

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Julio Henrique Losso Hermes

**Influência de microperfurações nas características
vibroacústicas de painéis de interior aeronáuticos.**

Florianópolis

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Julio Henrique Losso Hermes

**INFLUÊNCIA DE MICROPERFURAÇÕES NAS
CARACTERÍSTICAS VIBROACÚSTICAS DE PAINÉIS DE
INTERIOR AERONÁUTICOS.**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica .

Orientador:
Prof. Ph. D. Arcanjo Lenzi

Florianópolis

2018

Hermes, Julio Henrique Losso

Influência de microperfurações nas características vibroacústicas de painéis de interior aeronáuticos / Julio Henrique Losso Hermes; orientador, Arcanjo Lenzi, 2018. 238 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Acústica e Vibrações. 3. Painéis Microperfurados. 4. Painéis Aeronáuticos. I. Lenzi, Arcanjo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Julio Henrique Losso Hermes

**INFLUÊNCIA DE MICROPERFURAÇÕES NAS
CARACTERÍSTICAS VIBROACÚSTICAS DE PAINÉIS DE
INTERIOR AERONÁUTICOS.**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 28 de março de 2018.

Jonny Carlos da Silva., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Arcanjo Lenzi, Ph. D.
Orientador

José Maria Campos dos Santos, Dr. Eng.

Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira,
Dr. Eng.

Eric Brandão Carneiro, Dr. Eng.

Thiago Antônio Fiorentin, Dr. Eng.

Andrey Ricardo da Silva, Ph. D.

À minha família e amigos.

Agradecimentos

Agradeço a todos que fizeram parte dese trabalho, direta ou indiretamente.

*"Make your own rules or be a slave to another
man's."*

William Blake



Resumo

Painéis internos aeronáuticos possuem estrutura composta, com núcleo em forma de colmeia. São caracterizados por elevada rigidez e baixo peso, propriedades desejáveis do ponto de vista estrutural que agravam os problemas de ruído e vibração. Uma solução promissora é a aplicação de microperfurações em uma das faces do painel, o que cria um sistema de absorção sem a adição de massa. Painéis microperfurados (MPP) têm sido usados de forma eficiente por décadas. Os modelos tradicionais para MPP foram criados para perfurações circulares homogêneas em painéis isotrópicos rígidos e com uma única cavidade. Uma modificação destes modelos é realizada, levando em consideração cavidades subdivididas. A nova formulação permite que o modelo seja utilizado com distribuição não homogênea de diâmetros de perfuração em paralelo, o que amplia a largura de banda de frequência da absorção. Esta solução se demonstra viável, pois não afeta os parâmetros intrínsecos ao painel. Um método de otimização do painel de interior microperfurado é desenvolvido para a maximização da amplitude e faixa de frequência da absorção. Aplica-se o algoritmo de otimização para a caracterização inversa de painéis microperfurados com o intuito de estimar com melhor precisão suas propriedades geométricas. Procedimentos experimentais são realizados para validar os modelos clássicos e desenvolvido e, para a caracterização vibroacústica do painel de interior. Um modelo baseado na Análise Estatística Energética é desenvolvido para avaliar o impacto da aplicação de painéis microperfurados no ruído interno de aeronaves.

Palavras-chave: painéis microperfurados, absorção acústica, painéis aeronáuticos.

Abstract

Composite honeycomb sandwich panels have been increasingly used in industry, due to its high stiffness and low weight. However, these structurally desirable properties aggravate noise and vibration issues. A promising alternative solution is the application of micro-perforations, which creates an increased absorption system without the addition of new materials. Microperforated panel (MPP) absorbers have been used efficiently for decades, but are known to be limited in bandwidth. Traditional models for MPP have been used and adapted for many applications. The new formulation allows the model to be used with inhomogeneous distribution of perforation diameters, which broadens the absorption bandwidth. Unlike other solutions, this does not affect any intrinsic parameters of the panel. An optimization method for the microperforated interior panel is developed for maximizing the amplitude and frequency range of the absorption. The optimization algorithm is applied in an inverse characterization method to better estimate the panel's geometric properties. Experimental procedures are performed to validate the classical and developed models and to characterize the vibroacoustic parameters of the interior panel. A model based on Statistical Energy Analysis is developed to evaluate the impact of the application of microperforated panels on aircrafts cabin noise.

Keywords: microperforated panels, acoustic absorption, aeronautical panels.

Sumário

Lista de Figuras	xxx
Lista de Tabelas	xxxii
Lista de Símbolos	xxxiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura	5
2 Contextualização	7
2.1 Síntese do Capítulo	16
3 Modelos Analíticos	19
3.1 Impedância Característica e Coeficiente de Absorção	19
3.2 Modelos para Perfurações Circulares	22
3.2.1 Modelos de Maa	24
3.2.2 Modificação dos Fatores de Correção.....	30
3.2.2.1 Fatores Empíricos de Correção.....	31
3.2.2.2 Modelo de Kim.....	32
3.2.2.3 Modelo de Temiz <i>et al.</i>	34
3.2.3 Modelo de Fluido Equivalente.....	36
3.2.4 Análise de Sensibilidade e Comparação dos	
Modelos	38
3.2.4.1 Análise de Sensibilidade dos Parâmet-	
ros Geométricos	38
3.2.4.2 Comparação entre Modelos	46
3.3 Modelo com Cavidade Subdividida	50
3.4 Modelo de Materiais Porosos com Estrutura Rígida	57

3.5	Método da Matriz de Transferência	60
3.5.1	TMM em Série.....	60
3.5.2	TMM em Série com Elementos em Paralelo ...	65
3.6	Síntese do Capítulo	71
4	Otimização de Painéis Microperfurados	73
4.1	Algoritmo de Otimização: Evolução Diferencial.....	73
4.2	Parâmetros de Entrada e Restrições	79
4.3	Aplicações com Painel Microperfurado	80
4.3.1	MPP Simples	81
4.3.2	MPP Duplo	86
4.3.3	MPP com Distribuição Não-Homogênea de Diâmetros de Perfuração em Paralelo	89
4.4	Síntese do Capítulo	93
5	Procedimentos Experimentais	95
5.1	Materiais	95
5.2	Estrutura das Perfurações	99
5.3	Coeficiente de Absorção	102
5.3.1	Coeficiente de Absorção por Incidência Nor- mal	102
5.3.1.1	Resultados	105
5.3.2	Método Inverso	124
5.3.2.1	Método de Liu <i>et al.</i>	124
5.3.2.2	Método Inverso por Evolução Difer- encial.....	125
5.3.3	Coeficiente de Absorção em Campo Difuso ...	137
5.4	Propriedades Mecânicas	142
5.5	Eficiência de Radiação	145
5.6	Perda por Amortecimento Estrutural	153
5.7	Perda de Transmissão	156
5.8	Síntese do Capítulo	158
6	Impacto no Ruído Interno de Aeronaves	161

6.1	Modelo de Perda de Transmissão	162
6.2	Modelo para Obtenção do Ruído Interno em Aeronaves	169
6.3	Síntese do Capítulo	179
7	Conclusões e Sugestões	181
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	185
	Referências Bibliográficas	187

Lista de Figuras

1.1	Desenho esquemático do tratamento termo-acústico.....	2
1.2	Painel de interior composto com núcleo em <i>honeycomb</i> típico.....	3
3.1	(a) Esquema do sistema MPP e (b) circuito equivalente análogo.	21
3.2	Efeitos atribuídos aos fatores de correção. Adaptado de [Atalla e Sgard, 2007].....	25
3.3	(a) Magnitude da reatância do MPP. (b) Coeficiente de absorção correspondente.	28
3.4	Partes real e imaginária da impedância de superfície de um MPP.....	29
3.5	Coeficiente de absorção de um MPP para os três modelos de Maa.	30
3.6	Perfuração com bordas (a) arredondada e (b) aguda.	32
3.7	Geometria do modelo em CFD de Kim. Adaptado de [Kim, 2011].....	33
3.8	Detalhe do modelo com acabamento arredondado da perfuração. Adaptado de [Kim, 2011].	34
3.9	Modelo computacional de Temiz <i>et al.</i> . Adaptado de [Temiz <i>et al.</i> , 2014]	34
3.10	Coeficiente de absorção de um MPP com variação do diâmetro da perfuração com $\sigma = 1\%$	39
3.11	Parte real da impedância de um MPP com variação do diâmetro da perfuração com $\sigma = 1\%$	40

3.12	Coeficiente de absorção de um MPP com variação do diâmetro da perfuração e σ dependente de d	41
3.13	Parte real da impedância de um MPP com variação do diâmetro da perfuração e σ dependente de d	41
3.14	Coeficiente de absorção de um MPP com variação da razão de perfuração σ	42
3.15	Parte real da impedância de um MPP com variação da razão de perfuração σ	43
3.16	Coeficiente de absorção de um MPP com variação da profundidade da cavidade D	43
3.17	Coeficiente de absorção de um MPP com variação da espessura da placa t	44
3.18	Parte real da impedância de um MPP com variação da espessura da placa, t	44
3.19	Coeficiente de absorção de um MPP com variação do fator de correção da resistência β_r	45
3.20	Parte real da impedância de um MPP com variação do fator de correção da resistência β_r	45
3.21	Comparação entre α e $real(Z_{m0})$ dos modelos de Allam <i>et al.</i> [2009], Kim [2011], Temiz <i>et al.</i> [2014] e Atalla <i>et al.</i> [2007] para C1.....	47
3.22	Comparação entre α e $real(Z_{m0})$ dos modelos de Allam <i>et al.</i> [2009], Kim [2011], Temiz <i>et al.</i> [2014] e Atalla <i>et al.</i> [2007] para C2.....	48
3.23	Comparação entre α e $real(Z_{m0})$ dos modelos de Allam <i>et al.</i> [2009], Kim [2011], Temiz <i>et al.</i> [2014] e Atalla <i>et al.</i> [2007] para C3.....	49
3.24	Comparação entre α e $real(Z_{m0})$ dos modelos de Allam <i>et al.</i> [2009], Kim [2011], Temiz <i>et al.</i> [2014] e Atalla <i>et al.</i> [2007] para C4.....	50
3.25	MPP com perfurações de diâmetro único em todos os núcleos.	51

3.26	Aplicações alternativas de perfuração no MPP...	51
3.27	(a) Esquema do MPP com cavidades subdivididas e (b) circuito acústico equivalente para n impedâncias em paralelo.	53
3.28	Coeficiente de absorção de um MPP com cavidades subdivididas variando σ_h e mantendo $\sigma_{n_i} = 100\%$	55
3.29	Coeficiente de absorção de um MPP com cavidades subdivididas variando σ_{n_i} e mantendo $\sigma_h = 1\%$	55
3.30	Coeficiente de absorção de um MPP com três diâmetros de perfuração em paralelo.....	56
3.31	Coeficiente de absorção de um MPP três diâmetros de perfuração em paralelo.	57
3.32	Representação da matriz de quatro polos	60
3.33	Esquema de painéis multicamadas para a matriz de transferência.	62
3.34	Desenho esquemático das seis configurações de MPP e material poroso em múltiplas camadas. ..	64
3.35	Coeficiente de absorção para as configurações (a), (b) e (c).	65
3.36	Coeficiente de absorção para as configurações (e), (e) e (f).	65
3.37	Representação esquemática para a matriz de transferência em paralelo.....	67
3.38	Comparação entre modelo de Verdière [2013] e modelo proposto para uma montagem em paralelo de um MPP com cavidade subdividida.	69
3.39	Configuração com diferentes diâmetros de perfuração em paralelo com camadas de melamina+MPP+honeycomb em série.	70

3.40	Coefficiente de absorção da configuração com diferentes diâmetros de perfuração em paralelo com camadas de melamina+MPP+honeycomb em série.	70
4.1	Esquema do sistema MPP simples.	81
4.2	Coefficiente de absorção otimizado para as faixas de frequência (a), (b) e (c).	84
4.3	Coefficiente de absorção otimizado para as faixas de frequência (d), (e) e (f).	84
4.4	Convergência para a faixa de frequência (e).	85
4.5	Esquema do sistema MPP duplo.	86
4.6	Coefficiente de absorção do MPP duplo otimizado para as faixas de frequência (a), (b) e (c).	88
4.7	Coefficiente de absorção do MPP duplo otimizado para as faixas de frequência (d), (e) e (f).	89
4.8	Coefficiente de absorção do painel de interior otimizado para as faixas de frequência (a), (b) e (c).	92
4.9	Coefficiente de absorção do painel de interior otimizado para as faixas de frequência (d), (e) e (f).	93
5.1	Amostra do painel de interior.	96
5.2	Desenho esquemático do painel de interior.	96
5.3	Medição da área do núcleo honeycomb.	97
5.4	Amostras para medição em tubo de impedância.	97
5.5	Amostra com massa de calafetar.	97
5.6	Amostra da placa rígida microperfurada a laser.	98
5.7	Dimensões do painel de interior.	98
5.8	Microperfurações feitas por broca no painel de interior: (a) vista da entrada e (b) vista da saída da perfuração.	99

5.9	Microperfurações feitas por punção no painel de interior: (a) vista da entrada e (b) vista da saída da perfuração.	100
5.10	Microperfurações a laser em placa de alumínio. .	100
5.11	Obtenção do valor do diâmetro através do software ImageJ®.	101
5.12	Representação esquemática do método dos dois microfones para tubo de impedância.	103
5.13	Esquema de medição do coeficiente de absorção com incidência normal em tubo de impedância. .	104
5.14	Coefficiente de absorção experimental para parede rígida.	106
5.15	Validação dos modelos com bordas agudas para o coeficiente de absorção de um MPP simples. ...	107
5.16	Validação dos modelos com bordas arredondadas para o coeficiente de absorção de um MPP simples.	108
5.17	Validação dos modelos com bordas levemente arredondadas para o coeficiente de absorção de um MPP simples.	108
5.18	Validação dos modelos com bordas levemente arredondadas para o coeficiente de absorção de um MPP duplo.	109
5.19	Coefficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (b).	110
5.20	Coefficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (c).	111
5.21	Coefficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (e).	112
5.22	Coefficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (f).	112
5.23	Coefficiente de absorção experimental do painel de interior sem perfurações..	113

5.24	Configurações de teste do coeficiente de absorção por incidência normal para o painel de interior.....	114
5.25	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção $d_{nom} = 0.6$ mm.	115
5.26	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção, considerando $d = 0.35$ mm e $\beta_r = 4$	115
5.27	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção considerando $d = 0.35$ mm e $\beta_r = 3$	116
5.28	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção considerando $d = 0.35$ mm e $\beta_r = 2$	116
5.29	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{nom} = 0.40$ mm e $\sigma_n = 80$ %.....	117
5.30	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.40$ mm e $\sigma_n = 35$ %.....	118
5.31	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.40$ mm e $\sigma_n = 57$ %.....	118
5.32	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.42$ mm e $\sigma_n = 35$ %.....	119

5.33	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.60$ mm e $\sigma_n = 23$ %.	120
5.34	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.60$ mm e $\sigma_n = 46$ %.	120
5.35	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.60$ mm e $\sigma_n = 69$ %.	121
5.36	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_1 = 0,3$ mm com $\sigma_{n_1} = 11$ %, $d_2 = 0,4$ mm com $\sigma_{n_2} = 34$ % e $d_3 = 0,6$ mm com $\sigma_{n_3} = 39$ %.	122
5.37	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_1 = 0,34$ mm com $\sigma_{n_1} = 60$ % e $d_2 = 0,6$ mm com $\sigma_{n_2} = 24$ %.	122
5.38	Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_1 = 0,34$ mm com $\sigma_{n_1} = 60$ % e $d_2 = 0,6$ mm com $\sigma_{n_2} = 24$ % com adição de 10 mm de melamina em série.	123
5.39	Coeficiente de absorção para um MPP simples com d , b e β_r ajustados pelo método inverso.	128
5.40	Coeficiente de absorção para um MPP simples sem fixar parâmetros.	129
5.41	Coeficiente de absorção obtido para d otimizado para o painel de interior com punções de valor nominal de 0,6 mm.	130

5.42	Coeficiente de absorção obtido com todos os parâmetros otimizados para o painel de interior com punções de valor nominal de 0,6 mm.....	131
5.43	Coeficiente de absorção obtido para d otimizado para o painel de interior com punções de valor nominal de 0,6 mm..	132
5.44	Coeficiente de absorção com parâmetros otimizados para o paindel de interior (A) e três diâmetros de perfuração em paralelo.....	134
5.45	Coeficiente de absorção com parâmetros otimizados para o paindel de interior (B) e dois diâmetros de perfuração em paralelo.....	135
5.46	Coeficiente de absorção com parâmetros otimizados para o paindel de interior (B) e dois diâmetros de perfuração em paralelo.....	136
5.47	Perfurações no painel de interior.	140
5.48	Coeficiente de absorção em campo difuso para o painel de interior microperfurado.	140
5.49	Comparação entre valores experimental e calculado do coeficiente de absorção em campo difuso para o painel de interior microperfurado.	141
5.50	Coeficiente de absorção em campo difuso para o painel de interior microperfurado: comparação entre dados experimental e calculado pelo método inverso.....	142
5.51	Esquema de montagem experimental para a FRF da viga.	143
5.52	Posicionamento dos pontos de medição de reposta pontual e de transferência.	144
5.53	Função resposta em frequência para a viga.....	145
5.54	Esquema de medição da eficiência de radiação. ...	146
5.55	Painel montado na moldura entre as câmaras reverberantes.	148
5.56	Esquema de medição da eficiência de radiação. ...	149

5.57	Montagem do excitador eletrodinâmico.	149
5.58	Configurações do MPP para os testes de eficiência de radiação.	150
5.59	Esquema de medição da eficiência de radiação dos dois lados radiantes.	150
5.60	Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP na câmara 1.	151
5.61	Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP na câmara 2.	151
5.62	Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP e o painel de referência. ..	152
5.63	Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP e o painel de referência. ..	153
5.64	Montagem de teste da perda por amortecimento estrutural.	155
5.65	Valores da perda estrutural por amortecimento para os painéis de interior obtidos com microfone.	155
5.66	Valores da perda estrutural por amortecimento para os painéis de interior obtidos com acelerômetro.	156
5.67	Representação esquemática do método de medição da perda de transmissão.	157
5.68	Perda de Trasmissão obtidos para as duas configurações do MPP e o painel de referência. ..	158
6.1	Modelo em SEA para a perda de transmissão.	166
6.2	Detalhe de montagem do painel no modelo em SEA para a perda de transmissão.	166
6.3	Validação experimental da perda de transmissão do painel de interior <i>baseline</i> para o modelo em SEA.	168
6.4	Validação experimental da perda de transmissão do MPP1 para o modelo em SEA.	168

6.5	Validação experimental da perda de transmissão do MPP2 para o modelo em SEA.	169
6.6	Modelo simplificado de uma aeronave no VAOne®.	170
6.7	Identificação dos elementos estruturais do modelo simplificado de uma aeronave.....	171
6.8	Identificação dos elementos acústicos do modelo simplificado de uma aeronave.....	172
6.9	Ruído interno na cabine para a configuração C1..	175
6.10	Ruído interno na cabine para a configuração C2..	176
6.11	Ruído interno na cabine para a configuração C3..	177
6.12	Redução do ruído interno na cabine para a configuração C3.....	178
6.13	Ruído interno na cabine para a configuração C4..	178

Lista de Tabelas

3.1	Fatores de correção utilizados nos modelos de Maa.	27
3.2	Valores dos parâmetros.....	39
3.3	Valores utilizados na comparação entre modelos	46
3.4	Valores dos parâmetros.....	54
3.5	Valores dos parâmetros dos materiais porosos ...	64
4.1	Faixas de frequência da otimização.....	79
4.2	Faixa de valores para o MPP simples.....	83
4.3	Valores dos parâmetros ótimos para o MPP simples.	83
4.4	Faixa de valores para o MPP duplo.....	87
4.5	Valores dos parâmetros ótimos para o MPP duplo	88
4.6	Faixa de valores para o painel de interior	91
4.7	Valores dos parâmetros para o painel de interior	92
5.1	Dimensões das amostras de painel interno.....	96
5.2	Valores dos diâmetros medidos para cada amostra	101
5.3	Valores dos parâmetros dos materiais porosos. ..	110
5.4	Parâmetros utilizados pelo método inverso para o MPP simples com t e D fixados.	128
5.5	Parâmetros utilizados pelo método inverso para o MPP simples	129
5.6	Parâmetros utilizados para a análise (i) do método inverso para o painel de interior com punção nominal de 0,6 mm.	130

5.7	Parâmetros utilizados para a análise (ii) do método inverso para o painel de interior com punção nominal de 0,6 mm.	131
5.8	Parâmetros utilizados para a análise do método inverso para o painel de interior com perfuração por broca de valor nominal de 0,4 mm.	132
5.9	Parâmetros utilizados para a análise do método inverso para o painel de interior (A) com três diâmetros em paralelo.	134
5.10	Parâmetros utilizados para a análise do método inverso para o painel de interior (B) com dois diâmetros em paralelo.	135
5.11	Propriedades mecânicas equivalentes do painel de interior.	145
6.1	Propriedades mecânicas equivalentes do painel de interior.	167
6.2	Valores das relações de área para as configurações no modelo de ruído interno.	175

Lista de Símbolos

Símbolos Gerais

ΔP	Diferencial de pressão, pág. 20.
$\langle v^2 \rangle$	Velocidade média quadrática espacial, pág. 146.
a	Raio da perfuração, pág. 23.
a_b	Raio externo da borda da perfuração, pág. 34.
b	Distância entre perfurações, pág. 27.
c_0	Velocidade do som no ar, pág. 20.
C_m	Fator de correção da reatância da impedância característica de um MPP, pág. 25.
C_p	Probabilidade de recombinação do algoritmo DE, pág. 76.
C_r	Fator de correção da resistência acústica da impedância característica de um MPP, pág. 26.
D	Profundidade da cavidade, pág. 20.
d	Diâmetro da perfuração, pág. 22.
d_t	Diâmetro interno do tubo de impedância, pág. 103.
F	Fator de mutação do algoritmo DE, pág. 75.
f_0	Frequência de pico de absorção máxima, pág. 28.
f_c	Frequência de corte do tubo de impedância, pág. 103.

f_f	Frequência final no algoritmo DE, pág. 78.
f_i	Frequência inicial no algoritmo DE, pág. 78.
f_{max}	Frequência máxima de utilização do tubo de impedância, pág. 104.
f_{min}	Frequência mínima de utilização do tubo de impedância, pág. 104.
H_{12}	Função de transferência experimental, pág. 104.
H'_{12}	Função de transferência com as fase corrigidas, pág. 105.
J_i	Função de Bessel de primeira espécie de ordem i , pág. 24.
k	Constante de perfuração, pág. 22.
k_0	Número de onda no ar, pág. 20.
K_k	Módulo de compressibilidade da fase fluida, pág. 58.
k_t	Número de onda complexo devido à dissipação no tubo de impedância, pág. 104.
K_{eq}	Módulo de compressibilidade efetivo do fluido equivalente, pág. 58.
L_h	Lado do hexágono, pág. 52.
m	Massa efetiva por unidade de área, pág. 20.
N	Número de parâmetros a serem determinados pelo algoritmo de otimização, pág. 75.
n_f	Número de frequências analisadas pelo algoritmo DE, pág. 78.
n_n	número de núcleos na amostra, pág. 53.

N_p	Tamanho da população aplicado ao algoritmo DE, pág. 75.
n_p	Número de perfurações em uma placa microperfurada, pág. 19.
n_{p_i}	número de perfurações de cada i -ésimo diâmetro de perfuração, pág. 53.
P	Pressão, pág. 20.
Pr	Número de Prandtl, pág. 58.
R	Coeficiente de reflexão, pág. 22.
r	Resistência acústica, pág. 20.
R_{exp}	Coeficiente de reflexão experimental, pág. 104.
S	Área da placa, pág. 19.
S_h	Área do núcleo <i>honeycomb</i> , pág. 52.
s_i	Distância entre microfones utilizados no tubo de impedância, pág. 104.
S_p	Área da perfuração, pág. 19.
t	Profundidade da perfuração, pág. 23.
u	Velocidade de partícula, pág. 20.
W_{rad}	Potência radiada, pág. 146.
Z_0	Impedância característica do ar, pág. 20.
Z_m	Impedância de superfície de uma placa, pág. 20.
Z_p	Impedância característica de uma perfuração, pág. 20.
Z_t	Impedância de superfície total para n diâmetros de perfuração, pág. 54.

Z_{exp}	Impedância experimental, pág. 105.
Z_{m_0}	Impedância de superfície normalizada de uma placa, pág. 20.
Z_{mpp}	Impedância de superfície de um MPP, pág. 21.

Símbolos Gregos

α	Coefficiente de absorção, pág. 22.
α_i	Curva discreta analítica do coeficiente de absorção, pág. 78.
α_n	Coefficiente de absorção experimental para incidência normal, pág. 105.
α_∞	Tortuosidade geométrica, pág. 36.
β_m	Constante de correção da reatância acústica, pág. 31.
β_r	Constante de correção da resistência acústica, pág. 31.
η	Viscosidade dinâmica do ar, pág. 22.
γ	Fator de arredondamento, pág. 34.
γ_c	Razão de calores específicos, pág. 58.
Λ	Comprimento característico viscoso, pág. 36.
Λ	Comprimento característico viscoso, pág. 58.
Λ'	Comprimento característico térmico, pág. 58.
ω	Frequência angular, pág. 20.
ϕ	Porosidade do material poroso, pág. 58.
ρ_0	Densidade característica do ar, pág. 20.

ρ_e	Densidade efetiva do meio, pág. 36.
ρ_k	Densidade da fase fluida, pág. 58.
ρ_t	Densidade do material poroso, pág. 59.
ρ_{eq}	Densidade efetiva do fluido equivalente, pág. 58.
σ	Razão de perfuração de uma placa microperfurada, pág. 19.
σ_h	Área do núcleo <i>honeycomb</i> , pág. 52.
σ_r	Resistividade ao fluxo, pág. 36.
σ_{n_i}	Porosidade relativa, pág. 53.
σ_{rad}	Eficiência de radiação, pág. 146.
θ	Ângulo de incidência da onda sonora em propagação, pág. 22.

Acônimos e Abreviaturas

BEM	<i>Boundary Elements Method</i> , ou método dos elementos de contorno, em português, pág. 161.
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> , ou dinâmica dos fluidos computacional, em português, pág. 32.
CLF	<i>Coupling Loss Factor</i> , ou fator de perda por acoplamento, em português, pág. 162.
DE	<i>Differential Evolution</i> , ou evolução diferencial, em português, pág. 73.
DLF	<i>Damping Loss Factor</i> , ou fator de perda por amortecimento, em português, pág. 162.

- DLMPP *Double Leaf Microperforated Panel*, ou painel microperforado de folha dupla, em português, pág. 9.
- FEM *Finite Element Method*, ou método dos elementos finitos, em português, pág. 13.
- FRF Função Resposta em Frequência, pág. 142.
- JCA Modelo de Johnson-Champoux-Allard para materiais porosos de estrutura rígida, pág. 57.
- LVA Laboratório de Vibrações e Acústica, pág. 139.
- MPP *Microperforated Panel*, ou em português, painel microperforado, pág. 3.
- MSA *Micro-Slit Absorber*, ou absorvedor de micro ranhuras, em português, pág. 10.
- SA *Simmulated Annealing*, ou recozimento simulado, em português, pág. 16.
- TAS *Thermal-Acoustical System*, ou em português, sistema termo-acústico, pág. 1.
- TBL *Turbulent Boundary Layer*, ou camada limite turbulenta, em português, pág. 1.
- TMM *Transfer Matrix Method*, ou método da matriz de transferência, em português, pág. 9.

1 Introdução

Cabines de aeronaves possuem várias fontes de ruído provenientes dos propulsores a jato, do movimento de dispositivos mecânicos tais como as superfícies de controle e trem de pouso, e da camada limite turbulenta (TBL - *Turbulent Boundary Layer*, em inglês) sobre a fuselagem. O ruído interno em aeronaves têm sido uma preocupação para os projetistas devido à sua capacidade de fadiga dos passageiros e tripulantes, bem como a inibição do seu conforto. Além disso, os altos níveis de vibração e ruído causados pela camada limite turbulenta podem gerar desgaste estrutural [D'Angelo, 2004].

No mercado de aviação, principalmente no segmento executivo, o nível de ruído de cabine é considerado um diferencial competitivo importante para o sucesso de um produto. Uma das principais estratégias para o controle do ruído de cabine é o projeto do sistema de tratamento termo-acústico. Este sistema é composto por um conjunto de materiais responsáveis por amortecer as estruturas principais, absorver e atuar como barreira para a energia acústica. Com exceção dos materiais viscoelásticos usados para aumentar o amortecimento das estruturas, os materiais típicos utilizados nos tratamentos não sofreram significativa evolução nas últimas décadas e, acredita-se, que estão próximos ao ápice de suas performances. Logo, para que o ruído de cabine seja reduzido, o tratamento convencional deve ser utilizado juntamente com formas inovadoras de tratamento acústico.

Um sistema termo-acústico típico (TAS - *Thermal-Acoustical System*, em inglês) consiste em materiais e dispositivos de fixação entre o painel de fuselagem e o painel de interior, conforme apresentado na Figura 1.1.

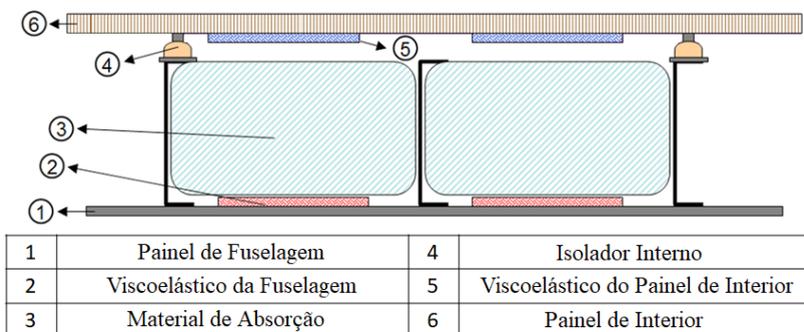


Figura 1.1: Desenho esquemático do tratamento termo-acústico.

O material viscoelástico (2) e (5), atuante no painel da fuselagem (1) e painel interno (6), adiciona amortecimento, minimizando a radiação sonora. O material de absorção (3) é geralmente composto de material fibroso, espuma de células abertas ou uma combinação de ambos e, atua como absorção sonora e barreira para a transmissão sonora via aérea. O isolador de interior (4) é um dispositivo elastomérico que conecta a estrutura externa ao painel de interior (6) e atua minimizando a transmissão via caminho estrutural.

Atualmente, aeronaves comerciais e executivas utilizam painéis internos do tipo composto sanduíche com núcleo em forma de colmeia (*honeycomb*, em inglês), pois estes possuem uma elevada rigidez e baixo peso. As propriedades que tornam estas estruturas desejáveis do ponto de vista estrutural são as mesmas que tendem a agravar os problemas de ruído e vibração em cabines de aeronaves [Seera, 2011]. Na sua forma mais simples, estes painéis consistem de um material no qual um núcleo *honeycomb* é imprensado entre duas placas finas e conectados por uma fina camada de adesivo. A Figura 1.2 apresenta uma amostra de um painel de interior composto típico.

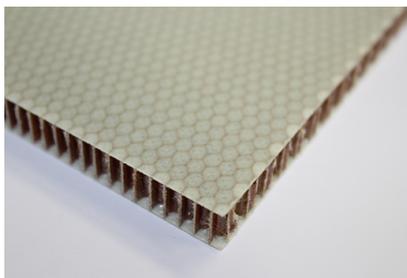


Figura 1.2: Painel de interior composto com núcleo em *honeycomb*.

Por possuir baixo desempenho acústico, novas soluções para painéis compostos são necessárias, das quais a aplicação de microperfurações têm se destacado por não requerer a adição de materiais de absorção, o que acarretaria em maior peso e custo [Sakagami *et al.*, 2010]. Devido às microperfurações, absorvedores acústicos tipo MPP (*Microperforated Panels*, em inglês) oferecem altos níveis de absorção sonora. Oposto aos materiais de absorção sonora tradicionais, como espumas, fibras e lãs, painéis microperfurados são únicos e sustentáveis, pois são recuperáveis, não combustíveis e resistentes, além de não soltarem particulados.

Um sistema composto por duas placas e um painel *honeycomb* no interior, sendo uma das placas microperfurada, age como uma matriz de ressonadores, o que oferece alta performance em absorção sonora em uma larga faixa de frequência. Tal solução é altamente viável, considerando que a maioria das aeronaves comerciais e executivas na atualidade já utilizam o painel composto sem microperfurações.

1.1 Motivação

A aplicação de painéis microperfurados em cabines internas de aeronaves se demonstra uma solução viável e promissora. Entretanto, o modelo clássico de Maa [1975], o qual tem sido utilizado há décadas para o cálculo da impedância característica de painéis microperfurados, foi inicialmente formulado para

placas rígidas, com perfurações circulares homogêneas e com uma cavidade única, ou seja, sem as subdivisões causadas pela adição do núcleo *honeycomb*. Devido aos métodos de perfuração e ao material do painel, algumas características tornam este cálculo complexo, tais como a flexibilidade da placa de superfície, a não homogeneidade da borda da perfuração, a absorção gerada pelo material do núcleo e particulados devido à furação.

O modelo clássico da Maa para MPP foi usado e adaptado para muitas aplicações, entretanto, para painéis compostos sanduíche com núcleo subdividido, funciona somente se todos os núcleos estiverem igualmente perfurados, o que restringe o uso do modelo.

Painéis microperfurados têm sido usados de forma eficiente por décadas, mas são conhecidos por serem limitados em largura de banda [Sakagami *et al.*, 2011]. Além disso, apesar dos modelos para a estimativa do coeficiente de absorção do MPP tradicional serem conhecidos, o comportamento vibroacústico de tais painéis ainda não está esclarecido, principalmente quanto à eficiência de radiação e perda de transmissão, parâmetros que, em conjunto com a absorção sonora, são críticos quando a referência é ruído de interior de aeronaves.

1.2 Objetivos

Este trabalho objetiva o estudo da influência de microperfurações nas características vibroacústicas de painéis compostos aeronáuticos, por meio da análise e modificação de modelos analíticos clássicos, da caracterização experimental, da otimização dos parâmetros geométricos e de um modelo numérico generalizado de uma aeronave.

A primeira contribuição deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo para calcular com precisão o coeficiente de absorção de painéis compostos microperfurados que leve em consideração o tipo e forma das perfurações, a cavidade

subdividida, as restrições impostas pelos painéis existentes e suas diferentes aplicações. A nova formulação pode ser aplicada para perfurações com múltiplos diâmetros, resultando em uma maior largura de banda de frequência de absorção. Esta solução é adequada para tal aplicação, uma vez que não altera nenhuma das propriedades intrínsecas ao painel.

Uma segunda contribuição consiste no desenvolvimento de uma ferramenta de otimização de sistemas MPP pela da identificação da melhor combinação geométrica dos parâmetros do material e configurações dos painéis em conjunto com o núcleo *honeycomb* para uma maximização da amplitude e faixa de frequência da absorção. Propõe-se também a utilização do algoritmo de otimização em um método inverso para caracterização dos parâmetros geométricos, o qual soluciona problemas na estimativa dos principais parâmetros envolvidos.

Por fim, é realizada a análise do impacto do painel microperfurado no ruído interno de aeronaves por um modelo numérico, o qual utiliza como dados de entrada valores obtidos pela caracterização vibroacústica experimental do painel de interior.

1.3 Estrutura

Este documento é composto de sete capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se uma contextualização, ou estado da arte, contendo a evolução dos modelos, metodologias e teorias sobre painéis microperfuradas pertinentes a este trabalho.

No Capítulo 3, os modelos clássicos para painéis microperfurados são descritos com destaque no trabalho pioneiro de Maa [1975, 1987, 1998]. Um estudo sobre os fenômenos físicos e uma análise de sensibilidade dos parâmetros geométricos são realizados. Quatro variações para o modelo de Maa existentes na literatura são descritas. Apresenta-se, também, uma modificação para duas novas aplicações de painéis microperfurados considerando a cavidade subdividida gerada pelo núcleo. O método da matriz de transferência é descrito para o cálculo de

sistemas de absorção de múltiplas camadas. Uma modificação para este método é descrito, considerando a nova formulação com cavidade subdividida.

Um método de otimização de parâmetros geométricos com base no algoritmo de Evolução Diferencial é apresentado no Capítulo 4. Uma comparação entre três diferentes sistemas de painéis microperfuradas é realizada focando nas restrições e performance dos mesmos.

O Capítulo 5 detalha a caracterização experimental do painel de interior aeronáutico e a validação dos modelos analíticos. Primeiramente apresentam-se os materiais de composição e detalhes dos parâmetros geométricos das amostras disponíveis. Uma análise realizada em microscópio demonstra as irregularidades dos tipos de perfuração no material das placas utilizadas em painéis aeronáuticos. Avaliações comparativas também são apresentadas a fim de mostrar o efeito no coeficiente de absorção devido ao tipo de material, tipo de perfuração e diferentes configurações. Apresenta-se um método inverso para obtenção de parâmetros geométricos baseado no algoritmo de otimização Evolução Diferencial. Uma análise experimental demonstra o efeito de microperfurações em outros parâmetros vibroacústicos, como a eficiência de radiação, o amortecimento estrutural e a perda de transmissão.

O sexto capítulo apresenta um modelo em SEA para estimar a redução no ruído interno de aeronaves com a aplicação de microperfurações nos painéis de interior. Um modelo para a perda de transmissão foi utilizado para validar a implementação das propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas dos painéis microperfurados.

