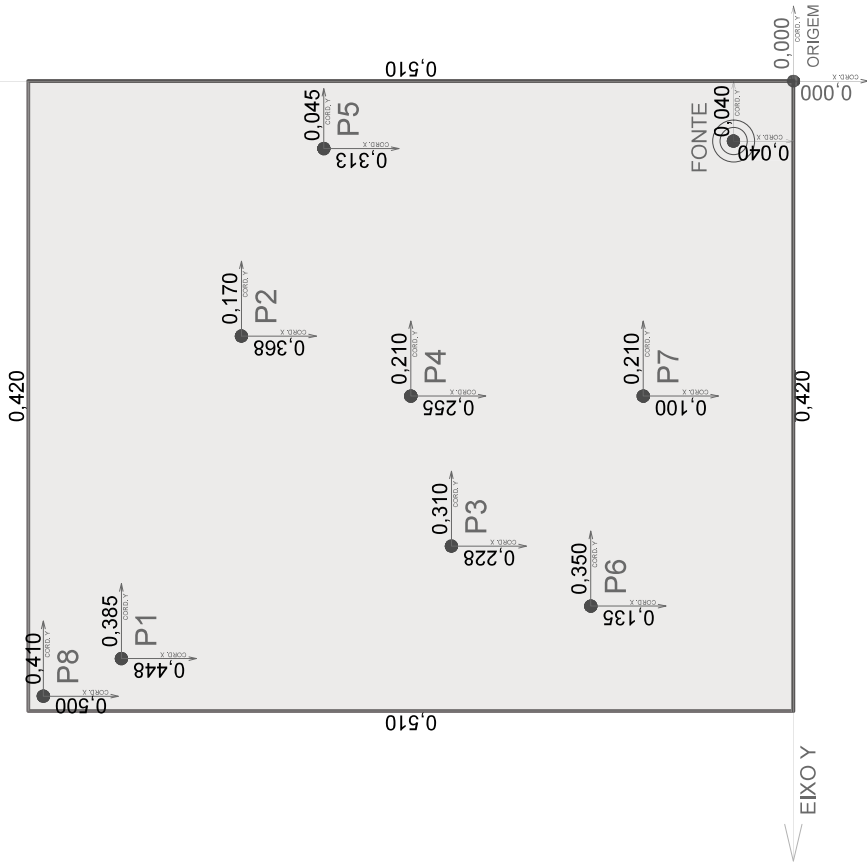


MCO-4 : MAN-4

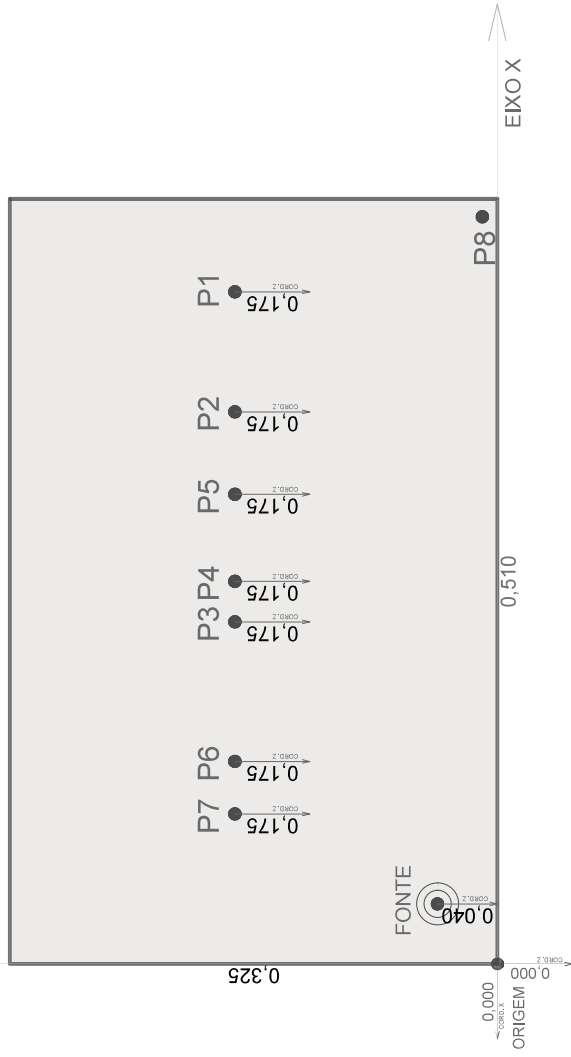
ESCALA (1:5)

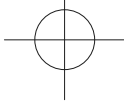


EIXO X



EIXO Z



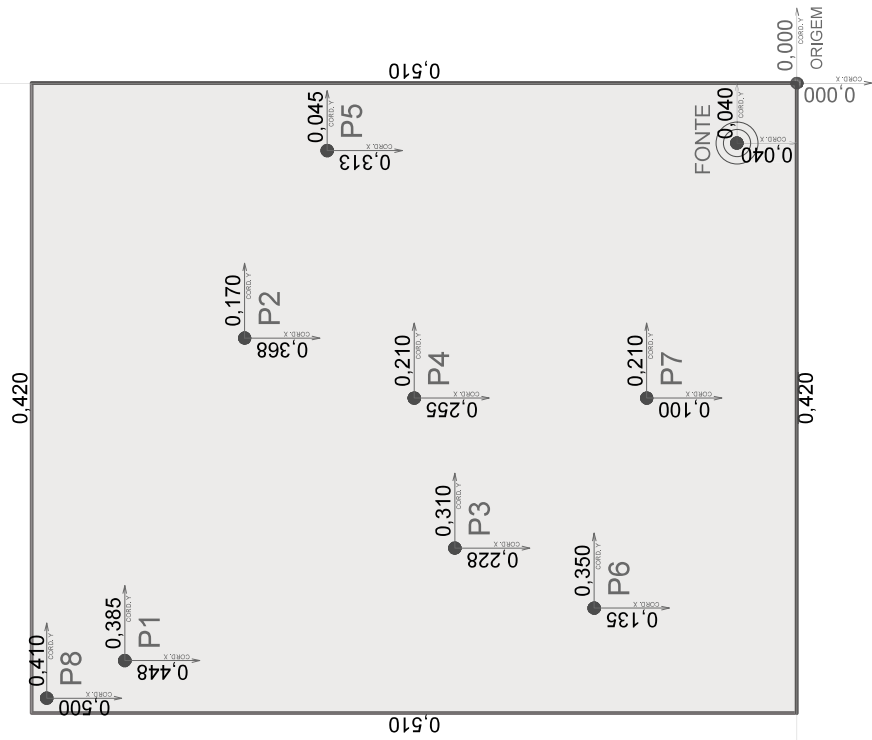


MFI-4

ESCALA (1:5)

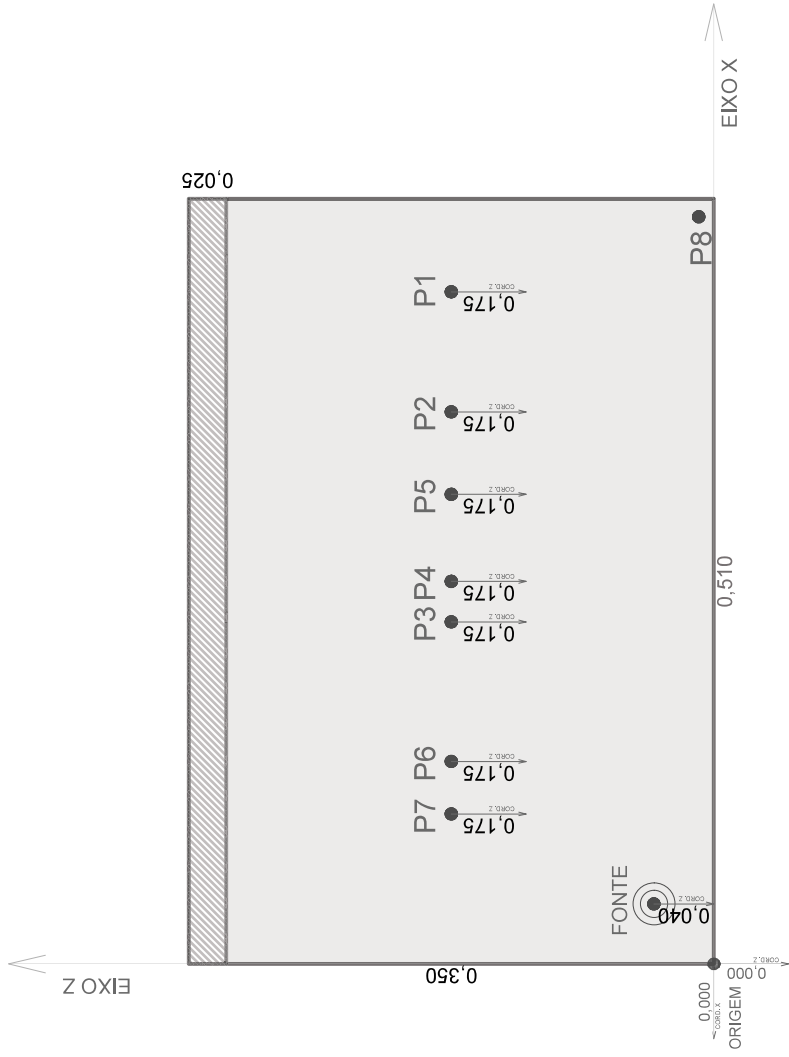


EIXO X



PLANTA

EIXO Y



VISTA A-A'

EIXO X

EIXO Z





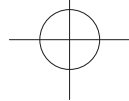
## APÊNDICE E – CONFIGURAÇÕES DE MFI-5, MAN-5 E MCO-5

Quadro E.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-5.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro E.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-5.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,036$ [m <sup>2</sup> ]	

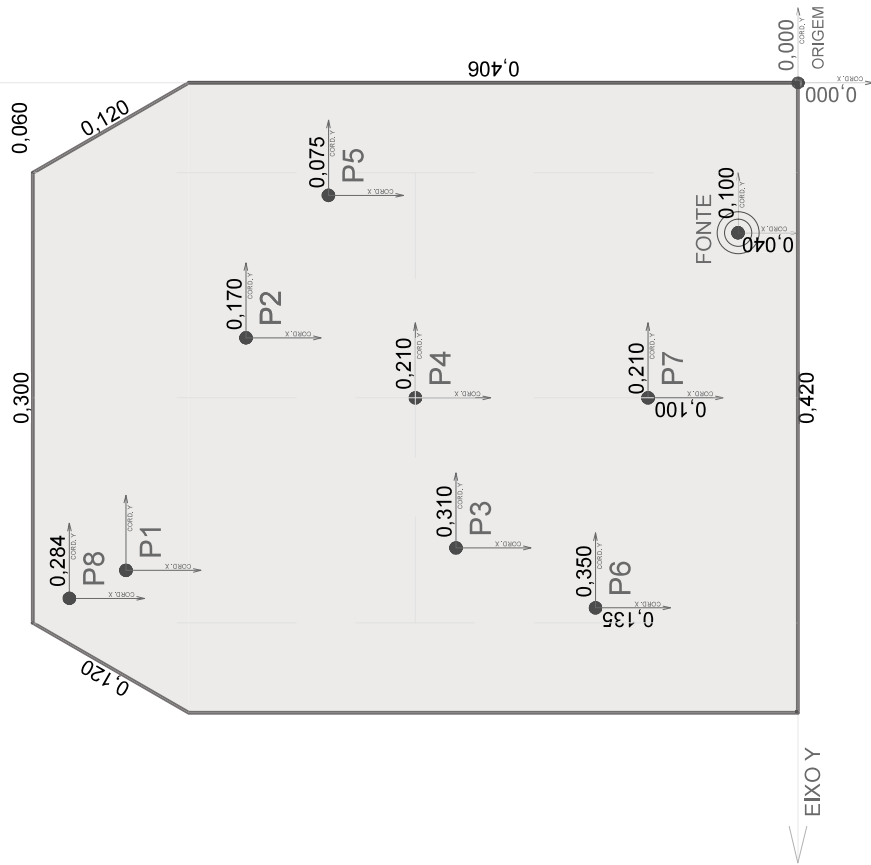


MCO-5

ESCALA (1:5)



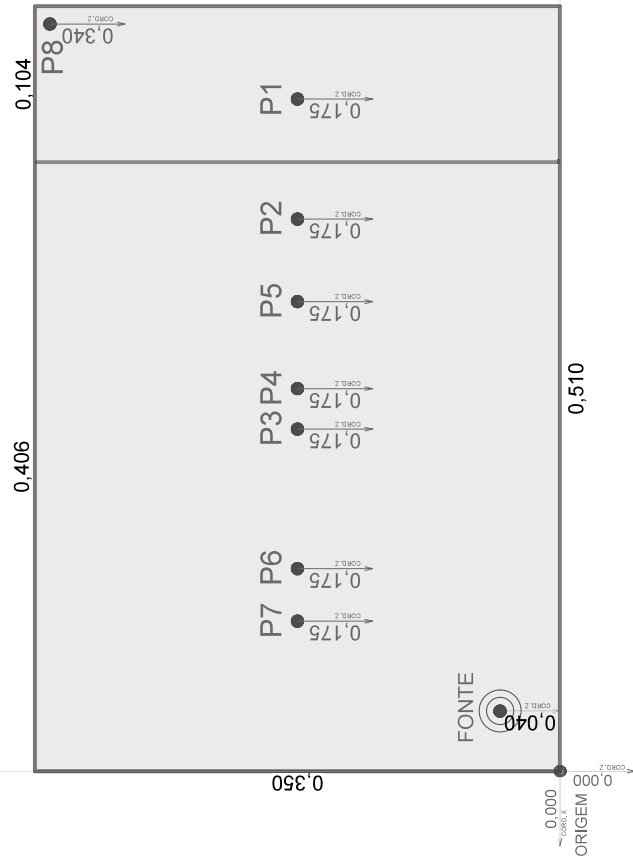
EIXO X



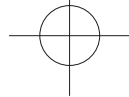
PLANTA



EIXO Z



VISTA A-A'

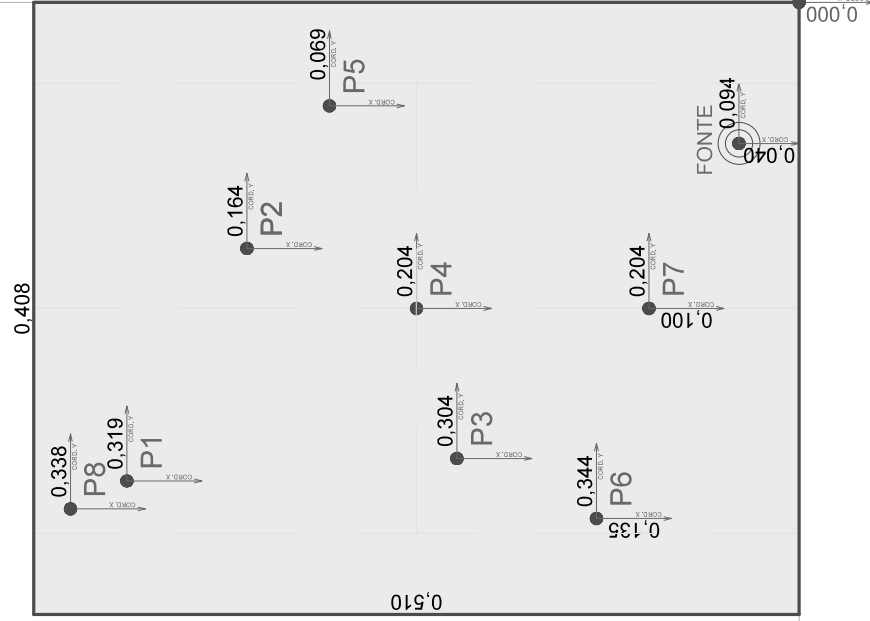


MAN-5

ESCALA (1:5)



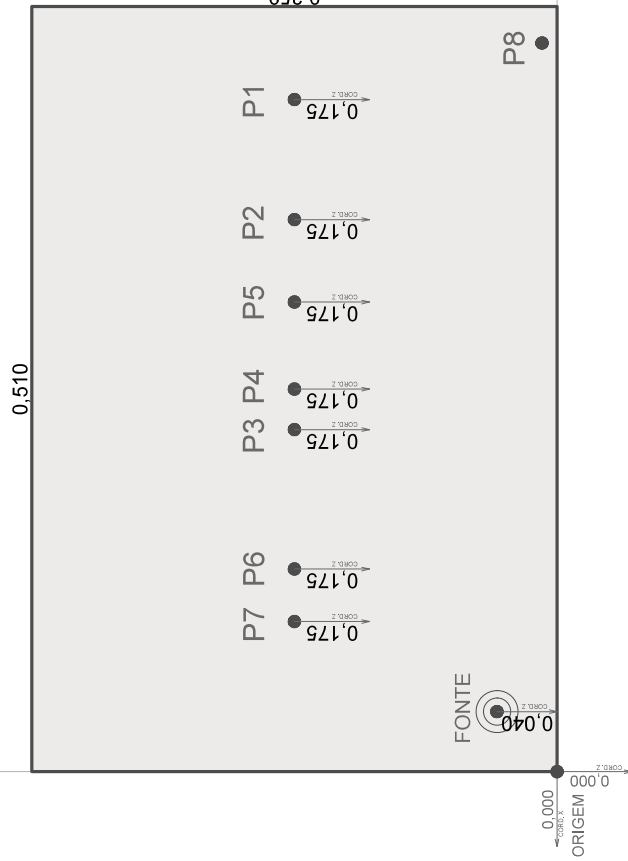
EIXO X



PLANTA

EIXO Y

EIXO Z



VISTA A-A'

EIXO X



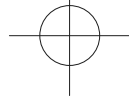
## APÊNDICE F – CONFIGURAÇÕES DE MFI-6, MAN-6 E MCO-6

Quadro F.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-6.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro F.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-6.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,089$ [m <sup>2</sup> ]	

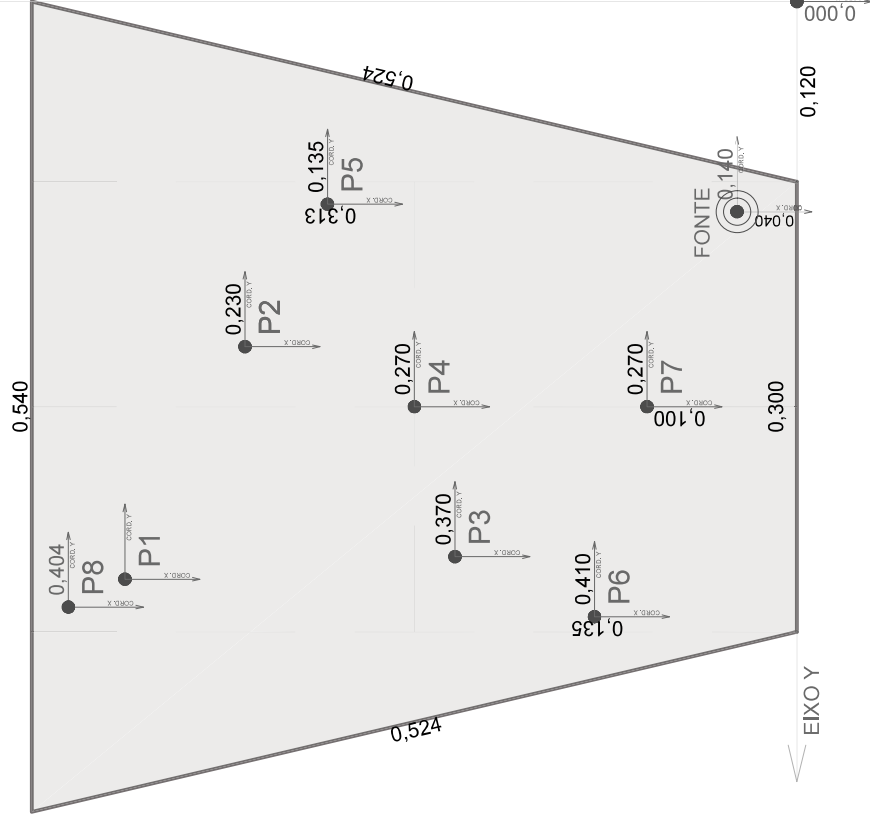


MCO-6

ESCALA (1:5)



EIXO X

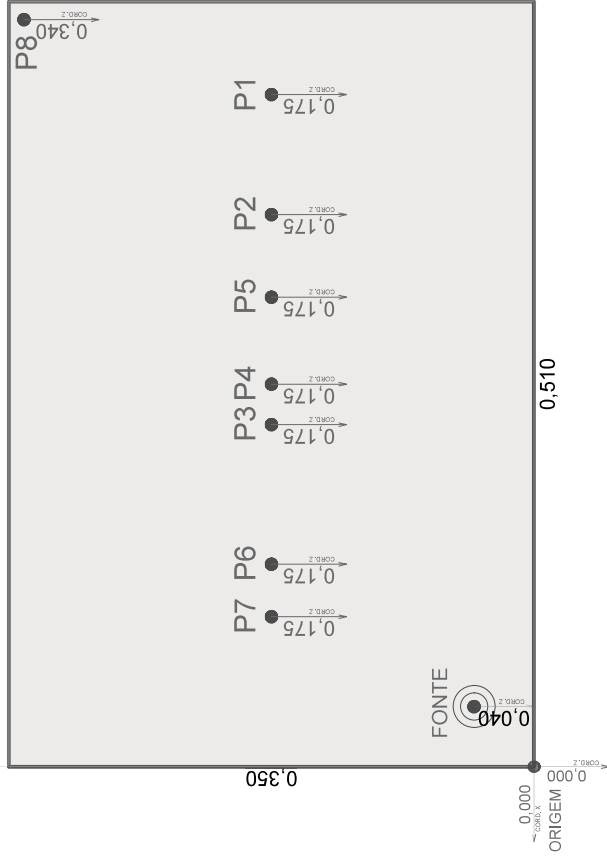


PLANTA



EIXO Y

EIXO Z

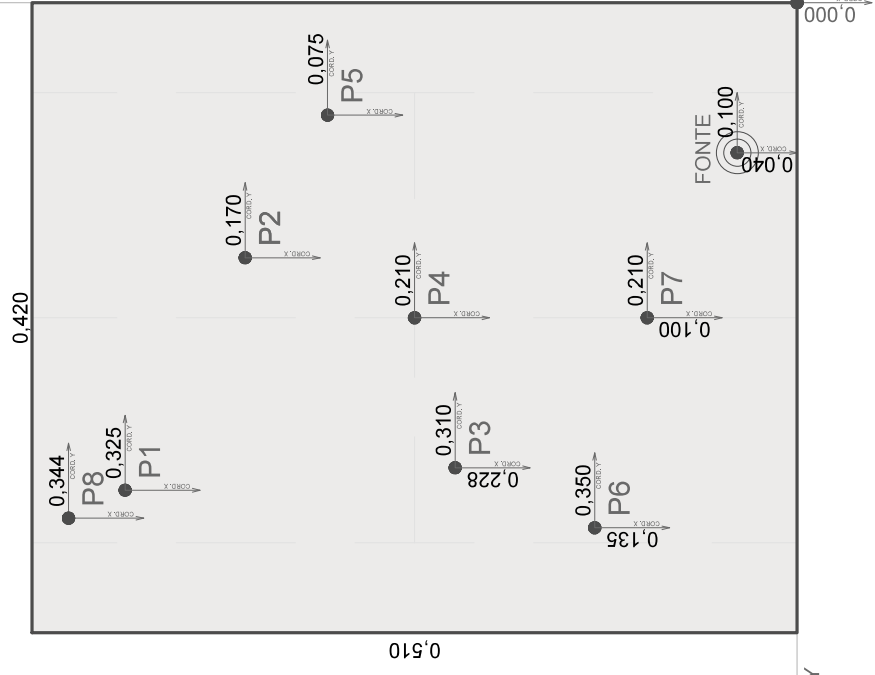
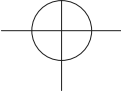


VISTA A-A'

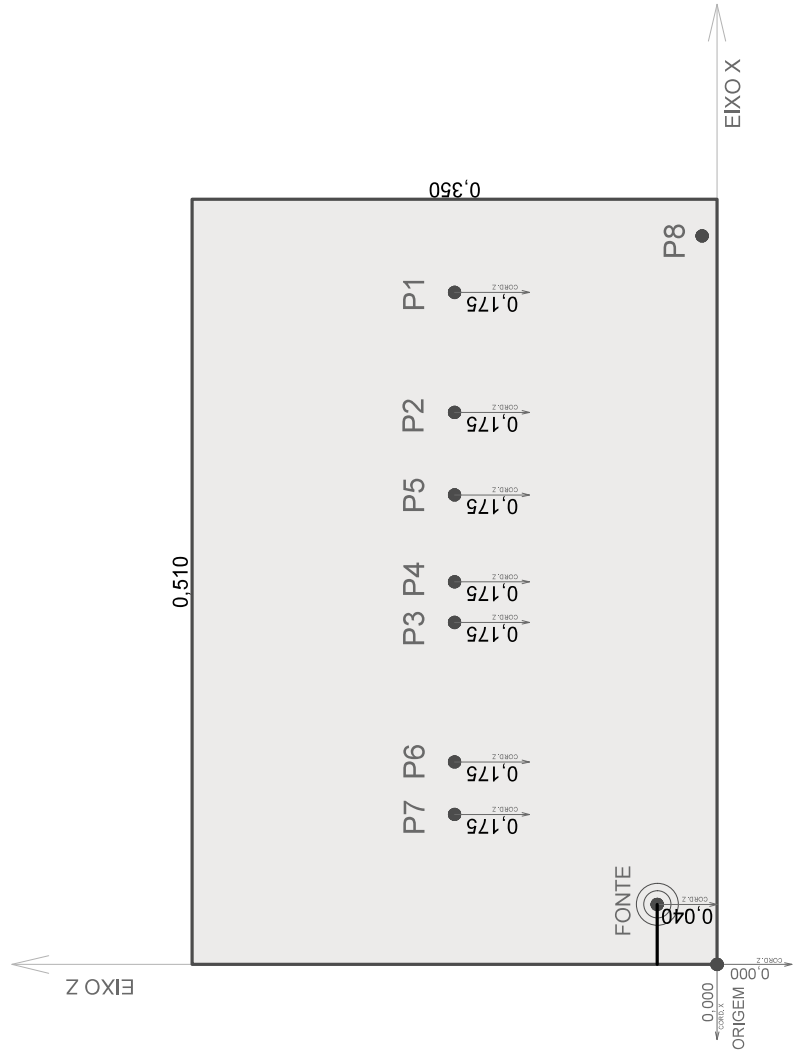
EIXO X

MAN-6

ESCALA (1:5)



PLANTA



VISTA A-A'





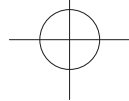
## APÊNDICE G – CONFIGURAÇÕES DE MFI-7, MAN-7 E MCO-7

Quadro G.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-7.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro G.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-7.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,032$ [m <sup>2</sup> ]	



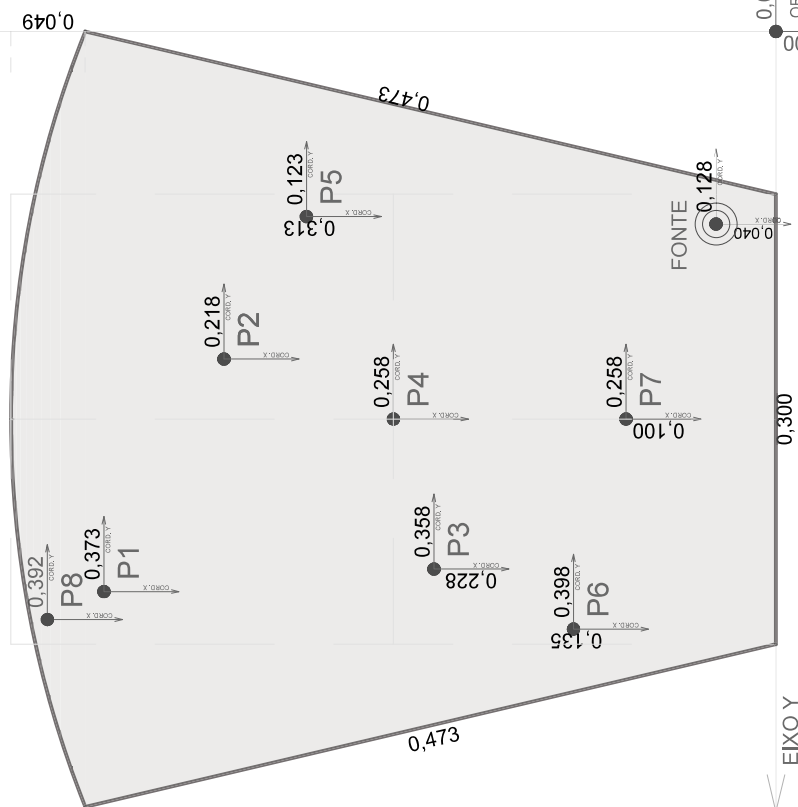
MCO-7

ESCALA (1:5)



EIXO X

0,049



EIXO Y

0,300

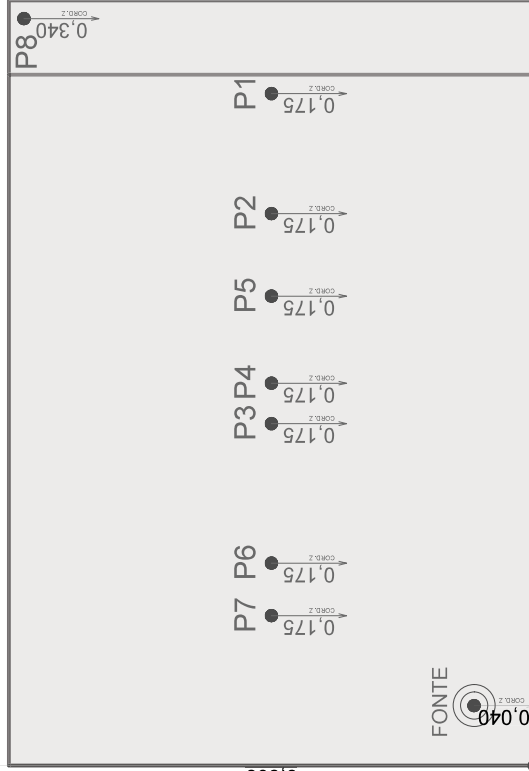
0,000  
ORIGEM

PLANTA



EIXO Z

0,350



0,510

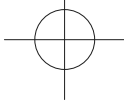
0,000  
ORIGEM

VISTA A-A'

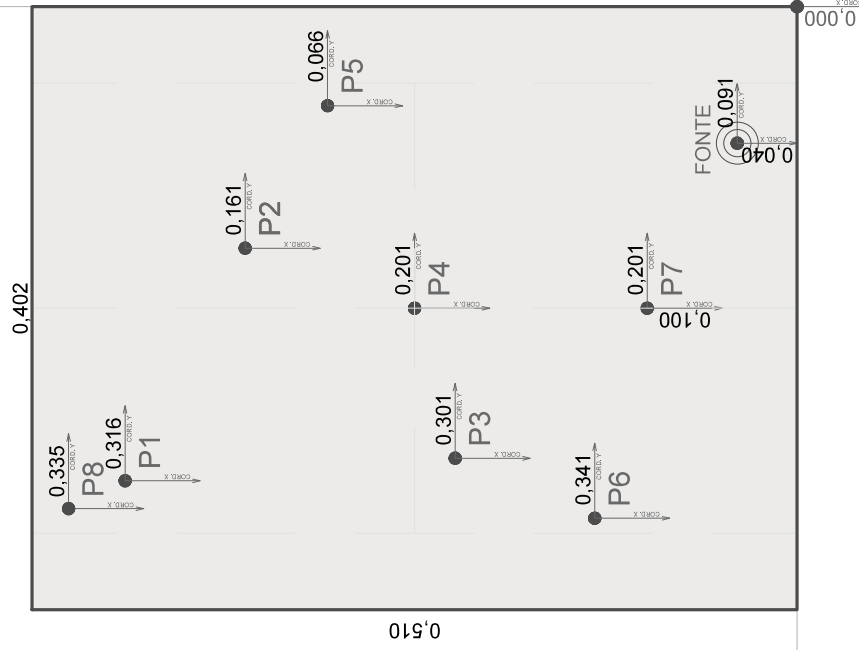
EIXO X

MAN-7

ESCALA (1:5)