Por fim, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Contextualização

O MPP é caracterizado como um sistema de duas placas e uma camada de ar, onde uma das placas possui perfurações submilimétricas. De forma similar ao ressonador de Helmholtz, o painel microperfurado pode ser sintonizado para fornecer máxima absorção em uma faixa de frequência. Entretanto, ao contrário do ressonador de Helmholtz, o MPP possui absorção acústica em bandas mais largas devido às dimensões submilimétricas de suas perfurações. Neste caso, a energia acústica é dissipada quando as ondas sonoras causam fluxo oscilatório através dos pequenos orifícios no painel, o que resulta em dissipação viscosa. O tamanho da perfuração é o parâmetro mais sensível para controlar o desempenho destes sistemas [Yoo, 2009].

O MPP apresenta algumas vantagens quando comparado aos materiais porosos: é mais fino, leve e pode ser facilmente lavado ou limpo [Villamil, 2012]. Para aeronaves, a utilização do MPP se torna viável, pois pode ser aplicado ao painel de interior de forma a melhorar suas características vibroacústicas.

Em 1975, Maa [1975] propôs um modelo aproximado para obter a impedância de placas microperfuradas, o qual ainda é largamente utilizado. Desde então, publicou outros trabalhos relacionados [Maa, 1987, 1999, 1998], dos quais o último demonstra a versão exata do modelo. Maa utilizou a simplificação de Crandall [1926] para o equacionamento de Rayleigh [1878] da propagação de uma onda sonora em tubos curtos. O modelo considera uma placa infinita rígida com perfurações submilimétricas circulares e baixa porosidade ($< 1\%$). O modelo para tubos curtos utiliza fatores de correção de terminação para os termos da impedância, reatância e resistência, propostos por Ingard [1953]. A correção na resistência é devida à fricção do

fluxo (efeito viscoso adicional) na superfície do painel, enquanto que na reatância é devido ao comprimento do tubo, equivalente à radiação de um pistão. Em [Maa, 1999], publicou uma modificação destes fatores de correção.

Com intuito de demonstrar quais dos modelos de Maa melhor se relacionam com dados experimentais, Yoo *et al.* [2007] realizaram medições com placas de latão microperfuradas, com fabricação de alta precisão. Os resultados demonstraram que o modelo publicado em 1987 foi o mais preciso. Mesmo assim, os autores propõem que o modelo pode ser aperfeiçoado ao modificar os fatores de correção em função da razão de perfuração.

Em 1987, Maa modificou sua abordagem, utilizando-se de uma analogia a um circuito elétrico equivalente. No mesmo trabalho, demonstrou que sistemas de dupla camada microperfurada podem ampliar a absorção em baixas frequências e que pode estender a frequências mais altas quando utilizados em campo difuso. No modelo de camada dupla, Maa utiliza a impedância de uma massa de ar em uma parede rígida para a cavidade entre as placas microperfuradas. Segundo Sakagami *et al.* [2007], tal abordagem não é direta, porém é uma boa aproximação. Vários trabalhos posteriores utilizaram este modelo como base para o estudo e cálculo de painéis de absorção microperfurados de camada dupla [Zhang, 1998, Kang e Fuchs, 1999, Sakagami *et al.*, 2010], entre outros. Lee e Chen [2001] estenderam esta ideia para múltiplas camadas.

Posteriormente, Lee e Kwon [2004] propuseram a utilização do método da matriz de transferência para o cálculo do coeficiente de absorção para sistemas de múltiplas camadas. Neste método, a impedância acústica de superfície é estimada pela matriz de transferência global obtida da multiplicação de matrizes unitárias para cada subsistema, o qual representa placas perfuradas ou cavidades de ar. Ao contrário dos modelos anteriores, utilizaram o modelo de impedância originalmente proposto por Rao e Munjal [1986], que considera a parte real da

impedância como constante.

Sakagami *et al.* [2006] propuseram um sistema de absorção com duas folhas microperfuradas sem a adição de uma parede rígida (em inglês *Double Leaf Microperforated Panel*, DLMPP). Seu modelo demonstra que, em baixas frequências, a absorção é menor, porém tal configuração age em ambos os lados, sendo mais efetivo para o controle de médias e altas frequências.

Os estudos mencionados consideram apenas a absorção gerada pelos ressonadores, no entanto as vibrações induzidas pelas ondas sonoras no próprio painel afetam as características de absorção do sistema. O mecanismo básico de um absorvedor tipo membrana é similar a um sistema massa-mola com absorção sintonizável [Toyoda *et al.*, 2010]. Liu *et al.* [1998] demonstraram, por uma série de experimentos, que o efeito de vibração do painel afeta fortemente as características de absorção de um MPP e, se sintonizados, podem abranger uma maior faixa de frequência. Posteriormente, uma teoria [Kang e Fuchs, 1999] combinando ambas as ressonâncias foi proposta, utilizando a impedância do MPP em paralelo com a impedância da placa flexível no circuito elétrico equivalente. Concluíram que o efeito de membrana não é tão significativo quanto o das perfurações, mas modifica a impedância global. Seu estudo também se estendeu para camadas duplas.

Lee *et al.* [2005] utilizaram o método da matriz de transferência (TMM - *Transfer Matrix Method*, em inglês) para realizar uma análise do efeito de membrana em um MPP de forma a poder aplicar em multicamadas. Desenvolveram o equacionamento da absorção baseados na solução da análise modal da equação clássica de uma placa acoplada utilizando a equação da onda sonora. Concluíram que o efeito de vibração do painel pode aumentar a largura de banda da absorção se a frequência de ressonância estrutural é maior do que a do pico da frequência de absorção das perfurações.

Sakagami *et al.* [2009] estudaram a relação entre a ressonância do painel e a de Helmholtz em MPP, também utilizando o

método do circuito equivalente. Concluíram que ambas as ressonâncias são fenômenos que estão interligados, pois uma pode ser transformada na outra por mudanças na razão de perfuração. Entretanto, seu modelo não considera os efeitos de vibração flexional e é limitado às placas infinitas. Toyoda *et al.* [2010] desenvolveram um modelo analítico para a vibração do MPP com uma admitância de superfície, o qual inclui o efeito dos modos de vibração do painel.

Um novo modelo da impedância de MPP foi proposto por Atalla e Sgard [2007] para diferentes configurações de painéis utilizando a matriz de transferência. Demonstraram que o MPP pode ser modelado como fluido equivalente, seguindo o modelo de Johnson e Allard [1993] para material poroso rígido com uma tortuosidade equivalente, a qual depende do contato fluido-estrutura. Este modelo gera resultados semelhantes aos modelos clássicos com boa concordância para vários tipos de painéis. Ao contrário dos modelos baseados no de Maa, a massa do painel foi considerada a fim de incluir os efeitos de inércia da fase sólida.

Baseado no modelo de Atalla e Sgard, Hou [2009] aplicou esta nova abordagem em elementos finitos. Ao utilizar modelos de elementos finitos existentes para materiais porosos rígidos, demonstrou que consegue obter as características acústicas de sistemas MPP rígido e flexível, este último considerando material poroelástico. Seus resultados demonstraram boa concordância com os modelos analíticos existentes.

Vários pesquisadores demonstraram interesse na impedância de MPP com diferentes tipos e formas de perfuração. Tal estudo começou devido ao custo de fabricar um painel com furos homogêneos. Maa [2001] propôs um modelo para absorvedores com ranhuras (em inglês *Micro-Slit Absorber*, MSA). O MSA nunca obteve a mesma popularidade do MPP, pois provê pior performance acústica. Isto é devido ao aumento da reatância mássica, o que estreita a largura de banda de frequência da absorção.

Em [2000], Randenberg sugeriu um método para calcular

a impedância específica de um painel com perfurações em forma cônica com o propósito de aumentar a área da superfície incidente, o que aumenta a velocidade de fluxo na saída, que possui área menor, para melhor ajustar a impedância com a onda incidente. Os resultados indicaram uma maior largura de banda no espectro de absorção sonora.

Ning *et al.* [2016] estudaram as propriedades acústicas do MPP com perfurações de áreas arbitrárias. Em seu trabalho, derivaram variações para o modelo de Maa para perfurações triangulares e retangulares. Seus resultados indicam que perfurações com área triangular possuem melhor performance de absorção.

A modelagem e cálculo do termo de correção da terminação de perfurações não circulares é um problema pendente no estudo de painéis microperfurados. Com o desenvolvimento de novos métodos de fabricação, os painéis de absorção estão se tornando mais leves e finos de modo que o termo de correção desempenha um papel mais importante na determinação da impedância [Hou, 2009]. Em [2009], Allam *et al.* propuseram a utilização de placas microperfuradas para silenciadores. Em seu trabalho, utilizaram a equação exata de Maa com duas constantes extras nos fatores de correção da resistência e reatância acústica. A constante de correção da resistência acústica serve para ajustar o modelo para o tipo de perfuração, indicando se possui bordas arredondadas ou agudas.

Bolton e Kim [2010] propuseram que a resistência e a reatância do termo de correção de pequenas aberturas podem ser calculadas utilizando modelos em dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*, em inglês) relativamente simples em que uma única perfuração é modelada. Assumiu o fluido como viscoso e incompressível, e a geometria do furo como sendo de simetria axial. Esta abordagem essencialmente reproduz a teoria clássica de Maa para aberturas circulares. No entanto, também mostra que a correção empírica para o termo de correção resistivo, em particular, apresenta uma

dependência da frequência e dos parâmetros geométricos que não são considerados nos modelos convencionais.

Utilizando uma abordagem semelhante, Temiz *et al.* [2014] propuseram um resultado alternativo para o trabalho de Bolton e Kim [2010] através da utilização de um modelo numérico linear baseado nas equações de Navier-Stokes, com fluido incompressível e axissimetria 2D. Segundo os autores, tal abordagem assegura a eficiência numérica e ausência de efeitos não lineares.

Com o intuito de obter absorvedores com uma largura de banda de frequência de absorção mais abrangentes, Sakagami *et al.* [2011] propuseram a utilização de painéis microperfurados em conjunto com materiais porosos. Pesquisadores já haviam estudado as características de painéis perfurados com materiais porosos, porém com perfurações grandes em comparação ao MPP. O painel perfurado ($d > 1$ mm), possui resistência acústica baixa e, para melhorar tal característica e, conseqüentemente, aumentar a absorção sonora, é comum utilizar uma camada de material poroso atrás do painel perfurado. Entretanto, o MPP já possui resistência acústica otimizada e, ao adicionar material poroso, a resistência aumenta resultando na redução da absorção. Porém, Sakagami *et al.* [2011] demonstram que quando os parâmetros são escolhidos de forma apropriada, a resistência acústica adicional do material poroso pode melhorar a curva de absorção sonora, depreciando levemente os picos já existentes devido às microperfurações. Tal efeito depende fortemente da resistividade ao fluxo, característica intrínseca ao material poroso.

Zha [1994, *apud* Wang e Huang, 2011], propôs a utilização de painéis microperfurados com diferentes profundidades de cavidade dispostos em paralelo para alargar a faixa de frequência de atuação. Seu trabalho foi puramente experimental. Em [2009], Yairi *et al.* testaram uma configuração em paralelo semelhante e compararam os resultados medidos com previsões baseadas na analogia ao circuito equivalente. Segundo Wang e Huang [2011],

ambos os estudos mostraram que a disposição paralela de dois MPP diferentes é capaz de obter uma banda de frequência de absorção mais ampla, porém não detalham o comportamento acústico distinto da configuração e os mecanismos físicos envolvidos. Em seu trabalho [Wang e Huang, 2011], atenção especial é dada à explicação física dos mecanismos de absorção dentro de uma matriz de ressonadores em paralelo. Suas análises foram realizadas por meio da analogia a um circuito equivalente para calcular o coeficiente de absorção e, para obter maiores detalhes do campo acústico, utilizaram-se do método dos elementos finitos (FEM - *Finite Element Method*, em inglês).

Para melhorar a absorção na região de baixas frequências, no caso de painéis MPP ($f < 500$ Hz), Park [2013] demonstrou que configurações com MPP e ressonadores de Helmholtz em série podem ser utilizadas. Em seu trabalho, utilizou o método da matriz de transferência para obter a impedância acústica do sistema proposto. Os resultados indicam um pico de frequência estreito em regiões abaixo da frequência de pico do MPP.

A maioria dos estudos em placas e painéis microperfurados foram desenvolvidos para perfurações homogêneas. Entretanto, devido aos métodos de perfuração e ao material do painel aeronáutico, perfurações aplicadas a tais painéis possuem formas não homogêneas e, conseqüentemente, são difíceis de modelar. Liu *et al.* [2014] propuseram a utilização de um algoritmo de ajuste de curva pelo método dos mínimos quadrados não-linear para estimar os parâmetros geométricos do MPP de forma inversa, ou seja, utilizando dados experimentais do coeficiente de absorção. Para o cálculo inverso, utilizaram como base o modelo de Maa. Com este método, pode-se estimar os parâmetros geométricos da placa e então calcular a impedância e o coeficiente de absorção do MPP. Desta forma, consegue-se entender o efeito de variações na forma das perfurações causadas pelo tipo de fabricação e/ou material utilizado, como rebarbas, além de poder identificar contaminação por poeira ou algum outro material depositado nas cavidades. A pesquisa

também demonstra que a teoria de Maa é abrangente a fendas e orifícios de formas irregulares. Como resultado disso, pode ser possível correlacionar os parâmetros efetivos (porosidade e diâmetro do furo) para os diferentes processos e materiais de fabricação utilizados.

Pan *et al.* [2005] propuseram a utilização de MPP em painéis com núcleo *honeycomb* para aplicação em navios, aeronaves e edifícios. Utilizaram o modelo de Maa, o qual subestimou os valores do coeficiente de absorção em comparação a dados experimentais. Após algumas análises, apresentaram duas propostas para melhorar a concordância dos resultados. Aplicaram uma correção estatística para o número de perfurações por núcleo e outra para a utilização de cola na junção das placas com o *honeycomb*. Com estas correções, os valores calculados e medidos apresentam melhor concordância.

Em 2006, Sakagami *et al.* utilizaram da analogia a um circuito equivalente para analisar a performance do painel MPP com *honeycomb* [Sakagami *et al.*, 2006]. A impedância do *honeycomb* foi modelada com a teoria tradicional de tubos. Entretanto, o modelo possui aproximações e subestima os efeitos em frequências abaixo do pico de ressonância. Sakagami *et al.* [2010] propuseram um novo modelo, utilizando como base as integrais de Helmholtz-Kirchhoff. Esta abordagem se demonstrou mais coerente em relação às medições experimentais quando comparada com o trabalho de 2006. Também observaram dois efeitos principais causados pelo núcleo *honeycomb*: aumento no pico de absorção e deslocamento do pico para frequências mais baixas. Tais efeitos surgem apenas quando o MPP é analisado em campo difuso.

Em 2005, Hillereau *et al.* [2005] consideraram o caso em que as próprias paredes dos núcleos do *honeycomb* também causam absorção. Estudaram a atenuação do som de um painel perfurado ordinário sob incidência rasante. Concluíram que a variação da porosidade do *honeycomb* teve um impacto significativo sobre a atenuação acústica de um dado MPP. Nesta

situação, o particionamento não pode ser simplificado como apenas um dispositivo que torna um sistema não-localmente reativo em localmente reativo.

Toyoda e Takahashi [2005] propuseram um modelo para a radiação acústica de placas infinitas com uma superfície perfurada ($d > 1$ mm), considerando uma cavidade acoplada à placa, ou seja, considerando que a cavidade vibra em conjunto com a placa. Em [2007], Toyoda *et al.* aplicaram o modelo em três dimensões, adicionando uma estrutura tipo *honeycomb* ao sistema perfurado. Demonstraram que cada núcleo *honeycomb* atua como um campo sonoro uni-dimensional localizado. Posteriormente, propuseram um modelo da perda de transmissão considerando o sistema de placa perfurada com núcleo em *honeycomb* [Toyoda e Takahashi, 2008]. Ambos os modelos e referentes resultados experimentais indicam que a adição de perfurações em um painel *honeycomb* afeta positivamente a eficiência de radiação e a perda de transmissão.

Com o intuito de determinar se os desempenhos acústicos de vários painéis microperfurados excedem os de painéis típicos de aeronave, Bravo *et al.* [2014] desenvolveram um método para avaliar os desempenhos de absorção e transmissão de estruturas microperfuradas de várias camadas, sob diferentes fontes de excitação. Em seu trabalho, é apresentada uma formulação modal para prever a resposta vibroacústica de painéis MPP multicamadas. Entretanto, seu trabalho considera apenas placas em alumínio microperfuradas com cavidade única ou material poroso no interior.

Ruiz *et al.* [2011] propuseram a aplicação de um algoritmo de otimização para fornecer a absorção sonora média máxima dentro de uma banda de frequência prescrita para sistemas MPP simples e duplos. Utilizaram o modelo de Maa, com perfurações circulares homogêneas e placa rígida para o modelo teórico e o algoritmo de Recozimento Simulado (SA - *Simulated Annealing*, em inglês) para a otimização. No seu método, utilizaram quatro parâmetros de caracterização do MPP: o diâmetro de perfuração,

a espessura do painel, a porosidade e a profundidade da cavidade.

Painéis microperfurados tem sido utilizados há décadas, entretanto, diferentes aplicações necessitam um estudo mais minucioso. O painel de interior aeronáutico possui características mais complexas, como placas em fibra de vidro e o núcleo em *honeycomb*. Microperfurações na placa de fibra resultam em perfurações não homogêneas, com diâmetros variados e forma indefinida, o que afeta a performance como sistema de absorção sonora. Devido à forma e fabricação destes painéis, é difícil estimar seus parâmetros geométricos, como a espessura da placa, a profundidade da cavidade, a espessura do núcleo e, principalmente, o diâmetro equivalente da perfuração. O núcleo em forma de colmeia gera uma cavidade com subdivisões e, apenas uma aplicação de painéis microperfurados pode ser implementada pelos modelos existentes. A largura de banda de frequência de absorção de painéis MPP é limitada e a utilização de materiais porosos acoplados acarreta em aumento de peso e custo.

Dois métodos interessantes para a otimização e caracterização de painéis microperfurados foram propostos na literatura [Ruiz *et al.*, 2011] e [Liu *et al.*, 2014]. Entretanto, estes métodos são limitados aos modelos clássicos e não consideram as características complexas de diferentes painéis e diferentes aplicações.

Métodos numéricos são largamente utilizados na indústria aeronáutica para a avaliação do ruído interno. Entretanto, a análise do ruído interno devido à utilização de painéis de interior microperfurados ainda é pendente e carece de estudos aprofundados.

2.1 Síntese do Capítulo

Este capítulo apresentou o desenvolvimento da teoria de painéis microperfurados desde o modelo clássico de Maa. Os

modelos existentes na literatura abrangem diferentes características, desde o tipo e forma de perfuração, a flexibilidade da placa da superfície e diferentes tipos de cavidade. Novas metodologias, como a utilização de mecânica dos fluidos computacional e o método inverso, mostram-se promissoras quanto à obtenção do fator de correção de terminação para formas irregulares.

3 Modelos Analíticos

Este capítulo apresenta os modelos e métodos para a obtenção da impedância de superfície de painéis e placas microperfuradas considerando diferentes configurações. O foco é dado no modelo clássico de Maa [1975, 1987, 1998] e em suas variações. Destaca-se a aplicação destes modelos, os quais foram desenvolvidos para cavidades sem a consideração de subdivisões. Uma variação para estes modelos é proposta considerando cavidade subdividida, de onde surgem duas novas aplicações. Uma nova abordagem, a qual utiliza o método da matriz de transferência para a aplicação em múltiplas camadas é apresentada considerando o MPP com cavidade subdividida aplicado em série e em paralelo com diferentes configurações.

3.1 Impedância Característica e Coeficiente de Absorção

A razão de perfuração, σ , é o que determina a porosidade de uma placa microperfurada. Tal grandeza depende da geometria da perfuração e da forma da placa. É expressa por:

$$\sigma = \frac{n_p S_p}{S}, \quad (3.1)$$

sendo n_p é o número de perfurações, S_p a área de cada perfuração e S a área da placa. Normalmente, as perfurações são separadas por uma distância menor que o comprimento de onda da banda de frequência de absorção [Maa, 1998].

A impedância característica de uma perfuração, Z_p , é definida como a razão da diferença de pressão, ($\Delta P = P_1 - P_2$), entre os dois lados da placa e a velocidade, sendo obtida aplicando

as condições de conservação da massa para a velocidade de partícula, u , entre os lados, tal como

$$Z_p = \frac{\Delta P}{u} = \frac{P_1 - P_2}{u}. \quad (3.2)$$

A impedância de superfície da placa microperfurada é obtida pela razão entre a impedância de perfuração e a razão de perfuração,

$$Z_m = \frac{Z_p}{\sigma}. \quad (3.3)$$

A impedância normalizada Z_{m_0} , é obtida ao dividir Z_m pela impedância característica do ar, $Z_0 = \rho_0 c_0$, onde ρ_0 é a densidade e c_0 a velocidade do som, podendo ser expressa por suas partes real e imaginária, na forma:

$$Z_{m_0} = \frac{Z_m}{Z_0} = r \pm i\omega m, \quad (3.4)$$

em que r é a parte real, que expressa a radiação de energia e as perdas viscosas da onda propagando através das perfurações, denominada resistência acústica, e $i\omega m$ é referente à massa de ar movendo-se dentro da perfuração, denominada reatância acústica, sendo ω a frequência angular e m a massa efetiva por unidade de área.

A impedância de superfície de uma cavidade de ar de espessura D , com uma terminação rígida é dada por

$$Z_D = -iZ_0 \cot(k_0 D), \quad (3.5)$$

onde $k_0 = \omega/c_0$ é o número de onda.

Para que a placa microperfurada atue como um painel de absorção, esta deve ser acoplada a uma cavidade. A Figura 3.1 mostra o sistema placa microperfurada adicionada à cavidade, sendo (a) uma demonstração esquemática do MPP e (b) a

analogia acústica a um circuito elétrico equivalente.

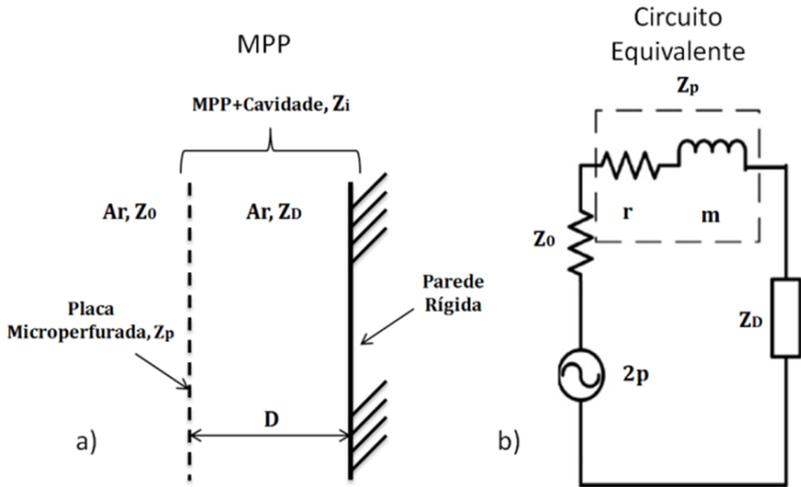


Figura 3.1: (a) Esquema do sistema MPP e (b) circuito equivalente análogo.

Baseando-se na analogia acústica a um circuito elétrico, a impedância de superfície da placa microperfurada, cavidade e parede rígida aplicados em série, Z_{mpp} , pode ser expressa como [Ingard, 1953]:

$$Z_{mpp} = Z_m + Z_D. \quad (3.6)$$

A equação 3.6 indica que a massa de ar nos poros vibra unidirecionalmente, normal ao painel, e que a reatância da cavidade é uniforme na superfície da placa perfurada, ou seja, o modelo, desta forma, é localmente reativo [Yang e Cheng, 2016] após a placa microperfurada.

Os coeficientes de reflexão e absorção, R e α , são definidos, respectivamente, como

$$R = \frac{Z_{mpp} \cos \theta - Z_0}{Z_{mpp} \cos \theta + Z_0} \quad (3.7)$$

sendo θ o ângulo de incidência da onda sonora em propagação, o qual é igual a zero para incidência normal, e

$$\alpha_{\theta} = 1 - |R|^2. \quad (3.8)$$

No caso de excitação em campo difuso, o coeficiente de absorção é definido como [Allard, 1993]:

$$\alpha_{dif} = \frac{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \alpha_{\theta} \cos\theta \sin\theta d\theta}{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos\theta \sin\theta d\theta}. \quad (3.9)$$

3.2 Modelos para Perfurações Circulares

Os modelos de painéis microperfurados com perfurações circulares são baseados no desenvolvimento do equacionamento da propagação sonora em tubos cilíndricos curtos e estreitos, tratado por Rayleigh [1878] e, posteriormente, simplificado por Crandall [1926]. A teoria é baseada na solução da equação da onda para expressar a velocidade de partícula e a impedância em função de um termo, o qual Maa [1975] chama de constante de perfuração, definido por:

$$k = d \sqrt{\frac{\omega \rho_0}{4\eta}}, \quad (3.10)$$

em que d é o diâmetro da perfuração [m] e η a viscosidade dinâmica do ar ($\eta = 1,78910^{-5}$ [Pas]).

A equação do escoamento, ou da perda de carga, para tubos curtos e estreitos para uma frequência ω é dada por [Crandall, 1926]

$$\left[i\omega\rho_0 - \frac{\eta}{a} \frac{\partial}{\partial a} \left(a \frac{\partial}{\partial a} \right) \right] u = \frac{\Delta P}{t}, \quad (3.11)$$

em que a é o raio [m] e t o comprimento [m] do tubo. Esta equação demonstra que a diferença de pressão entre a entrada e saída é equilibrada entre a aceleração do fluido e as forças viscosas, a qual varia entre o centro e a parede da perfuração. Devido à viscosidade, a velocidade de partícula é igual a zero na parede e aumenta em direção ao centro.

Considerando que a velocidade de partícula u é somente função de a , a equação 3.11 pode ser reescrita como

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial a^2} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial a} + k_c^2 \right) u = -\frac{\Delta P}{\eta t}, \quad (3.12)$$

onde $k_c^2 = -\frac{i\omega\rho_0}{\eta}$. A solução para a velocidade de partícula é [Crandall, 1926]:

$$u = -\frac{\Delta P}{\eta k_c^2 t} + A J_0(k_c a), \quad (3.13)$$

sendo J_0 a função de Bessel de primeiro tipo e ordem zero. Como a velocidade é zero para $a = a_0$, pode-se determinar A e, portanto, a solução para a distribuição radial da velocidade de partícula é

$$u(a) = -\frac{\Delta P}{\eta k_c^2 t} \left[1 - \frac{J_0(k_c a)}{J_0(k_c a_0)} \right]. \quad (3.14)$$

Obtém-se velocidade média ao integrar $u(a)$:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{2}{a_0^2} \int_0^{a_0} u(a) a da \\ &= -\frac{\Delta P}{\eta k_c^2 t} \left[1 - \frac{2}{k_c^2 a_0^2 (k_c a_0)} \int_0^{a_0} J_0(k_c a) \cdot k_c a \cdot k_c da \right] \\ &= -\frac{\Delta P}{\eta k_c^2 t} \left[1 - \frac{2}{k_c a_0} \frac{J_1(k_c a_0)}{J_0(k_c a_0)} \right], \end{aligned} \quad (3.15)$$

em que J_1 é a função de Bessel de primeiro tipo e primeira ordem. A impedância característica da perfuração pode ser obtida pela razão entre a perda de carga e o valor médio da velocidade pela área da perfuração, como

$$\begin{aligned} Z_p = \frac{\Delta P}{\bar{u}} &= -\eta k_c^2 t \left[1 - \frac{2 J_1(k_c a_0)}{k_c a_0 J_0(k_c a_0)} \right]^{-1} \\ &= i\omega \rho_0 t \left[1 - \frac{2 J_1(k_c a_0)}{k_c a_0 J_0(k_c a_0)} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Pode-se reescrever a equação 3.16 em função da constante de perfuração k como:

$$Z_p = \frac{\Delta P}{\bar{u}} = i\omega \rho_0 t \left[1 - \frac{2 J_1(k\sqrt{-i})}{k\sqrt{-i} J_0(k\sqrt{-i})} \right]^{-1}. \quad (3.17)$$

Na adaptação de Maa [1998], considera-se cada perfuração como um tubo cilíndrico curto e estreito, sendo que a corresponde ao raio e t a profundidade da perfuração.

3.2.1 Modelos de Maa

Segundo Maa [1998], a razão da resistência pela reatância é muito alta em comparação à unidade quando $k < 1$ e muito baixa quando $k > 10$. Considerando perfurações micrométricas, a faixa viável para a constante de perfuração é exatamente para $1 < k < 10$. Maa, então, propôs uma equação para valores intermediários de k utilizando aproximações para as funções de Bessel, da forma:

$$Z_p = \frac{32\eta t}{d^2} \left(\sqrt{\frac{1+k^2}{32}} \right) + i\omega \rho_0 t \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{9+k^2}{2}}} \right). \quad (3.18)$$

Ambas as partes, resistiva e reativa, da impedância devem ser corrigidas devido a dois efeitos: resistência causada pela viscosidade na superfície do painel e reatância mássica relacionada à radiação tipo pistão em ambos lados do painel. Estes efeitos estão demonstrados na Figura 3.2.

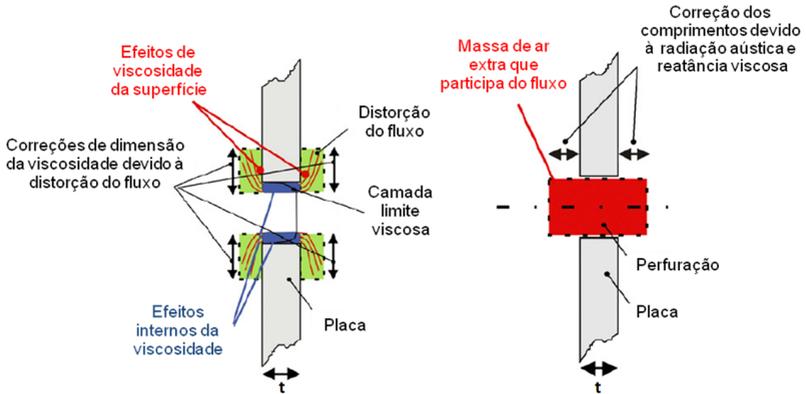


Figura 3.2: Efeitos atribuídos aos fatores de correção. Adaptado de [Atalla e Sgard, 2007]

O fator de correção da parte reativa é devido à massa de ar dentro do tubo, o qual Ingard [1953] definiu como sendo equivalente à radiação de um pistão circular em um flange infinito. O efeito surge pela massa de ar nas proximidades da entrada e saída, o qual participa do fluxo e, assim, contribui para a massa total associada à perfuração. O termo de correção da reatância é definido como

$$C_m = i\omega\rho_0(0.85d). \quad (3.19)$$

Este termo foi utilizado em todas as versões dos modelos de Maa [1975, 1987, 1998].

O fator de correção da resistência acústica é gerada pelo atrito devido à parte do escoamento de ar que se move ao longo do painel quando o ar flui para dentro e para fora da perfuração [Hou e Bolton, 2008]. Este fator surge da dissipação da energia na superfície de contato e é, em grande parte, dependente das

perdas por viscosidade. O termo proposto por Ingard [1953] e utilizado por Maa [1975] é dado por:

$$C_r = 2\sqrt{2\eta\rho_0\omega}. \quad (3.20)$$

Adicionando os termos de correção à equação 3.18, e considerando a impedância acústica do MPP normalizada pela impedância do ar, tem-se:

$$Z_{m_0} = \frac{Z_p}{\sigma Z_0} = r + i\omega m, \quad (3.21)$$

onde

$$r = \frac{32\eta t}{\sigma Z_0 d^2} \left[\left(\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} \right) + \left(\frac{\sqrt{2}}{8} k \frac{d}{t} \right) \right], \quad (3.22)$$

e

$$\omega m = \frac{\omega\rho_0}{\sigma Z_0} \left[\left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}}} \right) + \left(0.85 \frac{d}{t} \right) \right]. \quad (3.23)$$

Em ambas as equações 3.22 e 3.23, o primeiro termo em parênteses é contribuição da perfuração e o segundo é contribuição dos fatores de correção. Maa propôs três fatores de correção da resistência acústica em três artigos diferentes, conforme a Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Fatores de correção utilizados nos modelos de Maa.

Artigo	Termo de Correção
[Maa, 1975]	$\frac{\sqrt{2}}{8} k \frac{d}{t}$
[Maa, 1987]	$\sqrt{\frac{2kd}{8t}}$
[Maa, 1998]	$\frac{\sqrt{2}}{32} k \frac{d}{t}$

Pode-se determinar a razão de perfuração, descrita na equação 3.1, em função da distância entre perfurações, b , caso estas estejam arranjadas simetricamente, da forma:

$$\sigma = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{b} \right)^2. \quad (3.24)$$

As Figuras 3.3 (a) e (b) apresentam curvas obtidas para um sistema MPP, sendo que (a) representa a parte imaginária da impedância característica em termos de seus dois componentes Z_{m0} e Z_D e (b) apresenta o coeficiente de absorção deste sistema. Nota-se que quando a curva da reatância da placa perfurada, Z_{m0} , intercepta a parte negativa da reatância da cavidade, $-Z_D$, ocorre um pico de absorção. Nessas frequências, a reatância total se anula e o sistema comporta-se como um ressonador de Helmholtz em suas frequências de ressonância [Yang e Cheng, 2016]. As frequências em que a magnitude da reatância da cavidade é alta correspondem aos vales de absorção. Entre estes extremos, onde a variação da reatância da cavidade é moderada, obtém-se um alargamento da banda de frequência devido aos efeitos da viscosidade. A magnitude da reatância da cavidade é alta em baixas frequências, restringindo o uso de MPP.

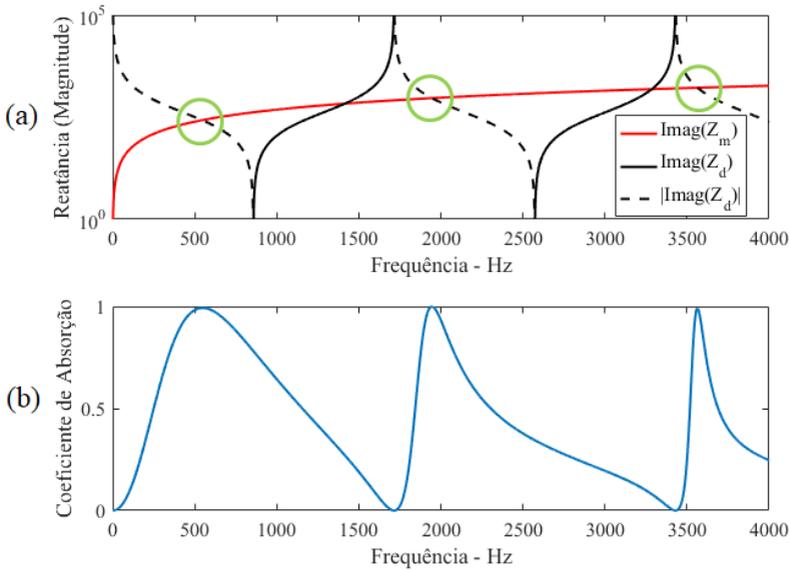


Figura 3.3: (a) Magnitude da reatância do MPP. (b) Coeficiente de absorção correspondente.

Maa [1998] descreve a constante de perfuração, k , como o parâmetro mais importante do MPP. Este, juntamente com a resistência acústica normalizada, r , e a frequência de pico de absorção máxima, f_0 , determina toda a estrutura do sistema de absorção e suas características de frequência. O coeficiente de absorção máximo ocorre na frequência de ressonância do sistema equivalente a um ressonador de Helmholtz [Yang e Cheng, 2016] e a possível largura de banda atingida pode ser obtida pela equação:

$$B_f = \pi / \cot^{-1}(1 + r) - 1. \quad (3.25)$$

B_f assume valores altos quando r também é alto. Para uma gama considerável de valores de k , a largura de banda otimizada torna-se realidade ou próximo disso. A faixa de absorção se estreita rapidamente quando k se torna muito alto, entretanto, pequenos valores de k exigem perfurações com diâmetro muito pequenos [Maa, 1998]. Concluí-se, então, que a constante de perfuração é

essencial para o dimensionamento de um MPP, bem como suas características de absorção. Maa [1998] relata que, em geral, baixos valores de k são essenciais para uma absorção sonora de banda larga, entretanto, altos valores de k se tornam importantes quando r é baixo.

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram resultados de impedância e do coeficiente de absorção, respectivamente, obtidos pelo modelo de Maa, considerando os três fatores de correção descritos na Tabela 3.1 para uma placa de $t = 0,5$ mm de espessura, separação entre perfurações $b = 3,5$ mm e profundidade da cavidade $D = 8$ mm. Três valores de diâmetro foram utilizados: 0,3; 0,5 e 0,8 mm.

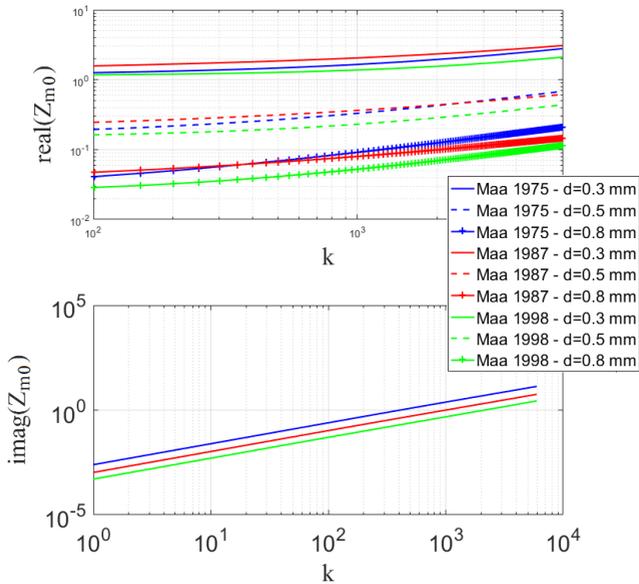


Figura 3.4: Partes real e imaginária da impedância de superfície de um MPP.