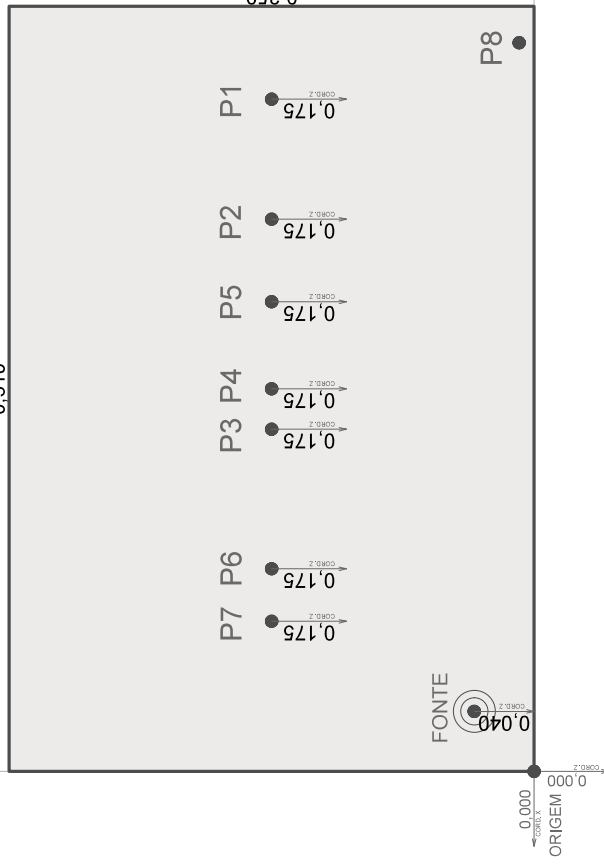
EIXO X



PLANTA

EIXO Z

0,510



VISTA A-A'

EIXO X

ORIGEM

EIXO Y



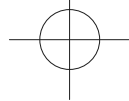
## APÊNDICE H – CONFIGURAÇÕES DE MFI-8, MAN-8 E MCO-8

Quadro H.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-8.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [ $s^{-1}$ ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro H.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-8.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,022$ [m <sup>2</sup> ]	

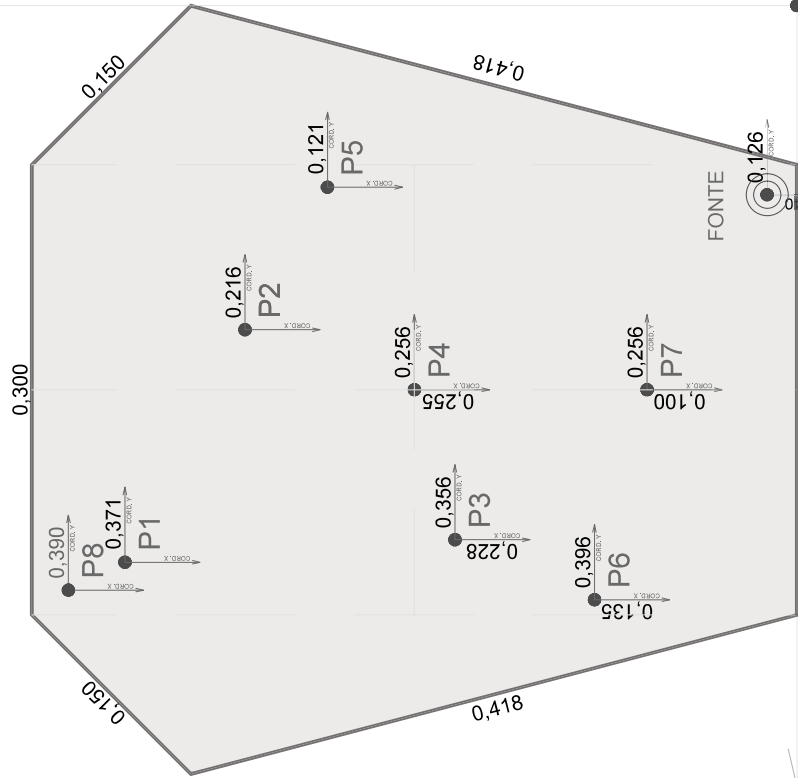


MCO-8

ESCALA (1:5)



EIXO X



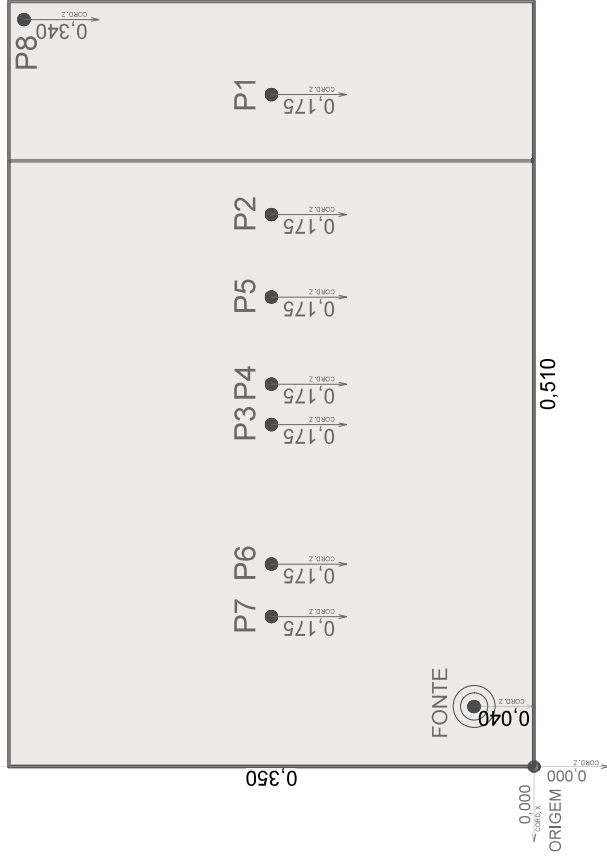
PLANTA

EIXO Y

0,000  
ORIGEM



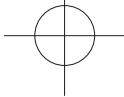
EIXO Z



VISTA A-A'

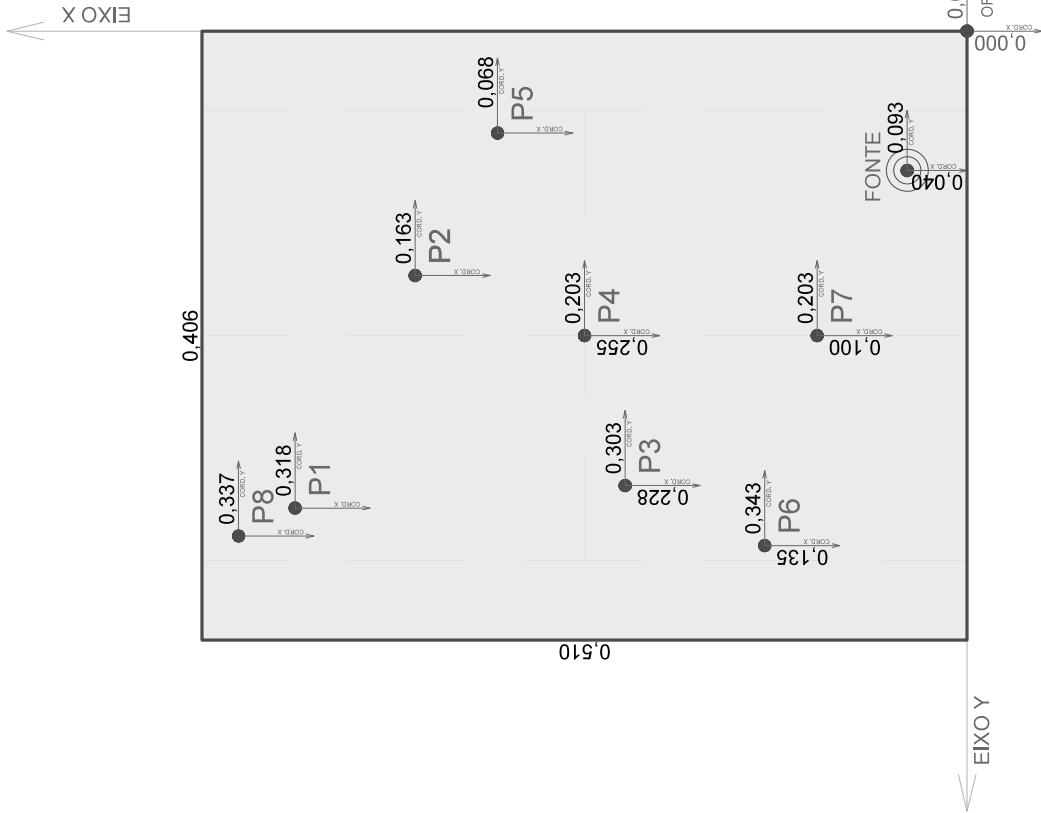
EIXO X

0,000  
ORIGEM

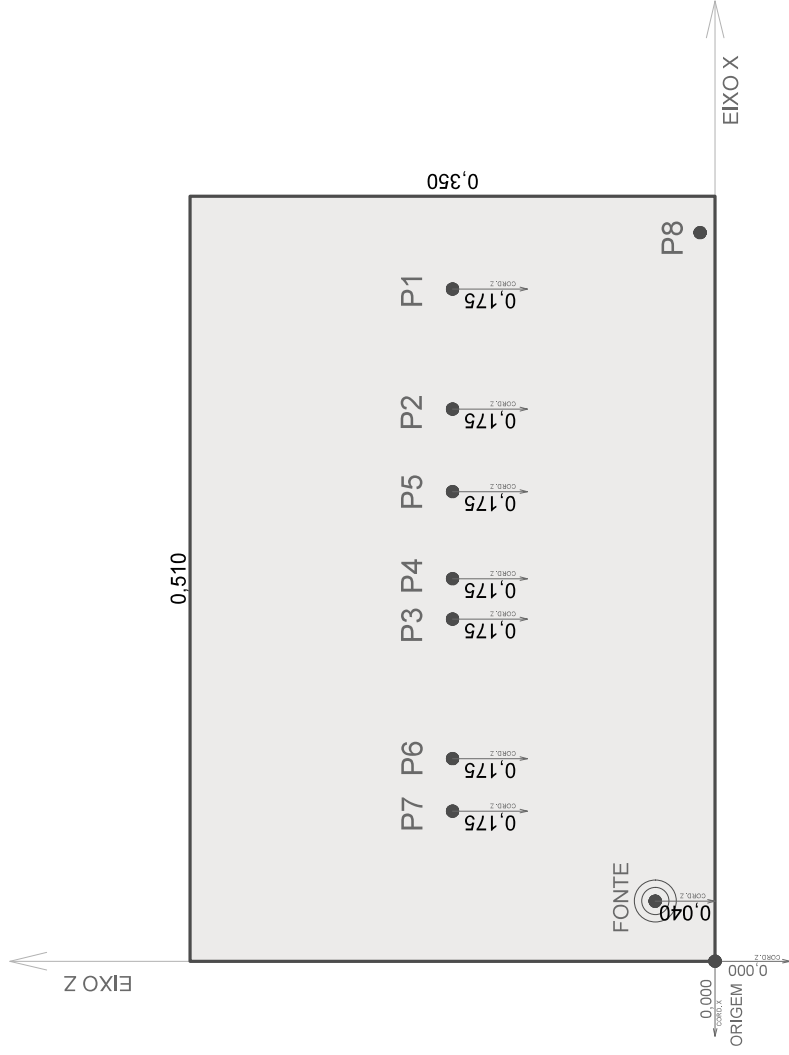


MAN-8

ESCALA (1:5)



PLANTA



VISTA A-A'





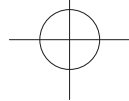
## APÊNDICE I – CONFIGURAÇÕES DE MFI-9, MAN-9 E MCO-9

Quadro I.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-9.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro I.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-9.

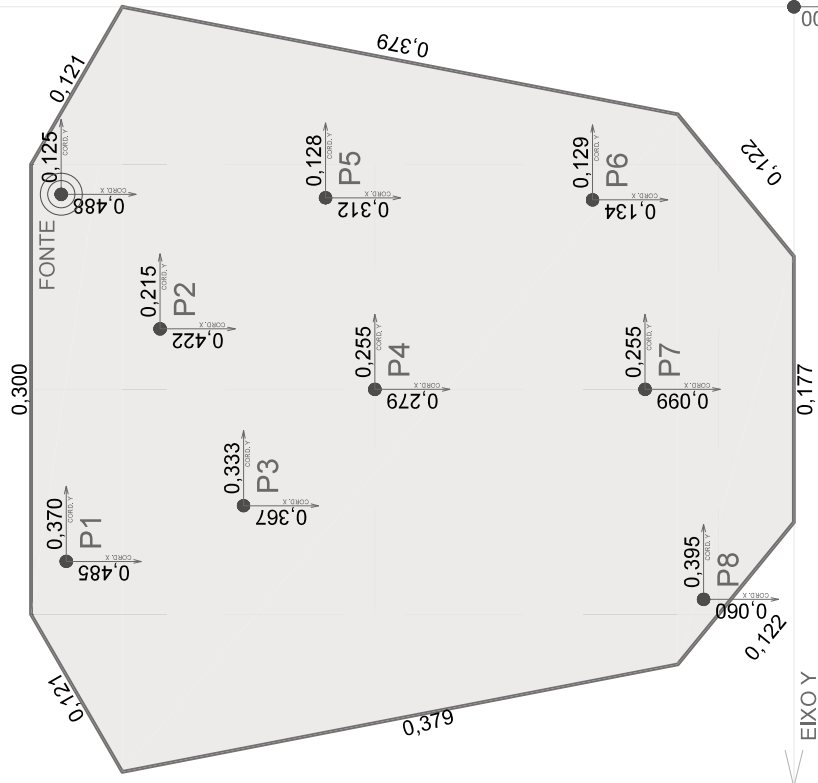
Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,006$ [m <sup>2</sup> ]	



MCO-10

ESCALA (1:5)

EIXO X



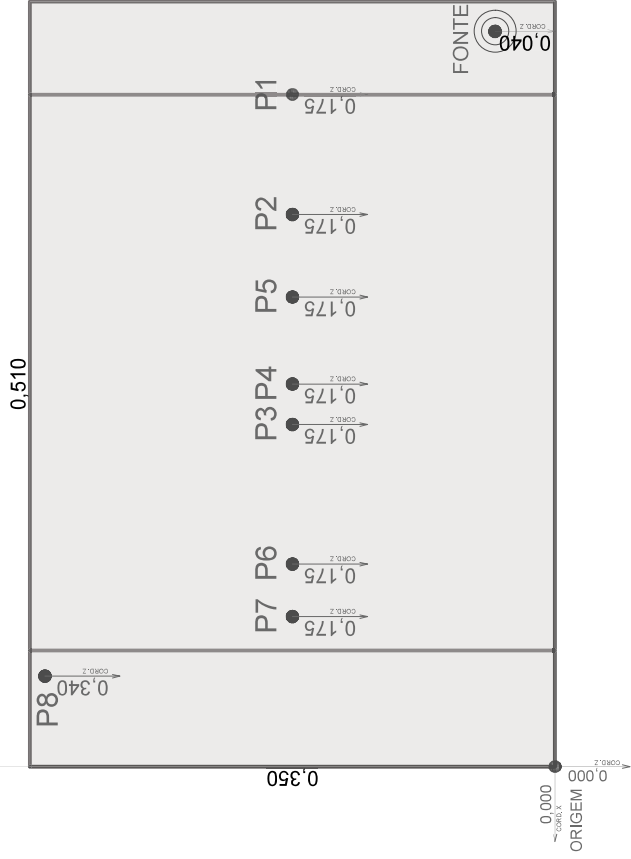
EIXO Y

PLANTA

0,000  
ORIGEM



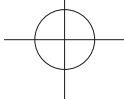
EIXO Z



EIXO X

0,000  
ORIGEM

VISTA A-A'

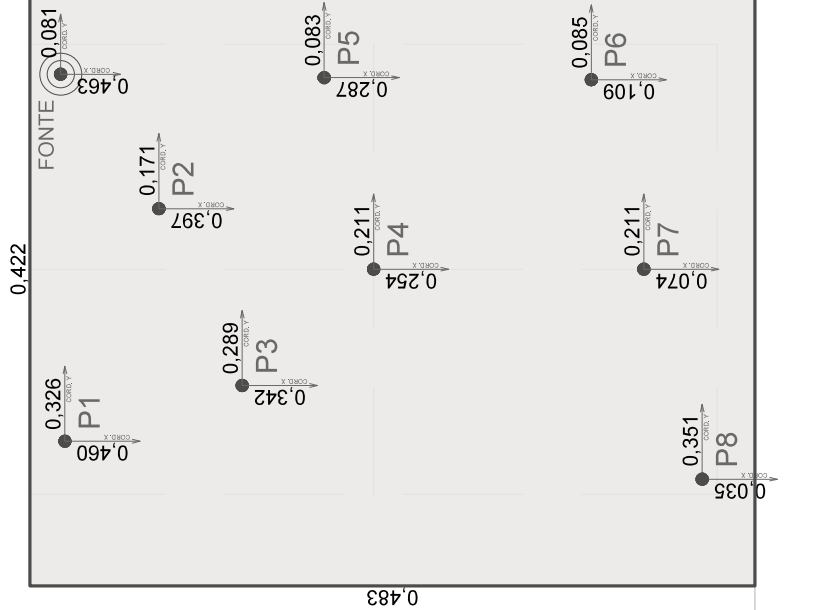


MAN-9

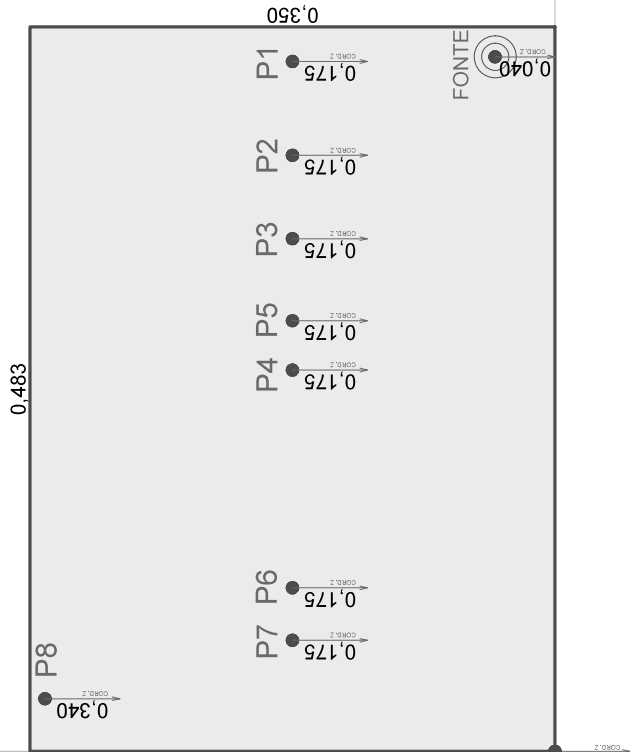
ESCALA (1:5)



EIXO X



EIXO Z



EIXO X



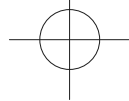
## APÊNDICE J – CONFIGURAÇÕES DE MFI-10, MAN-10 E MCO-10

Quadro J.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-10.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro J.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-10.

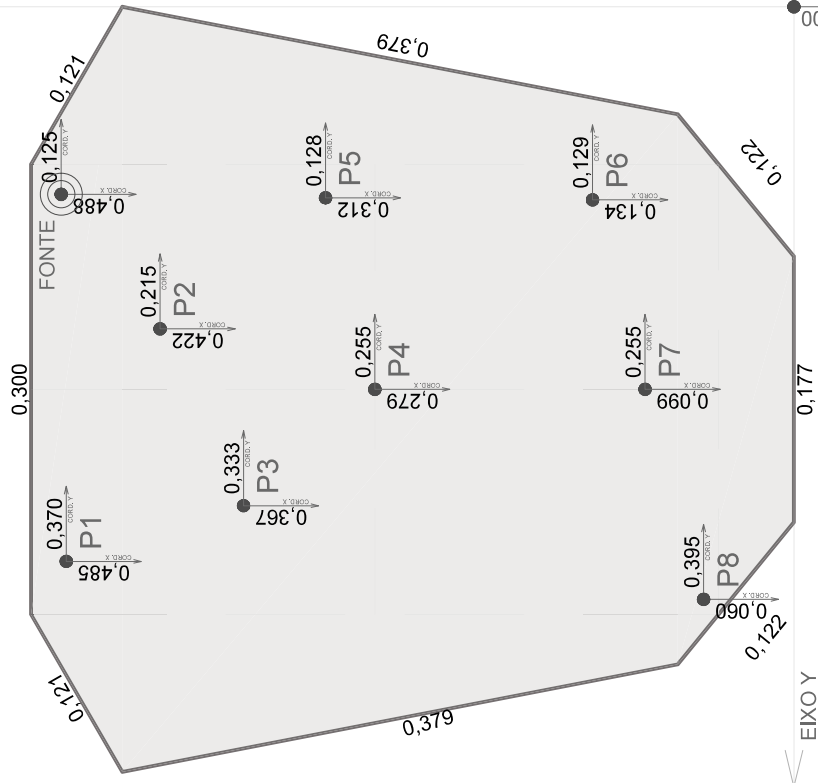
Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,010$ [m <sup>2</sup> ]	



MCO-10

ESCALA (1:5)

EIXO X



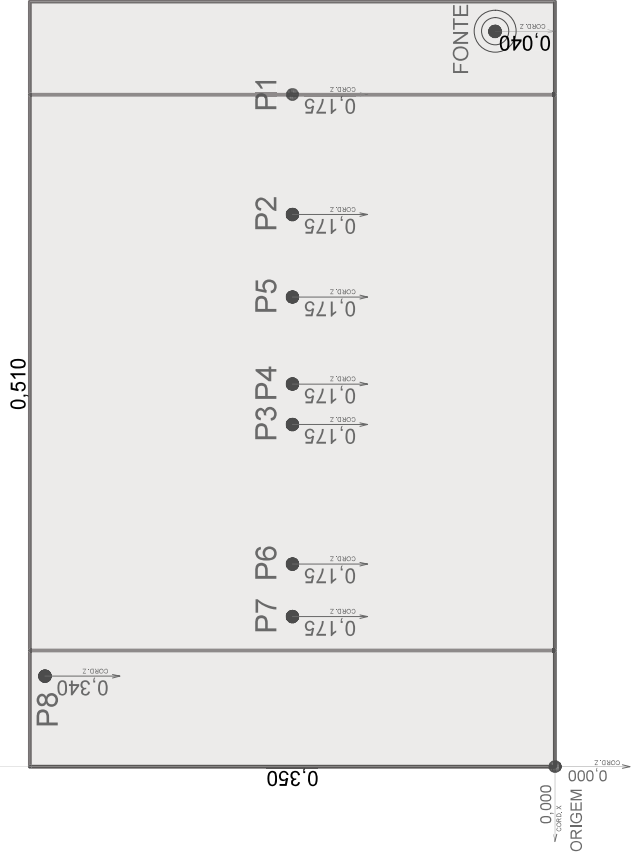
PLANTA

EIXO Y

0,000 ORIGEM



EIXO Z



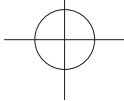
VISTA A-A'

EIXO X

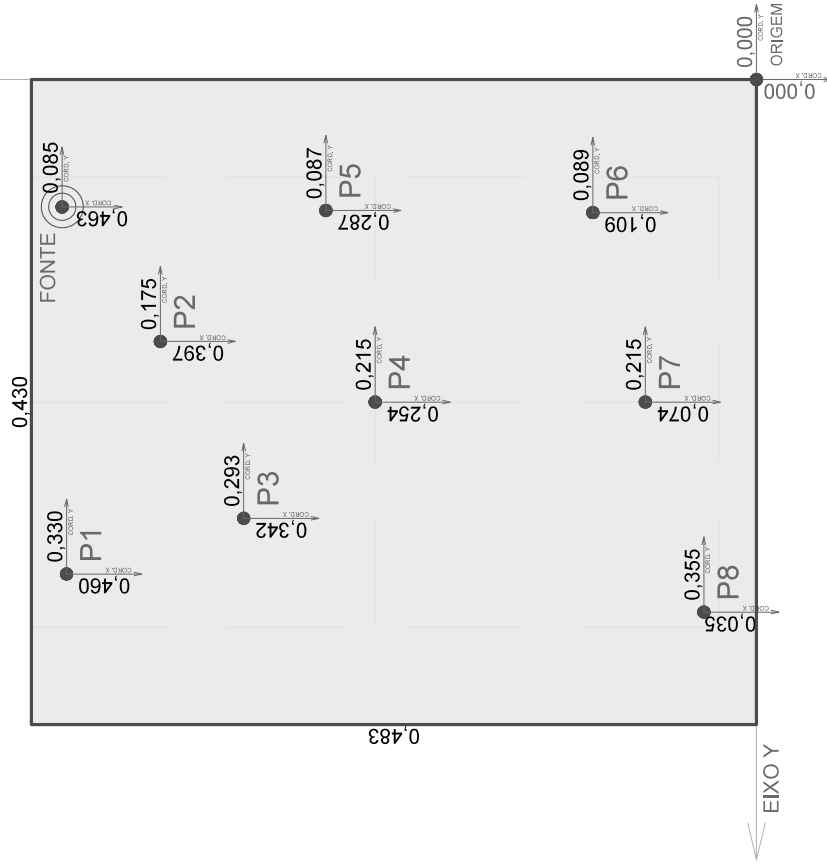
0,000 ORIGEM

MAN-10

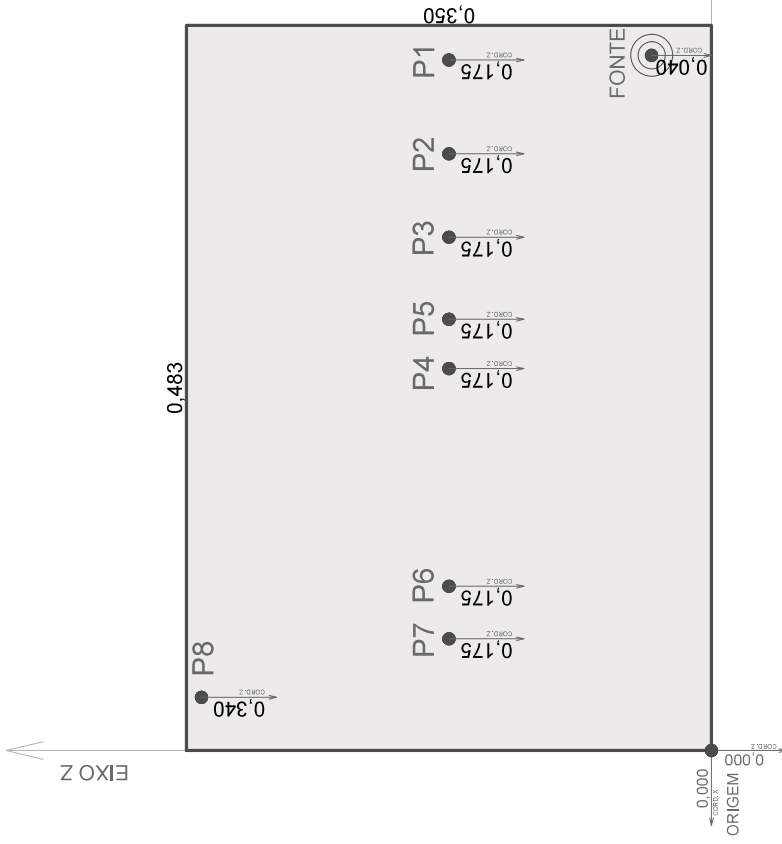
ESCALA (1:5)



EIXO X



EIXO Z



ORIGEM  
0,000

EIXO X





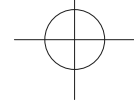
## APÊNDICE K – CONFIGURAÇÕES DE MFI-11, MAN-11 E MCO-11

Quadro K.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-11.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

Quadro K.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-11.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 1,021$ [m <sup>2</sup> ]	

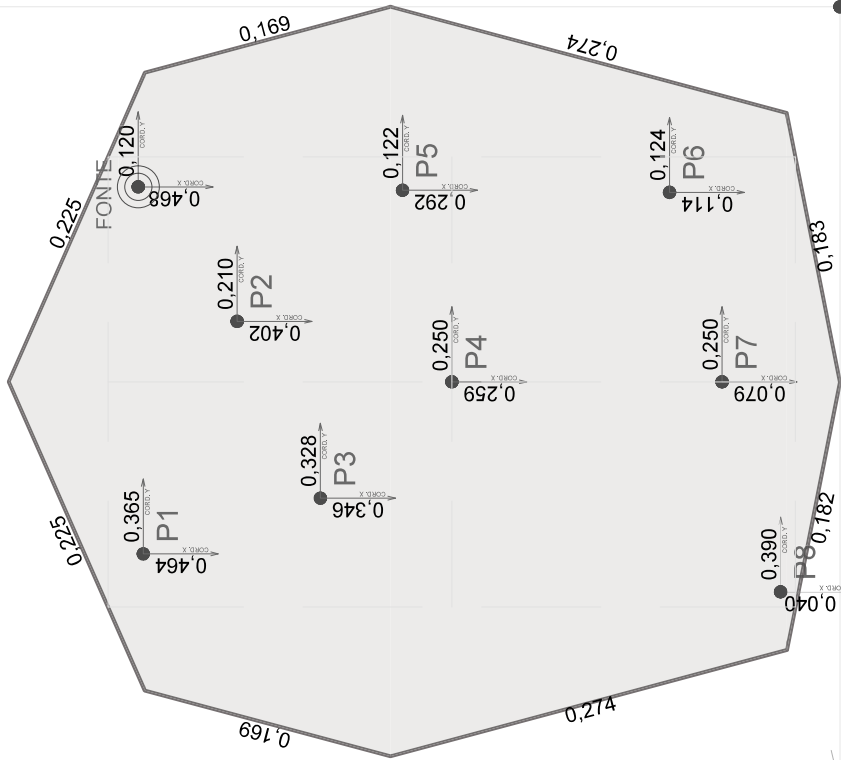


MCO-11

ESCALA (1:5)