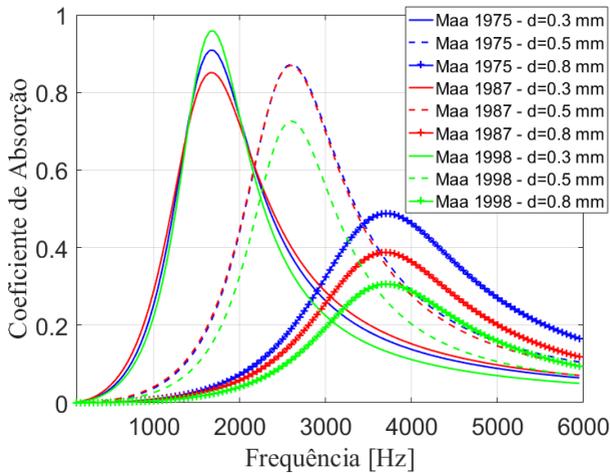


Figura 3.5: Coeficiente de absorção de um MPP para os três modelos de Maa.

Pode-se notar uma grande variação entre os resultados obtidos para cada modelo. Segundo Temiz *et al.* [2014], comparações existentes na literatura demonstraram que os fatores de correção, em particular na resistência, variam de forma significativa entre amostras. Isso é devido, principalmente, ao tipo e forma da perfuração. Este gráfico demonstra que há uma necessidade de examinar minuciosamente os fatores de correção para uma modelagem mais precisa de sistemas MPP.

3.2.2 Modificação dos Fatores de Correção

Em seu modelo, Maa [1975] combina o fluxo viscoso oscilante na solução para tubos curtos e estreitos de Crandall [1926], a qual é uma versão simplificada da derivação visco-térmica de Kirchhoff, com os fatores de correção propostos por Ingard [1953]. Desta forma, Maa deriva a equação da impedância para uma única perfuração. Mesmo assim, Ingard [1953] baseia os fatores de correção na hipótese de camada limite fina de Stokes. Assim, esse modelo não representa o comportamento acústico de painéis microperfurados para camadas limite tão

espessas quanto o raio de perfuração. Esta é uma hipótese muito simplificativa e negligencia o efeito de borda da geometria da perfuração [Temiz *et al.*, 2014].

3.2.2.1 Fatores Empíricos de Correção

O modelo exato de Maa foi inicialmente apresentado em seu artigo de 1998 [Maa, 1998], entretanto não foi aplicado. Posteriormente, Allam *et al.* [2009] publicaram uma variação para este modelo, a qual inclui duas constantes, β_r e β_m , associadas aos fatores de correção da resistência e reatância acústica do modelo de Maa, respectivamente. Utilizaram a equação exata e adicionaram os fatores de correção, da forma:

$$Z_p = i\omega\rho_0 t \left[1 - \frac{2}{k\sqrt{-i}} \frac{J_1(k\sqrt{-i})}{J_0(k\sqrt{-i})} \right]^{-1} + 0.5\beta_r C_r + i\beta_m \omega\rho_0 \frac{d}{2} \quad (3.26)$$

Apesar dos fatores de correção terem sido definidos por Ingard como $\beta_r = 2$ e $\beta_m = 1.64$, observa-se na literatura [Allam e Abom, 2011, Maa, 1975, 1998, Hou, 2009] que dados experimentais de diferentes configurações exigem diferentes constantes de ajuste para β_r . Allam e Åbom [2011] descobriram empiricamente que a forma da borda das perfurações possui forte influência no fator de correção da resistência e definiram os valores $\beta_r = 4$ para bordas agudas e $\beta_r = 2$ para bordas arredondadas.

A forma das bordas são definidas pela manufatura das mesmas, as quais podem ser perfeitamente cilíndricas com bordas bem definidas ("bordas agudas"), ou não ("bordas arredondadas"). A Figura 3.6 ilustra um exemplo para duas perfurações com diferentes bordas. O efeito de arredondamento da borda da perfuração atua principalmente na magnitude e faixa de frequência de atuação no coeficiente de absorção, tendo pouca influência na frequência de pico [Kim, 2011].

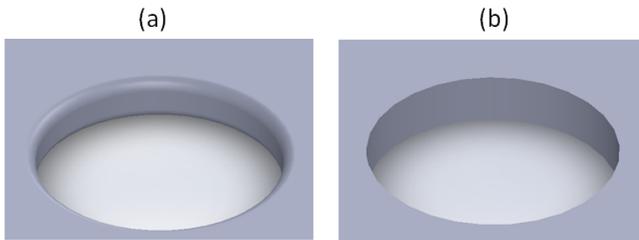


Figura 3.6: Perfuração com bordas (a) arredondada e (b) aguda.

3.2.2.2 Modelo de Kim

Kim [2011] desenvolveu um modelo simples utilizando dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*, em inglês) de um escoamento oscilatório e viscoso através de uma única perfuração para a obtenção dos fatores de correção. Em particular, a ênfase é dada na parte real da impedância acústica específica, referida como a resistência ao fluxo dinâmico, uma vez que a dissipação de energia produzida por um painel microperfurado é representada por esse termo. O autor mostra que os resultados estão, em geral, de acordo com as previsões dos modelos existentes, particularmente em altas frequências, mas que diferem significativamente nas baixas. Com base nos resultados das simulações, é proposto um novo termo β_r dinâmico, ou seja, em função da frequência.

Kim assumiu:

- escoamento incompressível;
- as perfurações são pequenas o suficiente e as velocidades de escoamento baixas o suficiente para manter o escoamento laminar;
- que não há dissipação térmica, de forma que somente são necessárias as equações da conservação da massa e a quantidade de movimento.

A Figura 3.7 mostra o modelo para uma perfuração. Apenas o fluido é modelado, demonstrado em azul na Figura, e o contato

fluido/estrutura é determinado pelas condições de contorno de não escorregamento, ou seja, possui velocidade nula em relação à superfície. As regiões de contato estão destacadas em vermelho na Figura 3.7.

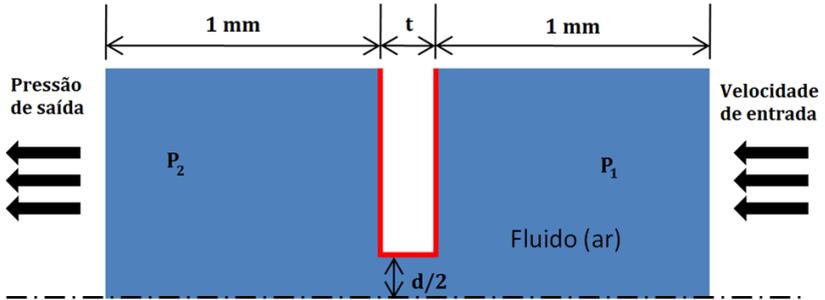


Figura 3.7: Geometria do modelo em CFD de Kim. Adaptado de [Kim, 2011].

A impedância acústica específica do painel foi calculada através da equação 3.2, onde P_1 é a pressão de entrada e P_2 a pressão de saída, a qual foi considerada igual à pressão ambiente e u é a velocidade de entrada. Todas as grandezas foram transformadas para o domínio da frequência. Para cobrir a faixa de frequência de interesse (0 - 10 kHz), a velocidade de entrada foi considerada como um pulso senoidal em 5 kHz de valor máximo de 0.1 mm/s, através de um janelamento tipo *Hanning*.

Em seu trabalho, Kim [2011] considerou a parte real da impedância como resistência de fluxo dinâmico e a parte imaginária como reatância de fluxo dinâmico. Obteve valores para β_r na equação 3.26, os quais demonstraram uma dependência da frequência e de parâmetros geométricos. Utilizou, então, o método dos mínimos quadrados para realizar ajustes de curvas e obter uma equação para β_r . Inicialmente, determinou uma equação para bordas agudas, porém realizou novas simulações considerando bordas arredondadas. Desenvolveu, então, uma equação para β_r em função da frequência, do diâmetro, da profundidade da perfuração e de um novo fator, γ , o qual chama de fator de arredondamento:

$$\beta_r = \left[1 + \left(0.03 \frac{t}{d} \right)^2 - 1.06 \frac{t}{d} + 0.26 \right] \gamma \left(16.9 \frac{t}{d} + 152.8 \right) f^{-0.5}, \quad (3.27)$$

em que $\gamma = 2a_b/t$ é o fator de arredondamento, variando entre zero para bordas agudas e 0,7 para bordas arredondadas, e a_b é o raio de arredondamento da borda, conforme a Figura 3.8.

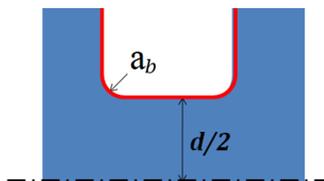


Figura 3.8: Detalhe do modelo com acabamento arredondado da perfuração. Adaptado de [Kim, 2011].

3.2.2.3 Modelo de Temiz *et al.*

Temiz *et al.* [2014] utilizaram uma abordagem semelhante à de Kim [2011], porém empregaram as equações linearizadas de Navier-Stokes diretamente no domínio da frequência. Kim havia utilizado as equações não lineares no domínio do tempo. Os autores também determinaram o diferencial de pressão ao longo da perfuração. O modelo foi realizado no software comercial COMSOL Multiphysics®v4.3b utilizando o método dos elementos finitos para perfurações de borda aguda. A Figura 3.9 demonstra um esquema do modelo computacional.

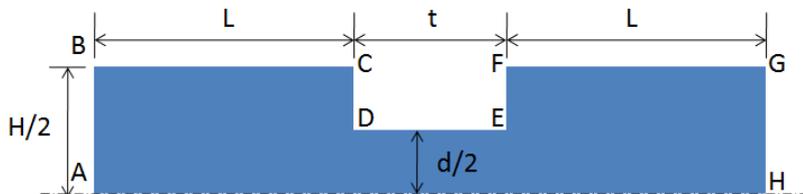


Figura 3.9: Modelo computacional de Temiz *et al.*. Adaptado de [Temiz *et al.*, 2014]

O diâmetro e comprimento utilizados para o fluido a montante e a jusante da perfuração foi calculado como $H = d/\sqrt{\sigma}$ e $L = 3H$, respectivamente, para garantir que o efeito da perfuração não influencie as condições de contorno na entrada e saída.

A impedância característica para uma perfuração é calculada pela diferença de pressão entre os dois lados da mesma dividida pelo fluxo volumétrico por área em que o escoamento ocorre, conforme a equação:

$$P_1 - P_2 = P_m - P_j - i2L\rho_0\omega U, \quad (3.28)$$

em que P_m e P_j são as pressões a montante e a justante na entrada do volume de controle, respectivamente, e U é a velocidade uniforme imposta na entrada. As condições de contorno utilizadas foram:

- $|AB|$ - velocidade de entrada;
- $|BC|$ e $|FG|$ - condição de escorregamento;
- $|CD|$, $|DE|$ e $|EF|$ - condição de não escorregamento;
- $|GH|$ - sem viscosidade, pressão de saída nula;
- $|AH|$ - axissimetria radial.

Ao contrário do trabalho de Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] obtiveram equações para ambos os fatores de correção em função da constante de perfuração k :

$$\beta_r = -0.12/k^3 + 2.30/k^2 + 2.76/k + 1.48, \quad (3.29)$$

e

$$\beta_m = -0.66/k^2 + 1.49/k + 1.56. \quad (3.30)$$

3.2.3 Modelo de Fluido Equivalente

Atalla e Sgard [2007] apresentaram um modelo simples e geral para diferentes configurações de painéis de absorção tipo MPP e tela utilizando o método da matriz de transferência. Este modelo considera uma placa perfurada infinita acoplada em ambos os lados a um fluido semi-infinito. Em particular, demonstram que um MPP pode ser modelado como um fluido equivalente seguindo o modelo de material poroso de estrutura rígida de Johnson-Champoux-Allard [1991] com uma tortuosidade equivalente. Essa tortuosidade depende da interface de contato entre a placa e o meio adjacente. O modelo de fluido equivalente pode ser usado para diferentes configurações considerando a geometria do painel e a interface multicamada. Para simplificar a derivação, assumem perfurações cilíndricas.

A impedância no interior do tubo e na frente do painel é regida por efeitos viscosos e inerciais. Se o diâmetro da perfuração for inferior a 1 mm, existe absorção por perdas visco-térmicas. A equação exata para a impedância de uma perfuração é dada por [Atalla e Sgard 2007]

$$Z_p = i\omega\rho_e t, \quad (3.31)$$

sendo ρ_e a densidade efetiva que está relacionada à densidade do ar pela tortuosidade dinâmica α_d ($\rho_e = \rho_0\alpha_d$). A densidade efetiva leva em consideração os efeitos viscosos e inerciais, sendo definida por

$$\rho_e = \rho_0\alpha_\infty \left(1 + \frac{\sigma_r\sigma}{i\omega\rho_0\alpha_\infty} G_f(\omega) \right), \quad (3.32)$$

em que α_∞ é a tortuosidade geométrica, σ_r a resistividade ao fluxo e

$$G_f(\omega) = \sqrt{\left(1 + i \frac{4\omega\rho_0\alpha_\infty^2\Lambda}{\sigma_r^2\sigma^2\Lambda^2} \right)}, \quad (3.33)$$

sendo Λ o comprimento característico viscoso. A tortuosidade geométrica, a resistividade ao fluxo e o comprimento viscoso dependem da forma da perfuração. Para uma perfuração circular, o comprimento viscoso é igual ao raio de perfuração, $\Lambda = a = d/2$. A resistividade ao fluxo é definida como

$$\sigma_r = \frac{8\eta}{\sigma a^2}. \quad (3.34)$$

O arranjo de camadas influencia na tortuosidade geométrica. Para um painel com perfurações circulares que radiam ao ar em ambas as extremidades, a tortuosidade geométrica fica

$$\alpha_\infty = 1 + \frac{2\epsilon_e}{t}, \quad (3.35)$$

em que ϵ_e é uma correção do comprimento induzido pela radiação do ar nos lados da placa, ou seja, é um fator de correção da reatância mássica. O comprimento de correção é uma função da razão de perfuração e do raio:

$$\epsilon_e = \epsilon_0(1 - 1,14\sqrt{\sigma}) = 0,48\sqrt{S_p}(1 - 1,14\sqrt{\sigma}), \quad (3.36)$$

sendo $\epsilon_0 = 0,48\sqrt{S_p}$. Para o caso de uma placa com perfurações circulares, $\epsilon_0 = 0,48\sqrt{\pi a^2} = 0,85a$.

Até aqui, nenhuma aproximação para alta e baixa frequência foi considerada, portanto, a equação 3.31 é válida para placas micro e macro perfuradas. A equação 3.31 aproximada fica

$$Z_{p(AS)} = \left(\frac{2t}{a} + 4\frac{\epsilon_e}{a} \right) C_r + i\omega\rho_0(t + 2\epsilon_e) + i \left(\frac{2t}{a} + 4\frac{\epsilon_e}{a} \right) C_r. \quad (3.37)$$

É importante notar que o fator de correção da resistência acústica, C_r é a mesma que a utilizada por Maa.

A impedância acústica específica de um painel microperforado, incluindo as impedâncias das perfurações e os fatores de

correção, é dada por

$$Z_{M(AS)} = \frac{i\omega\rho_0 t}{\sigma} \alpha_\infty \left(1 + \frac{\sigma_r \sigma}{i\omega\rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{\left(1 + i \frac{4\omega\rho_0 \alpha_\infty^2 \eta}{\sigma_r^2 \sigma^2 \Lambda^2} \right)} \right), \quad (3.38)$$

e em forma aproximada, por

$$Z_{M(AS)} = (1 + i) \left(\frac{2t}{a} + 4 \frac{\epsilon_e}{a} \right) \frac{C_r}{\phi} + \frac{i\omega\rho_0}{\phi} (t + 2\epsilon_e). \quad (3.39)$$

3.2.4 Análise de Sensibilidade e Comparação dos Modelos

Nesta seção é realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros geométricos, bem como uma comparação entre os modelos de MPP descritos anteriormente.

Para a primeira, é utilizada somente a variação de Allam *et al.* [2009] para a equação 3.26 de Maa, pois o efeito da variação dos parâmetros geométricos é similar para todos os modelos. Para cada análise verifica-se o efeito da sensibilidade paramétrica de cada configuração no coeficiente de absorção pela frequência e na parte real da impedância de superfície do MPP ($real(Z_{m_0})$) em função da constante de perfuração k .

Na segunda parte, a comparação é realizada entre os modelos e variações propostas por Allam *et al.* [2009], Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] e o modelo de fluido equivalente de Atalla *et al.* [2007]. O modelo aproximado de Maa [1975, 1987, 1998] não é utilizado, pois é representado pelo modelo exato com a variação dos fatores de correção propostos por Allam *et al.* [2009].

3.2.4.1 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros Geométricos

A análise de sensibilidade dos parâmetros estão demonstrados pelos correspondentes valores do coeficiente de absorção e da parte real da impedância. Não utilizou-se a parte imaginária da impedância, pois os valores mantém-se sempre iguais,

exceto quando analisando a profundidade da cavidade D . Os valores dos parâmetros geométricos utilizados na análise estão demonstrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores dos parâmetros

Parâmetro	Valor Fixo	Variações
d (mm)	0,3	0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7
t (mm)	0,3	0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1
D (mm)	10	5; 10; 20; 35; 50
σ (%)	1	0,05; 0,5; 1; 2; 5
β_r	4	2; 3; 4
β_m	1,64	-

Duas análises de sensibilidade do diâmetro das perfurações foram realizadas devido à correlação entre o mesmo e a razão de perfuração (porosidade). A primeira, ilustrada nas Figuras 3.10 e 3.11, apresentam a variação do diâmetro nominal das perfurações considerando $\sigma = 1\%$, ou seja, mesmo variando o tamanho da perfuração, a porosidade continua a mesma.

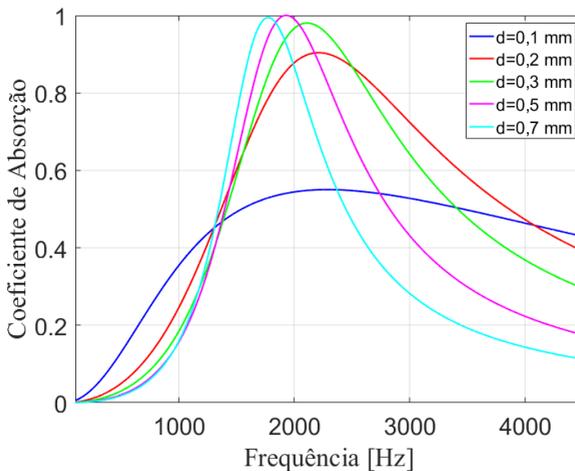


Figura 3.10: Coeficiente de absorção de um MPP com variação do diâmetro da perfuração com $\sigma = 1\%$.

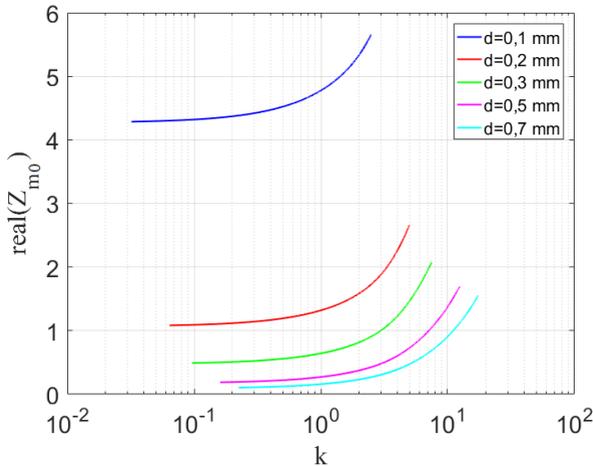


Figura 3.11: Parte real da impedância de um MPP com variação do diâmetro da perfuração com $\sigma = 1\%$

Ao considerar variações do diâmetro nominal com σ fixo, nota-se que há pouca variação do pico de frequência, porém há grande influência na largura da banda de absorção. Ressalta-se que a curva de absorção mais abrangente ocorre quando a parte real da impedância do MPP, r , possui valores maiores, como é o caso dos valores obtidos para $d = 0,1$ mm, entretanto os valores de absorção com melhor desempenho surgem quando r é mais próximo do valor unitário, como o caso com $d = 0,2$ mm. Nota-se também que à medida em que a razão d/t aumenta, após o valor unitário, a banda de absorção se estreita e o pico desloca-se levemente para baixas frequências.

A segunda análise de sensibilidade do diâmetro da perfuração, apresentada nas Figuras 3.12 e 3.13, considera σ variando juntamente com o diâmetro. Esta análise é mais próxima da aplicação real, pois σ é função de d^2 . Os valores calculados para σ estão indicados na janela de legenda na própria Figura.

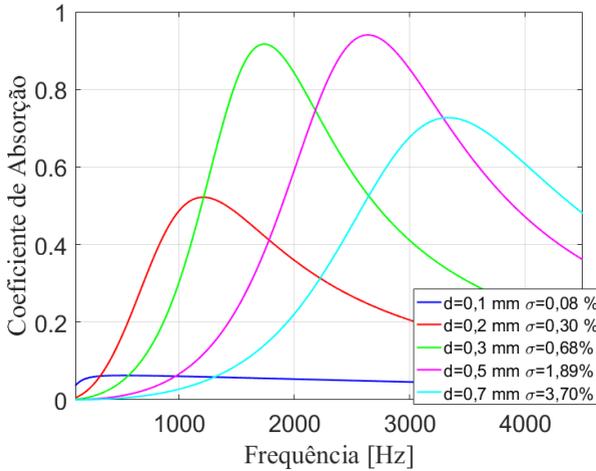


Figura 3.12: Coeficiente de absorção de um MPP com variação do diâmetro da perfuração e σ dependente de d .

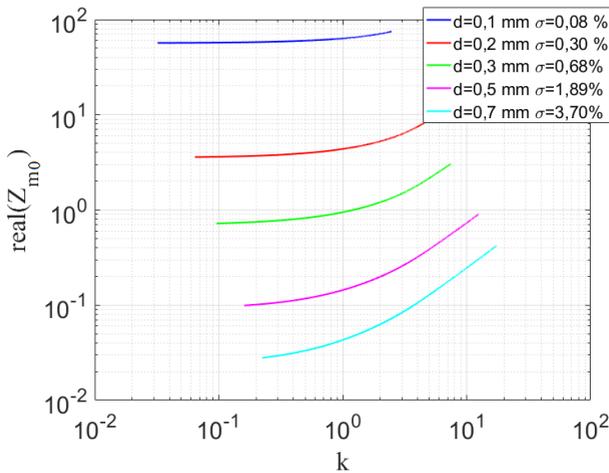


Figura 3.13: Parte real da impedância de um MPP com variação do diâmetro da perfuração e σ dependente de d .

A segunda análise é mais aplicável ao painel de interior aeronáutico microperfurado, pois o valor da razão de perfuração é relacionado ao diâmetro da perfuração em cada núcleo. Pode-se notar forte influência da variação do diâmetro no coeficiente de absorção, tanto na magnitude, pico de frequência e bandas

atingidas. Ao verificar os valores de k e r , nota-se que a melhor absorção está relacionada a valores de r baixo e k mais alto, o que corrobora os relatos de Maa [1998].

As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam as curvas obtidas variando apenas a razão de perfuração σ . Nota-se forte influência da porosidade no coeficiente de absorção. Quanto maior a porosidade, maior a frequência de pico de absorção, f_0 , e a banda atingida. Neste caso, a absorção otimizada encontra-se entre 1 e 2%, com baixos valores de r .

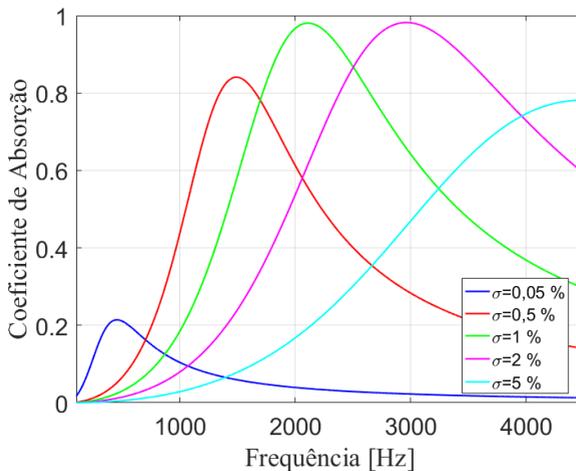


Figura 3.14: Coeficiente de absorção de um MPP com variação da razão de perfuração σ .

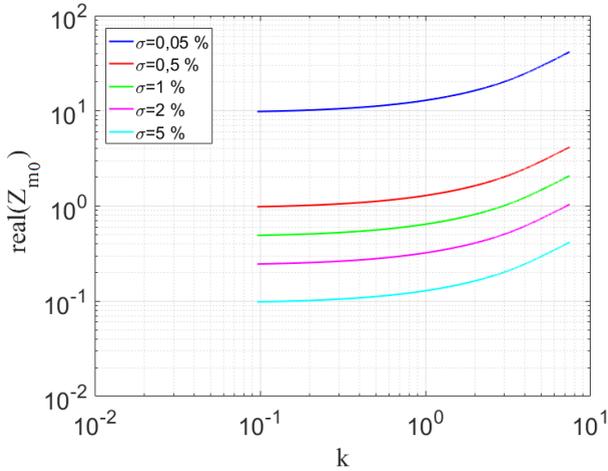


Figura 3.15: Parte real da impedância de um MPP com variação da razão de perfuração σ .

A Figura 3.16 apresenta as curvas obtidas variando apenas a profundidade da cavidade. Este parâmetro possui somente influência na parte imaginária da impedância. Nota-se que o efeito no coeficiente de absorção está diretamente relacionado ao pico f_0 , ou seja, quanto maior a profundidade, menor f_0 .

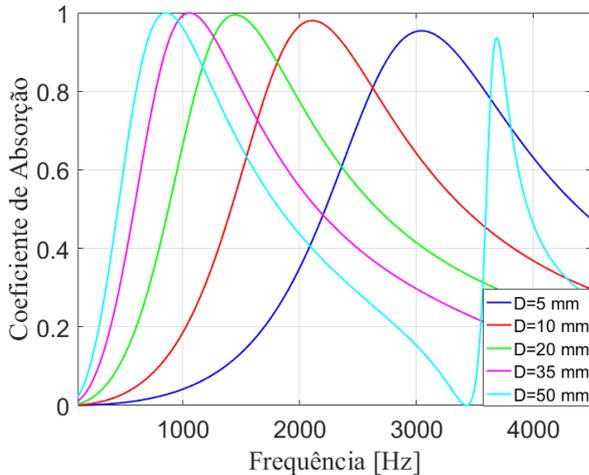


Figura 3.16: Coeficiente de absorção de um MPP com variação da profundidade da cavidade D .

As Figuras 3.17 e 3.18 mostram as curvas obtidas para variações da profundidade da perfuração t . Nota-se que com a diminuição da espessura há deslocamento do pico de ressonância para frequências mais altas e o alargamento da banda atingida.

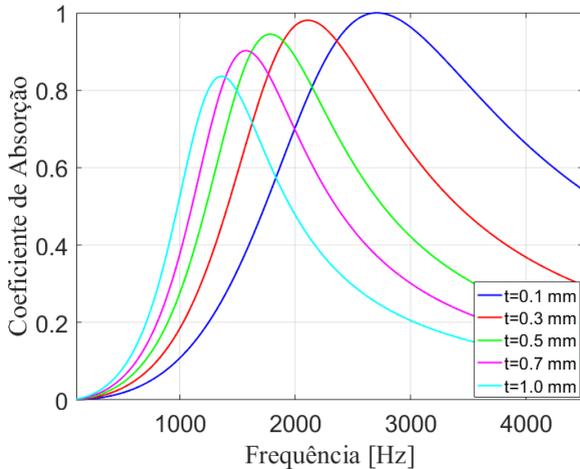


Figura 3.17: Coeficiente de absorção de um MPP com variação da espessura da placa t .

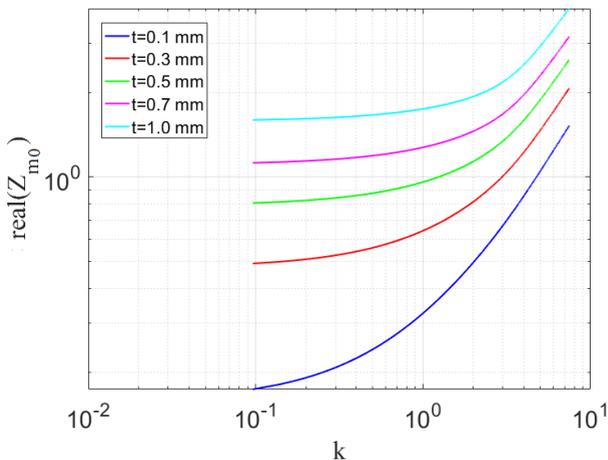


Figura 3.18: Parte real da impedância de um MPP com variação da espessura da placa, t .

As Figuras 3.19 e 3.20 apresentam as curvas obtidas variando o fator de correção da resistência acústica para duas situações diferentes: (i) $r \approx 1$, com razão $d/t = 1$ e $\sigma = 0,5\%$; (ii) $r \ll 1$, $d/t = 1,67$ e $\sigma = 2,5\%$.

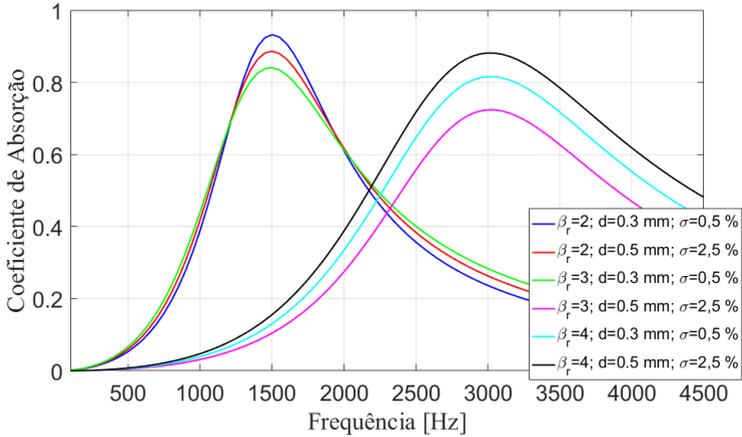


Figura 3.19: Coeficiente de absorção de um MPP com variação do fator de correção da resistência β_r .

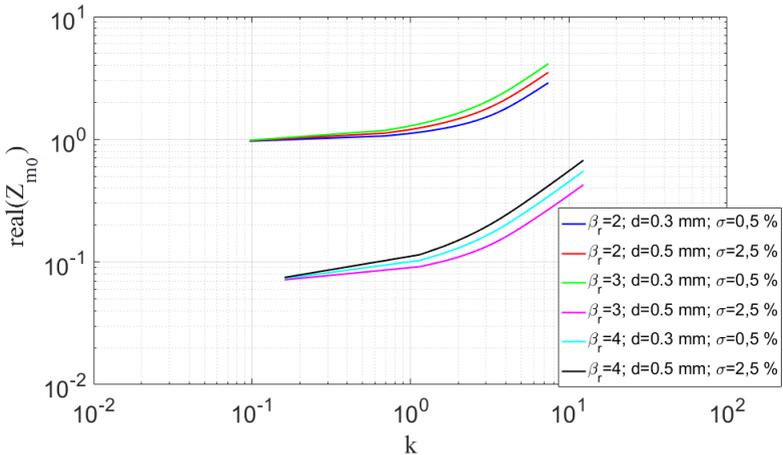


Figura 3.20: Parte real da impedância de um MPP com variação do fator de correção da resistência β_r .

Nota-se que o fator de correção influencia principalmente no nível de absorção, não exercendo influência na frequência f_0 e pouca influência na banda de frequência de atuação. Observa-se que este parâmetro age de forma inversa entre as duas situações. Esta análise também serve para comparar valores de r e k , onde as curvas da configuração (i) possuem $r \approx 1$ e $0.1 < k < 10$, conferindo picos um pouco superiores em $f_0 \approx 1500\text{Hz}$, com curvas mais estreitas. Neste caso, quanto maior β_r , menor a absorção. Na segunda configuração (ii), encontra-se $r \ll 1$ e $0.17 < k < 17$, gerando uma absorção mais abrangente em $f_0 \approx 3000\text{ Hz}$ e quanto maior β_r , maior a absorção. Isto indica que para valores maiores de k , quanto menor r , maior a absorção sonora.

3.2.4.2 Comparação entre Modelos

Uma comparação é realizada entre os modelos e variações propostas por Allam *et al.* [2009], Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] e o modelo de fluido equivalente de Atalla *et al.* [2007]. Foram consideradas as formas da borda da perfuração, ou seja, aguda ou arredondada. Quatro configurações foram utilizadas nesta análise, sendo duas para cada forma de borda, mostradas na Tabela 3.3

Tabela 3.3: Valores utilizados na comparação entre modelos

Parâmetro	C1	C2	C3	C4
β_r - Allam 2009	4	4	2	2
γ - Kim 2011	0	0	1	1
r	≈ 1	$\ll 1$	≈ 1	$\ll 1$
d [mm]	0.3	0.5	0.3	0.5
t [mm]	0.3	0.3	0.3	0.3
D (mm)	10	10	10	10
σ (%)	0.5	2.5	0.5	2.5

As Figuras 3.21 e 3.22 apresentam a comparação entre os modelos para o coeficiente de absorção e para a parte real da

impedância de superfície em função da frequência considerando bordas agudas nas configurações C1 e C2, respectivamente.

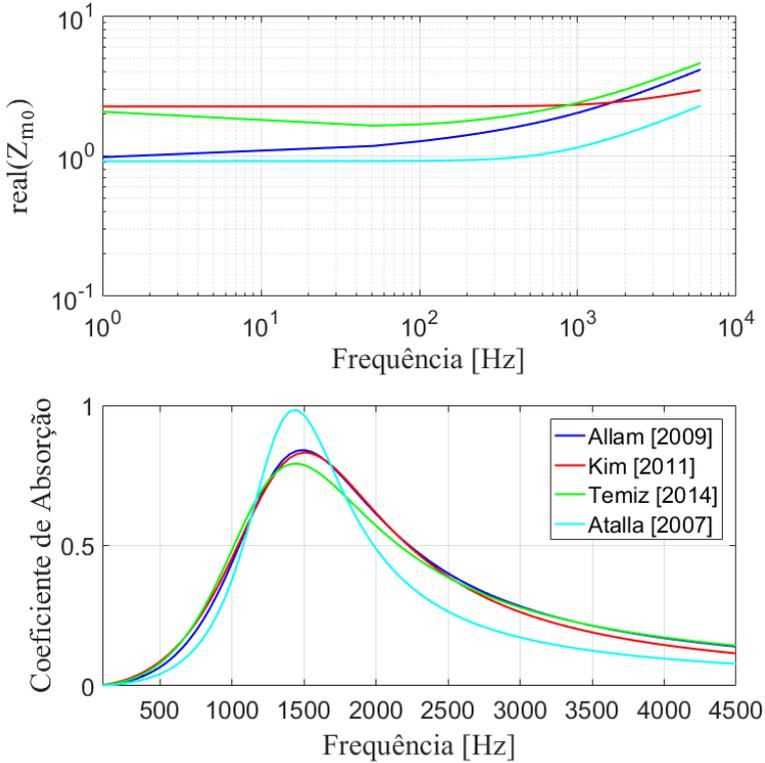


Figura 3.21: Comparação entre α e $\text{real}(Z_{m0})$ dos modelos de Allam *et al.* [2009], Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] e Atalla *et al.* [2007] para C1.

Para a configuração C1, nota-se divergência entre valores de r que, entretanto, não se reflete no coeficiente de absorção, o que indica que a reatância possui maior influência. Ademais, o modelo de Atalla [2007] resulta em maior absorção no pico, porém com menor abrangência na frequência.

Na configuração C2, a diferença em r apresenta maior influência no coeficiente de absorção. Neste caso, o modelo de fluido equivalente subestima o coeficiente de absorção em

comparação aos demais.

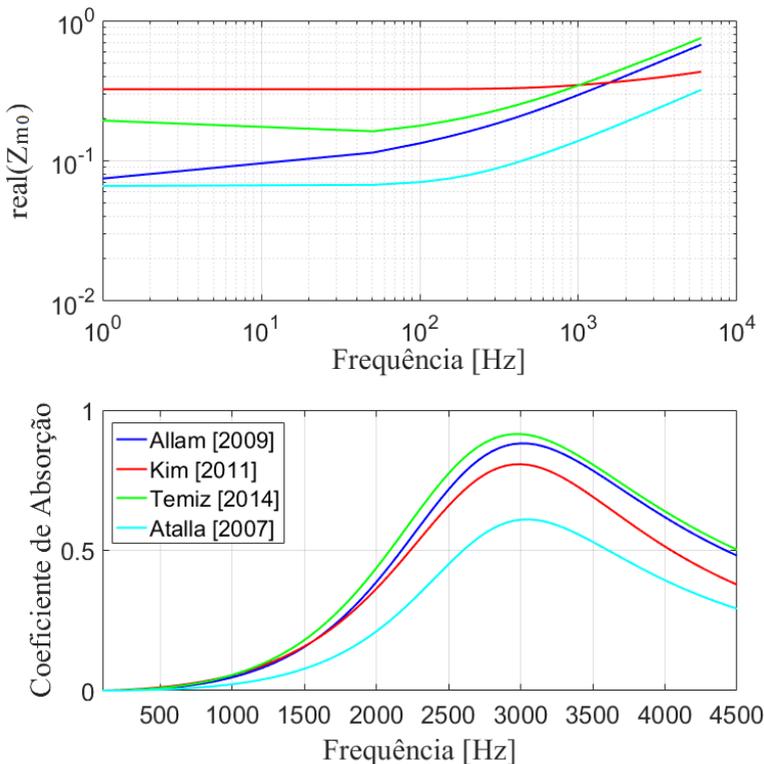


Figura 3.22: Comparação entre α e $\text{real}(Z_{m0})$ dos modelos de Allam *et al.* [2009], Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] e Atalla *et al.* [2007] para C2.

As Figuras 3.23 e 3.24 apresentam a comparação considerando bordas arredondadas nas configurações C3 e C4, respectivamente.

Na configuração C3, r possui valor próximo à unidade com exceção ao modelo de Temiz [2014], no qual $r \approx 2$. Isto é evidenciado no coeficiente de absorção no qual apenas este modelo subestima a absorção em comparação aos demais. Pode-se notar que quando r se aproxima do valor unitário o coeficiente de absorção tende ao valor máximo.

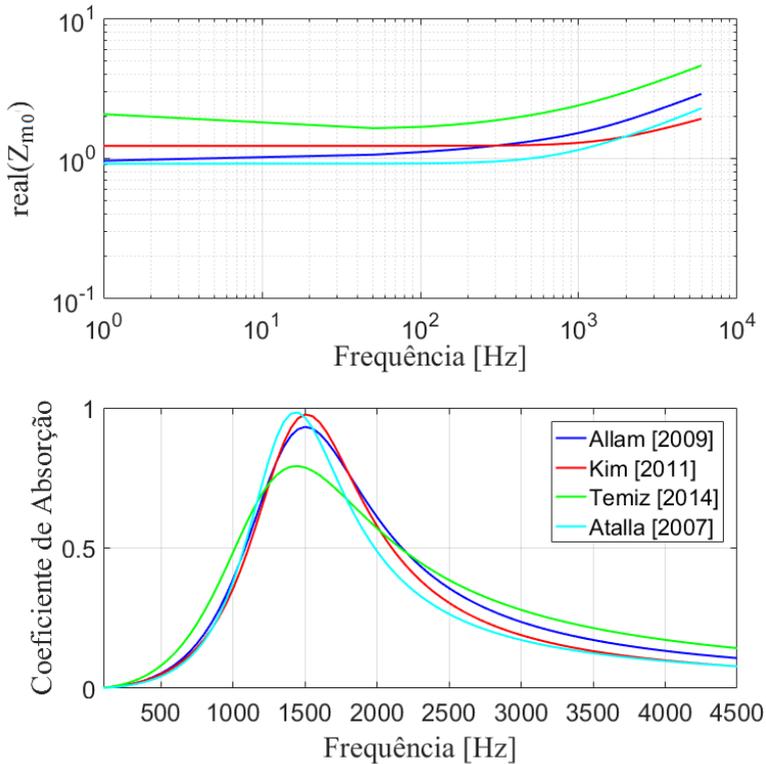


Figura 3.23: Comparação entre α e $real(Z_{m0})$ dos modelos de Allam *et al.* [2009], Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] e Atalla *et al.* [2007] para C3.

Considerando C4, os valores de r mostram-se pouco relacionados ao coeficiente de absorção. Novamente, o modelo de Temiz [2014] demonstra pouco correlacionamento entre os outros modelos.

Em geral, os modelos de Maa, representado pela variação de Allam [2009], e Kim [2011] apresentam resultados similares para ambas as formas de borda. Utilizando estes como referência, pode-se dizer que o modelo de Temiz [2014] se aproxima melhor quando são consideradas bordas agudas e o modelo de fluido equivalente de Atalla [2007] com bordas arredondadas.

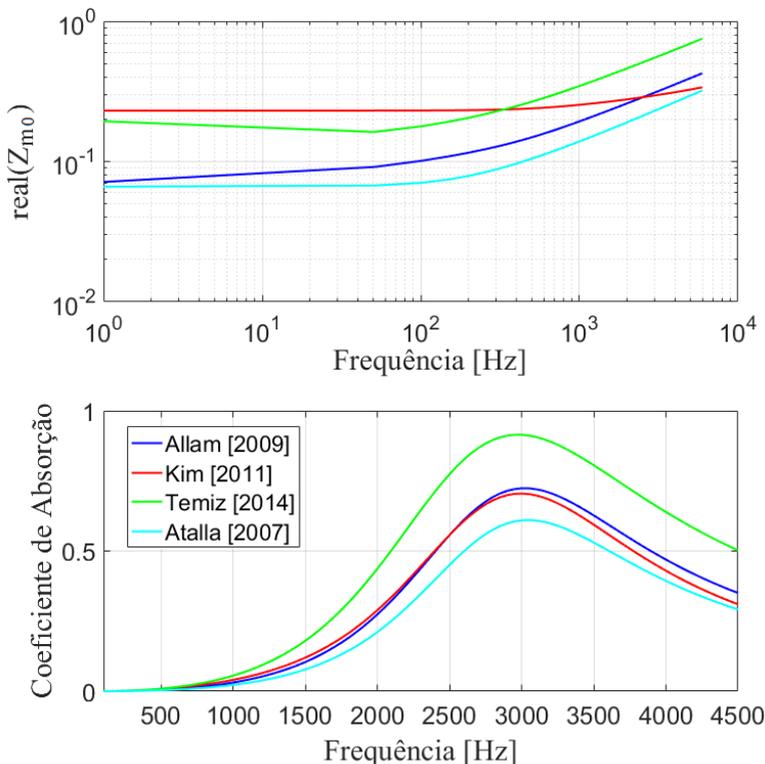


Figura 3.24: Comparação entre α e $real(Z_{m0})$ dos modelos de Allam *et al.* [2009], Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] e Atalla *et al.* [2007] para C4.

3.3 Modelo com Cavidade Subdividida

A porosidade de um MPP, definida pela equação 3.1, é uma simples relação de área aberta (área da perfuração) pela área total do painel. No caso do painel de interior aeronáutico microperfurado, por possuir cavidades subdivididas causadas pelo núcleo em *honeycomb*, esta relação somente pode ser utilizada quando todos os núcleos possuem perfurações, o que torna o modelo limitado a apenas um tipo de aplicação. Este é o caso dos modelos publicados por Pan *et al.* [2005] e Sakagami *et*

al. [2010]. O primeiro utiliza as equações de Maa para modelar um painel com núcleos subdivididos, enquanto que o segundo desenvolve um equacionamento novo a partir das integrais de Helmholtz-Kirchhoff. Entretanto, ambos são limitados a apenas uma aplicação, apresentada na Figura 3.25, em que as perfurações na placa sob incidência sonora possui perfurações para todos os núcleos e apenas um diâmetro de perfuração é utilizado.

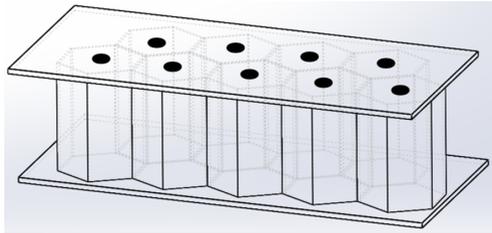


Figura 3.25: MPP com perfurações de diâmetro único em todos os núcleos.

Devido à necessidade de estender a utilização dos modelos de MPP, desenvolveu-se uma modificação que considera distribuições não homogêneas na superfície microperfurada. Duas novas aplicações são abordadas: (1) quando o número de perfurações é menor que o número de núcleos e (2) quando há mais de um diâmetro de perfuração na distribuição entre superfície e núcleo. Estas aplicações estão ilustradas na Figura 3.26.

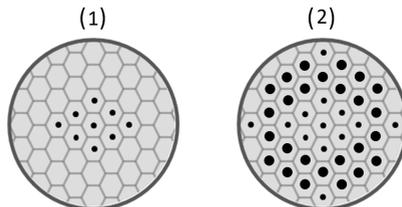


Figura 3.26: Aplicações alternativas de perfuração no MPP.

Para estas aplicações, deve-se separar a razão de perfuração, denominada porosidade, em duas partes. A primeira consiste na

porosidade do núcleo, que é uma relação da área da perfuração pela área do núcleo. Este representa um elemento único da cavidade subdividida. A porosidade do núcleo é definida como a razão da área da perfuração pela área transversal do núcleo, ou seja,

$$\sigma_h = S_p / S_{hi}, \quad (3.40)$$

onde S_{hi} é a área de superfície interna do núcleo. No caso de painéis *honeycomb*, o núcleo possui formato hexagonal. Considerando um hexágono regular, ou seja, com lados iguais, a área transversal interna é dada por:

$$S_{hi} = \frac{3L_h^2\sqrt{3}}{2}, \quad (3.41)$$

onde L_h é o lado do hexágono, sem considerar a espessura da parede do núcleo.

A porosidade do núcleo, σ_h , é aplicada ao modelo de Maa e suas variações, substituindo a razão de perfuração na equação 3.21. Ao utilizar a equação 3.40, a impedância é calculada somente para cada elemento da cavidade subdividida.

Uma equação genérica para a impedância total pode ser obtida utilizando uma analogia acústica a um circuito elétrico equivalente para n diferentes diâmetros de perfuração em paralelo. A Figura 3.27 mostra um esquema do MPP com cavidades subdivididas (a) e uma analogia a um circuito elétrico equivalente com n impedâncias em paralelo (b).

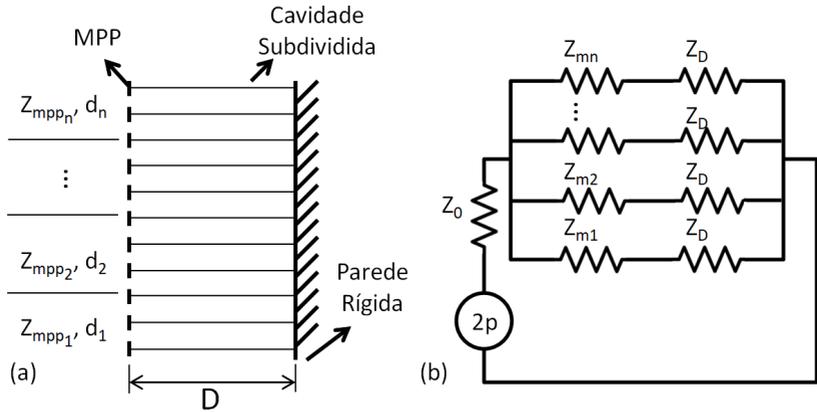


Figura 3.27: (a) Esquema do MPP com cavidades subdivididas e (b) circuito acústico equivalente para n impedâncias em paralelo.

A impedância acústica equivalente pode ser calculada por

$$\frac{1}{Z_t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{mpp_i}}. \quad (3.42)$$

Pode-se notar que esta equação considera igualmente cada impedância, assim, um fator de correção deve considerado.

Para calcular a impedância total é necessário relacionar a área dos núcleos perfurados para cada diâmetro de perfuração d_i e a área total do painel. Para tal propósito, é introduzida a segunda porosidade, denominada porosidade relativa, definida por

$$\sigma_{n_i} = n_{p_i} / n_n, \quad (3.43)$$

onde n_{p_i} é o número de perfurações de cada i -ésimo diâmetro de perfuração utilizado e n_n é o número de núcleos da placa, obtido pela relação entre a área total e a área de superfície de cada núcleo, $S_{he} = 1,5L_{he}^2\sqrt{3}$, sendo $L_{he} = L_h + t_h$ e t_h a espessura da parede do núcleo. Observa-se que, novamente, é utilizada a área do núcleo. Assim, o lado do hexágono L_h torna-se um parâmetro de extrema importância, pois possui influência em ambas as porosidades. Calcula-se, então, a impedância

total, considerando n diferentes diâmetros na mesma placa microperfurada, por:

$$\frac{1}{Z_t} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{n_i}}{Z_{mpp_i}}. \quad (3.44)$$

Duas análises de sensibilidade complementares considerando o modelo com cavidade subdividida são apresentadas variando-se a porosidade do núcleo σ_h e a porosidade relativa σ_{n_i} . Os valores fixos utilizados são os mesmos descritos na Tabela 3.2 com adição de $L_h = 2$ mm. Os novos parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 3.4. Somente o modelo de Allam *et al.* [2009] para bordas agudas foi utilizado na análise.

Tabela 3.4: Valores dos parâmetros

Parâmetro	Valor Fixo	Variações
L_h (mm)	2	-
σ_h (%)	1	0,05; 0,5; 1; 2; 5
σ_{n_i} (%)	1	0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1

A Figura 3.28 apresenta o coeficiente de absorção obtido variando apenas a porosidade do núcleo σ_h e mantendo fixo o valor de $\sigma_{n_i} = 100\%$, considerando apenas um diâmetro de perfuração. Os valores do coeficiente de absorção são iguais aos valores apresentados na Figura 3.14, pois a porosidade relativa de 100% indica que todos os núcleos estão perfurados. Esta é a única aplicação para a qual os modelos clássicos podem ser utilizados. A Figura 3.29 apresenta o coeficiente de absorção obtido variando-se σ_{n_i} e mantendo $\sigma_h = 1\%$.

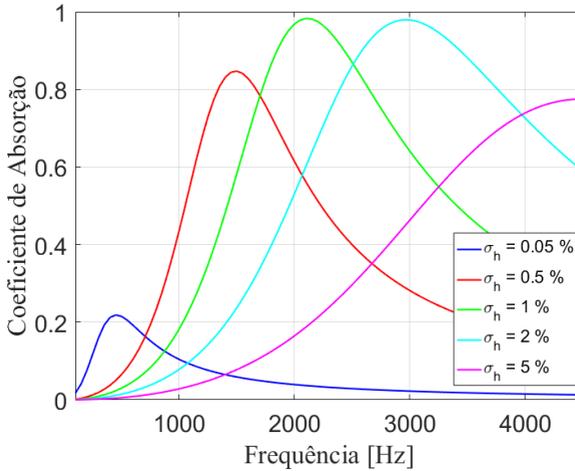


Figura 3.28: Coeficiente de absorção de um MPP com cavidades subdivididas variando σ_h e mantendo $\sigma_{n_i} = 100\%$.

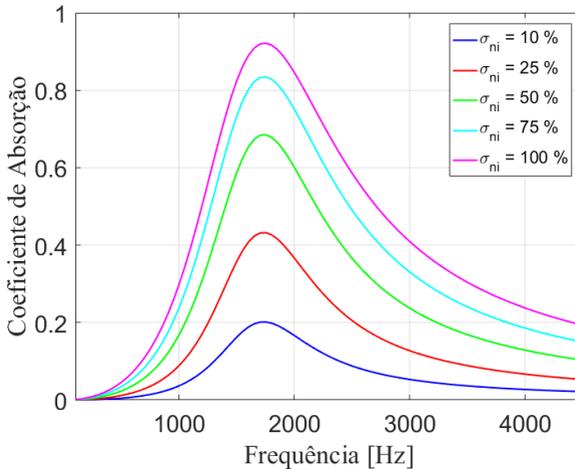


Figura 3.29: Coeficiente de absorção de um MPP com cavidades subdivididas variando σ_{n_i} e mantendo $\sigma_h = 1\%$.

Nota-se a variação da magnitude da absorção com a diminuição da relação de área aberta. Esta Figura corresponde à aplicação (1), ilustrada na Figura 3.27. Ao utilizar os modelos clássicos para esta aplicação, obtém-se somente a curva para $\sigma_{n_i} = 100\%$.

A formulação do modelo para cavidades subdivididas pode ser aplicado ao MPP com perfurações de múltiplos diâmetros, resultando em uma banda de frequência de absorção mais ampla. Esta solução é adequada à aplicação (2), ilustrada na Figura 3.27, pois não altera nenhuma das propriedades intrínsecas ao painel de interior. Isto pode ser observado na Figura 3.30, a qual demonstra uma configuração de MPP com três diâmetros diferentes em paralelo.

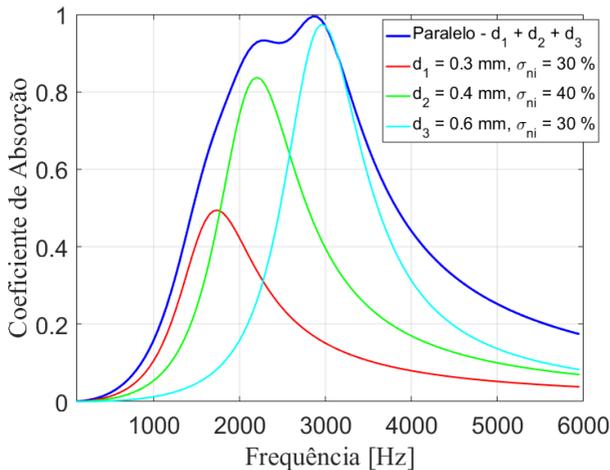


Figura 3.30: Coeficiente de absorção de um MPP com três diâmetros de perfuração em paralelo.

Para verificar a abrangência da configuração em paralelo, uma comparação foi realizada considerando o modelo clássico de Maa para cada diâmetro separadamente, ou seja, com $\sigma_{ni} = 100\%$. Esta comparação é apresentada na Figura 3.31.

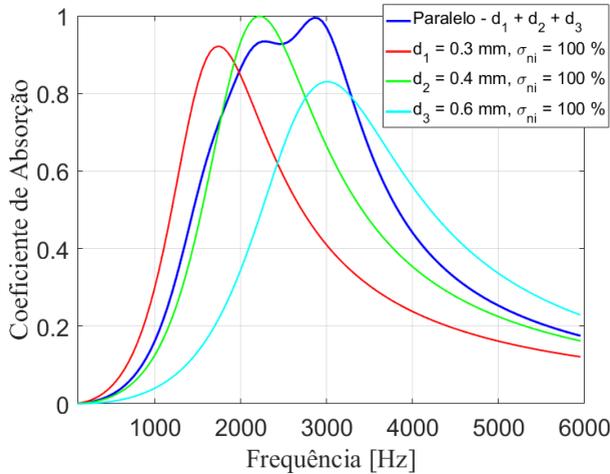


Figura 3.31: Coeficiente de absorção de um MPP três diâmetros de perfuração em paralelo.

Nota-se que, separadamente, nenhuma das três configurações com diâmetro único consegue uma maior abrangência que a configuração em paralelo.

3.4 Modelo de Materiais Porosos com Estrutura Rígida

Esta seção descreve o modelo de fluido equivalente para materiais porosos de estrutura rígida de Johnson-Champoux-Allard (JCA). Este modelo será aplicado na próxima seção, juntamente com o método da matriz de transferência com o intuito de demonstrar a aplicabilidade de múltiplas camadas de MPP com material poroso e os benefícios na absorção sonora. Apesar da aplicação em foco nesta Tese não incluir MPP multicamadas e nem a utilização em conjunto com materiais porosos, decidiu-se apresentar a modelagem dos mesmos, pois pode ser de grande valia em estudos futuros. Portanto, o modelo JCA será apresentado brevemente, sem demais aprofundamentos nos mecanismos de absorção.

O MPP em si possui baixa resistência acústica e para melhorar tais características e, conseqüentemente, aumenta a absorção,

é comum usar uma camada de material poroso atrás do painel perfurado. Uma vez que o MPP já tem sua resistência acústica otimizada, a adição de material poroso causaria uma resistência muito alta, resultando em redução da absorção. No entanto, foi demonstrado [Sakagami *et al.*, 2011] que, quando os parâmetros são escolhidos adequadamente, a resistência acústica adicional do material poroso pode melhorar a banda de absorção, depreciando ligeiramente os picos já existentes devido às microperforações. Este efeito depende fortemente da resistividade ao fluxo, característica intrínseca ao material poroso.

Do ponto de vista acústico, um material poroso em contato com uma superfície rígida pode ser modelado como um fluido equivalente quando sob uma das duas hipóteses: possui uma estrutura rígida (uma moldura imóvel), o que é plausível para frequências acima da frequência de desacoplamento [Allard, 1993]; ou quando o material poroso tem uma densidade muito baixa, como uma lã de vidro de qualidade aeronáutica, de modo que sua estrutura pode ser considerada como móvel, mas que não se deforma. No último, a propagação da onda através da fase sólida também é negligenciada, mas a densidade efetiva do fluido equivalente é corrigida para que a inércia da estrutura seja considerada.

A equação da onda para um fluido equivalente pode ser escrita como:

$$\Delta p + \left(\frac{\rho_{eq}}{K_{eq}} \right) \omega^2 p = 0, \quad (3.45)$$

em que $\rho_{eq} = \rho_f / \phi$ é a densidade efetiva, $K_{eq} = K_f / \phi$ o módulo de compressibilidade efetivo do fluido equivalente, ρ_f e K_f são os mesmos para a fase fluida e ϕ a porosidade do material. No caso de materiais flexíveis, ρ_{eq} pode ser substituído pela densidade equivalente flexível [Panneton, 2007]:

$$\rho_{flex} \approx \frac{\rho_t \rho_{eq} - \rho_0^2}{\rho_t + \rho_c q - 2\rho_0} = 0, \quad (3.46)$$

sendo ρ_t a densidade do material poroso.

Dentre os modelos existentes para calcular ρ_f e K_f , o modelo JCA foi escolhido. A popularidade deste modelo deve-se à algumas de suas vantagens: aplica-se a ampla faixa de frequência e a vários tipos de materiais porosos; utiliza cinco parâmetros com significado físico, os quais são a resistividade ao fluxo σ_r , porosidade ϕ , tortuosidade α_∞ , comprimento característico viscoso Λ e comprimento característico térmico Λ' . A densidade equivalente é obtida pela expressão:

$$\rho_f = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\phi \sigma}{i \omega \rho_0 \alpha_\infty} \left(1 + i \frac{4 \omega \rho_0 \eta \alpha_\infty^2}{\sigma_r^2 \phi^2 \Lambda^2} \right)^{1/2} \right], \quad (3.47)$$

e o módulo de compressibilidade por

$$K_f = \gamma_c P_0 \left(\gamma_c - \frac{\gamma_c - 1}{\left[1 + \frac{8 \eta}{i \omega Pr \Lambda'^2 \rho_0} \left(1 + i \frac{\omega Pr \rho_0 \Lambda'^2}{16 \eta} \right)^{1/2} \right]^{-1}} \right)^{-1}, \quad (3.48)$$

onde Pr é o número de Prandtl e γ_c a razão de calores específicos. Estes parâmetros efetivos levam em consideração o mecanismo de dissipação no material poroso. A densidade efetiva considera a interação viscosa e inercial com a estrutura e o módulo de compressibilidade efetivo indica as transferências térmicas. Assim, pode-se determinar o número de onda complexo k_c e a impedância característica do fluido equivalente que representa o material poroso como:

$$k_c = \omega \left(\frac{\rho_{eq}}{K_{eq}} \right)^{1/2}, \quad (3.49)$$

e

$$Z_c = (\rho_{eq} K_{eq})^{1/2}. \quad (3.50)$$

3.5 Método da Matriz de Transferência

Esta seção apresenta o método da matriz de transferência, a qual pode ser utilizada para o cálculo da impedância acústica de painéis e placas microperfuradas com múltiplas camadas em série e em paralelo.

3.5.1 TMM em Série

Um esquema do método da matriz de transferência (*Transfer Matrix Method - TMM*) acústica de quatro polos está apresentada na Figura 3.32. Um elemento acústico é modelado por seus parâmetros de quatro polos, os quais são relacionados à pressão sonora e velocidade de partícula, na entrada e na saída.



Figura 3.32: Representação da matriz de quatro polos

A matriz de transferência pode ser expressa como:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (3.51)$$

em que E_{11} , E_{12} , E_{21} e E_{22} são os quatro polos ou os elementos da matriz de transferência.

Para um elemento em série não distribuído, ou seja, com impedância de superfície localizada, os quatro polos são definidos como [Munjal, 1987]

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.52)$$

sendo Z_e a impedância característica do elemento. Segundo Lee e Kwon [2004], no caso de uma placa microperfurada, assume-se espessura ínfima em comparação ao comprimento de onda, de forma que a diferença de fase da velocidade de partícula entre ambos os lados da placa pode ser negligenciada. Desta forma, basta utilizar a impedância da placa, ou seja, $Z_e = Z_m$, na equação 3.52.

No caso de uma cavidade de ar, a matriz fica [Munjal, 1987]:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 D) & iZ_0 \sin(k_0 D) \\ i \sin(k_0 D) / Z_0 & \cos(k_0 D) \end{bmatrix}, \quad (3.53)$$

e para fluidos equivalentes:

$$[S_{eq}] = \begin{bmatrix} \cos(k_c D) & iZ_c \sin(k_c D) \\ i \sin(k_c D) / Z_c & \cos(k_c D) \end{bmatrix}. \quad (3.54)$$

Apesar de apenas terem sido apresentadas as funções de transferência para o MPP, cavidade e material poroso, o método pode ser utilizado para vários tipos de camadas, como ressonadores de Helmholtz, absorvedores tipo membrana, painéis flexíveis, etc.

O esquema de um sistema de múltiplas camadas de placas microperfuradas está demonstrado na Figura 3.33.

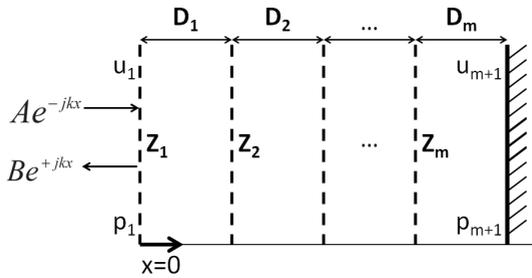


Figura 3.33: Esquema de painéis multicamadas para a matriz de transferência.

A matriz de transferência global $[T]$ para tal sistema pode ser obtido pela multiplicação de todas as matrizes de cada unidade, da forma:

$$[T] = [T_{c_1}][T_{c_2}] \dots [T_{c_m}], \quad (3.55)$$

sendo T_{c_j} a matriz de transferência da j -ésima camada e $j = 1, 2, 3, \dots, m$. Como o MPP somente atua como um painel de absorção se estiver acoplado a uma cavidade, podendo esta possuir ou não material poroso, a matriz de transferência $[P]$ deve vir sempre multiplicada por uma matriz $[S]$ ou $[S_{eq}]$.

As variáveis do lado incidente do painel (lado 1) e da terminação rígida (lado $n+1$), podem ser expressas em termos da matriz global, da forma:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{m+1} \\ u_{m+1} \end{bmatrix}. \quad (3.56)$$

Considerando as amplitudes de incidência e reflexão A e B , respectivamente, as amplitudes complexas da pressão e velocidade de partícula podem ser expressas como:

$$A + B = p_1 = T_{11}p_{m+1} + T_{12}u_{m+1}, \quad (3.57)$$

e

$$\frac{A - B}{\rho_0 c_0} = u_1 = T_{21} p_{m+1} + T_{22} u_{m+1}. \quad (3.58)$$

Como a velocidade de partícula na parede rígida é nula, o coeficiente de reflexão por incidência normal $R = B/A$ pode ser expresso pelos elementos da matriz como:

$$R = \frac{T_{11} - \rho_0 c_0 T_{21}}{T_{11} + \rho_0 c_0 T_{21}}, \quad (3.59)$$

e, conseqüentemente, a impedância total do sistema, já normalizada:

$$Z_t = \rho_0 c_0 \frac{1 + R}{1 - R}. \quad (3.60)$$

Com o objetivo de demonstrar o efeito de múltiplas camadas, seis configurações de MPP com material poroso foram aplicadas com o modelo de Allam *et al.* [2009] para painéis microperfurados e o modelo JCA para materiais porosos. A Figura 3.34 ilustra tais configurações.

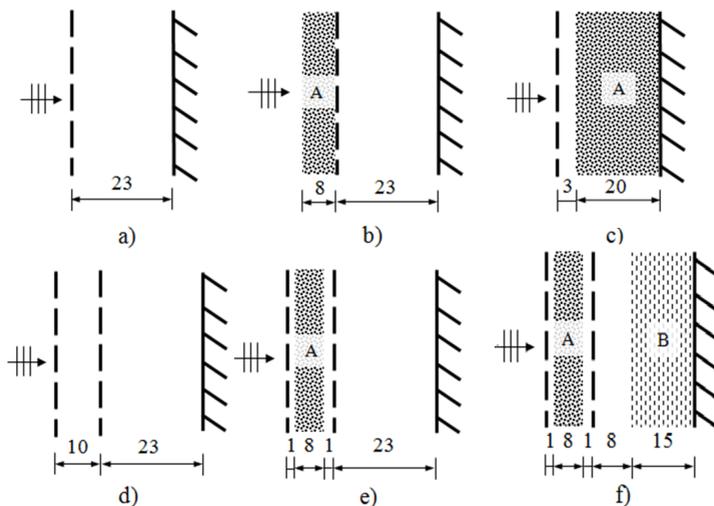


Figura 3.34: Desenho esquemático das seis configurações de MPP e material poroso em múltiplas camadas.

Os dados utilizados para a placa microperfurada foram: $d = 0,5$ mm, $\sigma = 1,27$ %, $t = 0,5$ mm e $\beta_r = 3$. Dois materiais porosos foram considerados, espuma de melamina (A) e lã de vidro (B). Seus parâmetros estão descritos na Tabela 3.5, obtidos de Cavalheiro [2017]. A Figura 3.35 mostra as curvas de absorção das configurações (a), (b) e (c). A Figura 3.36 apresenta as curvas do coeficiente de absorção obtidas para as configurações (d), (e) e (f). Pode-se verificar um deslocamento do pico de frequência e, em geral, um aumento da absorção em ambas as configurações com material poroso.

Tabela 3.5: Valores dos parâmetros dos materiais porosos

Amostra	σ_r	ϕ	α_∞	Λ	Λ'	ρ_{ho_t}
Espuma (A)	18901	0,98	1	0,095	0,197	10
Fibra (B)	23815	0,97	1	0,019	0,084	13

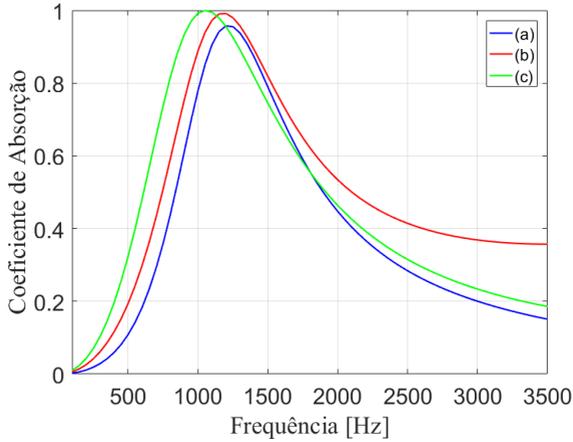


Figura 3.35: Coeficiente de absorção para as configurações (a), (b) e (c).

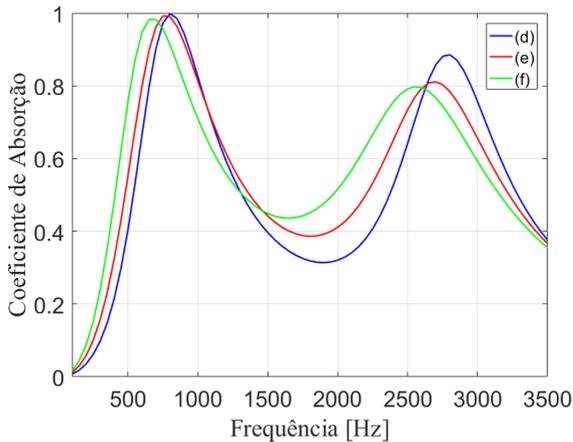


Figura 3.36: Coeficiente de absorção para as configurações (d), (e) e (f).

3.5.2 TMM em Série com Elementos em Paralelo

As matrizes de transferências descritas servem para modelar sistemas de múltiplas camadas em série. Segundo Munjal [1987], para aplicar em paralelo, deve-se criar uma matriz de admitâncias, da forma:

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_m & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.61)$$

Ao utilizar esta formulação na equação 3.55, o elemento é considerado em paralelo com o próximo. Uma forma de visualizar isto é fazer uma analogia a um ressonador de Helmholtz na parede de uma tubulação.

Verdière *et al.* [2013] propuseram uma variação da TMM em um processo de montagem de matrizes em paralelo para modelar materiais heterogêneos, mosaicos acústicos ou uma coleção de elementos acústicos em paralelo. Neste método, assume-se que cada elemento paralelo pode ser modelado por uma matriz de transferência 2×2 . No modelo, uma matriz de transferência de admitâncias é criada a partir da matriz de transferência clássica, descrita na equação 3.51. Realiza-se, então, uma soma das admitâncias com uma correlação de áreas para cada elemento de apenas uma camada separadamente, criando assim uma matriz de admitâncias total para cada elemento. A partir da matriz de admitância total, gera-se uma nova matriz de transferência para uma camada específica. Esta nova matriz pode ser utilizada em série com outras camadas na equação 3.55.

Este método soluciona problemas em que cada camada possui impedâncias diferentes. Entretanto, ao aplicar ao MPP com cavidades subdivididas, como cada configuração MPP/núcleo possui uma relação com a porosidade relativa, não é possível utilizar este método. Isto ocorre, pois o método realiza a soma das admitâncias por camada.

Para aplicar o modelo com cavidades subdivididas, foi desenvolvido um método que une a TMM com a analogia a um circuito equivalente. Esta variação da TMM considera cada elemento de uma configuração completa em série e, posteriormente, realiza a soma das admitâncias destes elementos por meio da analogia a um circuito elétrico. Uma representação esquemática está ilustrada na Figura 3.37.

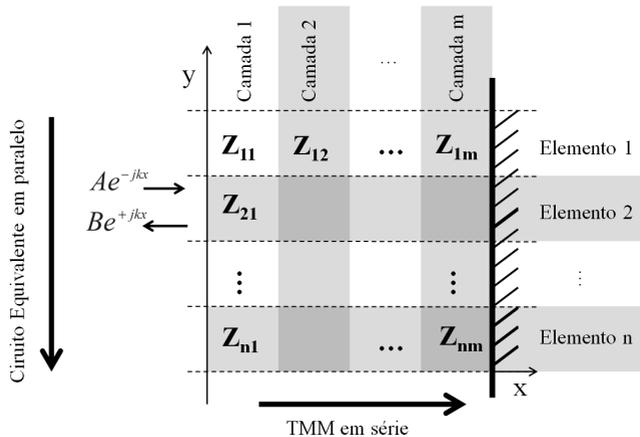


Figura 3.37: Representação esquemática para a matriz de transferência em paralelo.

É necessário aplicar uma porosidade relativa para cada elemento em paralelo. Desta forma, relaciona-se a área de cada elemento à área total.

Para uma cavidade, a nova matriz fica:

$$[S_p] = \begin{bmatrix} \cos(k_0 D) & iZ_0 \text{sen}(k_0 D) \\ i \left(\frac{\sigma_{n_i}}{Z_0} \right) \text{sen}(k_0 D) & \cos(k_0 D) \end{bmatrix}, \quad (3.62)$$

e para uma placa microperfurada, tem-se

$$[P_p] = \begin{bmatrix} 1 & Z_m / \sigma_{n_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.63)$$

e, para materiais porosos:

$$[S_{eq_p}] = \begin{bmatrix} \cos(k_c D) & iZ_c \text{sen}(k_c D) \\ i \left(\frac{\sigma_{n_i}}{Z_c} \right) \text{sen}(k_c D) & \cos(k_c D) \end{bmatrix}. \quad (3.64)$$

Considerando um sistema MPP de cavidades subdivididas, σ_{n_i} será o mesmo para as matrizes $[P_p]$ e $[S_p]$, e ambas devem

sempre ser alocadas em série, da forma $[P_{subdiv}] = [P_p][S_p]$.

Deve-se encontrar uma matriz de transferência global para cada elemento em paralelo T_{e_i} , da forma:

$$\begin{aligned} [T_{e_1}] &= [T_{e_1c_1}][T_{e_1c_2}] \dots [T_{e_1c_m}] \\ [T_{e_2}] &= [T_{e_2c_1}][T_{e_2c_2}] \dots [T_{e_2c_m}] \\ &\vdots \\ [T_{e_n}] &= [T_{e_nc_1}][T_{e_nc_2}] \dots [T_{e_nc_m}], \end{aligned} \quad (3.65)$$

onde $[T_{e_i c_j}]$ é a matriz do i -ésimo elemento em paralelo e da j -ésima camada, sendo $i = 1, 2, 3, \dots, n$ e $j = 1, 2, 3, \dots, m$.

O coeficiente de reflexão, R_{e_i} é obtido pelas matrizes T_{e_i} , analogamente à equação 3.59:

$$R_{e_i} = \frac{T_{e_i11} - \rho_0 c_0 T_{e_i21}}{T_{e_i11} + \rho_0 c_0 T_{e_i21}}, \quad (3.66)$$

e, conseqüentemente, a impedância de superfície para i -ésimo elemento em paralelo:

$$Z_{e_i} = \rho_0 c_0 \frac{1 + R_{e_i}}{1 - R_{e_i}}. \quad (3.67)$$

A impedância total do sistema em paralelo é calculada de forma:

$$\frac{1}{Z_{paralelo_i}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{e_i}}. \quad (3.68)$$

A Figura 3.38 apresenta a comparação entre os coeficientes de absorção obtidos com o modelo de Verdière *et al.* [2013] e o modelo proposto para um MPP com cavidade subdividida, (*honeycomb*), com dois diâmetros de perfuração em paralelo. Os seguintes dados foram utilizados: $d_1 = 0,3$ mm, $d_2 = 0,6$ mm, $t = 0,3$ mm, $D = 10$ mm, $L_h = 2$ mm, $\sigma_{n_1} = 50$ %, $\sigma_{n_2} = 50$ % e $\beta_r = 4$, e os correspondentes valores da porosidade do núcleo:

$\sigma_{h_1} = 0,68 \%$ e $\sigma_{h_2} = 2,72 \%$.