EIXO X

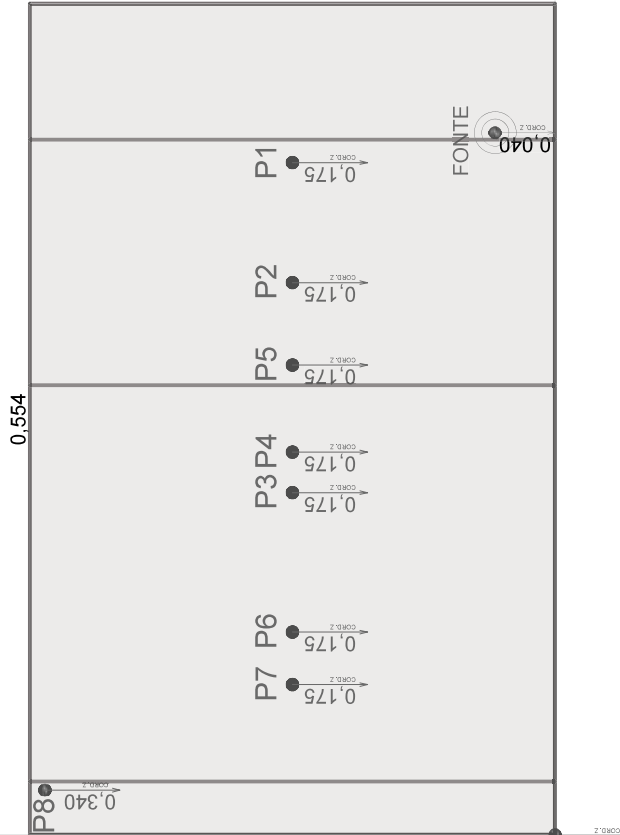


PLANTA

EIXO Y

0,000 ORIGEM

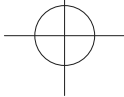
EIXO Z



VISTA A-A'

EIXO X

0,000 ORIGEM

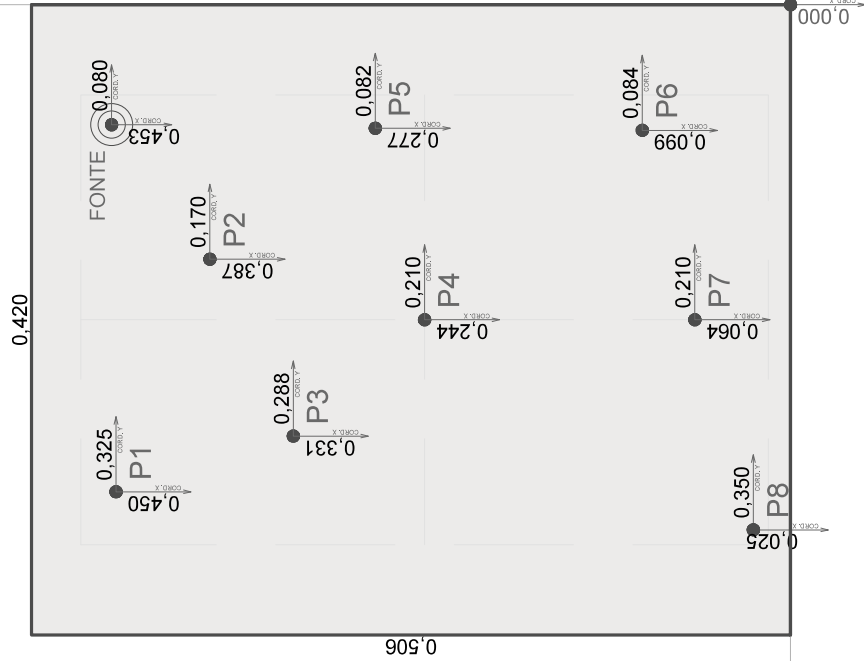


MAN-11

ESCALA (1:5)



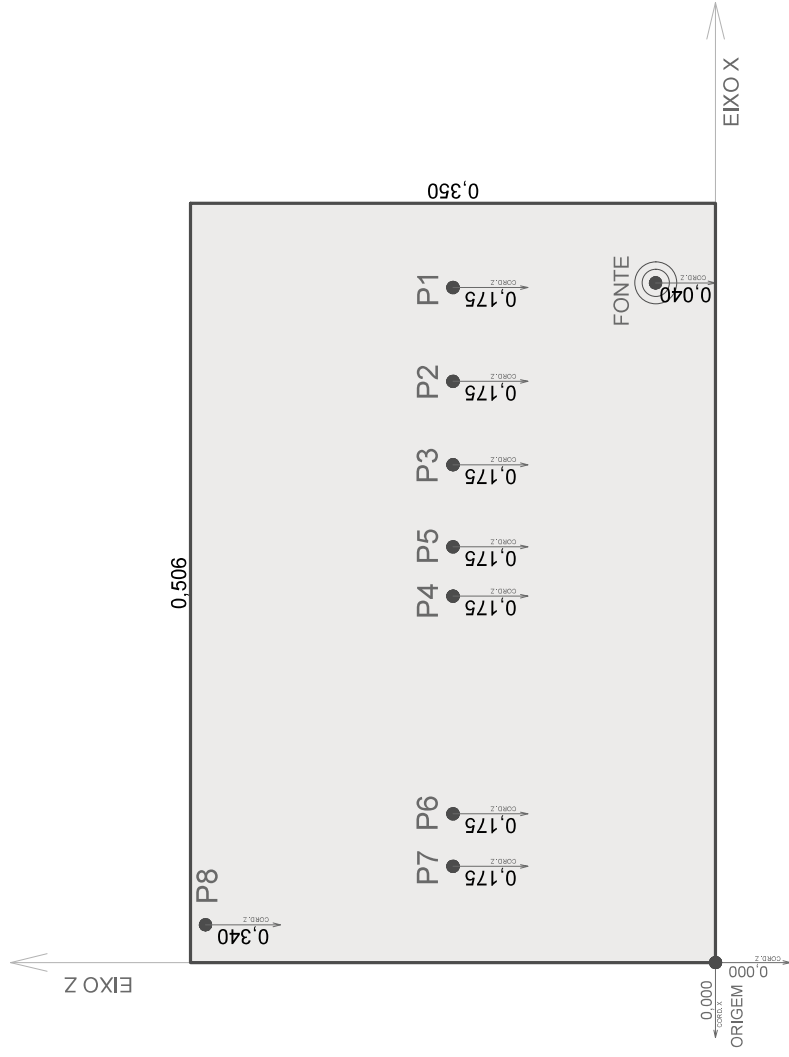
EIXO X



PLANTA



EIXO Z



VISTA A-A'

EIXO X



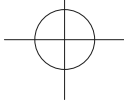
## APÊNDICE L – CONFIGURAÇÕES DE MFI-12, MAN-12 E MCO-12

Quadro L.1 – Tempos de reverberação usados no MAN-12.

Banda (1/3) [Hz]	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
$T_{30}$ [s]	0,32	0,41	0,30	0,24	0,32	0,24	0,28	0,32	0,26
$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	21,59	16,85	23,03	28,79	21,59	28,79	24,68	21,59	26,58

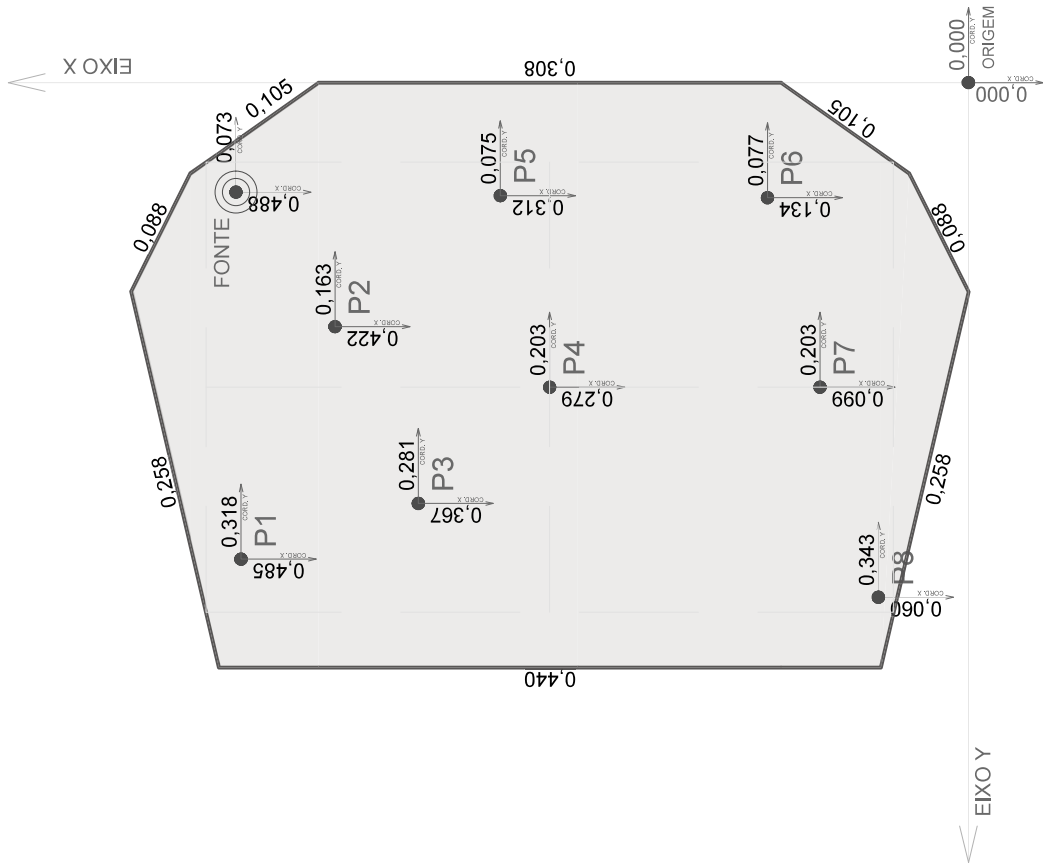
Quadro L.2 – Impedâncias de superfícies, e seus correspondentes coeficientes de absorção, usadas nas simulações em FEM do MCO-12.

Freq. Banda (1/3)	Etapa Simu.	Malha [m]	$Z_s$ [Pa.m/s]	$\alpha$ (Eq. 3.23)	Superfícies Aplicação $Z_s$
315 Hz	S1	0,120	46922,27+6225,45j	0,03	Piso - Paredes - Teto
400 Hz	S2	0,095	53043,24+33202,40j	0,03	Piso - Paredes - Teto
500 Hz	S3	0,076	38990,63+20751,50j	0,03	Piso - Paredes - Teto
630 Hz	S4	0,060	29897,83+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
800 Hz	S5	0,048	38167,06+33202,40j	0,02	Piso - Paredes - Teto
1 kHz	S6	0,038	30999,71+20751,50j	0,04	Piso - Paredes - Teto
1.25 kHz	S7	0,030	31626,48+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
1.6 kHz	S8	0,024	40176,56+39427,85j	0,02	Piso - Paredes - Teto
2 kHz	S9	0,019	32531,99+31127,25j	0,03	Piso - Paredes - Teto
Soma das áreas de superfície de (Piso + Paredes + Teto):				$S = 0,958$ [m <sup>2</sup> ]	

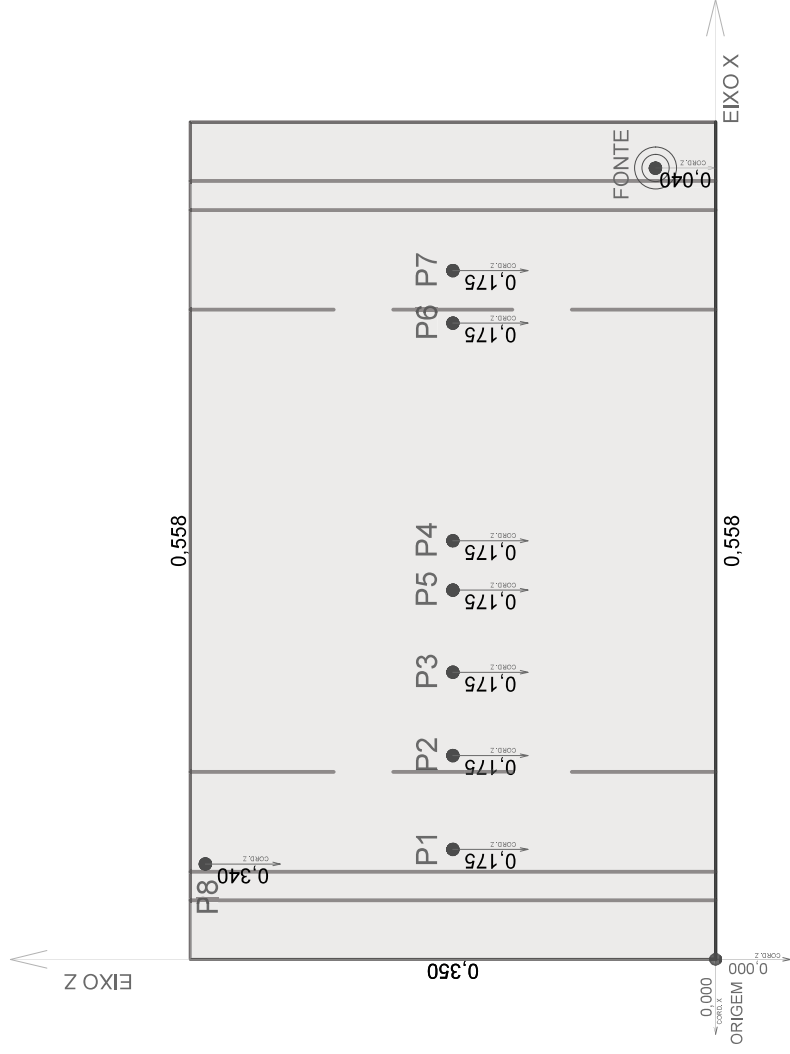


MCO-12

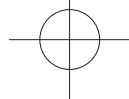
ESCALA (1:5)



PLANTA



VISTA A-A'



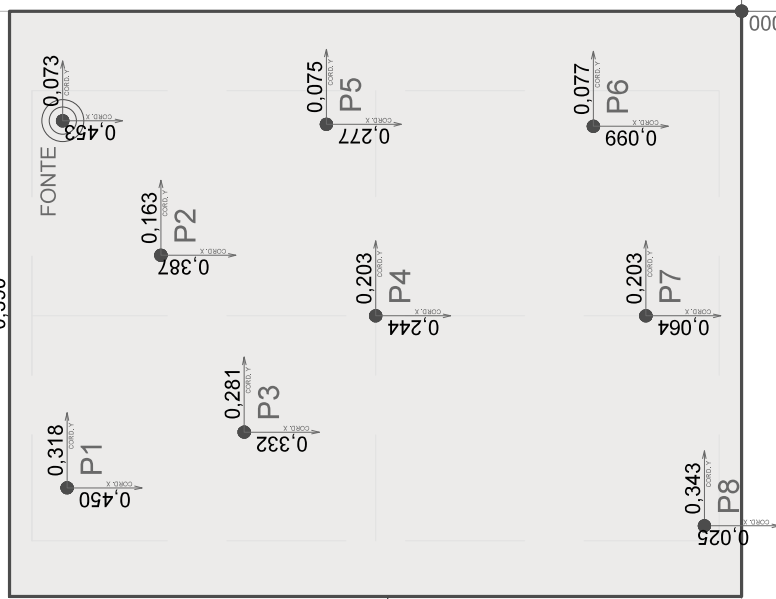
MAN-12

ESCALA (1:5)



EIXO X

0.390



PLANTA

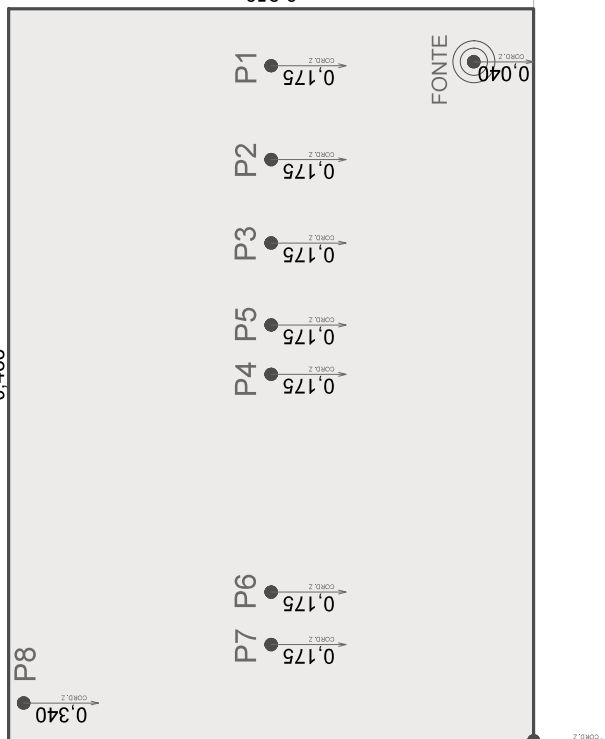


EIXO Y

0.000  
ORIGEM

0.000  
ORIGEM

0.488



VISTA A-A'

EIXO X

EIXO Z

0.350





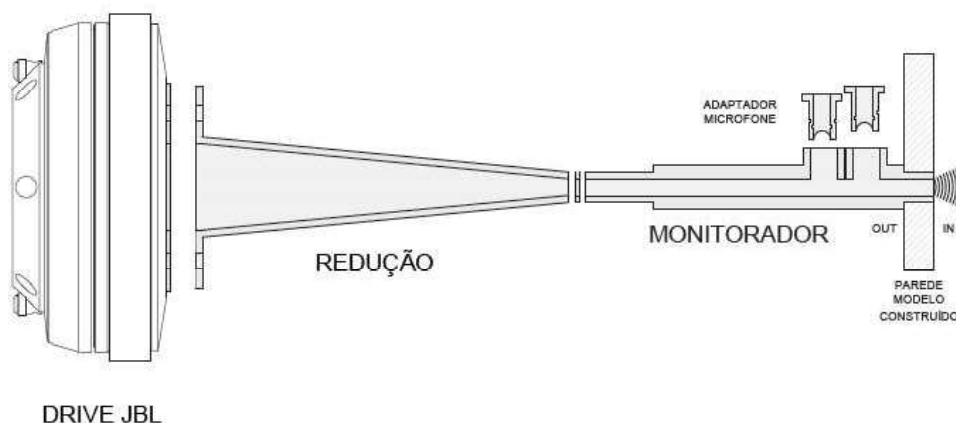
## APÊNDICE M – TENTATIVA DE USO DE UMA FONTE SONORA ALTERNATIVA

Uma fonte sonora alternativa foi concebida com a intenção de, monitorar a velocidade de volume do som usado como excitação do MFI-1 construído, durante as medições do MFI-1. O uso de fontes onidirecionais ou caixas de som convencionais dificultam esse monitoramento. Os dados obtidos de velocidade de volume, durante a medição, poderiam ser usados no MAN-1 e também no MCO-1 em FEM, para representar de maneira mais fiel o comportamento da fonte sonora, durante o processo de medição.

### M.1 – CONCEPÇÃO DA FONTE SONORA ALTERNATIVA

A fonte sonora com monitoramento da velocidade de volume foi construída tendo como mecanismo gerador de sinais, um drive de áudio corriqueiramente usado em sistemas automotivos de áudio. Em sistemas de áudio automotivos esse drive é acoplado a uma espécie de "corneta", promovendo uma amplificação dos sons em médias e altas frequências. O drive de áudio utilizado foi escolhido de maneira que pudessem ser excitadas as primeiras frequências modais do modelo MFI-1 construído e também, as frequências próximas do limite superior de análise. Estando a primeira frequência modal do MFI-1 sintonizada em 339,59 [Hz] e a resposta em frequência do drive JBL 405 Trio (JBL, 2011), entre 300 e 7000 [Hz], fica evidenciada a compatibilidade das frequências analisadas e das frequências geradas pelo mecanismo de excitação.

Figura M.1 – Esquema de montagem, em corte longitudinal, da fonte criada para monitoramento da velocidade de volume.



Fonte: Arquivo pessoal.

Ao drive escolhido foi acoplado um sistema de redução. Essa peça redutora (mais detalhes no apêndice H) foi concebida para que, o som oriundo da saída do drive (com diâmetro de 50 mm) fosse guiado para um tubo com diâmetro de 3/8 de polegada. Esse tubo por sua vez (mais detalhes no apêndice H), foi concebido para tornar planas as ondas sonoras oriundas da saída do drive e que passaram pelo sistema de redução. Com diâmetro interno  $a$  de 3/8 de polegada, aproximadamente 1 cm, o primeiro modo não planar ocorre para a frequência de 20.200 Hertz. Uma vez planas, as ondas sonoras podem ser monitoradas por microfones instalados perpendicularmente e próximos a saída desse pequeno tubo. Esse monitoramento torna possível, por meio da equação 3.55, a estimativa da velocidade de partícula  $u(\omega)$  na saída do tubo. Consequentemente por meio da equação ( $Q(\omega) = u(\omega)2\pi a^2$ ) é possível estimar a velocidade de volume que é inserida dentro do MFI-1, durante o processo de medição. A figura M.1 mostra um croqui, em corte longitudinal, do projeto de construção dessa fonte alternativa. Informações adicionais sobre o modelo do drive usado estão contidas no *datasheet* presente nos anexos do trabalho. O projeto contendo as dimensões e especificações das peças que compõem a fonte construída, bem como imagens da fonte, estão no apêndice desse trabalho.

## M.2 – MEDIÇÃO USANDO A FONTE SONORA ALTERNATIVA

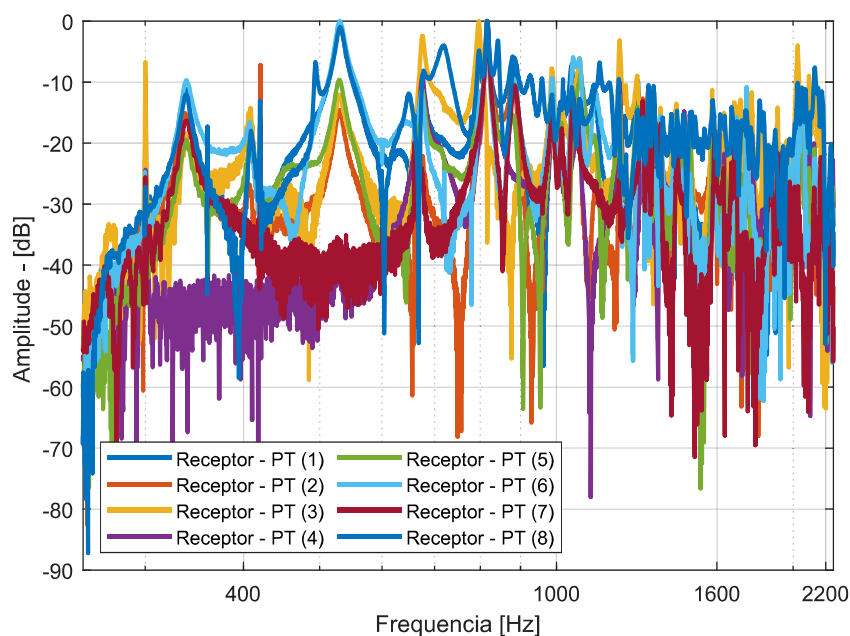
As configurações de tipo, duração e amostragem do sinal de excitação, são as mesmas usadas na medição como o uso da fonte x-mini. As posições de receptores também são as mesmas usadas nas medições com a fonte x-mini, alterando apenas a posição de referência da fonte. A posição de fonte adotada agora, leva em conta o seu posicionamento acoplado a uma perfuração feita em uma das faces do modelo físico construído. Em coordenadas cartesianas a fonte está situada na posição  $x = 0,001$  m,  $y = 0,009$  m,  $z=0,009$  m.

O uso do *Itatoolbox* na medição facilita a obtenção das respostas ao impulso e dos espectros. De maneira análoga as medições feitas com o uso da fonte x-mini, a obtenção dos espectros em frequência para cada ponto ocorreu de maneira direta, sem a necessidade de um pós-processamento. A figura M.2 mostra os espectros medidos nos pontos de análise, usando como instrumento de excitação, a fonte sonora criada. A figura M.3 mostra a velocidade de volume (valor médio para as oito medições/configurações de fonte receptor) que é injetada dentro do modelo físico construído durante o processo de medição. O cálculo da velocidade de volume é feito com base nas pressões sonoras medidas nos pontos A e B do sistema de monitoramento.

Em posse das respostas ao impulso, dos espectros em frequências e com o uso de rotinas de cálculo elaboradas (com as equações descritas na seção de revisão bibliográfica) para fazer o pós processamento dos dados obtidos na medição, pode ser feito o levantamento dos parâmetros ( $T_{20}$ ), ( $T_{30}$ ), (EDT), ( $C_{80}$ ), ( $D_{50}$ ) e (Ts), que descrevem o comportamento acústico do modelo físico construído em escala reduzida. Os valores obtidos para esses parâmetros estão descritos

na Tabela M.1.

Figura M.2 – Espectros em frequência obtidos na medição do MFI-1 construído, nas posições de receptor.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela M.1 – Valores médios dos parâmetros obtidos na medição usando a fonte construída.

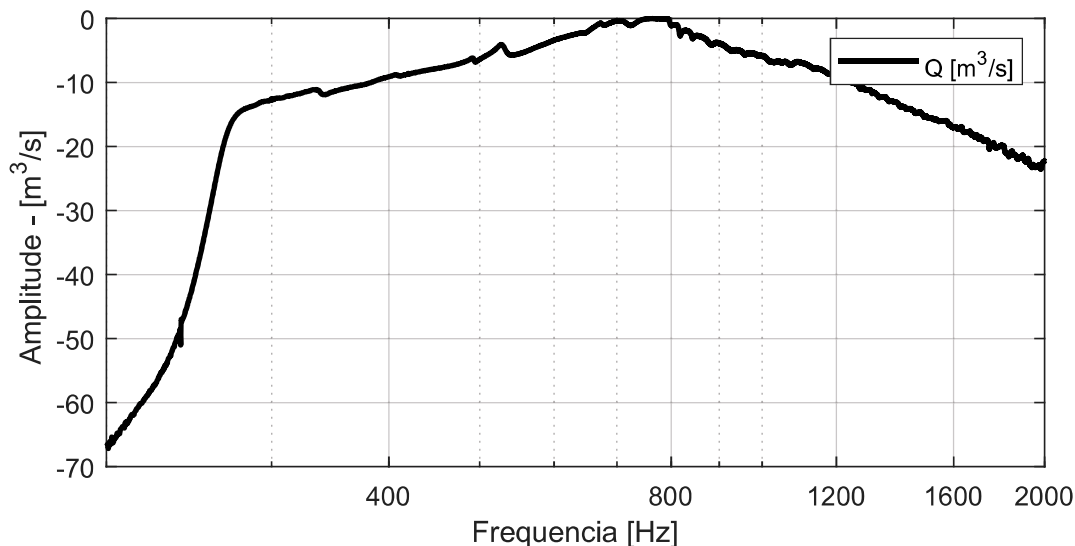
Frequência	Valor Médio Parâmetro						
	Central Banda	EDT [s]	T20 [s]	T30 [s]	D50 [-]	C80 [dB]	Ts [s]
315 Hz		0,545	0,906	0,987	0,901	15,120	0,030
400 Hz		0,060	0,389	0,542	0,986	22,833	0,006
500 Hz		0,059	0,389	0,542	0,987	22,741	0,006
630 Hz		0,993	1,377	1,472	0,813	10,429	0,042
800 Hz		0,049	0,309	0,441	0,991	24,241	0,005
1 kHz		0,049	0,309	0,442	0,991	24,240	0,005
1,25 kHz		0,138	0,492	0,610	0,980	24,892	0,013
1,6 kHz		0,040	0,246	0,345	0,994	27,214	0,004
2 kHz		0,040	0,246	0,347	0,994	27,067	0,004
W		0,219	0,518	0,637	0,960	22,086	0,013

Fonte: Arquivo pessoal.

O uso da fonte sonora com monitoramento da velocidade de volume, na avaliação do MFI-1, apresentou valores muito acima do esperado e estimado inicialmente. Ao se comparar os valores médios do parâmetro ( $T_{30}$ ) medidos na banda de 630 Hz, como o valor médio global

estimado inicialmente para ( $T_{30} = 0,102$ ), pode-se verificar diferenças de valores de 1250 %.

Figura M.3 – Velocidade de volume medida em função da frequência

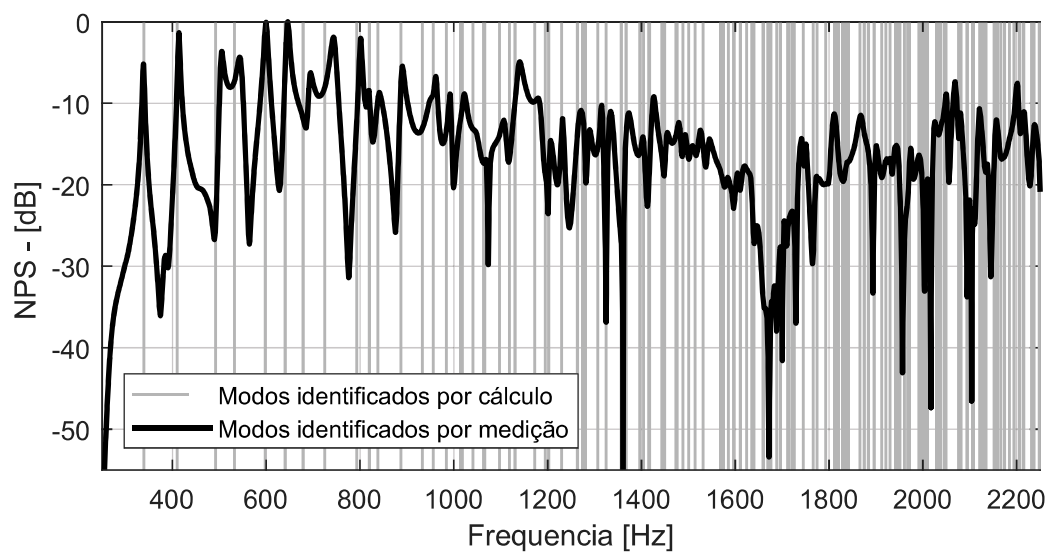


Fonte: Arquivo pessoal.

Outro ponto acolhido como determinante para o desuso da fonte sonora, concebida para monitorar a velocidade de volume, está na presença de outros erros durante o processo de medição. A figura M.4 mostra, por meio de uma sobreposição em espectro, da pressão sonora medida no ponto 8 (local onde todas as formas modais se manifestariam) (em preto) e das frequências naturais calculadas para o MFI-1 (em cinza), o afastamento da posição em espectro de algumas frequências, principalmente na faixa compreendida entre (600 e 800 Hz). Sem um aprofundamento maior nos motivos causais que influenciaram os resultados dos parâmetros obtidos com as medições usando essa fonte e, com a hipótese de existirem vibrações excessivas que causaram o afastamento das frequências modais medidas e calculadas, optou-se pela não utilização dessa fonte, para a sequência da pesquisa, buscando na literatura uma nova fonte de excitação para a medição do MFI-1.

Assim tomou-se como fonte sonora de referência, para a presente pesquisa, a fonte sonora x-mini, presente na pesquisa do autor (FONSECA, 2013). Nas comparações feitas entre as diferentes metodologias de análise da FGE-1 (MFI-1, MCO-1 e MAN-1), os resultados apresentados para MFI-1, são consequências das medições feitas com a fonte (adotada como referência) x-mini. As figuras seguintes mostram com mais detalhamento o projeto das fonte sonora alternativa.