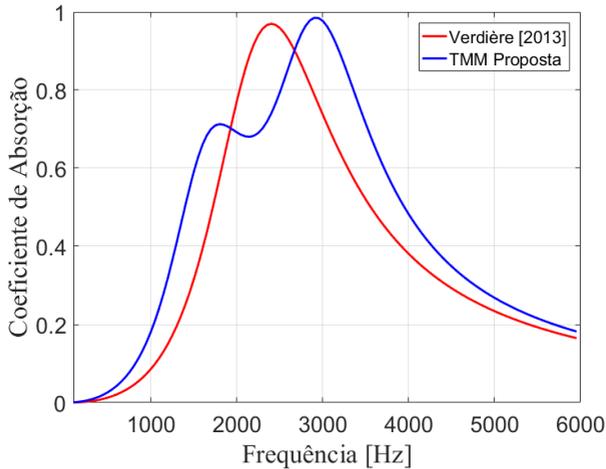


Figura 3.38: Comparação entre modelo de Verdière [2013] e modelo proposto para uma montagem em paralelo de um MPP com cavidade subdividida.

Nota-se que para o modelo de Verdière [2013], tem-se apenas um pico de frequência, enquanto que com o modelo proposto o pico para cada diâmetro de perfuração está bem definido. Isto ocorre, pois o modelo de Verdière [2013] realiza a soma das admitâncias para cada camada. No caso do MPP com cavidade subdividida, isto deve ser realizado após o acoplamento da camada MPP com a cavidade subdividida. Além disso, por ser necessário criar uma matriz de admitância por camada para realizar a soma e depois refazer a matriz de transferência, o processo torna-se moroso para a programação e com maior custo computacional.

A Figura 3.40 mostra o coeficiente de absorção obtido pela TMM proposta com os mesmos dados da Figura 3.38 considerando uma camada de 15 mm de melamina à frente do MPP com cavidade subdividida, conforme representação esquemática na Figura 3.39. Em vermelho, encontra-se a curva obtida somente pela melamina; em verde somente a curva

gerada pelo MPP e em azul, a montagem em série.

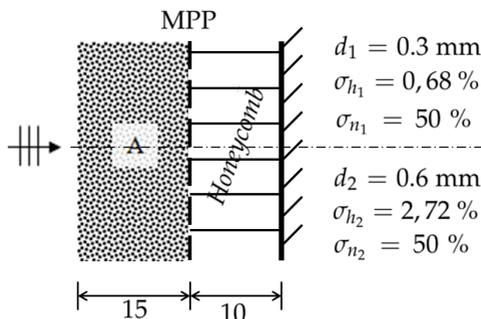


Figura 3.39: Configuração com diferentes diâmetros de perfuração em paralelo com camadas de melamina+MPP+honeycomb em série.

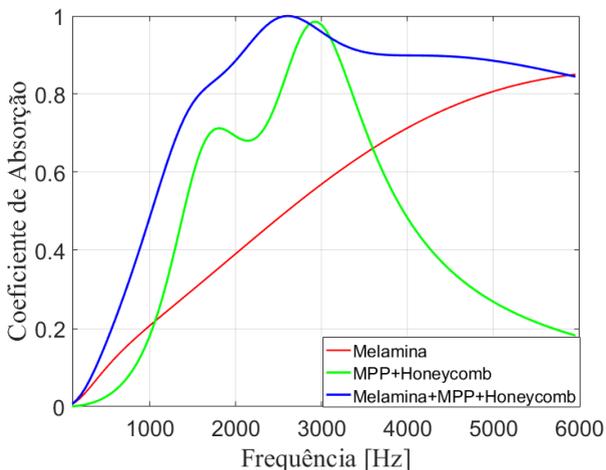


Figura 3.40: Coeficiente de absorção da configuração com diferentes diâmetros de perfuração em paralelo com camadas de melamina+MPP+honeycomb em série.

Observa-se na curva em azul, da configuração completa em série, uma junção de ambos os sistemas, com absorção superior à obtida para cada camada individual. Pode-se notar, também na curva azul, que os picos de frequência específicos para cada diâmetro de perfuração foram deslocados para frequências mais baixas, porém com maior absorção.

3.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os modelos básicos para cálculo da impedância de painéis microperfurados. Variações considerando fatores de correção obtidos empiricamente ou por meio de CFD foram descritas e analisadas. Uma modificação destes modelos foi desenvolvida para de cavidades subdivididas considerando duas novas aplicações:(1) quando o número de perfurações é menor que o número de núcleos e (2) quando há mais de um diâmetro de perfuração na distribuição entre superfície e núcleo. Uma análise da nova formulação, focando na porosidade relativa, revela que os modelos clássicos não conseguem estimar o coeficiente de absorção para ambos os casos.

O método da função de transferência para a aplicação de múltiplas camadas de MPP e materiais porosos foi descrita e a uma modificação foi desenvolvida para a aplicação em paralelo. A nova abordagem indica que a TMM deve ser aplicada em série e, posteriormente, a soma da admitâncias deve ser realizada para configurações em paralelo. Desta forma, pode-se aplicar a TMM para configurações com MPP e cavidades subdivididas.

4 Otimização de Painéis Microperfurados

A literatura apresenta que, ao aplicar microperfurações, pode-se melhorar efetivamente os parâmetros vibroacústicos de um painel composto, como o coeficiente de absorção [Sakagami *et al.*, 2010], a perda de transmissão sonora [Toyoda e Takahashi, 2008] e a eficiência de radiação [Toyoda *et al.*, 2007]. Neste último, Toyoda *et al.* [2007] indicam que o efeito causado na eficiência de radiação e perda de transmissão ocorrem devido ao aumento da absorção sonora do sistema, atuando na mesma faixa de frequência e é dependente da magnitude. Estes podem ser sintonizados por parâmetros geométricos das perfurações e do próprio painel.

Este Capítulo aborda a maximização do coeficiente de absorção, dentro das restrições impostas pelos painéis aeronáuticos, através de um código de otimização de parâmetros baseado no algoritmo de evolução diferencial (DE - *Differential Evolution*, em inglês).

4.1 Algoritmo de Otimização: Evolução Diferencial

Na Seção 3.3 foi realizada uma descrição do modelo de painel composto sanduíche com cavidade subdividida com o intuito de obter o coeficiente de absorção de painéis de interior microperfurados em duas aplicações diferentes. Para a aplicação e validação dos modelos, foram utilizados os painéis e métodos disponíveis no LVA-UFSC. No entanto, em aplicações de engenharia, o projeto de painéis microperfurados não é tão simples. De forma geral, pode-se afirmar que tais projetos dependem das restrições impostas pelo problema, neste caso, restrições geométricas dos próprios painéis e de faixas de

frequência de análise. Este é um problema inverso onde as restrições determinam o tipo de tratamento necessário.

O problema inverso pode ser resolvido de duas formas diferentes [Villamil, 2012]: por meio de uma busca exaustiva, isto é, calculando as curvas de absorção de todas as combinações possíveis de parâmetros e selecionando aqueles que apresentam o desempenho desejado; utilizando técnicas de otimização. A busca exaustiva pode ser aplicada quando o número de configurações possíveis é pequena. Este não é o caso, pois o modelo em questão possui seis parâmetros otimizáveis: o diâmetro da perfuração d ; a espessura da placa, ou profundidade da perfuração t ; a profundidade da cavidade D ; a porosidade do núcleo σ_h , a qual é dependente de d e da área de superfície do núcleo $S_h(L_h)$; a porosidade relativa σ_{n_i} ; e o fator de correção da resistividade acústica β_r . Desta forma, o uso de uma técnica de otimização é necessário.

As técnicas de otimização introduzem uma solução mais eficiente e reduzem significativamente o custo de computação. A otimização pode ser alcançada por métodos gradientes ou evolutivos. Enquanto os primeiros operam em uma única solução potencial e buscam melhorias em sua vizinhança, os métodos evolutivos mantêm grandes conjuntos de soluções potenciais (populações) e aplicam operadores de recombinação e seleção sobre eles [Hrstka *et al.*, 2003]. Os métodos evolutivos são especialmente eficazes em problemas com muitas soluções locais. À medida em que o número de configurações possíveis aumenta de forma combinatória, esses métodos também são conhecidos como técnicas de otimização combinatória [Press *et al.*, 1986]. Neste capítulo, um método evolutivo conhecido como Evolução Diferencial é apresentado com foco na otimização do coeficiente de absorção do painel de interior microperfurado.

O algoritmo Evolução Diferencial faz parte da família dos algoritmos de evolução, tais quais os algoritmos genéticos, e é aplicado em problemas de otimização global. O DE foi proposto

em 1995 por Storn e Price e, desde então, ganha popularidade por ser um algoritmo simples e, ao mesmo tempo robusto, tendo aplicações nas mais variadas áreas [Cavalheiro, 2015].

Como outros algoritmos de evolução, o DE é baseado na analogia da seleção natural que, com o decorrer das gerações, refina o desempenho dos indivíduos de uma população de acordo com seu ambiente. Esse refinamento acontece por meio de ciclos de mutações, recombinações e seleções. O propósito da otimização é encontrar um indivíduo que minimize ou maximize o valor de uma função objetivo. Para o problema de interesse nesse trabalho, cada indivíduo é um vetor composto de cinco a dez parâmetros, dependendo do modelo utilizado.

Inicialmente, definem-se os limites mínimos e máximos de cada um dos N parâmetros a serem determinados. Esses limites determinam o domínio do qual os N_p vetores da população inicial serão aleatoriamente escolhidos. Cada vetor da população, denominado indivíduo, contém N parâmetros.

A seguir, o procedimento do algoritmo é descrito de forma resumida, conforme Cavalheiro [2015].

- O n -ésimo ($n = 1, 2, \dots, n_p$) indivíduo da população atual é selecionado como vetor alvo, o qual fica alocado para as fases de recombinação e seleção. Inicia-se por $n = 1$;
- Dois outros vetores dentro da população atual são selecionados aleatoriamente e a diferença entre eles é realizada. Obtém-se, então, um vetor diferença. Na sequência, este vetor é multiplicado por um fator de mutação, F , o qual é uma constante real positiva, situada no intervalo $[0, 1]$, fixada pelo usuário;
- O vetor diferença ponderado é somado a um terceiro vetor, escolhido dentre a população atual. Dependendo da estratégia utilizada, este terceiro vetor pode ser um melhor indivíduo da população (*best*, em inglês), com menor valor da função objetivo, ou um vetor aleatório da

população atual (*random*, em inglês). O vetor resultante dessa operação é chamado de vetor perturbado (*noisy vector*, em inglês). Esta fase é denominada mutação;

- A fase seguinte consiste na recombinação ou cruzamento (*crossover* - em inglês) do vetor perturbado com o vetor alvo. Estes dois vetores darão origem a um novo vetor, chamado de vetor teste (*trial vector*, em inglês). Uma constante real definida pelo usuário, chamada de probabilidade de recombinação (*crossover probability*, em inglês), $C_p \in [0, 1]$, rege o processo. Os parâmetros do vetor teste, identificados pelo índice i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), são definidos sequencialmente, da seguinte forma: um gerador de números aleatórios, com distribuição normal e dentro do intervalo $[0, 1]$, fornece um valor r_i que é comparado à constante C_p . Se $r_i \leq C_p$, o n -ésimo parâmetro do vetor teste é igual ao n -ésimo parâmetro do vetor perturbado. Se $r_i > C_p$, o i -ésimo parâmetro do vetor teste é igual ao i -ésimo parâmetro do vetor alvo. Definido o i -ésimo parâmetro, determina-se o $(i + 1)$ -ésimo parâmetro, seguindo a mesma lógica, até completar os N parâmetros. Esta estratégia de recombinação é chamada de binomial. Se a estratégia for definida como exponencial, assim que a condição $r_i > C_p$ for atendida, não só o i -ésimo parâmetro do vetor teste torna-se igual ao i -ésimo parâmetro do vetor alvo, mas todos os parâmetros restantes do vetor teste são automaticamente copiados do vetor alvo e a recombinação termina. Em todos os casos, se algum parâmetro do vetor teste estiver fora dos limites estabelecidos inicialmente, este é convertido para o valor do limite mais próximo;
- A terceira fase é denominada seleção, na qual o vetor alvo e o vetor teste são confrontados. O valor da função objetivo de cada um destes vetores é comparado e o que possuir menor valor é selecionado. O vetor selecionado ocupa

então a n -ésima posição dentro da população da próxima geração;

- Seleciona-se o $(n + 1)$ -ésimo indivíduo da população atual como próximo vetor alvo e repete-se todo o ciclo. Após N_p ciclos, obtém-se a população da próxima geração com N_p indivíduos;
- Esta nova geração assume, então, o posto de população atual e todo o processo descrito acima é repetido. O processo é finalizado quando se alcança um número de gerações especificado pelo usuário ou se atinge um tempo limite estipulado também pelo usuário, ou se chega a uma situação de estagnação, ou seja, quando após uma série de iterações, nenhuma melhora na população é observada. O melhor indivíduo, isto é, aquele com menor valor da função objetivo, é a solução fornecida pelo algoritmo.

A principal diferença entre o DE e outros algoritmos de evolução está na fase de mutação. Enquanto a maioria dos outros algoritmos de evolução faz uso de funções distribuição de probabilidade para perturbar indivíduos da população, o DE usa simplesmente a diferença entre dois vetores aleatórios da população para perturbar um terceiro vetor. Esta característica faz com que o DE se adapte rapidamente e eficazmente à função objetivo e confere boa convergência ao algoritmo à medida que este se aproxima do mínimo global.

Outra vantagem do DE reside no fato de possuir apenas três parâmetros que controlam seu funcionamento: tamanho da população N_p , fator de mutação F e probabilidade de recombinação C_p .

A escolha do algoritmo DE é motivada principalmente pelos trabalhos de Atalla [2005], que após implementar e testar vários algoritmos de otimização no problema de caracterização acústica de materiais porosos por método inverso, identificou o DE como o algoritmo de melhor desempenho para esta aplicação.

Para a operação correta do algoritmo, uma função objetivo que leva ao resultado desejado deve ser selecionada. O mínimo de uma função com muitas variáveis independentes deve ser encontrado definindo a função objetivo que depende da configuração do sistema. O parâmetro a ser otimizado é o coeficiente de absorção, dentro de uma faixa de frequência prescrita, o qual é obtido através dos modelos de impedância do painel MPP. A função objetivo, da qual deve-se obter a minimização é [Mareze, 2013]:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{n_f} (1 - \alpha_i)^2, \quad (4.1)$$

onde α_i é a curva discreta analítica do coeficiente de absorção. O intervalo de interesse da otimização está entre a frequência inicial f_i e a final f_f , sendo n_f o número de frequências analisadas. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo desenvolvido por Markus Buehren, o qual está disponível online [Buehren, 2008].

Em geral, o objetivo de um algoritmo de otimização é convergir para o mínimo ou máximo global, sendo um objetivo secundário utilizar o mínimo tempo computacional. Ao aplicar diferentes critérios de parada, ambos os objetivos são influenciados. Se uma otimização é finalizada muito cedo, a convergência pode não ter sido encontrada, porém, se é finalizada muito tarde, o custo computacional pode ser alto [Zielinski *et al.*, 2006].

O algoritmo possui dois critérios de parada: 1 - quando o número de iterações pré-determinado é encontrado; 2 - quando se realiza um determinado número de iterações sem melhorias na população. Para todas as otimizações realizadas, configurou-se o número de iterações de forma que somente o critério de parada 2 fosse atingido. Isto leva a um maior tempo de processamento, porém garante que o algoritmo não pare em um mínimo local.

4.2 Parâmetros de Entrada e Restrições

A otimização é realizada por faixa de frequência, ou seja, o código aproxima o coeficiente de absorção ao máximo ($\alpha = 1$), conforme a função objetivo, dentro da faixa estipulada. As frequências, superior e inferior, a serem utilizadas estão descritas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Faixas de frequência da otimização.

Parâmetro	f_i (Hz)	f_f (Hz)
(a)	400	1000
(b)	500	1500
(c)	1000	2000
(d)	1500	2500
(e)	2500	3500
(f)	500	5500

Os três parâmetros estratégicos usados em DE é o tamanho da população, N_p , o fator de mutação, F e a probabilidade de recombinação, C_p . O fator de mutação trata da diversidade populacional. Menores valores de F levam à convergência prematura e, portanto, à perda de diversidade. A probabilidade de recombinação controla o número de componentes herdados do vetor mutante, o que influencia a probabilidade de mutação e a rapidez de convergência.

Inicialmente, o algoritmo DE foi proposto com uma única variante para resolver problemas de otimização de variável única. Posteriormente, outras estratégias foram sugeridas por seus criadores, chamadas de variantes de DE. Estes, variam de acordo com o caminho em que os vetores são selecionados para computar o processo de mutação, número de pares de vetores para encontrar o vetor diferença e o tipo de recombinação utilizado [Aswani *et al.*, 2015].

A convenção geral da variante DE pode ser denotada como

$DE/p_s/q/r$, onde DE indica o algoritmo. p_s representa o método de seleção dos vetores para o processo de mutação, podendo variar entre: "*best*" - o melhor vetor da geração atual; "*rand*" - vetor selecionado aleatoriamente; ou "*rand-to-best*" - vetor entre o melhor atual e o vetor aleatório. q indica o número de pares de vetor a ser selecionado para calcular o vetor diferença. r indica o tipo de cruzamento a ser realizado, podendo ser: *bin* - recombinação binomial; e *exp* - recombinação exponencial.

A estratégia utilizada neste trabalho foi do tipo $DE/best/1/bin$, determinada como estratégia de número 6 no algoritmo, pois foi a que apresentou convergência mais rápida para os modelos. Para o tamanho da população, recomenda-se utilizar um valor de dez vezes o número de parâmetros [Buehren, 2008]. Após alguns testes, definiu-se a probabilidade de recombinação como $C_p = 0.9$. Outros valores foram testados, porém o indicado obteve melhor convergência. Quanto ao fator de mutação, o valor ajustado automaticamente pelo algoritmo é de $F = 0.8$, o qual foi mantido, pois demonstrou resultados mais rápidos de convergência.

4.3 Aplicações com Pannel Microperfurado

Os atuais métodos de modelagem de sistemas MPP em múltiplas camadas permitem considerar inúmeras configurações para a otimização. Neste trabalho foram consideradas três configurações:

- MPP simples sem subdivisões na cavidade;
- MPP duplo sem subdivisões na cavidade;
- MPP com cavidade subdividida e distribuição não homogênea de diâmetros de perfuração em paralelo.

Para esta tese, as duas primeiras configurações possuem caráter mais acadêmico. A última engloba as aplicações ao

painel de interior aeronáutico e as restrições impostas pelo mesmo.

O método de otimização em conjunto com a TMM pode ser utilizado para configurações mais complexas, como sistemas de múltiplas camadas com material poroso, entretanto, não será considerado neste trabalho. Sugere-se esta aplicação para trabalhos futuros em conjunto com outras configurações alternativas para a aplicação de painéis MPP.

Para os dois primeiros itens citados, foi utilizado o modelo exato de Maa, representado pela variação de Allam [2009], pois permite uma variação mais prática do fator de correção da resistência acústica. Entretanto, qualquer dos modelos descritos, como o modelo de Kim [2011] ou de fluidos equivalentes [Atalla e Sgard, 2007] pode ser utilizado.

4.3.1 MPP Simples

Primeiro, deve-se definir as restrições impostas pela aplicação, neste caso um painel microperfurado simples, conforme a Figura 4.1.

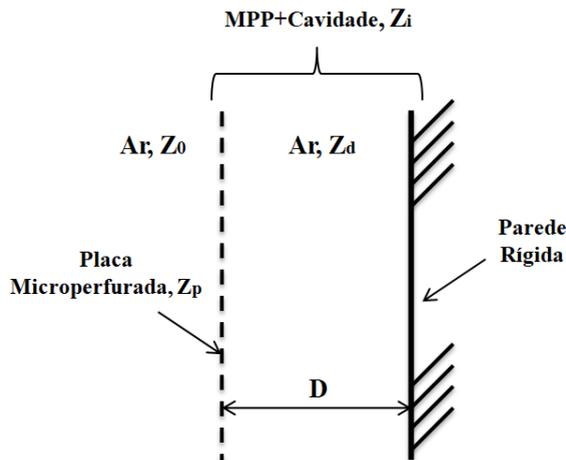


Figura 4.1: Esquema do sistema MPP simples.

Baseando-se no modelo de um MPP simples sem cavidade

subdividida, equação 3.26, os parâmetros a serem otimizados são:

- Parâmetro 1: d - diâmetro de perfuração;
- Parâmetro 2: t - espessura da placa, ou profundidade da perfuração;
- Parâmetro 3: D - profundidade do núcleo;
- Parâmetro 4: b - distância entre perfurações, que, em conjunto com d , determina a razão de perfuração (ou porosidade) do MPP;
- Parâmetro 5: β_r - fator de arredondamento.

Os parâmetros 1, 2, 3, e 4 são definidos na fase de projeto de um MPP. O parâmetro 5 depende do tipo de perfuração, que pode ser arredondado ou agudo. Decidiu-se por utilizar a distância entre perfurações b como parâmetro para definir a razão de perfuração (porosidade do MPP), pois é um parâmetro mais prático de se aplicar na fase de projeto. Assim, calcula-se a porosidade através da equação 3.24: $\sigma = \pi d^2 / 4b^2$.

Os valores para a otimização foram definidos dentro de uma faixa similar à utilizada nos painéis internos de aeronaves para os parâmetros t e D . Quanto aos parâmetros que definem o painel microperfurado, utilizou-se uma faixa ampla de diâmetro de perfuração d e distância entre perfurações b com intuito de abranger uma maior faixa de frequência. As faixas de valores dos parâmetros e suas variações para o MPP simples estão descritos na Tabela 4.2

Tabela 4.2: Faixa de valores para o MPP simples.

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Variação
d (mm)	0,3	1,0	0,1
t (mm)	0,2	0,5	0,1
D (mm)	4	10	0,1
b (mm)	2	5	0,5
β_r	2	4	1

Para cada uma das faixas de frequência, o algoritmo indica os parâmetros ótimos dentro das restrições impostas. A Tabela 4.3 descreve os valores dos parâmetros obtidos para o MPP simples juntamente com o valor da função objetivo, F_{obj} , e o tempo de processamento para as seis faixas de frequência.

Tabela 4.3: Valores dos parâmetros ótimos para o MPP simples.

Parâm./ Δ Freq.	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
d (mm)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
t (mm)	0,5	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2
D (mm)	10	10	10	10	9	8,5
b (mm)	5	5	3,5	2,5	2,0	2,0
β_r	2	2	2	3	4	4
F_{obj}	0,79	0,43	0,38	0,20	0,094	0,57
tempo (s)	2,83	3,0	3,0	3,03	3,95	3,93

Pode-se notar que os valores de d mantém-se sempre no valor mínimo, $d = 0,3$ mm. Isto ocorre, pois quanto menor o valor do diâmetro, maior o efeito da viscosidade e, portanto, mais abrangente em faixa de frequência é o sistema de absorção.

A Figura 4.2 apresenta os coeficientes de absorção obtidos para as faixas de frequência (a), (b) e (c). Pode-se notar que as restrições do sistema impedem que haja maior absorção em faixas de frequência abaixo de 2000 Hz. Isto se dá,

principalmente, pela restrição da profundidade da cavidade.

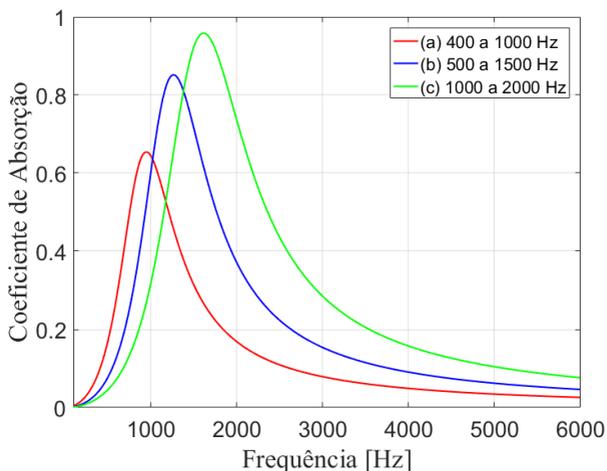


Figura 4.2: Coeficiente de absorção otimizado para as faixas de frequência (a), (b) e (c).

A Figura 4.3 apresenta os coeficientes de absorção obtidos para as faixas de frequência (d), (e) e (f).

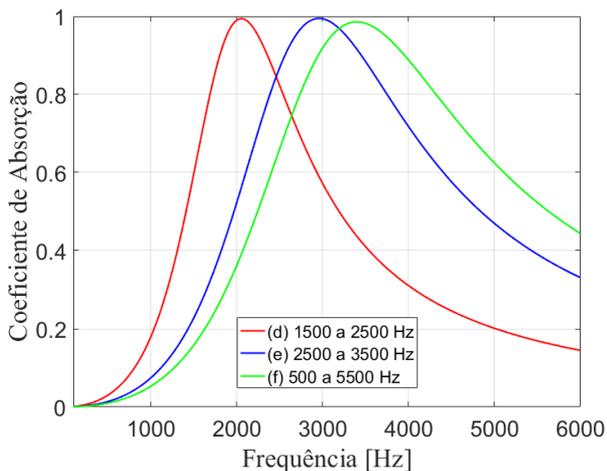


Figura 4.3: Coeficiente de absorção otimizado para as faixas de frequência (d), (e) e (f).

Nota-se uma atuação mais abrangente em torno de 3000 Hz

para a otimização realizada na faixa (e), entre 2500 Hz e 3500 Hz. Isto pode ser observado pelo valor da função objetivo, neste caso $F_{obj} = 0,094$, a qual indica que a média quadrática da diferença do coeficiente de absorção obtido dentro da faixa de frequência estipulada tende a 1.

As Figuras 4.4 (a) e (b) apresentam as curvas de convergência obtidas para a faixa de frequência 2500 e 3500 Hz (e). A primeira, (a), mostra o valor da função objetivo em função do número de indivíduos avaliados. A segunda, (b), relaciona as funções objetivo para os parâmetros selecionados em cada iteração.

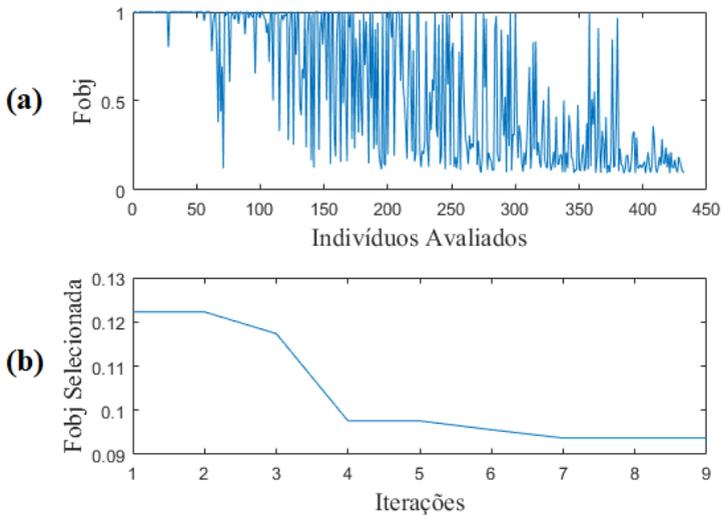


Figura 4.4: Convergência para a faixa de frequência (e).

Pode ser observado na Figura (a) que, mesmo ao encontrar valores da função objetivo próximos ao obtido ao final da otimização, o algoritmo não finalizou. Isto revela continuidade após encontrar mínimos locais, o que indica que foi encontrado um mínimo global. Nota-se na Figura (b) que, após a iteração 7, o valor da função objetivo mantém-se igual, denotando convergência do algoritmo.

4.3.2 MPP Duplo

A faixa de frequência de absorção de um MPP simples é limitada a uma ou duas oitavas. Para alargar esta faixa, pode ser introduzida outra camada de MPP entre o painel e uma parede rígida. Isto resulta em uma faixa de absorção mais ampla.

Um MPP duplo é definido por duas placas microperfuradas, cada uma com uma cavidade específica, e uma parede rígida (ou placa rígida), conforme a Figura 4.5.

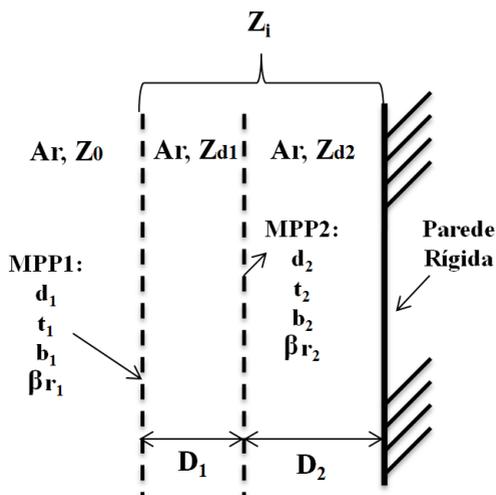


Figura 4.5: Esquema do sistema MPP duplo.

Os parâmetros a serem otimizados são os mesmos que o item anterior para cada sistema:

- Parâmetro 1: d_1 - diâmetro de perfuração do MPP1;
- Parâmetro 2: d_2 - diâmetro de perfuração do MPP2;
- Parâmetro 3: t_1 - espessura da placa, ou profundidade da perfuração do MPP1;
- Parâmetro 4: t_2 - espessura da placa, ou profundidade da perfuração do MPP2;

- Parâmetro 5: D_1 - profundidade do núcleo do MPP1;
- Parâmetro 6: D_2 - profundidade do núcleo do MPP2;
- Parâmetro 7: b_1 - distância entre perfurações do MPP1;
- Parâmetro 8: b_2 - distância entre perfurações do MPP2;
- Parâmetro 9: β_{r_1} - fator de arredondamento da perfuração do MPP1;
- Parâmetro 10: β_{r_2} - fator de arredondamento da perfuração do MPP2.

As faixas de valores utilizados para $d_1, d_2, t_1, t_2, b_1, b_2, \beta_{r_1}$ e β_{r_2} são os mesmos para o MPP simples e o MPP duplo. Os valores para D_1 e D_2 são a metade, de forma que o sistema MPP duplo ocupe, praticamente, o mesmo espaço que o simples. Os valores estão descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Faixa de valores para o MPP duplo

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Variação
d_1 (mm)	0,3	1	0,1
d_2 (mm)	0,3	1	0,1
t_1 (mm)	0,2	0,5	0,1
t_2 (mm)	0,2	0,5	0,1
D_1 (mm)	2	5	0,1
D_2 (mm)	2	5	0,1
b_1 (mm)	2	5	0,5
b_2 (mm)	2	5	0,5
β_{r_1}	2	4	1
β_{r_2}	2	4	1

A Tabela 4.5 apresenta os valores dos parâmetros ótimos obtidos para o MPP duplo, bem como o valor da função objetivo F_{obj} e o tempo de processamento para as seis faixas de frequência.

Tabela 4.5: Valores dos parâmetros ótimos para o MPP duplo

Parâm./ Δ Freq.	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
d_1 (mm)	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
d_2 (mm)	0,5	1	0,9	0,6	0,3	0,3
t_1 (mm)	0,5	0,5	0,4	0,2	0,2	0,3
t_2 (mm)	0,5	0,5	0,5	0,4	0,2	0,2
D_1 (mm)	5	5	5	5	5	5
D_2 (mm)	5	5	5	5	4	3
b_1 (mm)	5	3	4	3	2	2
b_2 (mm)	5	2	3	2	2	4
β_{r_1}	2	2	4	3	4	2
β_{r_2}	2	2	2	2	4	4
F_{obj}	0,78	0,40	0,38	0,21	0,081	0,48
tempo (s)	126,9	145,7	197,8	205,7	129,1	167,6

A Figura 4.6 apresenta os coeficientes de absorção do MPP duplo obtidos para as faixas de frequência (a), (b) e (c).

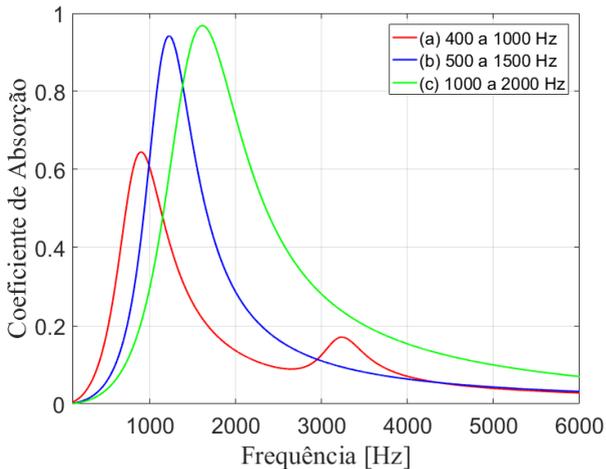


Figura 4.6: Coeficiente de absorção do MPP duplo otimizado para as faixas de frequência (a), (b) e (c).

Observam-se resultados semelhantes ao MPP simples. Isto

ocorre devido às limitações em baixas frequência ocasionadas pela restrição da profundidade da cavidade. Pode-se notar também que os valores das funções objetivo são praticamente os mesmos.

A Figura 4.7 apresenta os coeficientes de absorção do MPP duplo obtidos para as faixas de frequência (d), (e) e (f). Observa-se, novamente, uma semelhança com o MPP simples para (d) e (e). Neste último, um efeito do MPP duplo começa a surgir acima de 4500 Hz. Já para a faixa (f), nota-se o efeito do MPP duplo completo, o qual apresenta dois picos de frequência bem definidos e abrangendo uma larga faixa de absorção.

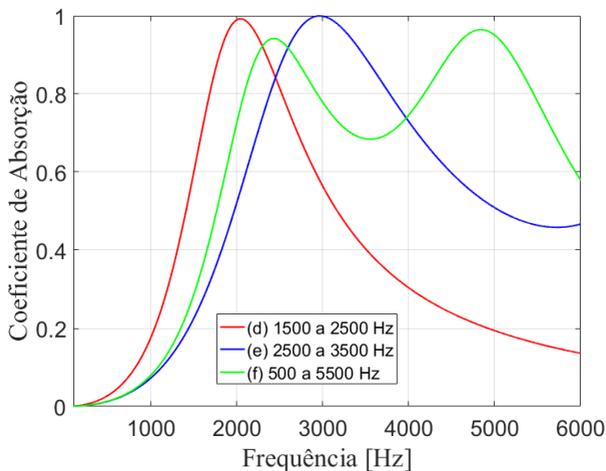


Figura 4.7: Coeficiente de absorção do MPP duplo otimizado para as faixas de frequência (d), (e) e (f).

4.3.3 MPP com Distribuição Não-Homogênea de Diâmetros de Perfuração em Paralelo

Considerando as restrições impostas pelo painel de interior com núcleo em *honeycomb*, sugere-se a utilização de diferentes diâmetros de perfuração em paralelo na face a ser microperfurada. Este tipo de configuração permite maximizar o coeficiente de absorção em uma maior faixa de frequência sem

comprometer nenhum parâmetro intrínseco ao próprio painel.

A equação 3.44 permite aplicar n diferentes diâmetros em paralelo. Após testes realizados com esta configuração, o ideal é limitar o número máximo de diâmetros diferentes para $n \leq 3$, pois acima disso limita a eficiência das configurações e diminui consideravelmente a absorção. Apesar da limitação do número máximo de n , o código considera automaticamente apenas 1 ou 2 diâmetros caso a atuação seja superior para a faixa de frequência a ser otimizada.

Baseado no modelo descrito, os parâmetros a serem otimizados são:

- Parâmetro 1: d_1 - diâmetro de perfuração 1;
- Parâmetro 2: d_2 - diâmetro de perfuração 2;
- Parâmetro 3: d_3 - diâmetro de perfuração 3;
- Parâmetro 4: σ_{n_1} - porosidade relativa para o diâmetro 1;
- Parâmetro 5: σ_{n_2} - porosidade relativa para o diâmetro 2;
- Parâmetro 6: σ_{n_3} - porosidade relativa para o diâmetro 3;
- Parâmetro 7: t - espessura da placa a ser perfurada;
- Parâmetro 8: D - profundidade do núcleo;
- Parâmetro 9: L_h - lado do hexágono, correspondente ao diâmetro equivalente do núcleo;
- Parâmetro 10: β_r - fator de arredondamento da perfuração.

Os parâmetros 7, 8 e 9 são definidos pelo tipo de painel. Podem ser especificados com restrição aberta ou fixos. Isto vai depender se a otimização é realizada para um painel específico, com os parâmetros já definidos, ou se deseja projetar um novo painel. Nesta configuração, a razão de perfuração σ é substituída pela porosidade do núcleo σ_h , a qual depende de d_i e L_h . Os

valores de L_h foram escolhidos de forma a σ para MPP simples e duplo e σ_h tenham o mesmo valor.

As faixas de valores dos parâmetros e suas variações estão descritos na Tabela 4.7. Os parâmetros 4, 5 e 6 possuem valor máximo de 1, o que indica 100% dos núcleos perfurados pelo i-ésimo diâmetro. Duas restrições são impostas ao código quanto aos três parâmetros mencionados. A primeira indica que a porcentagem máxima a ser perfurada é igual a 1, ou seja, 100%. A segunda impede que os diâmetros sejam iguais.

Tabela 4.6: Faixa de valores para o painel de interior

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Delta
d_1 (mm)	0,3	1	0,1
d_2 (mm)	0,3	1	0,1
d_3 (mm)	0,3	1	0,1
σ_{n_1}	0	1	0,05
σ_{n_2}	0	1	0,05
σ_{n_3}	0	1	0,05
t (mm)	0,2	0,5	0,1
D (mm)	4	10	0,5
L_h (mm)	1,2	3,1	0,1
β_r	2	4	1

A Tabela 4.7 apresenta os valores dos parâmetros ótimos obtidos para a configuração do painel de interior com cavidades subdivididas, bem como o valor da função objetivo F_{obj} e o tempo de processamento para as seis faixas de frequência.