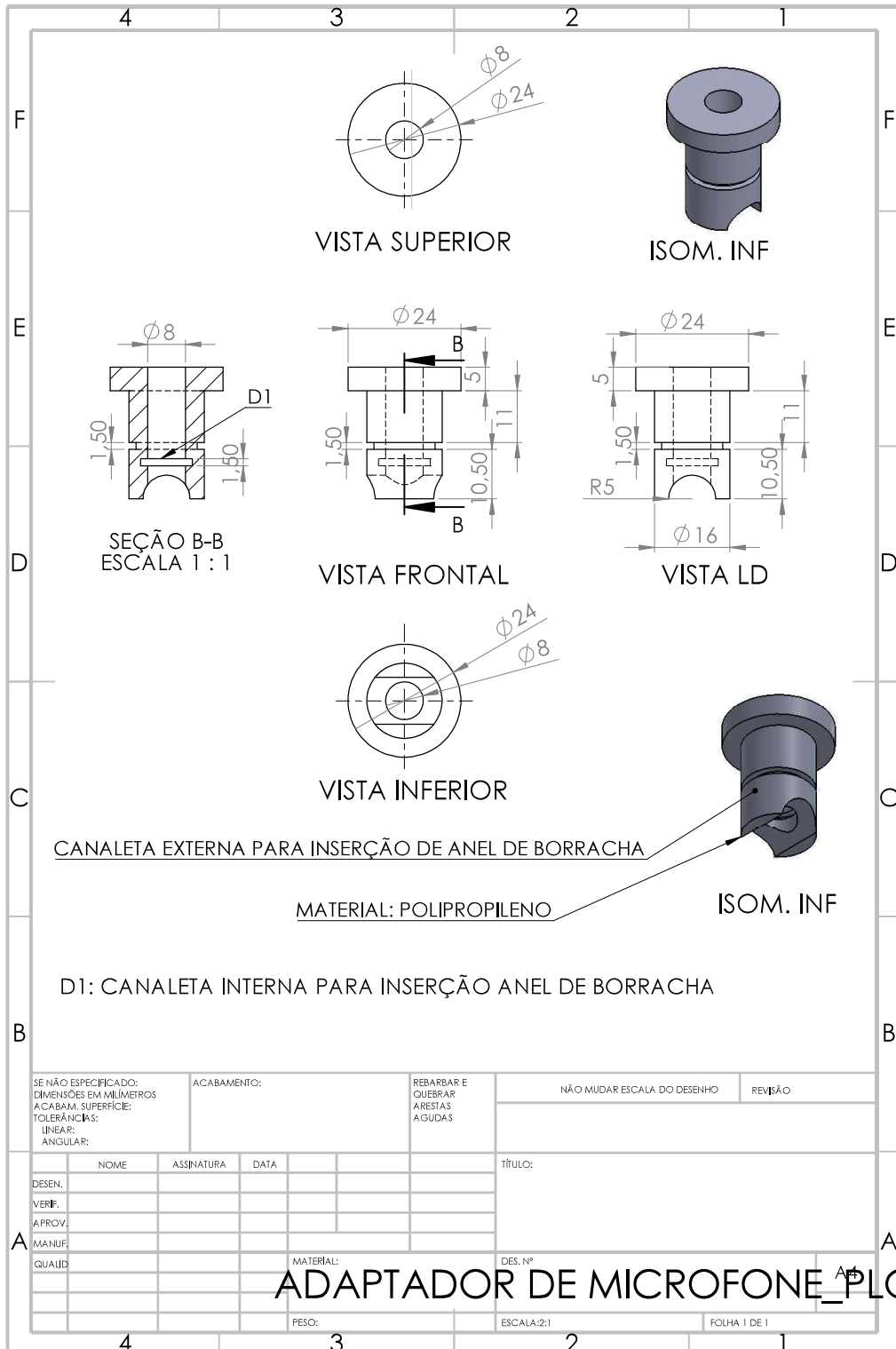
Figura M.4 – Distanciamento entre posições, em espectro, das frequências modais medidas com a fonte alternativa e as frequências modais calculadas para MFI-1.

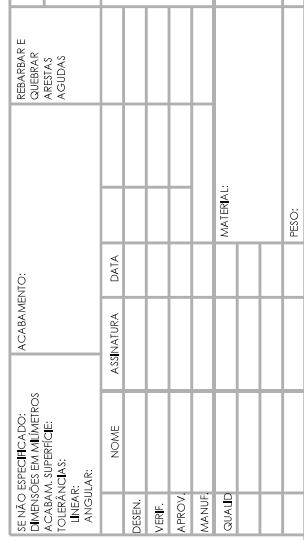
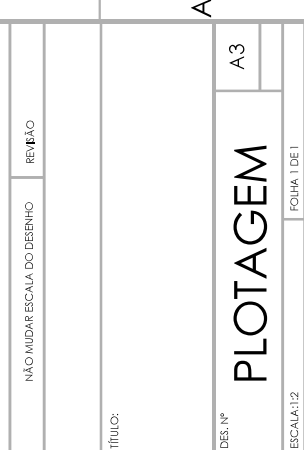
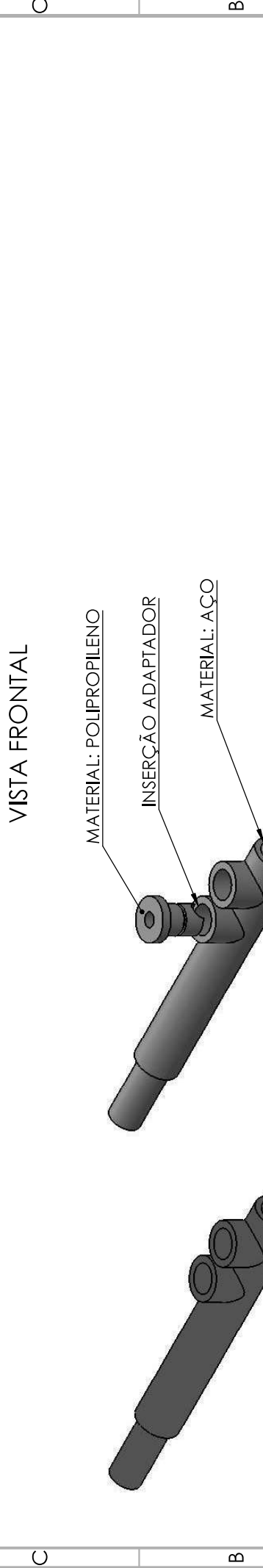
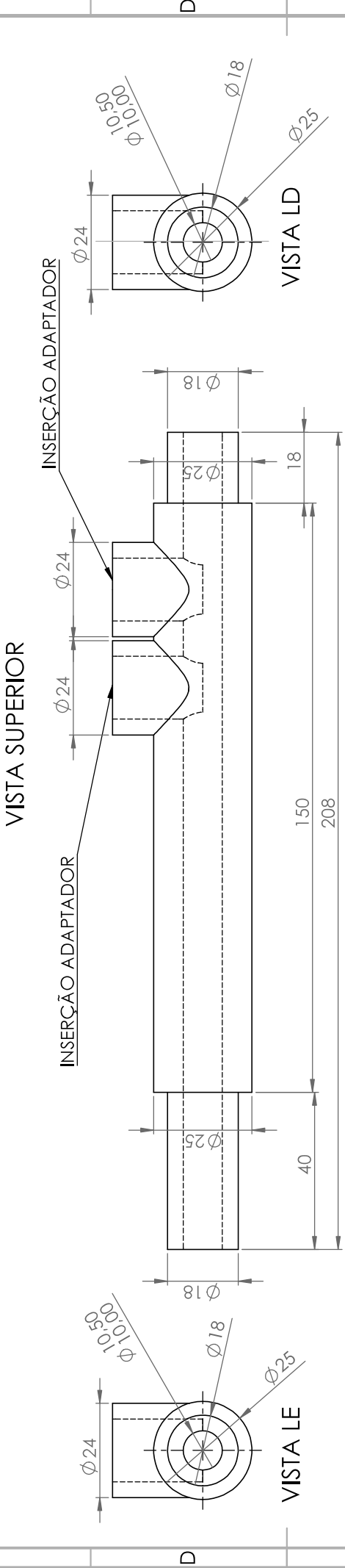
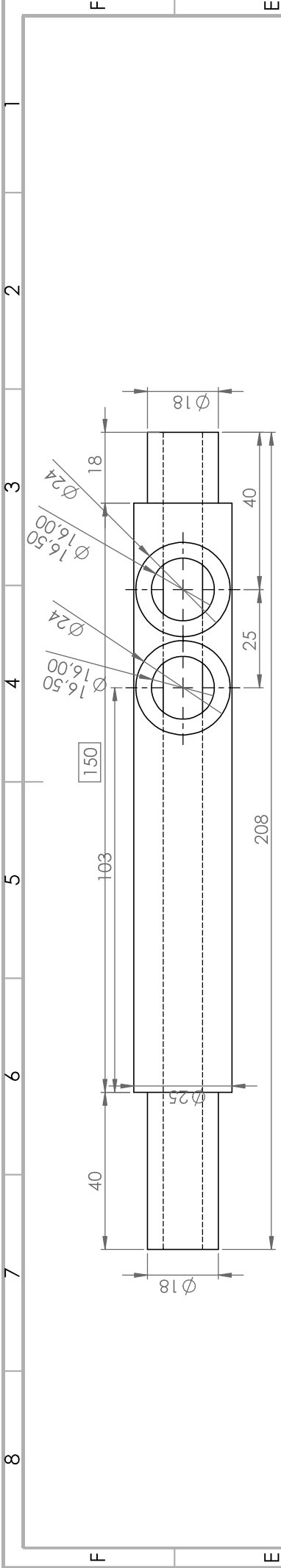


Fonte: Arquivo pessoal.



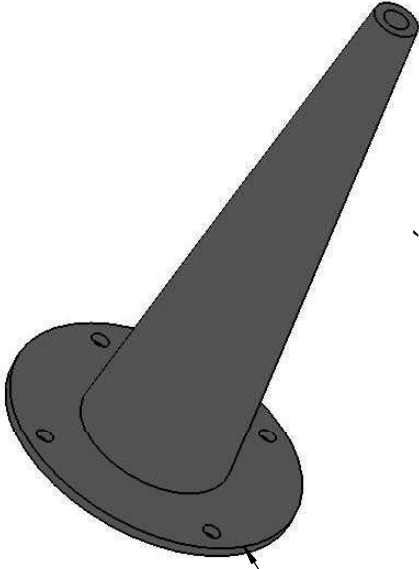
## APÊNDICE N – PROJETO DA FONTE SONORA ALTERNATIVA





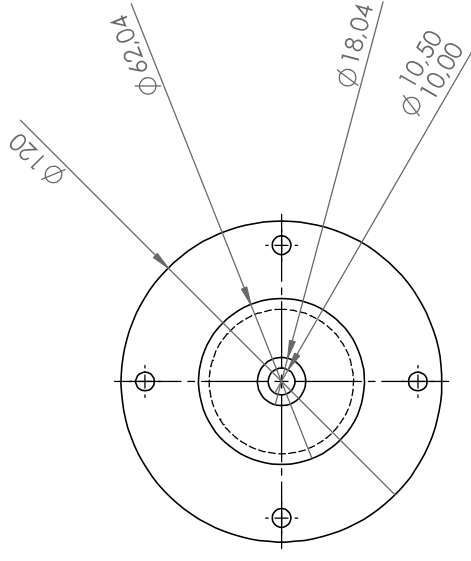
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO:		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
ACABAM. SUPERFÍCIE:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS					
TOLERÂNCIAS:							
LINEAR:							
ANGULAR:							
DESENH.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:			
VERIF.				DES. Nº			
APROV.				ESCALA: 1:2			
MANUF.				2			
QUALID.				3			
				PESO:			
				FOLHA 1 DE 1			
				A3			
				PLOTAGEM			



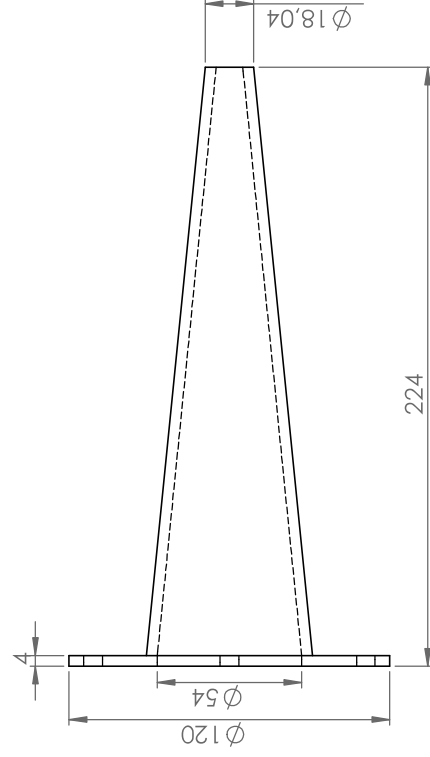


MATERIAL: AÇO

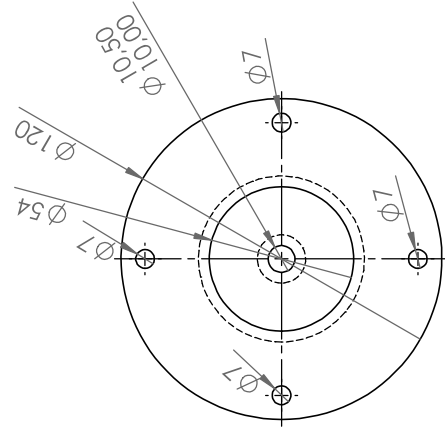
VISTA ISOMÉTRICA



VISTA LD



VISTA FRONTAL



VISTA LE

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTOS:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVÊÃO	
TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:									
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.									
				MATERIAL:		DES. Nº		A3	
						ESCALA: 1:2		2	
						FOLHA: 1 DE 1		2	

REDUÇÃO

DES. Nº

MATERIAL:

A3

ESCALA: 1:2

2

FOLHA: 1 DE 1

2





## ANEXO A – DATASHEET FONTE XMINI

### Technical Specification

---

Dimension	: 55mm × 44mm (closed resonator)
Net Weight	: 83g
Speaker	: Magnetically Shielded 40mm (4Ω)
Loudspeaker Output	: 2W
Frequency Response	: 100 Hz-20 kHz
Signal-to-Noise	: ≥80dB
Distortion	: ≤1.0%
Playback Time	: up to 12 hours
Battery Voltage/Capacity	: 400mAh
Battery Charging Voltage	: 4.2V±0.05V
Battery Charge Time	: 2.5 hours

---



# ANEXO B – DATASHEET MICROFONE

**Panasonic**

Microphone Cartridges

## Omnidirectional Back Electret Condenser Microphone Cartridge

Series: **WM-61A**  
**WM-61B** (pin type)



### ■ Features

- Small microphones for general use
- Back electret type designed for high resistance to vibrations, high signal-to-noise ratio
- High sensitivity type
- Microphone with pins for flexible PCB (WM-61B type)

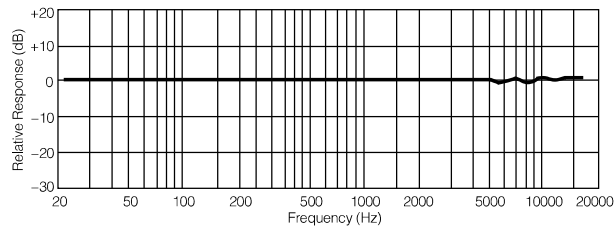
### ■ Sensitivity

$V_s = 2.0V$	-35 ± 4dB
$R_L = 2.2k\Omega$	

### ■ Specifications

Sensitivity	-35±4dB (0db = 1V/pa, 1kHz)
Impedance	Less than 2.2 kΩ
Directivity	Omnidirectional
Frequency	20-20,000 Hz
Max. operation voltage	10V
Standard operation voltage	2V
Current consumption	Max. 0.5 mA
Sensitivity reduction	Within -3 dB at 1.5V
S/N ratio	More than 62 dB

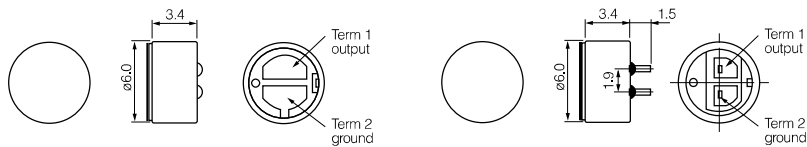
### ■ Typical Frequency Response Curve



### ■ Dimensions in mm (not to scale)

WM-61A

WM-61B



Design and specifications are subject to change without notice. Ask factory for technical specifications before purchase and/or use.  
Whenever a doubt about safety arises from this product, please contact us immediately for technical consultation.