Tabela 4.7: Valores dos parâmetros para o painel de interior

Parâm./ Δ Freq.	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
d_1 (mm)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
d_2 (mm)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
d_3 (mm)	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,6
σ_{n_1}	1	1	0,05	0,4	0,45	0,7
σ_{n_2}	0	0	0,55	0,2	0,35	0,05
σ_{n_3}	0	0	0,4	0,4	0,2	0,3
t (mm)	0,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,2
D (mm)	10	10	10	10	8,5	10
L_h (mm)	3,1	3,1	3,1	2,2	2,1	1,2
β_r	4	4	4	4	4	4
F_{obj}	0,79	0,42	0,37	0,21	0,04	0,5
tempo (s)	309,6	297,4	155,4	110,2	151,8	184,2

A Figura 4.8 apresenta os coeficientes de absorção do painel de interior obtidos para as faixas de frequência (a), (b) e (c).

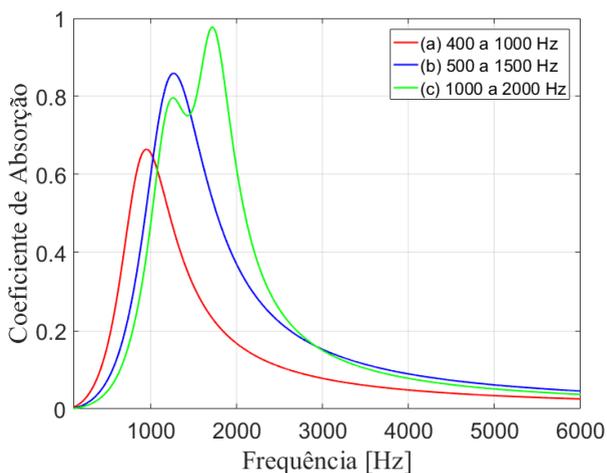


Figura 4.8: Coeficiente de absorção do painel de interior otimizado para as faixas de frequência (a), (b) e (c).

Observam-se resultados semelhantes ao MPP simples e duplo

para as duas primeiras curvas. Na terceira, (c), já aparecem dois picos, indicando os efeitos de dois diâmetros estão atuantes. Para esta faixa a função objetivo melhorou levemente de 0.38 para 0.37.

A Figura 4.9 apresenta os coeficientes de absorção do painel de interior obtidos para as faixas de frequência (d), (e) e (f).

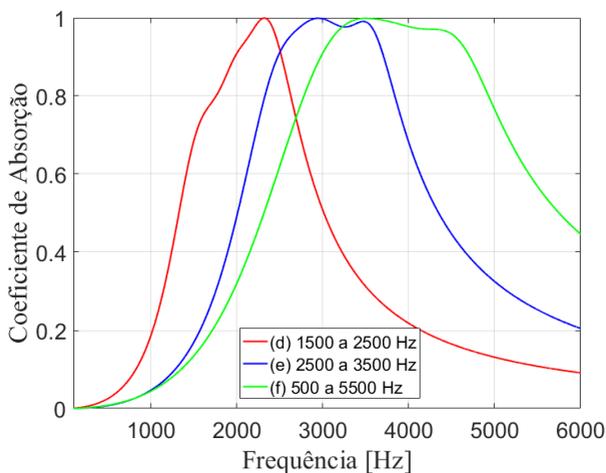


Figura 4.9: Coeficiente de absorção do painel de interior otimizado para as faixas de frequência (d), (e) e (f).

Nestas faixas de frequência, pode-se notar a atuação mista de três diâmetros de perfuração, o que resulta em uma maior abrangência na faixa de frequência de atuação. Destaca-se a aplicação entre 2500 Hz e 3500 Hz, para a qual o valor da função objetivo passou de 0.094 (MPP simples) e 0.081 (MPP duplo) para 0.04 com a configuração em paralelo. Isto indica que, na faixa de frequência de melhor abrangência dentro das restrições impostas, a configuração em paralelo alarga a faixa de atuação em mais de 2 vezes quando comparada às outras.

4.4 Síntese do Capítulo

Este Capítulo descreveu um método de otimização para a maximização do coeficiente de absorção de painéis microp-

erfurados baseado no algoritmo Evolução Diferencial. Três configurações de MPP foram testadas: MPP simples e duplo sem divisões na cavidade e MPP com cavidades divididas com distribuição não-homogênea de diâmetros de perfuração em paralelo.

Os resultados indicaram que, para uma mesma restrição de espaço (representado pela profundidade da cavidade), o painel com cavidade subdividida apresenta atuação em maior faixa de frequência. Para a faixa de frequência na qual a restrição de espaço permite melhor absorção (entre 2500 Hz e 3500 Hz) nas três configurações, o MPP com cavidade subdividida apresenta resultados de, aproximadamente, duas vezes superior aos outros.

5 Procedimentos Experimentais

Este capítulo detalha a caracterização experimental do painel de interior aeronáutico e a validação dos modelos analíticos. Primeiramente, apresentam-se os materiais de composição e detalhes dos parâmetros geométricos das amostras disponíveis. Uma análise micrométrica dos tipos de manufatura da perfuração é realizada.

Os métodos e procedimentos experimentais realizados para a caracterização vibroacústica do painel de interior são detalhados e os resultados analisados. Os parâmetros a serem medidos são:

- coeficiente de absorção em incidência normal;
- coeficiente de absorção em campo difuso;
- propriedades mecânicas equivalentes para um painel ortotrópico;
- eficiência de radiação;
- fator de perda por amortecimento estrutural;
- perda de transmissão.

5.1 Materiais

Os painéis utilizados nos testes são compostos de duas placas de fibra de vidro e resina, com núcleo tipo *honeycomb* de Nomex[®], conforme mostra a Figura 5.1. Um desenho esquemático destes painéis está apresentado na Figura 5.2. Dois painéis com diferentes configurações foram utilizados nos testes. Os valores dos parâmetros geométricos para cada painel estão descritos na Tabela 5.1.

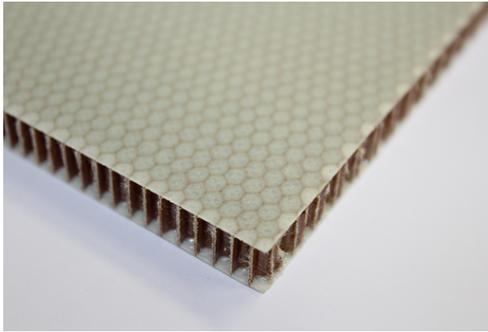


Figura 5.1: Amostra do painel de interior.

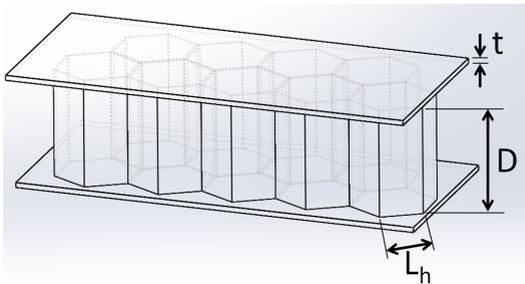


Figura 5.2: Desenho esquemático do painel de interior.

Tabela 5.1: Dimensões das amostras de painel interno.

Parâmetro	Amostra (A)	Amostra (B)
t (mm)	0,231	0,231
D (mm)	8,67	6,8
L_h (mm)	1,9	1,7

Como a área da superfície do núcleo é importante para o cálculo da porosidade σ_h , foram realizadas medições da área e arestas por meio do software livre ImageJ[®] de análise de imagens. A Figura 5.3 detalha como é realizada esta medição. Foram utilizadas 20 medições da área dos núcleos que possuíam menor deformação para a estimativa da média. Com o paquímetro, mediu-se a espessura da parede do núcleo,

resultando em 0,1 mm para ambas as amostras.

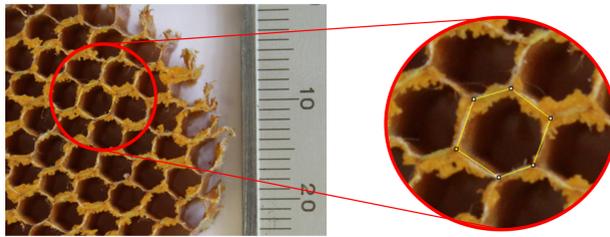


Figura 5.3: Medição da área do núcleo *honeycomb*.

As amostras para medição do coeficiente de absorção com incidência normal em tubo de impedância (ver subseção 5.3.1) possuem corte circular com diâmetro de 24 mm para ajustar nas dimensões internas do tubo. Estas amostras estão ilustradas na Figura 5.4. Com intuito de evitar absorção causada pelos núcleos expostos, foi adicionada massa de calafetar nas bordas das amostras, conforme a Figura 5.5.



Figura 5.4: Amostras para medição em tubo de impedância.

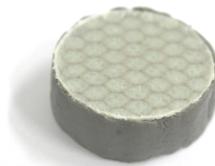


Figura 5.5: Amostra com massa de calafetar.

Como referência para as medições do coeficiente de absorção com incidência normal, uma placa de alumínio com espessura $t = 0,5$ mm e 37 perfurações com diâmetro $d = 0,5$ mm foi utilizada. Para constituir um sistema de absorção, foi utilizado

um porta amostras com cavidade de profundidade de $D = 23$ mm. A Figura 5.6 apresenta a placa rígida microperfurada. Os diâmetros maiores aparentes na placa em alumínio servem para prender a placa no porta amostras.



Figura 5.6: Amostra da placa rígida microperfurada a laser.

Para os testes da eficiência de radiação, perda de transmissão e fator de perda por amortecimento estrutural foram utilizados dois painéis de interior da amostra (A), descrita na Tabela 5.1. Em um painel, o qual é referenciado como MPP, foram feitas microperfurações em cada núcleo de, aproximadamente, 0,6 mm de diâmetro por meio de punções. Para fim de notificação, o painel denominado *baseline* não possui perfurações e é utilizado como referência. As dimensões destes painéis estão ilustradas na Figura 5.7.

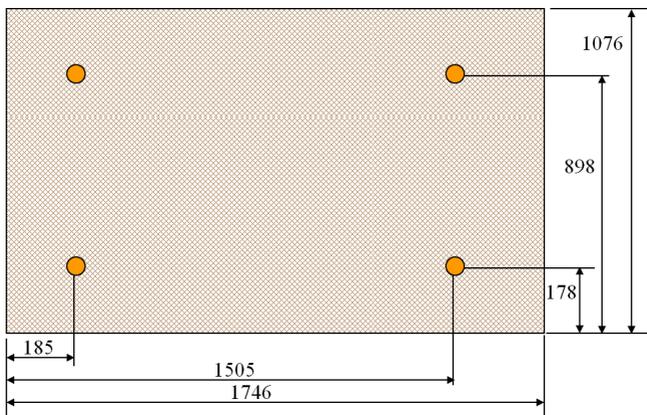


Figura 5.7: Dimensões do painel de interior.

5.2 Estrutura das Perfurações

Uma análise micrométrica das perfurações foi realizada considerando três diferentes processos de furação: laser para a amostra de alumínio; broca e punção para o painel interno.

As Figuras 5.8 (a) e (b) ilustram perfurações na placa superior do painel de interior realizadas com brocas de valor nominal de 0,3 e 0,6 mm com vista da entrada (a) e da saída da perfuração (b). Pode-se notar perfurações circulares bem definidas, tanto na entrada quanto na saída, porém com algumas rebarbas de fibra quebrada.

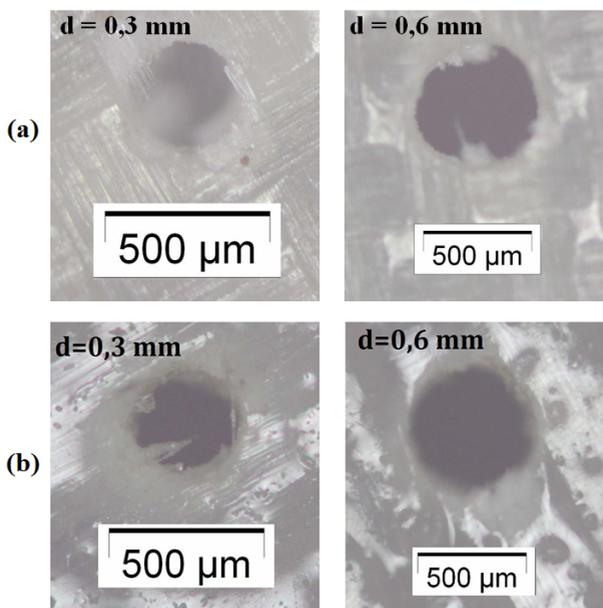


Figura 5.8: Microperfurações feitas por broca no painel de interior: (a) vista da entrada e (b) vista da saída da perfuração.

As Figuras 5.9 (a) e (b) ilustram as perfurações realizadas por punção com valor nominal de 0,3 e 0,4 mm com vista da entrada (a) e da saída da perfuração (b). As perfurações por punções não possuem forma circular definida, com bordas quebradas e excesso de rebarba, principalmente na saída. Nota-se, também,

que o diâmetro de saída não corresponde ao de entrada.

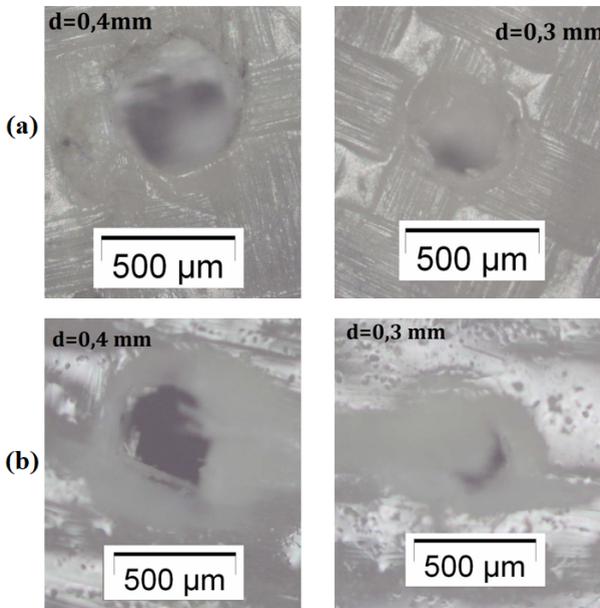


Figura 5.9: Microperfurações feitas por punção no painel de interior: (a) vista da entrada e (b) vista da saída da perfuração.

A Figura 5.10 apresenta duas perfurações realizadas na placa de alumínio com corte a laser de 0,5 mm de diâmetro. Pode-se notar uma perfuração homogênea, com bordas bem definidas. As placas com estas perfurações serão utilizadas como referência.

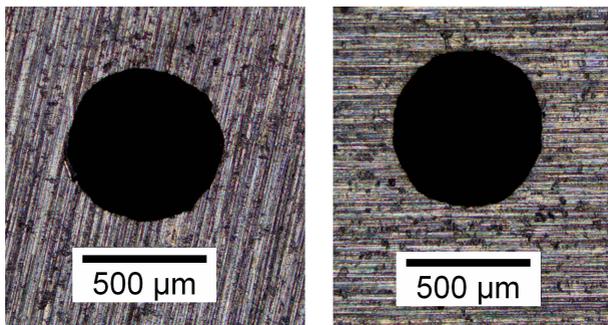


Figura 5.10: Microperfurações a laser em placa de alumínio.

O software livre ImageJ[®] de processamento de imagens foi utilizado para a análise das dimensões das perfurações. A Figura 5.11 mostra um exemplo para a medição do diâmetro de uma perfuração realizada por broca. Foi realizada a média de cinco imagens para cada diâmetro de perfuração.

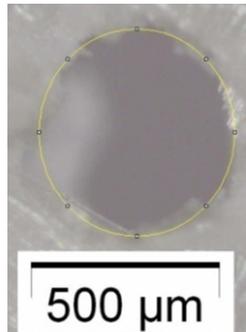


Figura 5.11: Obtenção do valor do diâmetro através do software ImageJ[®].

Os resultados das medições dos diâmetro estão descritos na Tabela 5.2, sendo d_{nom} o diâmetro nominal, d_{min} o valor mínimo medido, d_{max} o valor máximo, e d_{med} o valor médio. Todos os valores estão em [mm]. Para as furações feitas com punção e broca na placa de fibra foram utilizados os valores dos diâmetros na entrada e saída das perfurações, pois estes apresentam variações significativas, principalmente para punções.

Tabela 5.2: Valores dos diâmetros medidos para cada amostra

Amostra	d_{nom}	d_{min}	d_{max}	d_{med}
Fibra - Punção	0,30	0,13	0,29	0,24
Fibra - Punção	0,40	0,35	0,42	0,39
Fibra - Broca	0,30	0,32	0,35	0,33
Fibra - Broca	0,40	0,42	0,46	0,44
Alumínio - Laser	0,5	0,52	0,59	0,55

Nota-se que, em geral, os diâmetros das perfurações com

punção na placa de fibra de vidro possuem valor efetivo inferior ao nominal. Já as perfurações a broca na placa de fibra e a laser na placa de alumínio resultaram em valores superiores. Estas medições foram realizadas com baixa amostragem (aproximadamente cinco medições para cada tipo de furo) e são utilizadas apenas para análise qualitativa das perfurações. Na seção 5.3.2 está descrito um método inverso para a obtenção dos parâmetros geométricos, no qual obtém-se resultados mais precisos.

5.3 Coeficiente de Absorção

Esta seção apresenta os métodos utilizados para a medição do coeficiente de absorção e descreve um método inverso, o qual utiliza medições do coeficiente de absorção e um algoritmo de otimização para obter os parâmetros intrínsecos ao painel microperfurado.

Dois métodos foram utilizados para medição do coeficiente de absorção: método da função de transferência em tubo de impedância com incidência normal, também conhecido como método dos dois microfones; e método da câmara reverberante para campo difuso.

5.3.1 Coeficiente de Absorção por Incidência Normal

Com o intuito de obter o coeficiente de absorção por incidência normal, o método dos dois microfones apresentado por Chung e Blaser [1980] foi aplicado. Este método constitui a base da norma ISO 10534-2 [1998]. A teoria na qual este método se baseia envolve a decomposição de um sinal aleatório estacionário, gerado por um alto falante, em seus componentes incidente e refletido, utilizando uma função de transferência entre as pressões acústicas obtidas em duas localidades na parede do duto. A Figura 5.12 apresenta uma representação esquemática do método.

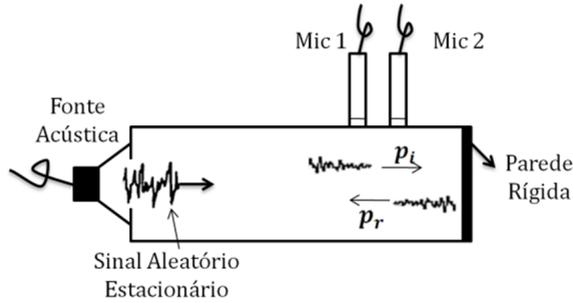


Figura 5.12: Representação esquemática do método dos dois microfones para tubo de impedância.

A utilização do tubo de impedância implica em duas limitações na faixa de frequência de medição. O limite superior é delimitado pela frequência de corte do tubo, definida como o início da existência de modos transversais, e também do espaçamento excessivo entre microfones. O limite inferior depende apenas do espaçamento entre os microfones. A frequência de corte do tubo de impedância é calculada por:

$$f_c = \frac{1,84c_0}{\pi d_t}, \quad (5.1)$$

sendo d_t o diâmetro interno do tubo que, neste caso, é igual a 0,025 m, resultando em uma frequência de corte de $f_c = 7965$ Hz. O tubo de impedância disponível no LVA (Laboratório de Vibrações e Acústica), possui três posições de microfone, de forma a obter uma maior abrangência nas medições. A Figura 5.13 ilustra o esquema de montagem de uma medição com o tubo de impedância.

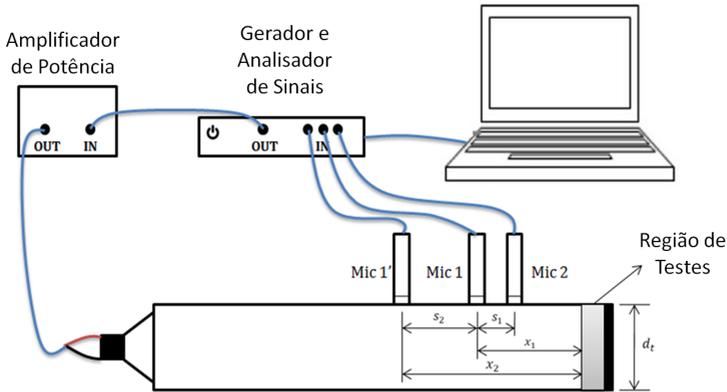


Figura 5.13: Esquema de medição do coeficiente de absorção com incidência normal em tubo de impedância.

As recomendações da norma quanto ao espaçamento entre microfones são as seguintes:

$$f_{max} < \frac{0,45c_0}{s_1}, \quad (5.2)$$

e

$$f_{min} > \frac{0,05c_0}{s_2}, \quad (5.3)$$

em que s_1 é a distância entre os microfones 1 e 2, e s_2 a distância entre os microfones 1 e 3. A menor e maior distâncias entre microfones são $s_1 = 0,024$ m e $s_2 = 0,124$ m, respectivamente, de forma que $f_{max} < 6431$ Hz e $f_{min} > 138$ Hz. O coeficiente de reflexão complexo é obtido por [Chung e Blaser, 1980]:

$$R_{exp} = \frac{H_{12} - e^{-ik_t s_i}}{e^{ik_t s_i} + H_{12}} e^{2ik_t x_1}, \quad (5.4)$$

sendo $H_{12} = P_{mic2}/P_{mic1}$ a função de transferência entre os microfones e k_t é o número de onda complexo, o qual contém informações de perdas viscotérmicas, definido por:

$$k_t(\omega) = k_0 - \frac{2ik_0}{d_t\sqrt{2}} \left(\sqrt{(\eta/(\rho_0\omega))} + (\gamma_c - 1)\sqrt{\kappa_f/(\rho_0\omega c_p)} \right), \quad (5.5)$$

sendo c_p o calor específico à pressão constante, γ_c a razão de calores específicos e κ_f o módulo de compressibilidade.

Para obter a função transferência de forma precisa, é necessária a calibração de fase do sistema de medição. O método de calibração proposto por Chung e Blaser [1980], e posteriormente normatizado [ISO10534-2:1998, 1998], foi escolhido por ser prático e não necessitar equipamentos extras. Primeiramente, realiza-se a medição da função transferência H_{12}^a . Invertem-se, então, os dois microfones, incluindo todo o sinal de medição (canal do analisador, amplificador, etc.), repetindo a medição e obtendo a nova função transferência H_{12}^b . A nova função de transferência com as fases corrigidas H'_{12} é obtida por:

$$H'_{12} = \left(\frac{H_{12}^a}{H_{12}^b} \right)^{0.5}. \quad (5.6)$$

A impedância de superfície experimental, Z_{exp} , e o coeficiente de absorção por incidência normal, α_n , são calculados pelas equações:

$$Z_{exp} = \rho_0 c_0 \frac{1 + R_{exp}}{1 - R_{exp}}, \quad (5.7)$$

e

$$\alpha_n = 1 - |R_{exp}|^2. \quad (5.8)$$

5.3.1.1 Resultados

Como referência, foi realizado um teste do coeficiente de absorção somente com o porta amostra, ou seja, sem nenhum material de absorção. Este teste tem o intuito de verificar a

absorção de parede rígida, constatando a presença, ou não, de vazamentos. A Figura 5.14 mostra o teste realizado para o porta amostra de profundidade igual a 23 mm. Em teoria, a parede rígida deve possuir coeficiente de absorção igual a zero, entretanto, na prática, nota-se que a absorção oscila entre 0 e 0.06 para toda a faixa de frequência. Inúmeros fatores podem causar tal efeito: rugosidade na parede do tubo, vazamentos ou frestas no flange, pressão, umidade, localização dos microfones e espaçamentos, entre outros [Niresh *et al.*, 2016]. Em geral, a influência destes fatores surge somente em regiões de baixa absorção (aproximadamente 5% de erro).

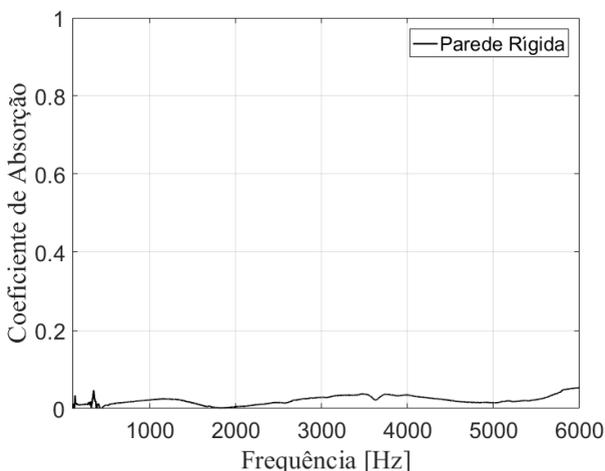


Figura 5.14: Coeficiente de absorção experimental para parede rígida.

Placa em Alumínio

O primeiro teste realizado foi com a placa rígida de alumínio com perfurações a laser, pois tal configuração possui as características nas quais os modelos clássicos foram baseados, ou seja, com perfuração circular homogênea e bordas bem definidas.

Para os testes com a placa referência, foi realizada a comparação entre o coeficiente de absorção obtido experimentalmente e

os valores obtidos pelos dos modelos de Maa (representado pela variação de Allam *et al.* [2009]), Kim [2011], Temiz *et al.* [2014] e o modelo de fluido equivalente de Atalla *et al.* [2007].

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam esta comparação considerando bordas agudas e arredondadas, respectivamente. Os parâmetros utilizados e um esquema da configuração testada estão descritos nas figuras. Nota-se que os modelo de Allam [2009], Kim [2011] e Temiz [2014] possuem valores semelhantes e superestimam a absorção para bordas agudas, enquanto que o modelo de fluido equivalente de Atalla [2007] a subestima. Já para bordas arredondadas, os modelos estimam melhor a absorção na região do pico, porém acima deste, a subestimam. Os quatro modelos identificam corretamente o pico, o que indica que os valores dos parâmetros geométricos utilizados estão próximos dos valores reais.

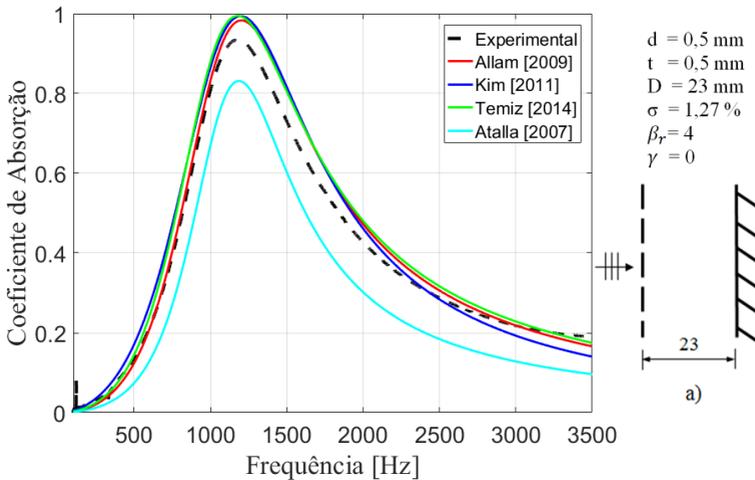


Figura 5.15: Validação dos modelos com bordas agudas para o coeficiente de absorção de um MPP simples.

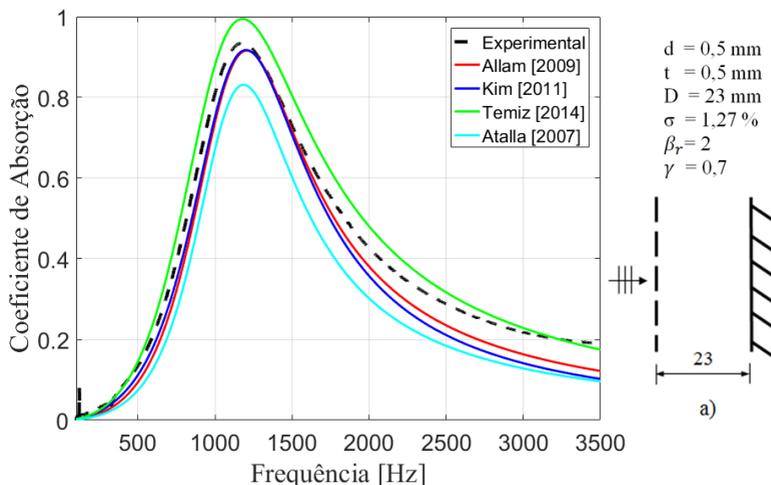


Figura 5.16: Validação dos modelos com bordas arredondadas para o coeficiente de absorção de um MPP simples.

A Figura 5.17 apresenta o coeficiente de absorção considerando bordas levemente arredondadas, o que pode ser realizado apenas nos modelos de Allam [2009], utilizando $\beta_r = 3$, e de Kim [2011], utilizando $\gamma = 0,35$. Nota-se uma boa concordância para toda a faixa de análise, tendo o modelo de Allam *et al.* [2009] apresentado melhores resultados.

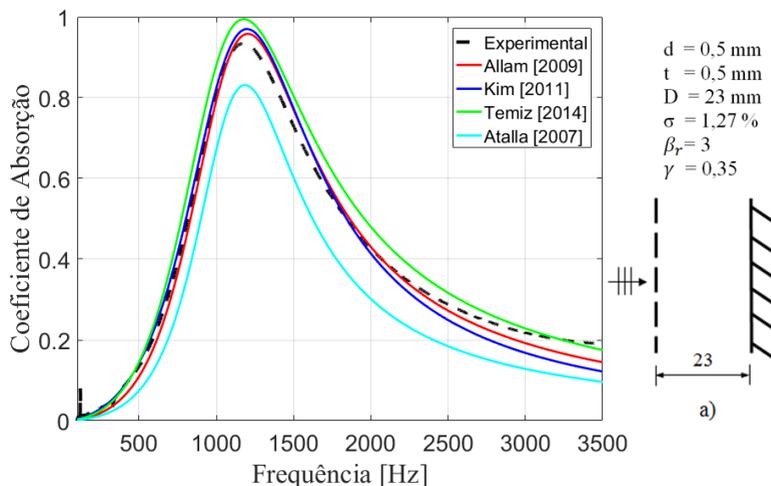


Figura 5.17: Validação dos modelos com bordas levemente arredondadas para o coeficiente de absorção de um MPP simples.

Uma configuração de teste considerando MPP duplo foi montada com duas placas de alumínio e mesmos parâmetros geométricos. Um separador de náilon foi utilizado para o primeiro espaçamento. A Figura 5.18 apresenta o coeficiente de absorção do MPP duplo, em conjunto com um esquema de montagem. Para os modelos, foram considerados os valores com as bordas levemente arredondadas. Novamente, os modelos de Allam [2009] e Kim [2011] estimam melhor a absorção sonora.

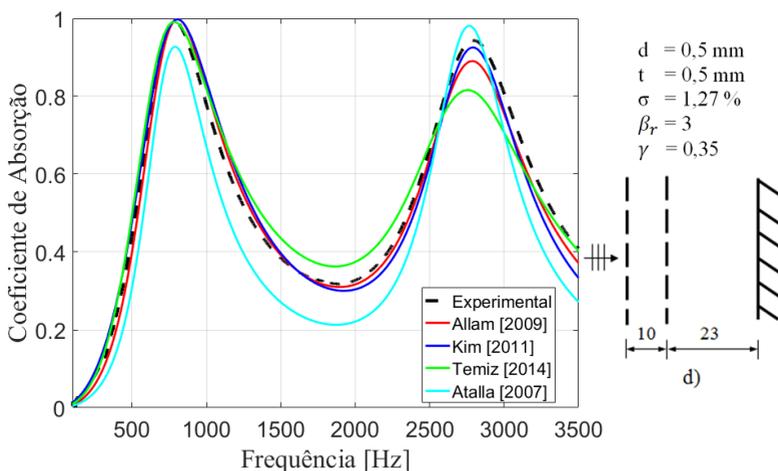


Figura 5.18: Validação dos modelos com bordas levemente arredondadas para o coeficiente de absorção de um MPP duplo.

Destas comparações entre valores experimentais e calculados, entende-se que o fator de correção da resistência acústica possui forte influência na modelagem de painéis microperfurados. Com estas validações, pode-se afirmar que o modelo de Maa (variação de Allam [2009]) e o modelo de Kim [2011] representam melhor o coeficiente de absorção de painéis microperfurados com forma de borda não aguda. Decidiu-se, então, utilizar a variação do modelo de Maa proposta por Allam *et al.* [2009]) para as demais análises realizadas, pois este possui melhores resultados para a faixa de frequência de análise.

Continuando as validações experimentais para uma placa de alumínio, realizaram-se medições com MPP e material

poroso em múltiplas camadas. As configurações de teste estão mostradas no Capítulo 3, porém serão apresentados em conjunto com as as curvas do coeficiente de absorção. As placas microperfuradas utilizadas são as mesmas das análises acima. Dois materiais porosos foram considerados, espuma melamina (A) e lã de vidro (B). Seus parâmetros estão descritos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Valores dos parâmetros dos materiais porosos.

Amostra	σ_r	ϕ	α_∞	Λ	Λ'	ρ_{ho_t}
Espuma (A)	18901	0.98	1	0.095	0.197	10
Fibra (B)	23815	0.97	1	0.019	0.084	13

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam as validações experimentais para as configurações (b) e (c) de MPP simples com a espuma de melamina (A).

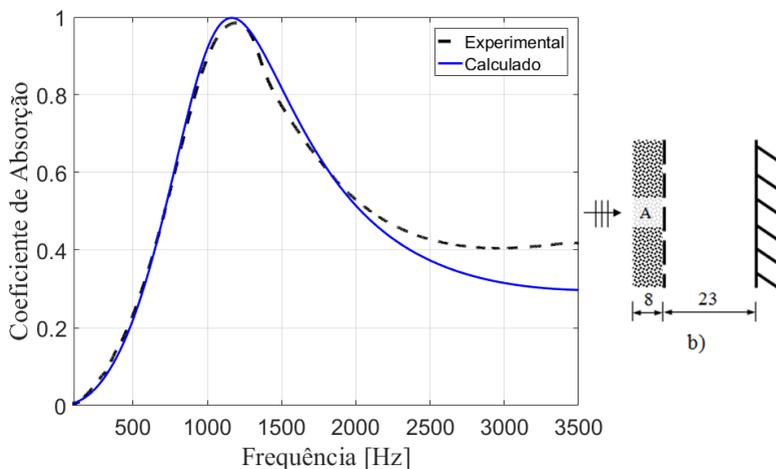


Figura 5.19: Coeficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (b).

Os coeficientes de absorção calculados mostram boa concordância para toda a faixa de frequência, exceto para a configuração (b), que mostra divergência acima de 2000 Hz. Isto pode ser atribuído a alguns fatores, como uma possível

camada de ar entre material e MPP, ou compressão da amostra no tubo de impedância. Na configuração (c), pode-se notar uma pequena discordância em torno de 1800 Hz. Isto ocorre, devido às ressonâncias de compressão de um quarto do comprimento de onda da fase sólida do material poroelástico, neste caso, a melamina.

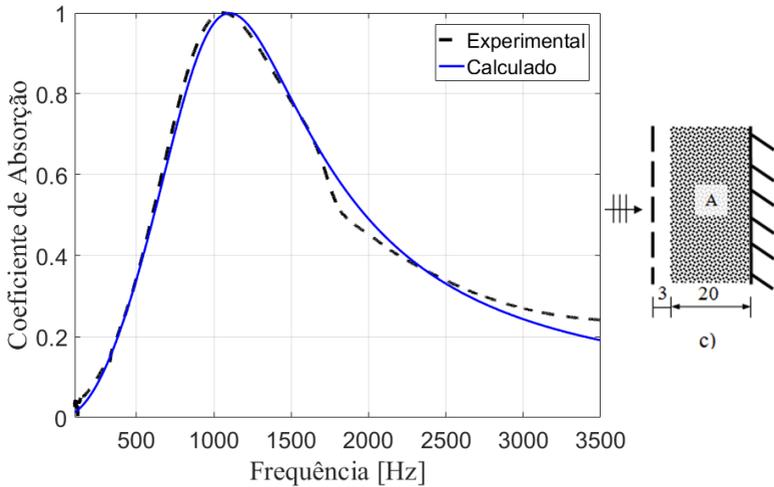


Figura 5.20: Coeficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (c).

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam as validações experimentais para as configurações (e) e (f) de MPP duplo com a espuma de melamina (A) e lã de vidro (B). Novamente, os coeficientes de absorção calculados mostram boa concordância para toda a faixa de frequência. Também pode-se verificar a ressonância da fase sólida, ocorrendo em 1400 Hz.

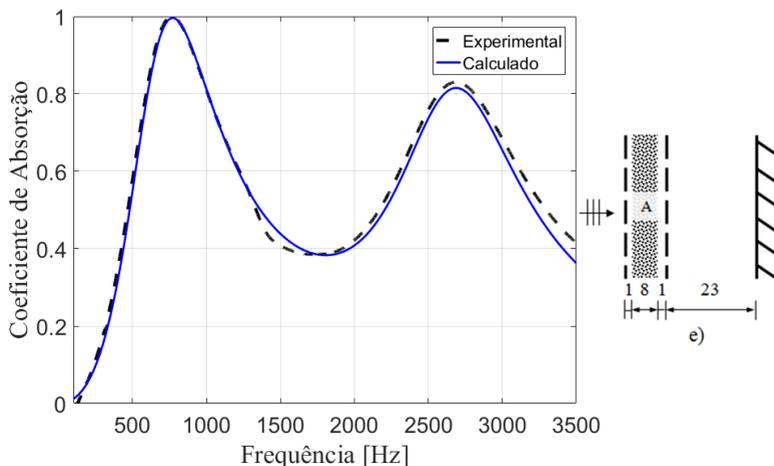


Figura 5.21: Coeficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (e).

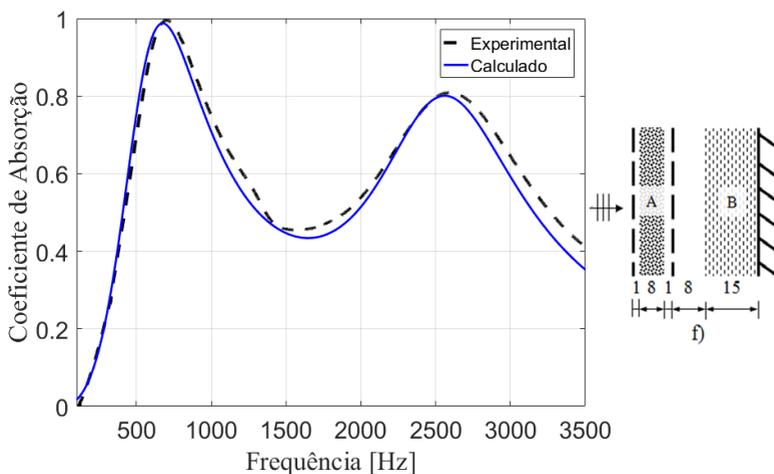


Figura 5.22: Coeficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (f).

Painel de Interior

A Figura 5.23 apresenta o coeficiente de absorção obtido experimentalmente para uma amostra do painel de interior sem microperfurações. Este teste tem o intuito de mostrar o

comportamento do painel como é utilizado atualmente pela indústria. Pode-se notar um comportamento similar a uma parede rígida, ou seja, com absorção quase nula.

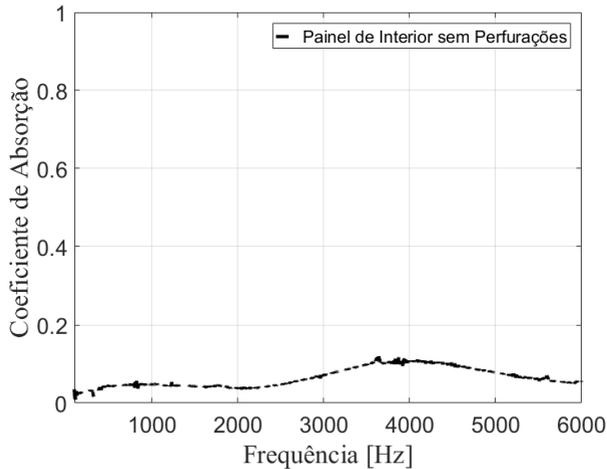


Figura 5.23: Coeficiente de absorção experimental do painel de interior sem perfurações..

Foram realizados três configurações de teste do coeficiente de absorção com incidência normal para o painel de interior: (a) núcleos inteiros perfurados por punção com apenas um diâmetro; (b) com menos de 100 % dos núcleos perfurados por broca e apenas um diâmetro; (c) com até três diâmetros diferentes de perfuração por broca. As configurações estão apresentadas na Figura 5.24.

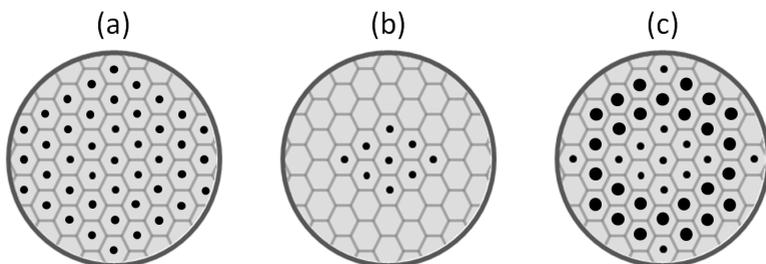


Figura 5.24: Configurações de teste do coeficiente de absorção por incidência normal para o painel de interior.

Foi realizada a comparação entre valores experimentais, o modelo proposto nesta tese para MPP com cavidade subdividida e a variação do modelo de Maa proposta por Allam *et al.* [2009].

A Figura 5.25 apresenta o coeficiente de absorção experimental e calculado para a configuração (a) com diâmetro de perfuração nominal de $d_{nom} = 0,6$ mm realizada com punção. Pode-se notar um forte deslocamento no pico de frequência. Isto ocorre, pois as perfurações realizadas com punção não possuem forma circular definida, além de conter bordas quebrada, excesso de rebarba e o diâmetro de saída não corresponde ao de entrada. A Figura 5.26 mostra a mesma configuração anterior, porém com o diâmetro utilizado nos modelos de $d = 0,35$ mm. Pode-se notar uma boa concordância geral entre os valores experimentais e calculados, com exceção de frequências entre 3500 Hz e 6000 Hz. Esta divergência pode ocorrer devido ao tipo de perfuração, a qual deixa bordas não homogêneas e rebarbas. A divergência entre valores dos modelos acontece, pois o modelo com cavidade subdividida considera o número real de perfurações em uma amostra, que neste caso gera $\sigma_n = 92$ %, enquanto que o modelo de Maa assume que todos os núcleos estão perfurados.

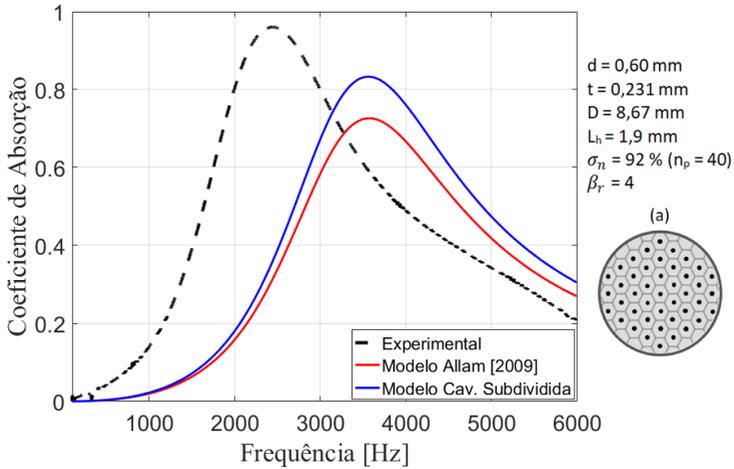


Figura 5.25: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção $d_{nom} = 0.6 \text{ mm}$.

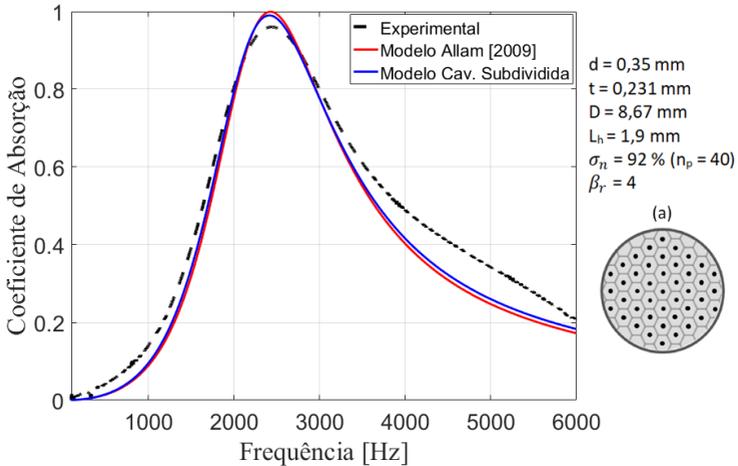


Figura 5.26: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção, considerando $d = 0.35 \text{ mm}$ e $\beta_r = 4$.

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam os resultados para a mesma configuração anterior, porém com os valores do fator de correção da resistência acústica $\beta_r = 3$ e $\beta_r = 2$, respectivamente.

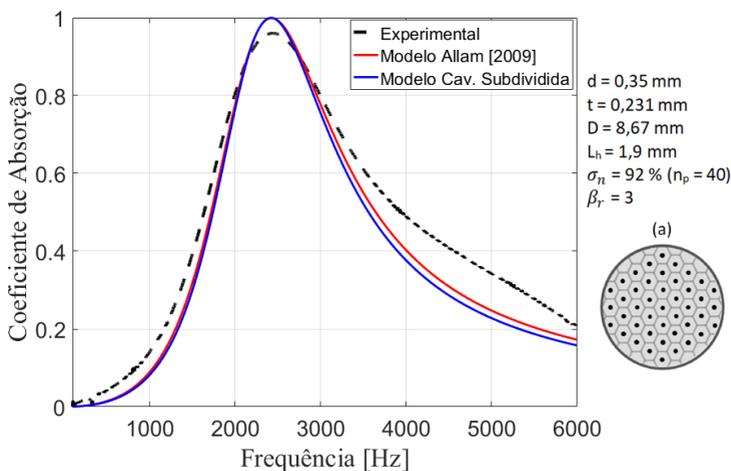


Figura 5.27: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção considerando $d = 0.35 \text{ mm}$ e $\beta_r = 3$.

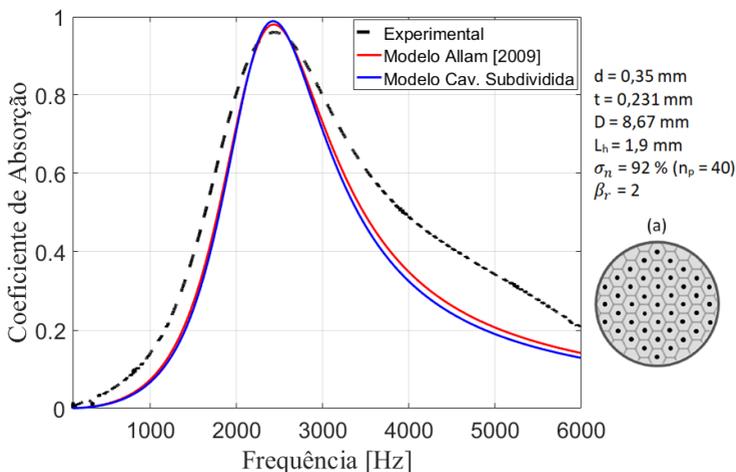


Figura 5.28: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (a) do painel de interior com furação por punção considerando $d = 0.35 \text{ mm}$ e $\beta_r = 2$.

Pode-se notar que menores valores de β_r diminuem a faixa de absorção e mais distante ficam os valores calculados do experimental. Isto indica que para perfurações com punção, o

valor de $\beta_r = 4$ é o mais indicado.

Para a configuração (b), foram realizados testes com diferentes porosidades relativas σ_n , a qual é função do número de núcleos perfurados em uma amostra, n_p . Para estes testes, foram utilizadas amostras do painel de interior (A), conforme Tabela 5.1. Estas amostras possuem um valor total de núcleos de, $n_{ne} \approx 43,5$.

A Figura 5.29 apresenta os resultados para a configuração (b) considerando perfurações por broca com diâmetro nominal de $d = 0,4$ mm e 35 perfurações na amostra, gerando $\sigma_n = 80\%$.

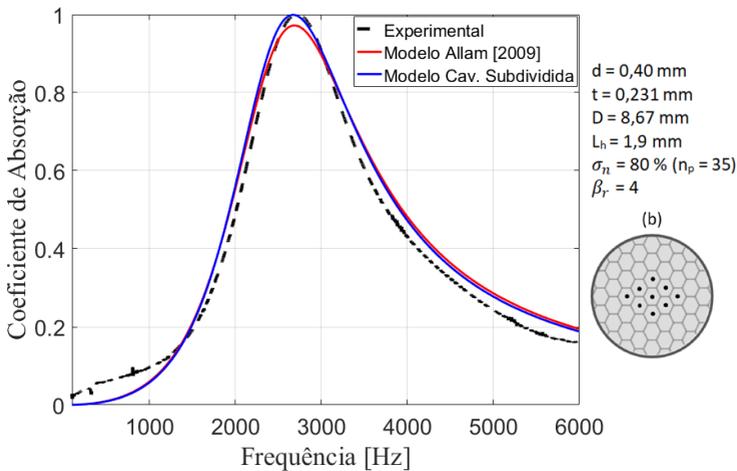


Figura 5.29: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{nom} = 0.40$ mm e $\sigma_n = 80\%$.

Observa-se boa concordância entre os picos de frequência experimental e calculados. Nota-se também que o modelo com cavidade subdividida estima melhor o coeficiente de absorção para toda a faixa de frequência. Isto ocorre, pois o modelo de Allam [2009] não prevê a variação do número de núcleos perfurados, neste caso $\sigma_n = 80\%$.

As Figuras 5.30 e 5.31 apresentam a mesma análise que a Figura anterior com $\sigma_n = 35\%$ ($n_p = 15$) e $\sigma_n = 57\%$ ($n_p = 25$), respectivamente.

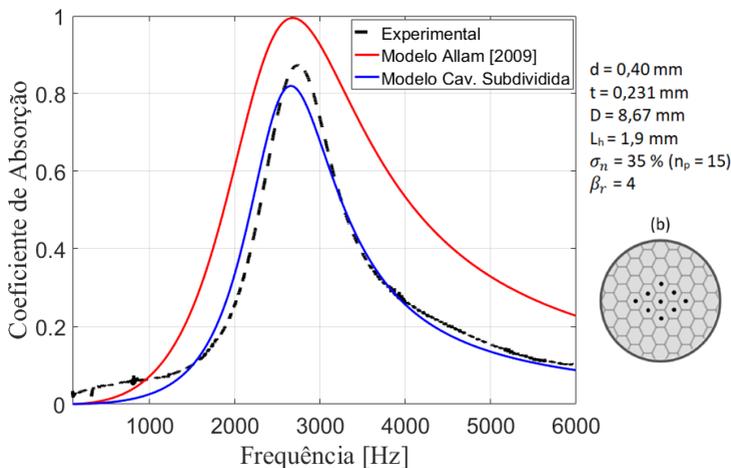


Figura 5.30: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.40 \text{ mm}$ e $\sigma_n = 35 \%$.

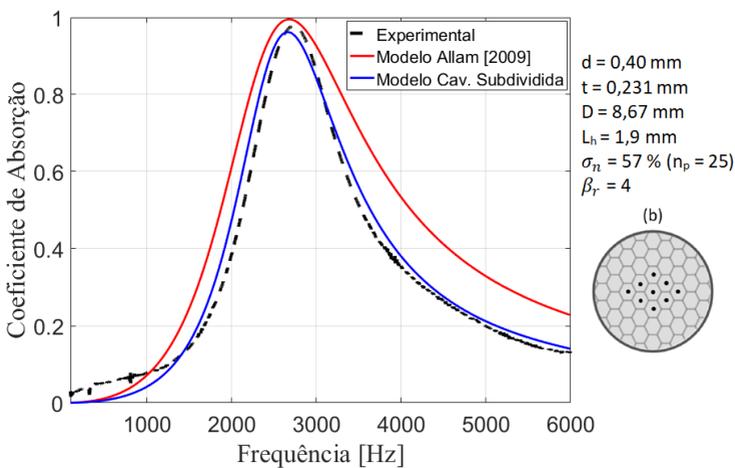


Figura 5.31: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.40 \text{ mm}$ e $\sigma_n = 57 \%$.

Pode-se notar boa concordância entre os valores experimental e calculado pelo modelo com cavidade subdividida, enquanto que o modelo clássico superestima a absorção. Nota-se também

que há um pequeno deslocamento no pico de frequência, em ambas as Figuras. Possivelmente o valor do diâmetro equivalente é maior que o nominal. A Figura 5.32 apresenta a mesma análise que a Figura 5.30, porém com diâmetro equivalente de $d = 0,42$ mm. O resultado indica que o diâmetro equivalente está acima do valor nominal.

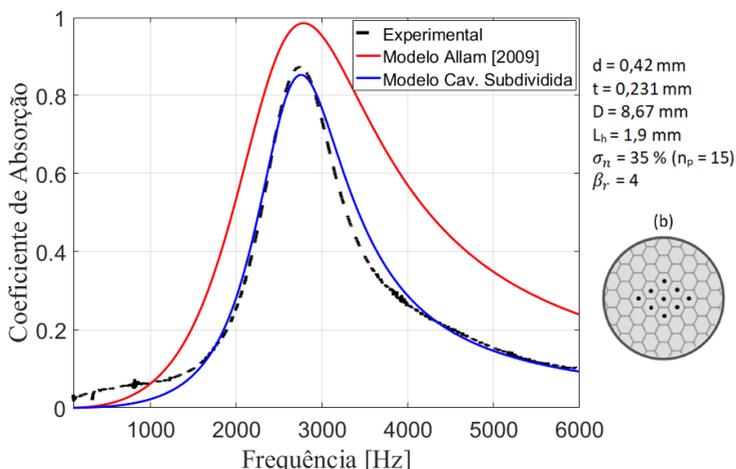


Figura 5.32: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_e f = 0.42$ mm e $\sigma_n = 35\%$.

As Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 apresentam a mesma análise que a Figura anterior, porém com diâmetro de perfuração nominal de 0,6 mm. Pode-se notar uma melhor concordância para as duas últimas, com um deslocamento de pico da primeira. Como o valor do pico experimental reduziu, pode-se afirmar que o diâmetro equivalente está diferente no resultado experimental da Figura 5.33.

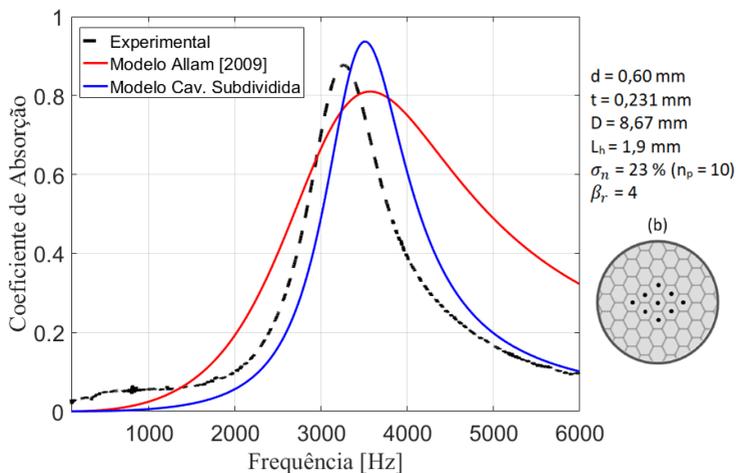


Figura 5.33: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.60 \text{ mm}$ e $\sigma_n = 23 \%$.

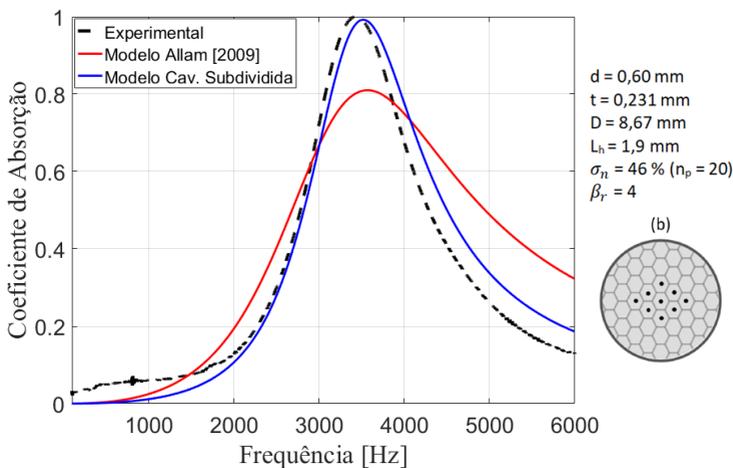


Figura 5.34: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_{ef} = 0.60 \text{ mm}$ e $\sigma_n = 46 \%$.

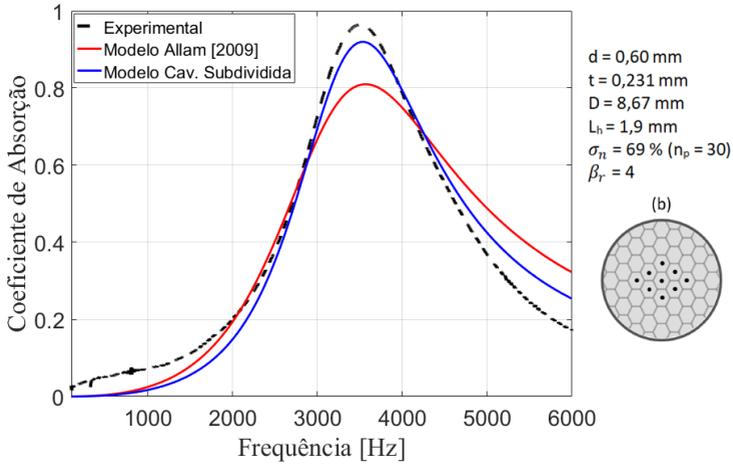


Figura 5.35: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_e f = 0.60 \text{ mm}$ e $\sigma_n = 69 \%$.

Para a configuração (c) foram realizados dois testes com diferentes distribuições de diâmetros em paralelo.

A Figura 5.36 apresenta os resultados para a configuração (c) com os parâmetros da amostra (A), com três diâmetros em paralelo, sendo $d_1 = 0,3 \text{ mm}$ com $\sigma_{n_1} = 11 \% (n_p = 5)$, $d_2 = 0,4 \text{ mm}$ e $\sigma_{n_2} = 34 \% (n_p = 15)$ e $d_3 = 0,6 \text{ mm}$ e $\sigma_{n_3} = 39 \% (n_p = 17)$. O modelo prevê com boa precisão os níveis globais de absorção e as frequências de pico de absorção, com pequenos deslocamentos.

A Figura 5.37 apresenta os resultados para a configuração (c) com os parâmetros da amostra (B), conforme Tabela 5.1, com dois diâmetros em paralelo, sendo $d_1 = 0,3 \text{ mm}$ com $\sigma_{n_1} = 60 \% (n_p = 32)$ e $d_2 = 0,6 \text{ mm}$ e $\sigma_{n_2} = 24 \% (n_p = 13)$. Novamente, o modelo estima bem a absorção global para a configuração em paralelo, com pequenos deslocamentos do pico. Esta validação indica que a aplicação em paralelo melhora a largura de banda de absorção sem alterações nos parâmetros intrínsecos ao painel.

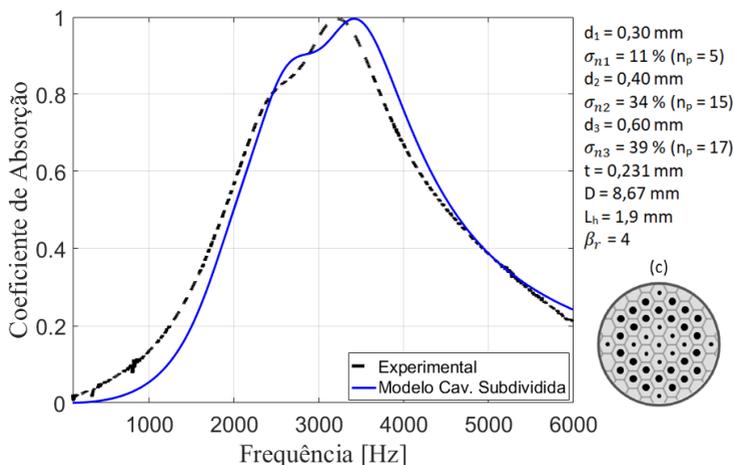


Figura 5.36: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_1 = 0,3 \text{ mm}$ com $\sigma_{n1} = 11 \%$, $d_2 = 0,4 \text{ mm}$ com $\sigma_{n2} = 34 \%$ e $d_3 = 0,6 \text{ mm}$ com $\sigma_{n3} = 39 \%$.

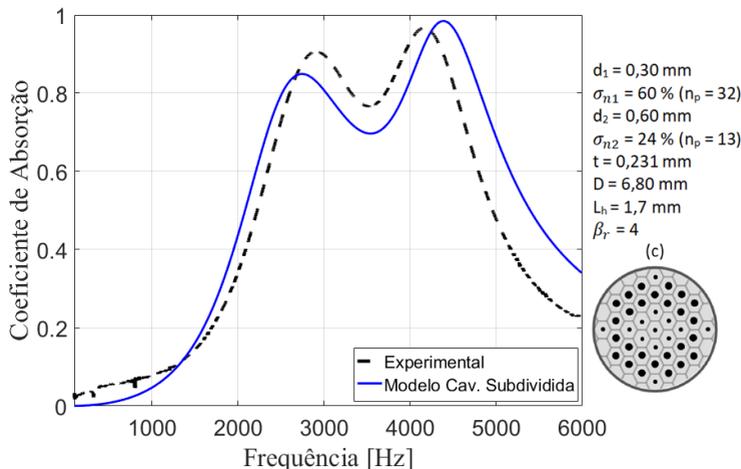


Figura 5.37: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_1 = 0,34 \text{ mm}$ com $\sigma_{n1} = 60 \%$ e $d_2 = 0,6 \text{ mm}$ com $\sigma_{n2} = 24 \%$.

As validações em tubo de impedância indicam que o modelo de MPP com cavidade subdividida estima com boa precisão os

níveis globais da absorção e suas variações devido aos diferentes tipos de configuração. Entretanto, deve-se tomar cuidado com os parâmetros de entrada, especialmente o diâmetro da perfuração, devido ao tipo de manufatura do mesmo. Observou-se que existe grande sensibilidade do modelo à este parâmetro e uma melhor estimativa do diâmetro de perfuração deve ser realizada. Para isto, desenvolveu-se uma variação do método inverso baseado na medição do coeficiente de absorção por incidência normal para a obtenção dos parâmetros geométricos do MPP, apresentado na seção 5.3.2.

Um teste considerando o painel de interior microperfurado com dois diâmetros de perfuração em paralelo com 10 mm de material poroso em série foi realizado. Para o painel foi utilizada a amostra (B) e para o material poroso a melamina (A). Foi utilizada a mesma configuração de diâmetros e porosidade relativa apresentados na Figura 5.37. A Figura 5.38 apresenta os resultados obtidos para esta configuração em comparação ao modelo de cavidade subdividida aplicado na TMM com e sem a melamina.

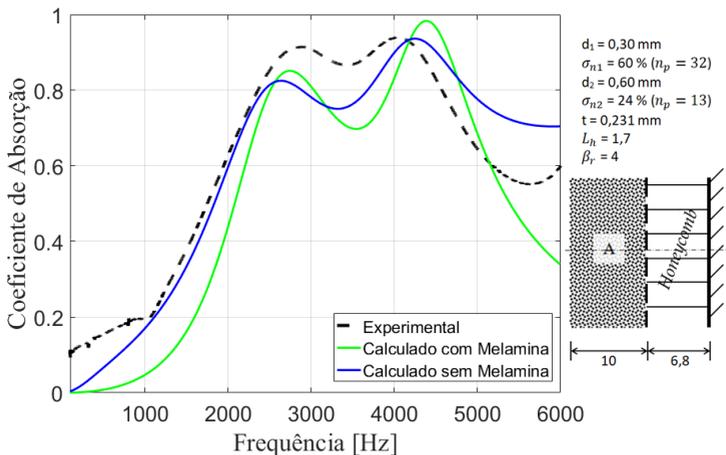


Figura 5.38: Coeficiente de absorção por incidência normal para a configuração (b) do painel de interior com furação por broca $d_1 = 0,34 \text{ mm}$ com $\sigma_{n1} = 60 \%$ e $d_2 = 0,6 \text{ mm}$ com $\sigma_{n2} = 24 \%$ com adição de 10 mm de melamina em série.

Em geral, verifica-se que a absorção aumenta quando se adiciona a melamina, ocorrendo um pequeno deslocamento e diminuição nos picos. Isto corrobora os resultados analíticos e experimentais de Sakagami *et al.* [2011]. O modelo representa bem a absorção obtida experimentalmente, com divergências de, aproximadamente, 15 % no primeiro pico (≈ 3000 Hz) e de 20 % acima de 5000 Hz.

5.3.2 Método Inverso

Métodos inversos para a obtenção de parâmetros de materiais de absorção são baseados na solução de um algoritmo de otimização para ajuste de curvas experimentais. O objetivo é encontrar uma função de erro a partir dos parâmetros de entrada de um modelo analítico e, com base neste, obter o melhor ajuste para o coeficiente de absorção. A função objetivo é dada pela função erro que se deseja minimizar, até que se encontre os parâmetros acústicos de ajuste, que são as próprias variáveis de projeto Mareze [2013].

5.3.2.1 Método de Liu *et al.*

Liu *et al.* [2014] propuseram a utilização de um método inverso para a obtenção de parâmetros de placas microperfuradas que possuem perfurações não homogêneas. Os autores explicam que deve existir uma combinação de diâmetro e porosidade que produzirá uma curva de absorção sonora que é uma combinação única de valor de pico de absorção, faixa de frequência e frequência central.

O algoritmo utiliza uma função base, neste caso o coeficiente de absorção, e uma série de dados experimentais para determinar um vetor de parâmetros geométricos equivalentes de forma que a soma dos quadrados dos resíduos é mínima. O problema de mínimos quadrados pode ser descrito como:

$$\min(\alpha, d) |\alpha(d) - \alpha_{exp}|_2^2 = \min(\alpha, d) \sum_t (\alpha(d, f_i) - \alpha_{exp}(f_i))^2, \quad (5.9)$$

sujeito à

$$\begin{aligned} 0.1\% &\leq \sigma \leq 5\% \\ 10^{-4} &\leq d \leq 210^{-3}. \end{aligned}$$

O procedimento numérico utilizado para este ajuste de curvas é uma modificação de Gauss-Newton [Liu *et al.*, 2014]. O processo é iterativo e para valores de gradiente suficientemente pequenos, dentro da tolerância especificada. A qualidade do ajuste pode ser avaliado pelo coeficiente de determinação:

$$R_d^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}}, \quad (5.10)$$

em que $SS_{residual}$ é a soma dos quadrados da distância de cada ponto medido e a curva melhor ajustada, e SS_{total} é soma dos quadrados da distância de cada ponto medido e a média de todos os pontos medidos. R_d^2 varia entre 0 e 1, é unidimensional e quanto mais próximo de 1 melhor a comparação entre curva ajustada e medida.

Em seu trabalho, Liu *et al.* [2014] utilizaram o método inverso para obter os valores equivalentes do diâmetro das perfurações d e, conseqüentemente, da razão de perfuração σ .

5.3.2.2 Método Inverso por Evolução Diferencial

O método inverso proposto por Liu *et al.* [2014] considera apenas o diâmetro equivalente d e a razão de perfuração σ . Como demonstrado no Capítulo 3, o fator de correção da resistência β_r possui forte influência no coeficiente de absorção de sistemas microperfurados. Além disso, a modificação dos modelos para painéis microperfurados adiciona dois novos parâmetros, a porosidade relativa σ_{n_i} e a área de superfície do

núcleo, representado pelo lado do hexágono L_h .

Devido às limitações do método de Liu *et al.* [2014], desenvolveu-se um método inverso utilizando o algoritmo de otimização DE (descrito no Capítulo 4) pelo do qual pode-se obter os parâmetros que caracterizam um MPP, com e sem cavidade subdividida. Para um MPP simples consideram-se os parâmetros: diâmetro das perfurações d , a espessura da placa t , a profundidade do núcleo D , a porosidade σ e o fator de correção da resistência acústica β_r . Para o MPP com cavidade subdividida, substitui-se a porosidade σ pela porosidade do núcleo σ_h ou o lado do hexágono L_h (que define a área de superfície do núcleo) e adiciona-se a porosidade relativa σ_{n_i} .

Embora alguns destes parâmetros sejam facilmente mensuráveis, como D e t , quando se desconhece a forma de manufatura ou não se tem acesso fácil a cada camada do painel, o método se torna essencial para a caracterização do mesmo. É importante lembrar que para cada parâmetro pode-se fixar um valor, caso conhecido, o que torna o processo de otimização mais rápido e preciso.

Para o MPP simples, o mais importante é caracterizar d , σ e β_r , especialmente se as perfurações não possuem diâmetro e forma homogênea, como é o caso de perfurações por punção (vide seção 5.2). No caso do MPP com cavidade subdividida, os parâmetros L_h e σ_{n_i} possuem forte influência e também devem ser estimados corretamente.

O método utiliza o algoritmo DE com as mesmas configurações para a otimização, exceto pela função objetivo, a qual é baseada na soma do erro quadrático entre o coeficiente de absorção obtido do modelo analítico e do resultado experimental, definida como [Atalla e Panneton, 2005] e [Bonfiglio e Pompoli, 2007]:

$$F_{obj_i} = \sum_{n=f_i}^{f_f} (\alpha - \alpha_{exp})^2. \quad (5.11)$$

Esta equação indica que quanto melhor o ajuste do modelo na frequência para o coeficiente de absorção, menor será o valor da função objetivo e, conseqüentemente, melhor ajuste com o modelo experimental. O domínio de frequência de ajuste encontra-se entre f_i e f_f . Após encontrar o mínimo satisfatório da função objetivo, tem-se então, os parâmetros ajustados [Mareze, 2013].

Definidos os parâmetros de entrada do DE e a função objetivo, deve-se definir os parâmetros de otimização e descrever as restrições dos mesmos. Os parâmetros a serem otimizados são os mesmos descritos no Capítulo 4, portanto não serão descritos novamente. Porém, os valores dos parâmetros otimizados estão contidos nas Figuras dos resultados.

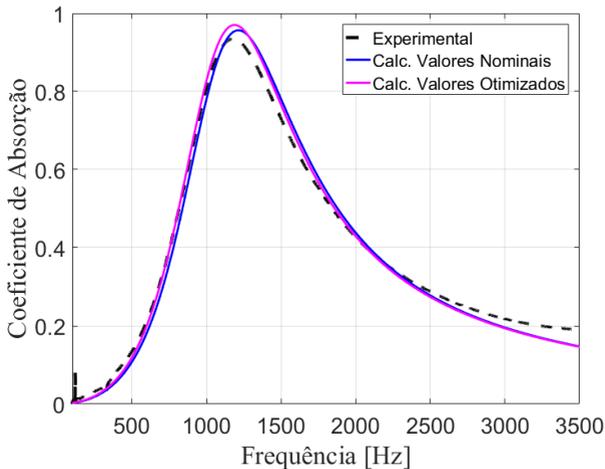
As análises realizadas contém comparações dos valores do coeficiente de absorção por incidência normal obtidos experimentalmente e pelos dos modelos indicados. As curvas obtidas pelos modelos são apresentadas com os valores nominais dos parâmetros e com os valores otimizados.

A primeira configuração analisada foi o MPP simples com a placa de referência dentro da sua principal faixa de atuação, entre 500 Hz e 3500 Hz. Duas análises foram consideradas: (i) fixando os parâmetros t e D para analisar a variação de d , b e β_r ; (ii) otimizando todos os parâmetros.

Para a análise (i), foram consideradas as restrições de d , b e β_r dentro de uma faixa de, aproximadamente, 10% para os dois primeiros e entre os valores extremos para β_r . Os parâmetros utilizados, seus valores nominais, as restrições impostas para o algoritmo e os valores obtidos pela otimização estão descritos na Tabela 5.4. A Figura 5.39 mostra as curvas do coeficiente de absorção obtidas.

Tabela 5.4: Parâmetros utilizados pelo método inverso para o MPP simples com t e D fixados.

Parâmetro	Nom.	Mín.	Máx.	Delta	Opt.
d (mm)	0.50	0.45	0.55	0.01	0.48
t (mm)	0.50	0.50	0.50	0	0.50
D (mm)	23	23	23	0	23
b (mm)	3.95	3.6	4.5	0.1	3.9
β_r	3	2	4	1	3

Figura 5.39: Coeficiente de absorção para um MPP simples com d , b e β_r ajustados pelo método inverso.

O algoritmo de otimização converge com valores similares aos nominais, porém com pequena variação no diâmetro. Pode-se notar uma melhor identificação do pico de frequência.

Para a análise (ii), consideraram-se variações de, aproximadamente, 10% para d e b . As variações de t e D correspondem ao erro de medição do paquímetro (± 0.1 mm). A Tabela 5.5 mostra os valores utilizados. A Figura 5.40 apresenta as curvas obtidas para o MPP simples sem fixar parâmetros.

Tabela 5.5: Parâmetros utilizados pelo método inverso para o MPP simples

Parâmetro	Nom.	Mín.	Máx.	Delta	Opt.
d (mm)	0.50	0.45	0.55	0.01	0.48
t (mm)	0.50	0.40	0.60	0.01	0.60
D (mm)	23	22	24	1	24
b (mm)	3.95	3.6	4.5	0.1	3.6
β_r	3	2	4	1	3

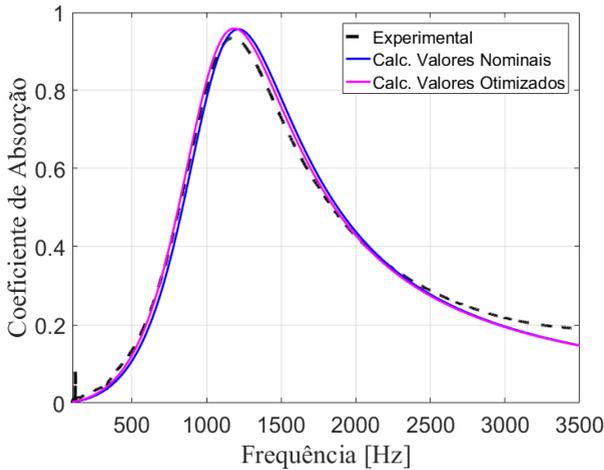


Figura 5.40: Coeficiente de absorção para um MPP simples sem fixar parâmetros.

Nota-se que a curva calculada se ajusta melhor à experimental. O método inverso confirma que $\beta_r = 3$ é o mais indicado para as furações à laser para esta amostra e que o valor equivalente do diâmetro é um pouco menor que o nominal. Pequenas variações de t , D e b são apresentadas.

A segunda configuração analisada foi o painel de interior com perfurações feitas com punções de 0,6 mm de diâmetro nominal conforme configuração (a) ilustrada na Figura 5.24. A otimização foi realizada entre 1000 Hz e 4000 Hz. Novamente, duas análises foram consideradas: (i) fixaram-se todos os parâmetros, exceto d ; (ii) otimizando todos os parâmetros.