## ANEXO C – DATASHEET DRIVE



### LINHA PROFISSIONAL - Driver de Compressão D405 TRIO

Driver de compressão de tamanho compacto, apresenta alta sensibilidade e baixa distorção cobrindo uma resposta de médias frequências. Pode ser utilizado em caixas de reforço de som (PA), monitoras e caixas de retorno (palco e side-fill). Esta performance é conseguida pela excelente combinação de seus componentes:

A Tampa é injetada em alumínio contribuindo assim para uma melhor dissipação de calor da bobina móvel, com um acabamento de usinagem diamantada (ferramenta diamante) e envernizado.

O diafragma fenólico tipo domo garante eficiência e durabilidade, mesmo quando exposto a grandes deslocamentos devido às altas potências.

O transformador acústico "Phase Plug" é injetado em alumínio com várias aberturas otimizadas, minimizando cancelamentos de fase, possui acabamento de usinagem diamantada (ferramenta de diamante) e envernizado.

O conjunto magnético com alto fluxo possui na parte interna um anel de alumínio em curto circuito, que evita a modulação de campo magnético, cujas variações bruscas e intensas de sinal invariavelmente causam distorções. Além disso, o gap do conjunto possui no seu interior um fluido magnético (Ferrosound<sup>®</sup>) que garante melhor centragem e excelente dissipação do calor da bobina móvel.

A bobina móvel é fabricada com fio resistente a altas temperaturas e enrolada em forma de Kapton<sup>®</sup>, obtendo-se um conjunto de grande estabilidade e resistência.

O driver possui boca de 50 mm (2") de diâmetro permitindo acoplagem direta à cornetas com o mesmo diâmetro de garganta.

O conjunto móvel (reparo) possui uma perfeita auto-centragem, sendo também de fácil troca em caso de eventual defeito.

Possui dimensões compactas facilitando a instalação em caixas de tamanho reduzido.

*Exposição a níveis de ruído além dos limites de tolerância especificados pela Norma Brasileira NR 15 - Anexo 1\*, pode causar perdas ou danos auditivos. A Selenium não responsabiliza-se pelo uso indevido de seus produtos. (\*Portaria 3214/78).*

#### ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Impedância nominal:	8 Ω	
Impedância mínima @ 2,800 Hz:	7,3 Ω	
<b>POTÊNCIA COM CROSSEOVER (12dB/oit)</b>	ATIVO	PASSIVO
AES (HPF 500 Hz) <sup>5</sup>	53	-- W
AES (HPF 1 kHz) <sup>5</sup>	65	-- W
RMS (NBR 10.303) (HPF 500 Hz) <sup>5</sup>	53	100 W
RMS (NBR 10.303) (HPF 1 kHz) <sup>5</sup>	65	150 W
PROGRAMA MUSICAL (HPF 500 Hz) <sup>1</sup>	106	200
PROGRAMA MUSICAL (HPF 1 kHz) <sup>1</sup>	130	300
<b>Sensibilidade</b>		
Em corneta, 1W@1m, no eixo <sup>3</sup>	110	dB SPL
Em tubo, 0,0894V <sup>4</sup>	116	dB SPL
<b>Resposta de frequência @ -10 dB:</b>	300 a 7.000 Hz	
Diâmetro da garganta:	50 mm	
Material do diafragma:	Fenólico	
Diâmetro da bobina:	100 mm	
Re (resistência da bobina):	6,0 Ω	
Densidade de fluxo no gap:	1,60 T	
Frequência de corte mínima recomendada (12 dB /oit):	500 Hz	

<sup>5</sup>Especificações para uso de programa musical e de voz, permitindo distorção harmônica máxima no amplificador de 5%, com o crossover passivo recomendado, sendo a potência calculada em função da tensão na saída do amplificador e da impedância nominal do transdutor.

<sup>1</sup>Norma Brasileira NBR 10.303, com a aplicação de ruído rosa durante 2 horas ininterruptas.

<sup>3</sup>Medida com corneta HL4750-SLF, média entre 500 e 3.500 Hz.

<sup>4</sup>A sensibilidade representa o SPL em um tubo de ondas planas de 25 mm de diâmetro, média entre 500 e 3.500 Hz.

<sup>5</sup>Ensaio com duração de 2h com ruído rosa (8dB de fator de crista) e filtrado uma década de frequência de corte.

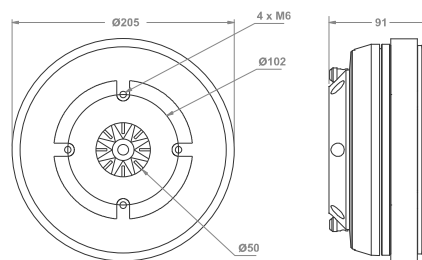
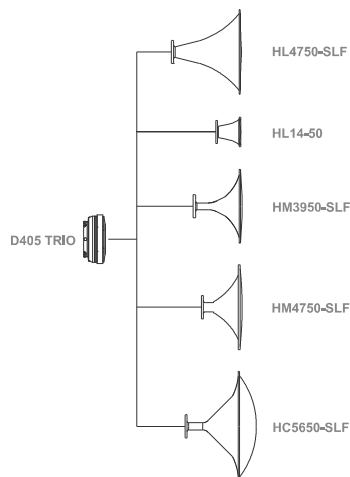
#### INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Material do ímã:	Ferrite de bário
Peso do ímã:	2,640 g
Diâmetro x altura do ímã:	200 x 24 mm
Peso do conjunto magnético:	6,800 g
Material da tampa:	Alumínio
Acabamento da tampa:	Pintado / Usinado / Envernizado
Acabamento das arruelas:	Eletroforese
Material do fio da bobina:	Cobre
Material da forma da bobina:	Polimida (Kapton <sup>®</sup> )
Comprimento do fio da bobina:	7,0 m
Altura do enrolamento da bobina:	4,1 mm
Coefficiente de temperatura do fio (α25):	0,00329 1/°C
Volume ocupado pelo falante:	2,2 l
Peso líquido do falante:	7,400 g
Peso total (incluindo embalagem):	7,800 g
Dimensões da embalagem (C x L x A):	24,5 x 22,5 x 12,5 cm

#### INFORMAÇÕES PARA MONTAGEM

Conexão com a corneta:	Parafusado no flange
Número de furos de fixação:	4 (M6) espaçados igualmente
Diâmetro dos furos de fixação:	102 mm
Tipo do conector:	Pressão p/ fio nu
Polaridade:	Tensão + no borne vermelho; deslocamento do diafragma na direção da garganta

#### CONEXÃO DRIVER x CORNETA



Dimensões em mm.





## ANEXO D – DATASHEET PLACA DE ÁUDIO (ENTRADAS)

6 Informações Técnicas  
6.2 Especificações da AudioBox 44 VSL

PreSonus AudioBox<sup>™</sup> 22/44VSL

### 62 Especificações da AudioBox 44 VSL

#### Pré Amplificadores de Microfone

Tipo	Combinadas, XLR, fêmea, balanceada
EIN do pré amplificador	-133 dB, 20kHz BW, ganho máximo, Rs=40Ω, A-wtd
Resposta de frequência	20 Hz - 22 kHz, +/- 0.25 dB, ganho unidade
DHT+R	0.002%, +4 dBu, 1kHz, ganho unidade, 22kHz BW, A-wtd
Razão S/R	97 dB, +4 dBu, 1kHz, ganho unidade, 22kHz BW, A-wtd
Faixa de Controle de Ganho	-15 dB a +65 dB
Headroom Máximo de Entrada	+16 dBu, < 0.5% DHT
Impedância de entrada	1.7 kΩ
Phantom Power (Alimentação Fantasma)	+48 VDC, 32mA total da unidade

#### Entrada de Instrumento (1 e 2)

Tipo de conector	Combinadas, P10 Mono, fêmea, não balanceada
Resposta de frequência	20 Hz a 22 kHz, +/- 0.25 dB, ganho unidade
DHT+R	0.003%, +4 dBu, 1kHz, ganho unidade, 22kHz BW, A-wtd
Razão S/R	89 dB, +4 dBu, 1kHz, ganho unidade, 22kHz BW, A-wtd
Faixa de Controle de Ganho	-30 dB a +50 dB
Headroom Máximo de Entrada	+21 dBu, < 0.5% DHT
Impedância de entrada	1 MΩ

#### Entradas de Linha (3 e 4):

Tipo de conector	Combinadas, P10 Stereo, fêmea, balanceada
Resposta de frequência	20 Hz a 22 kHz, +/- 0.25 dB, ganho unidade
DHT+R	0.002%, +4 dBu, 1kHz, ganho unidade, 22kHz BW, A-wtd
Razão S/R	98 dB, +4 dBu, 1kHz, ganho unidade, 22kHz BW, A-wtd
Faixa de Controle de Ganho	-20 dB a +20 dB
Headroom Máximo de Entrada	+21 dBu, < 0.5% DHT
Impedância de entrada	10 kΩ





## ANEXO E – DATASHEET PLACA DE ÁUDIO (SAÍDAS)

Manual do Usuário

Informações Técnicas 6  
Especificações da AudioBox 44 VSL 6.2

### Saída Fones

Tipo de Conector	P10 Stereo, fêmea
Potência Máxima	120 mW/ch @ 60Ω carga
Resposta de frequência	20 Hz - 20 kHz, +/- 0.5 dB, ganho máximo
DHT+R	0.01%, 1kHz, ganho máximo, 20kHz BW, A-wtd
Razão S/R	96 dB, 1kHz, ganho máximo, 20kHz BW, A-wtd

### Saída Analógica

Tipo de conector	P10 Stereo, fêmea, impedância balanceada
Resposta de frequência	20 Hz a 22 kHz, +/- 0.25 dB
DHT+R	0.003%, 1kHz, 22kHz BW, A-wtd
Razão S/R	109 dB, 1kHz, 22kHz BW, A-wtd
Nível de Saída	+10 dBu, < 0.5% DHT
Impedância de Saída	51 Ω

### Energia

Alimentação	Conector barril 2.1 mm, 12 VDC, 1A
-------------	------------------------------------

### Digital

Interface host	USB 2.0 alta velocidade
Bit Depth	24-bit
Taxa de Amostragem	44.1 kHz, 48 kHz, 88.2 kHz, 96 kHz
Latência máxima	6 mS, Entrada à Saída analógica
Faixa dinâmica conversão AD	114 dB, 48 kHz taxa de amostragem, A-wtd
Faixa dinâmica conversão DA	114 dB, 48 kHz taxa de amostragem, A-wtd
MIDI E/S	Conector DIN 5 pinos

Overview

Hooku

Connectin  
to  
Comput

Software: Virtual  
SL  
and Studio One

Tutorial



Technic  
Informatio

Troubleshoot  
and



# ANEXO F – DATASHEET AMPLIFICADOR

## Compliance with Standards

 	CE-mark indicates compliance with: EMC Directive and Low Voltage Directive. C-Tick mark indicates compliance with the EMC requirements of Australia and New Zealand
<b>Safety</b>	EN/IEC 60065, Audio, video and similar electronic apparatus – Safety Requirements
<b>EMC Emission</b>	EN 55103–1, E3: EMC – Product family standard for audio, video, audiovisual and entertaining lighting control apparatus for professional use – Part 1: Emission
<b>EMC Immunity</b>	EN 55103–2, E3: EMC – Product family standard for audio, video, audiovisual and entertaining lighting control apparatus for professional use – Part 2: Immunity
<b>Temperature</b>	IEC 60068–2–1 & IEC 60068–2–2: Environmental Testing. Cold and Dry Heat. Operating Temperature: +5°C to +40°C (+41 to +104°F) Storage Temperature: –25 to +70°C (–13 to +158°F)
<b>Humidity</b>	IEC 60068–2–3: Damp Heat: 90% RH (non-condensing at 40°C (104°F))
<b>Mechanical</b>	Non-operating: IEC 60068–2–6: Vibration: 0.3 mm, 20 m/s <sup>2</sup> , 10–500 Hz IEC 60068–2–27: Shock: 1000 m/s <sup>2</sup> IEC 60068–2–29: Bump: 1000 bumps at 250 m/s <sup>2</sup>
<b>Enclosure</b>	IEC 60529: Protection provided by enclosures: IP20

## Specifications – Audio Power Amplifier Type 2716-C

### MAXIMUM OUTPUT POWER<sup>a</sup>

Load	EIA @ 1 kHz and 1% THD
8 Ω stereo	110 W
4 Ω stereo	160 W
2 Ω stereo	200 W
8 Ω bridged	320 W
4 Ω bridged	400 W

### SPEAKER PROTECTION

Short-circuit, DC, VHF a thermal protection is provided

### FREQUENCY RESPONSE (8 Ω, 1 W)

20 Hz – 20 kHz: +0, –1 dB

a. Measured specifications for a 230 V AC. Continuous power (1 hour) is 1/3 of this

### INPUTS AND OUTPUTS

**Gain:** 30 dB ± 1 dB

**Input Attenuator:** 0–30 dB in 6 dB ± 0.3 dB steps

**Impedance:** 20 kΩ

**Common Mode Rejection:** 50 dB@1 kHz

**Slew Rate:** 25 V/μs

**Output Impedance:** 0.03 Ω

**Hum and Noise:** More than 105 dB below max. power

**Channel Separation:** 70 dB@10 kHz

### FRONT PANEL

**Gain Controls:** 2–channels, A and B

**Clip Indicator:** 2 red LEDs, fast peak and slow release or shorted output

**Protection Indicator:** 2 yellow LEDs, 80°C at heat sink or 12 kHz at full power

**Present Indicator:** 2 green LEDs, –25 dB at input

**On Indicator:** 2 green LEDs, DC rail voltage for channel A and B

### REAR PANEL

**Input Connectors:** Two XLR-type, 3-pin female (pin 2+) and 1/4" jack

**Output Connectors:** Two Neutrik®, 4-pin, Speakon® sockets

**Link:** Stereo – Link/Bridge A + B

**Clip Limiter:** On/Off

### POWER REQUIREMENTS

**Voltage Selector:** 230 V/115 V

### DIMENSIONS

**W × H × D:** 48.3 × 4.4 × 28.0 cm (19 × 1.7 × 11 inches)

### WEIGHT

7.5 kg (16.5 lb.)

## Ordering Information

Type 2716-C-001 Audio power amplifier (no accessories)

Type 2716-C

2 × WL-1324

2 × WL-1325

Audio Power Amplifier with the following accessories:  
BNC to XLR cable, 3 m  
2 Banana to Speakon® cable, 5 m

### OPTIONAL ACCESSORIES

AQ-0621 Bridging cable

### TRADEMARKS

Neutrik and Speakon are registered trademarks of Neutrik AG

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice

HEADQUARTERS: DK-2850 Nærum · Denmark · Telephone: +45 4580 0500  
Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Australia (+61) 2 9889-8888 · Austria (+43) 1 865 7400 · Brazil (+55) 11 5188-8161  
Canada (+1) 514 695-2225 · China (+86) 10 690 25006 · Czech Republic (+420) 2 6702 1100  
Finland (+358) 9-755 950 · France (+33) 1 69 90 71 00 · Germany (+49) 421 17 87 0  
Hong Kong (+852) 2548 7486 · Hungary (+36) 1 215 83 05 · Ireland (+353) 1 807 4083  
Italy (+39) 0257 68681 · Japan (+81) 3 5715 1512 · Republic of Korea (+82) 2 3473 0605  
Netherlands (+31) 318 55 9290 · Norway (+47) 66 77 11 55 · Poland (+48) 22 816 75 56  
Portugal (+351) 21 4169 040 · Singapore (+65) 6377 4512 · Slovak Republic (+421) 25 443 0701  
Spain (+34) 91 659 0820 · Sweden (+46) 33 225 622 · Switzerland (+41) 44 8807 035  
Taiwan (+886) 2 2502 7255 · United Kingdom (+44) 14 35 739 000 · USA (+1) 800 332 2040

Local representatives and service organisations worldwide

**Brüel & Kjær** 