Para a análise (i) variou-se o diâmetro de perfuração entre 0,2 mm e 0,7 mm. A Tabela 5.6 indica os parâmetros utilizados e otimizados. A Figura 5.41 apresenta as curvas obtidas para o painel de interior microperfurado considerando otimização do diâmetro de perfuração.

Tabela 5.6: Parâmetros utilizados para a análise (i) do método inverso para o painel de interior com punção nominal de 0,6 mm.

Parâmetro	Nom.	Mín.	Máx.	Delta	Opt.
d (mm)	0,6	0,2	0,7	0,01	0,35
t (mm)	0,231	0,231	0,231	0	0,231
D (mm)	8,67	8,67	8,67	0	8,67
L_h (mm)	1,9	1,9	1,9	0	1,9
σ_n (%)	92	92	92	0	92
β_r	4	4	4	0	4

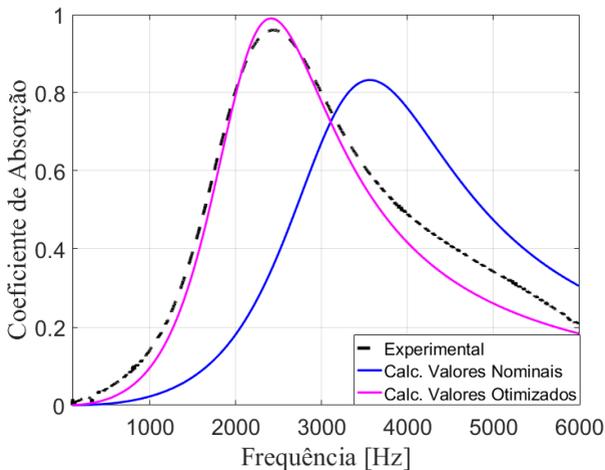


Figura 5.41: Coeficiente de absorção obtido para d otimizado para o painel de interior com punções de valor nominal de 0,6 mm..

O método inverso confirma o diâmetro de perfuração de 0,35 mm, previsto anteriormente na validação experimental.

Para a análise (ii) variou-se t , D e L_h em 0,1 mm e σ_n em 10%. A Tabela 5.7 indica os parâmetros utilizados e otimizados.

A Figura 5.42 apresenta as curvas obtidas para o painel de interior microperfurado considerando otimização de todos os parâmetros.

Tabela 5.7: Parâmetros utilizados para a análise (ii) do método inverso para o painel de interior com punção nominal de 0,6 mm.

Parâmetro	Nom.	Mín.	Máx.	Delta	Opt.
d (mm)	0,6	0,2	0,7	0,01	0,29
t (mm)	0,231	0,131	0,331	0,01	0,131
D (mm)	8,67	8,57	8,77	0,01	8,60
L_h (mm)	1,9	1,8	2,0	0,1	1,9
σ_n (%)	92	83	92	1	96
β_r	4	2	4	1	4

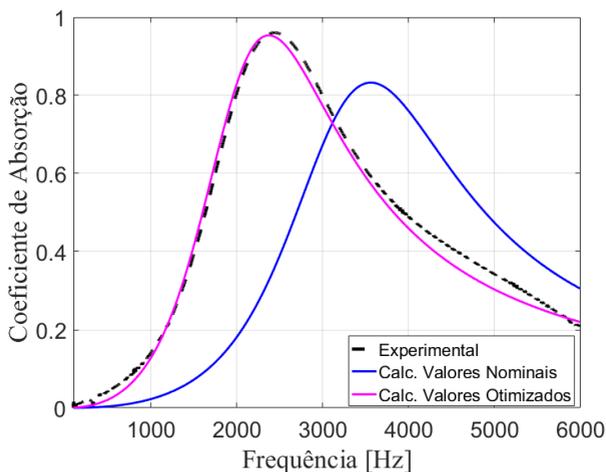


Figura 5.42: Coeficiente de absorção obtido com todos os parâmetros otimizados para o painel de interior com punções de valor nominal de 0,6 mm.

Nota-se que o método extrapola os valores para obter o melhor encaixe da curva. Os valores otimizados indicam que pode haver uma divergência nos valores fornecidos pelo fabricante e as medições em paquímetro para t e D . Embora as divergências sejam pequenas, podem gerar variações significativas nos

resultados.

A terceira configuração analisada foi o painel de interior com perfurações realizadas com broca de 0,4 mm de diâmetro nominal e $\sigma_n = 35\%$. A otimização foi realizada entre 1000 Hz e 4000 Hz. Foram otimizados todos os parâmetros, sendo a variação de t , D e L_h em 0,1 mm e σ_n em 10%. A Tabela 5.8 indica os parâmetros utilizados e otimizados. A Figura 5.43 apresenta as curvas obtidas para os parâmetros otimizados.

Tabela 5.8: Parâmetros utilizados para a análise do método inverso para o painel de interior com perfuração por broca de valor nominal de 0,4 mm.

Parâmetro	Nom.	Mín.	Máx.	Delta	Opt.
d (mm)	0,4	0,2	0,7	0,01	0,44
t (mm)	0,231	0,131	0,331	0,1	0,331
D (mm)	8,67	8,57	8,77	0,1	8,77
L_h (mm)	1,9	1,8	2,0	0,1	1,8
σ_n (%)	35	31	39	1	31
β_r	4	2	4	1	4

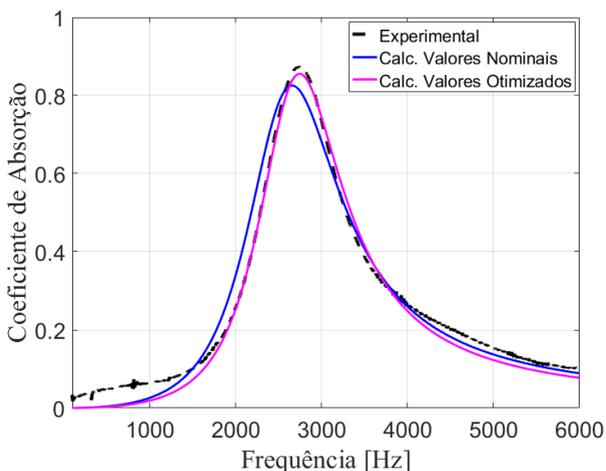


Figura 5.43: Coeficiente de absorção obtido para d otimizado para o painel de interior com punções de valor nominal de 0,6 mm..

Os resultados indicam que o diâmetro equivalente é maior que o nominal. Entretanto, os demais parâmetros obtidos diferem dos valores indicados na análise (ii) do painel de interior com perfurações realizados por punção, exceto o fator de correção da resistência acústica, o qual se manteve constante. Como as amostras são fornecidas como sendo iguais, estas variações podem surgir apenas pelo algoritmo extrapolando os valores para melhor convergir ao valor experimental. Recomenda-se, então, tomar cuidado com as restrições impostas, pois um número desconhecido de configurações de parâmetros pode resultar em absorções semelhantes.

Para as análises com diferentes diâmetros em paralelo, decidiu-se manter os dados do fornecedor para t e D e variou-se o diâmetro de perfuração d_i , o lado do hexágono L_h , a porosidade relativa σ_{n_i} e β_r .

A Tabela 5.9 indica os parâmetros utilizados e otimizados para a amostra amostra (A) do painel de interior, com três diâmetros em paralelo, sendo os valores nominais de $d_1 = 0,3$ mm com $\sigma_{n_1} = 11$ % ($n_p = 5$), $d_2 = 0,4$ mm e $\sigma_{n_2} = 34$ % ($n_p = 15$) e $d_3 = 0,6$ mm e $\sigma_{n_3} = 39$ % ($n_p = 17$). A Figura 5.44 apresenta as curvas obtidas para os parâmetros otimizados.

Tabela 5.9: Parâmetros utilizados para a análise do método inverso para o painel de interior (A) com três diâmetros em paralelo.

Parâmetro	Nom.	Mín.	Máx.	Delta	Opt.
d_1 (mm)	0,30	0,25	0,35	0,01	0,29
d_2 (mm)	0,40	0,35	0,45	0,01	3,7
d_3 (mm)	0,60	0,55	0,65	0,01	0,55
σ_{n_1} %	11	7	15	1	12
σ_{n_2} %	34	29	39	1	29
σ_{n_3} %	39	34	44	1	39
t (mm)	0,231	0,231	0,231	0	0,231
D (mm)	8,67	8,67	8,67	0	8,67
L_h (mm)	1,9	1,8	2,0	0,01	1,9
β_r	4	2	4	1	4

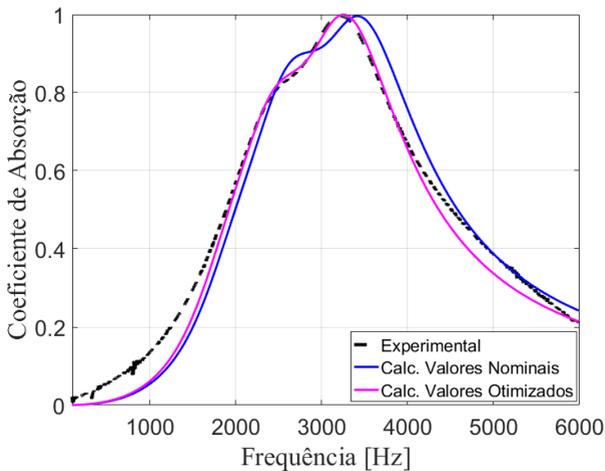


Figura 5.44: Coeficiente de absorção com parâmetros otimizados para o paindel de interior (A) e três diâmetros de perfuração em paralelo.

Nota-se uma boa sobreposição das curvas experimental e calculada com os parâmetros otimizados no pico de absorção. Os dados indicam variação aceitável tanto nos valores dos diâmetros de perfuração quanto nos valores da porosidade

relativa. Vale notar que os valores de L_h e β_r mantiveram-se iguais aos estimados anteriormente, com $L_h = 1,9$ mm e $\beta_r = 4$.

A Tabela 5.10 indica os parâmetros utilizados e otimizados para a amostra amostra (B), com dois diâmetros em paralelo, sendo $d_1 = 0,3$ mm com $\sigma_{n_1} = 60$ % ($n_p = 32$) e $d_2 = 0,6$ mm e $\sigma_{n_2} = 24$ % ($n_p = 13$). A Figura 5.45 apresenta as curvas obtidas para os parâmetros otimizados.

Tabela 5.10: Parâmetros utilizados para a análise do método inverso para o painel de interior (B) com dois diâmetros em paralelo.

Parâmetro	Nom.	Mín.	Máx.	Delta	Opt.
d_1 (mm)	0,30	0,25	0,35	0,01	0,34
d_2 (mm)	0,60	0,55	0,65	0,01	6,0
σ_{n_1} %	60	55	65	1	55
σ_{n_2} %	24	19	29	1	23
t (mm)	0,231	0,231	0,231	0	0,231
D (mm)	6,8	6,8	6,8	0	6,8
L_h (mm)	1,7	1,6	1,8	0,1	1,8
β_r	4	2	4	1	4

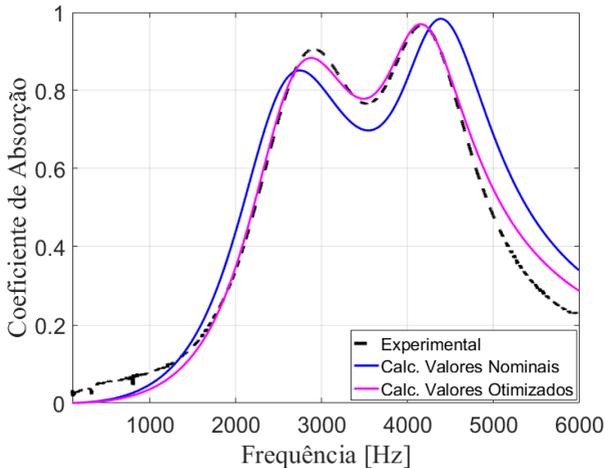


Figura 5.45: Coeficiente de absorção com parâmetros otimizados para o painel de interior (B) e dois diâmetros de perfuração em paralelo.

Novamente, há uma boa sobreposição das curvas experimental e calculada com os parâmetros otimizados.

Estes resultados indicam que o modelo de painéis microp-erfurados com cavidade subdividida comporta-se bem para distribuição não-homogênea de diâmetros de perfuração em paralelo. Entretanto, cuidados devem ser tomados na estimativa dos parâmetros utilizados.

Uma análise do modelo de cavidade subdividida aplicado através da TMM foi realizada considerando os dados obtidos pelo método inverso, apresentados na Tabela 5.10. A Figura 5.46 apresenta os resultados obtidos com os valores nominais e otimizados. Os valores nominais estão apresentados na Figura 5.38. O modelo com valores otimizados possui melhor concordância acima de 2500 Hz, com pequena divergência abaixo desta frequência. O modelo aplicado na TMM em série com material poroso estima bem a absorção, entretanto, divergências de $\approx 6\%$ aparecem em torno do primeiro pico de frequência e de $\approx 10\%$ acima de 5000 Hz.

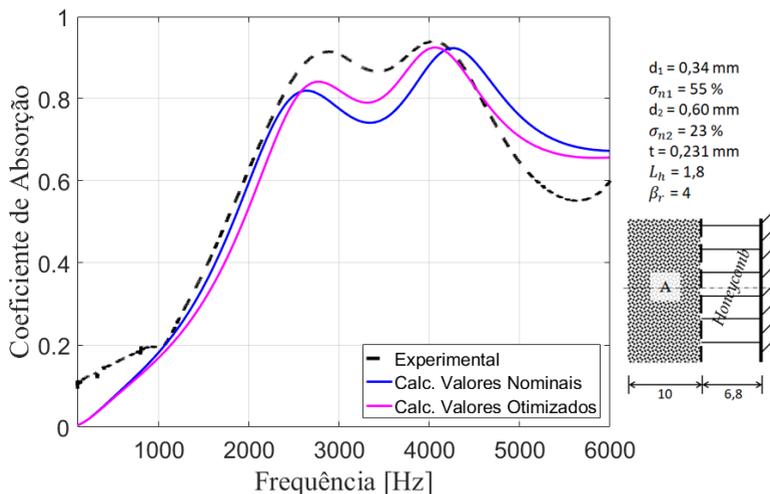


Figura 5.46: Coeficiente de absorção com parâmetros otimizados para o painel de interior (B) e dois diâmetros de perfuração em paralelo.

O método inverso pode ser aplicado para a estimativa dos parâmetros, contanto que as restrições sejam estipuladas dentro de valores realistas. Recomenda-se, para futuros trabalhos, a utilização de métodos estatísticos em conjunto com o método inverso para a obtenção de parâmetros geométricos de sistemas de absorção diversos com modelos analíticos através da TMM.

5.3.3 Coeficiente de Absorção em Campo Difuso

Quando uma fonte sonora atua em um ambiente fechado, o nível de pressão sonora em regime permanente, e o subsequente decaimento do som reverberante quando a fonte é interrompida, são governados pelas características de absorção sonora das superfícies limítrofes e dos objetos dentro desse espaço. Desde que a distribuição de ondas sonoras em ambientes fechados típicos inclui uma larga e imprevisível faixa de ângulos, é conveniente, para propósitos de normalização, tomar uma distribuição uniforme como a condição básica. Se, todavia, a intensidade sonora é independente da posição dentro da câmara, o campo sonoro é dito difuso, e os sons que atingem uma superfície da câmara possuem incidência aleatória.

O método, descrito na norma ISO 354 [2003], consiste em medir o tempo médio de reverberação, T_{60} , dentro de uma câmara reverberante com e sem amostra. Utiliza-se, então, a equação de Sabine [1922] para o tempo de reverberação para calcular a área de absorção equivalente da amostra. A teoria de Sabine relaciona o tempo que o som leva para decair 60 dB em um ambiente com o volume da câmara, as propriedades do ar no ambiente de teste, o coeficiente de absorção de cada material dentro da câmara e suas respectivas áreas:

$$T_{60} = \frac{55,3V}{c_0(A + 4Vm)}, \quad (5.12)$$

em que V é o volume da sala, $A = \alpha S$ é a área de absorção equivalente na câmara para apenas um tipo de material de teste e

m é o coeficiente de atenuação de potência, dado pelas condições climáticas do ar.

A área de absorção equivalente de uma câmara reverberante, A_1 [m²], é calculada por

$$A_1 = \frac{55,3V}{c_0 T_{60_1}} - 4Vm_1, \quad (5.13)$$

sendo T_{60_1} o tempo de reverberação da câmara vazia. O mesmo vale para a câmara com material de teste, sendo

$$A_2 = \frac{55,3V}{c_0 T_{60_2}} - 4Vm_2. \quad (5.14)$$

O coeficiente de absorção da amostra pode ser, então, calculado por

$$\alpha_s = \frac{55,3V}{c_0 S} \left(\frac{1}{T_{60_2}} - \frac{1}{T_{60_1}} \right) - 4V(m_2 - m_1). \quad (5.15)$$

A norma ISO 354 [2003] descreve recomendações quanto à câmara, amostra e condições climáticas do ar, sendo

- o volume mínimo da câmara deve ser 150 m³, mas fortemente recomenda que seja de 200 m³ e que a maior dimensão satisfaça a relação $L_{max} < 1,9V^{1/3}$. Duas câmaras reverberantes estão disponíveis LVA. A câmara menor, C1, possui volume interno de 150 m³ e a maior, C2, 200 m³. Embora a câmara C1 possua menor volume, é mais indicada para os testes, pois possui difusores distribuídos em seu interior, criando um campo mais difuso;
- a área da amostra sob medição, deve estar entre 10 m² a 12 m² para amostras de absorção média à alta, em câmaras de 200 m³. Para câmaras com volume diferente de 200 m³, a área deve ser multiplicada por $(V/200)^{2/3}$. As amostras devem ser retangulares com uma razão entre comprimento

e largura de 0,7 a 1,0, e devem ser posicionadas na câmara de forma que suas bordas estejam no mínimo a 1 m de distância de qualquer parede da câmara.

- as medições devem ser realizadas sob condições de temperatura e umidade relativa com valores próximos para ambas as medições: com a sala vazia e com o material de teste.

A amostra de painel de interior microperfurado disponível no LVA possui área de $1,88 \text{ m}^2$ e, portanto, não está em conformidade com a norma. Entretanto, uma análise realizada por Carvalho e Sousa [2016] indica uma variação entre 10% a 15% no coeficiente de absorção para uma amostra de 2 m^2 , acima de 1000 Hz. Estes valores são aceitáveis para a análise em questão.

As perfurações na amostra do painel de interior foram realizadas por punção, com pentes possuindo múltiplas agulhas de diâmetro nominal $d_{nom} = 0,6 \text{ mm}$. Estas perfurações foram realizadas manualmente e, como muitas perfurações deveriam ser feitas (aproximadamente 50.000), não foi possível manter a qualidade das mesmas. A Figura 5.47 apresenta uma pequena quantidade destas perfurações. Pode-se notar que há grande variação da forma e diâmetro das perfurações, sendo que algumas parecem completamente fechadas.

A Figura 5.48 apresenta o coeficiente de absorção em campo difuso para o painel de interior microperfurado. Estas curvas foram obtidas com filtro de um terço de oitava. Tanto o pico de frequência e o nível de absorção estão abaixo do valor obtido no tubo de impedância, o que indica que as perfurações possuem um diâmetro equivalente, d , e uma porosidade relativa, σ_n , diferentes dos valores nominais.

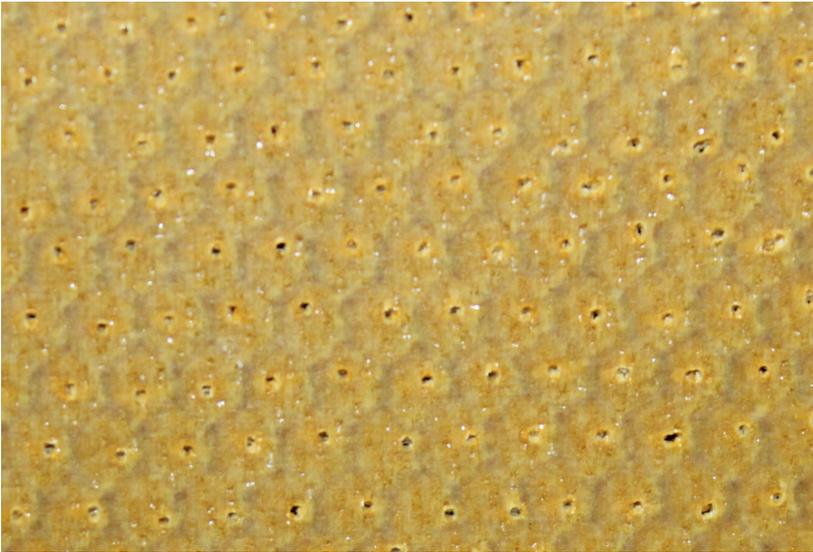


Figura 5.47: Perfurações no painel de interior.

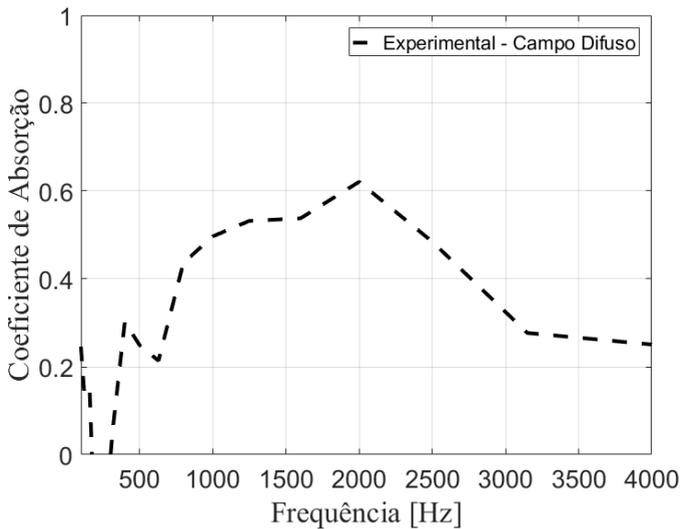


Figura 5.48: Coeficiente de absorção em campo difuso para o painel de interior microperfurado.

Uma comparação foi realizada com o modelo de cavidade

subdividida para incidência difusa, considerando a equação 3.9, para um diâmetro nominal de $d = 0,3$ mm e uma porosidade relativa $\sigma_n = 35$ %, apresentada na Figura 5.49. Pode-se notar uma boa concordância no pico de frequência, porém abaixo deste há uma divergência. Isto pode ocorrer pela distribuição não homogênea de diferentes diâmetros de perfuração.

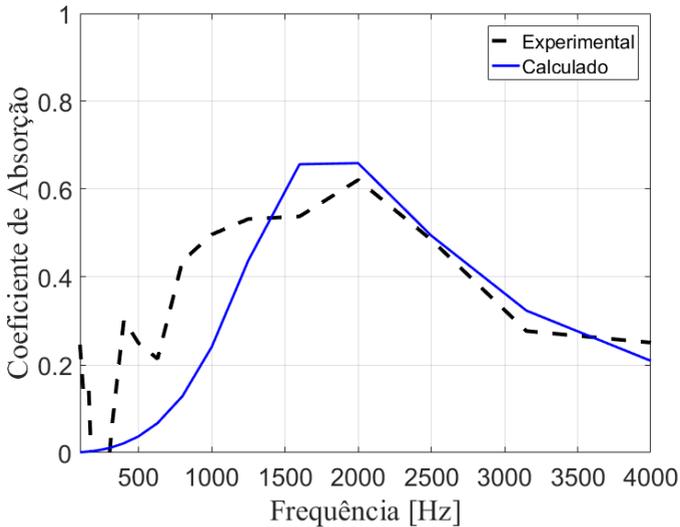


Figura 5.49: Comparação entre valores experimental e calculado do coeficiente de absorção em campo difuso para o painel de interior microperfurado.

Uma análise com o método inverso foi realizada considerando dois diâmetros equivalentes em paralelo. Os resultados indicaram $d_1 = 0,2$ mm com $\sigma_n = 25$ % e $d_2 = 0,3$ mm com $\sigma_n = 15$ %. A Figura 5.50 apresenta o coeficiente de absorção obtido experimentalmente em comparação ao modelo de cavidade subdividida com os dois diâmetros em paralelo. Nota-se boa concordância entre valores experimental e calculado. Isto indica distribuição não-homogênea dos diâmetros de perfuração com um valor equivalente abaixo do nominal.

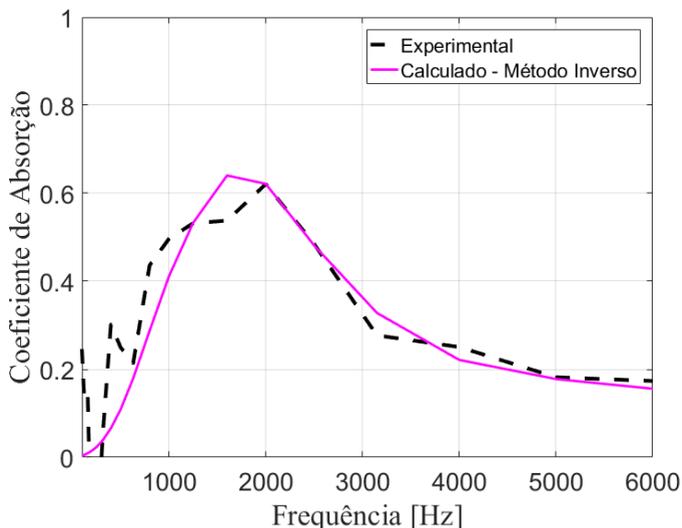


Figura 5.50: Coeficiente de absorção em campo difuso para o painel de interior microperfurado: comparação entre dados experimental e calculado pelo método inverso.

5.4 Propriedades Mecânicas

Uma técnica consolidada para a determinação das propriedades mecânicas em painéis compostos é baseada no ajuste de modelo através de resultados experimentais de funções de resposta em frequência (FRF). Este ajuste visa obter um grupo de propriedades em um processo iterativo a partir de uma curva de resposta em frequência, representando o comportamento real da estrutura. Com os sinais de força e aceleração é possível determinar a inertância, definida como a razão entre a amplitude complexa da aceleração e a amplitude complexa da força.

Para este ensaio, foi utilizada uma amostra de viga, retirada do painel (A), com dimensões 100×35 cm e espessura $t_p = 2t + D = 0,9132$ cm. Previamente aos ensaios, foi realizada a medição da massa da viga, para comparar com os dados fornecidos pela empresa. O valor medido foi $m_v = 53$ g, resultando em uma densidade equivalente para toda a viga de $\rho_v = 168,2$ kg/m³.

A excitação foi realizada com um martelo de impacto, para que não houvesse influência de massa adicional. Para minimizar este efeito, foi utilizado apenas um acelerômetro de baixa massa, marca Brüel & Kjaer, modelo 4517. A viga foi suspensa por fios de náilon, para minimizar a dissipação de energia e garantir a condição de contorno livre. A Figura 5.51 mostra o esquema de montagem experimental para a FRF da viga.

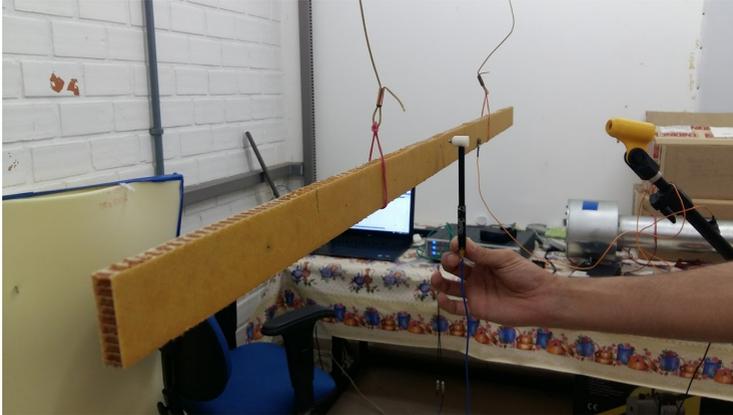


Figura 5.51: Esquema de montagem experimental para a FRF da viga.

A função resposta em frequência foi medida em pontos estrategicamente escolhidos, com o objetivo de evitar linhas modais dos primeiros modos de vibração da viga e poder identificar modos de flexão e torção. A Figura 5.52 indica a localização dos pontos de excitação e resposta.

A viga foi modelada com o método de elementos finitos no software comercial COMSOL Multiphysics[®]. O aprimoramento do modelo numérico foi realizado por ajustes nas propriedades da viga, a partir de valores iniciais fornecidos pelo fabricante. Desta forma, pode-se encontrar um conjunto de propriedades mecânicas que caracterizam de maneira mais realista o material composto.

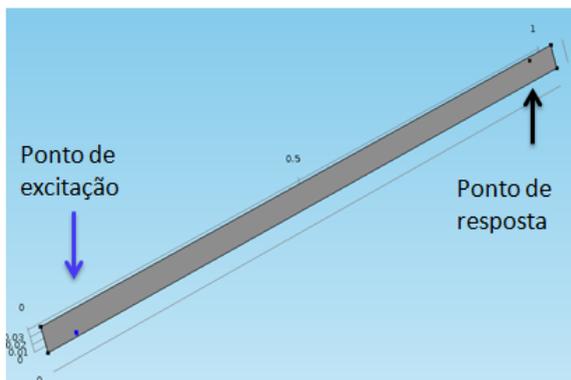


Figura 5.52: Posicionamento dos pontos de medição de resposta pontual e de transferência.

A viga foi modelada considerando um material ortotrópico equivalente, ou seja, um único material, e não um sanduíche composto. Foi utilizado elemento tipo *Shell* com função de forma linear, triangular, com seis graus de liberdade por nó.

O valor inicial do módulo de elasticidade para aplicação ao modelo numérico foi obtido analiticamente para uma viga simples livre, considerando o primeiro modo de flexão da curva experimental. O fator de amortecimento foi considerado constante com a frequência e foi estimado em valores médios de $\eta = 1\%$.

Uma análise harmônica entre 0 Hz e 1500 Hz foi realizada e as curvas de resposta em frequência obtidas pelo método direto. Uma força unitária foi aplicada no nó correspondente ao ponto de excitação e a aceleração obtida no nó oposto ao de aplicação da força.

A Figura 5.53 apresenta os resultados experimental e numérico ajustado para a FRF da viga. Pode-se notar uma boa concordância entre os valores comparados até a frequência de análise. A Tabela 5.11 descreve os dados obtidos para os módulos de elasticidade, cisalhamento e o coeficiente de Poisson.

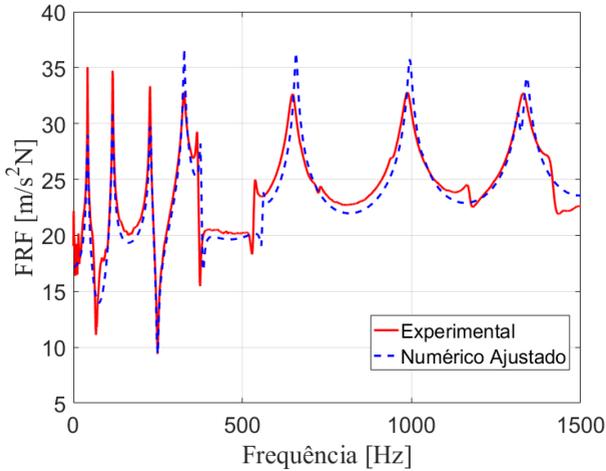


Figura 5.53: Função resposta em frequência para a viga.

Tabela 5.11: Propriedades mecânicas equivalentes do painel de interior.

Parâmetro	Valores Iniciais	Valores Ajustados
$E_{1,2,3}$ (Pa)	3,36e+9	3,45e+9
G_{12}, G_{13} (N/m ²)	-	3,13e+8
G_{23} (N/m ²)	-	3,13e+7
$\nu_{1,2,3}$	-	0.15

5.5 Eficiência de Radiação

A eficiência de radiação é definida como a razão entre a potência acústica radiada por uma placa pela potência acústica que um pistão (todas as partes vibrando em fase) estaria radiando se estivesse vibrando com a mesma velocidade que a placa, ou:

$$\sigma_{rad} = \frac{W_{rad}}{\rho_0 c_0 S \langle v^2 \rangle} \quad (5.16)$$

sendo W_{rad} a potência sonora radiada pela superfície, S a área da amostra e $\langle v^2 \rangle$ velocidade quadrática média espacial.

O procedimento de medição da eficiência de radiação consiste em excitar alguns pontos no painel, o qual se situa entre duas câmaras reverberantes, obter a velocidade média quadrática em uma sequência de pontos aleatórios e medir a potência sonora radiada. O excitador eletrodinâmico permanece na câmara reverberante 1, denominada fonte, enquanto o painel radia potência sonora para a câmara 2, denominada receptora. A Figura 5.54 apresenta um esquema do procedimento utilizado.

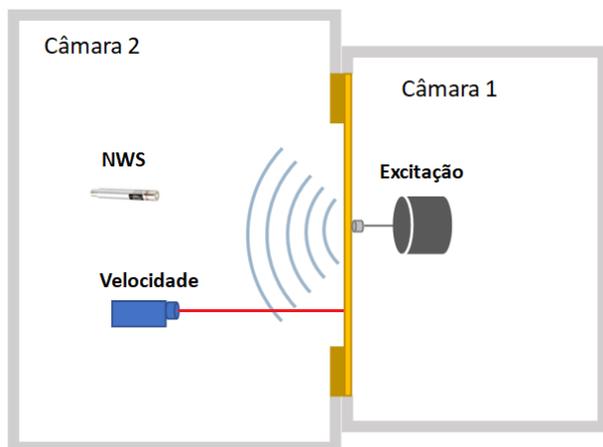


Figura 5.54: Esquema de medição da eficiência de radiação.

A potência sonora é determinada pelo método direto em câmaras reverberantes, descrito na norma ISO 3741 [1999]. O método direto utiliza o nível de pressão sonora (NPS) médio e a área de absorção equivalente da câmara reverberante. A equação para o nível da potência sonora (NWS) é definida como ISO3741:1999 [1999]:

$$\begin{aligned}
 NWS = NPS + 10\log(A_2) + 4,34\frac{A_2}{S_2} + 10\log\left(1 + \frac{S_2c_0}{8V_2f}\right) \\
 - 25\log\left(1,0675\sqrt{\frac{273}{273 + T}}\frac{B}{B_0} - 6\right),
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

em que S_2 é a área de superfície total da câmara 2, V_2 o volume, T a temperatura, B a pressão atmosférica e $B_0 = 1,013 \times 10^5$.

A câmara reverberante utilizada para a determinação da potência sonora radiada deve seguir algumas características, a fim de proporcionar resultados com menores incertezas:

- a relação entre a máxima e a mínima dimensão da câmara não deve exceder a proporção 3:1;
- a precisão da medição depende da uniformidade do campo difuso. Por isso, é importante que exista um grau mínimo de inclinação entre, pelo menos, duas paredes paralelas das câmaras, contribuindo para que as ondas se propaguem em todas as direções e não haja concentração de energia acústica. Este é o caso da câmara reverberante de número 2, contida no LVA (Laboratório de Vibrações e Acústica);
- o ruído de fundo para a câmara reverberante deverá ser 6 dB menor (preferencialmente 10 dB) que o nível de pressão sonora medido em cada banda de frequência, dentro da faixa de interesse;
- o volume mínimo da câmara reverberante deve ser 200 m^3 . Este é o caso da câmara reverberante de número 2, do LVA (Laboratório de Vibrações e Acústica).

Como o painel disponível possui dimensões menores que os batentes da janela entre câmaras reverberantes, uma moldura foi

instalada. Esta, foi construída em MDF de 30 mm de espessura e possui 10 cm cada aresta, restringindo os lados dos painéis testados a 160 x 93 cm. A Figura 5.55 ilustra o painel e a moldura montados na abertura entre câmaras.



Figura 5.55: Painel montado na moldura entre as câmaras reverberantes.

A velocidade média quadrática espacial foi medida com vibrômetro a laser em uma grade de 65 pontos. Cuidados foram tomados de forma a evitar pontos próximos às bordas e ao ponto de excitação. A Figura 5.56 apresenta a grade de pontos de medição da velocidade. Três pontos de excitação foram utilizados, com o cuidado de evitar linhas modais. A Figura 5.57 mostra o excitador eletrodinâmico montado em um dos pontos.

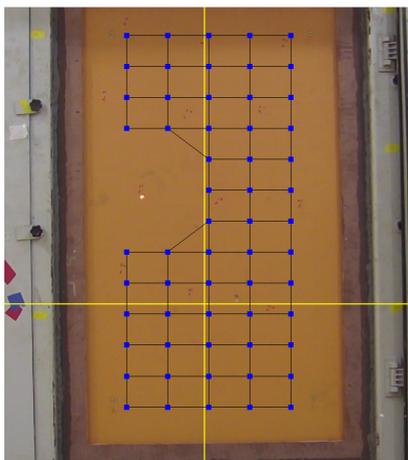


Figura 5.56: Esquema de medição da eficiência de radiação.

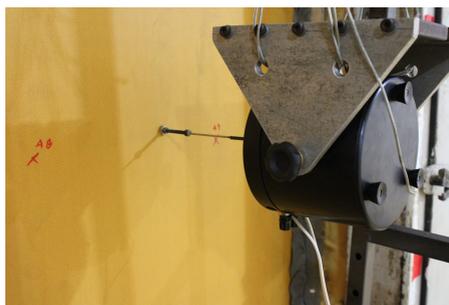


Figura 5.57: Montagem do excitador eletrodinâmico.

Foram testadas duas amostras de painel de interior, uma com perfurações (MPP) e outra sem (*baseline*). Os ensaios com o MPP foram realizados com as perfurações voltadas para a câmara receptora (MPP1) e para a câmara fonte (MPP2), conforme a Figura 5.58.

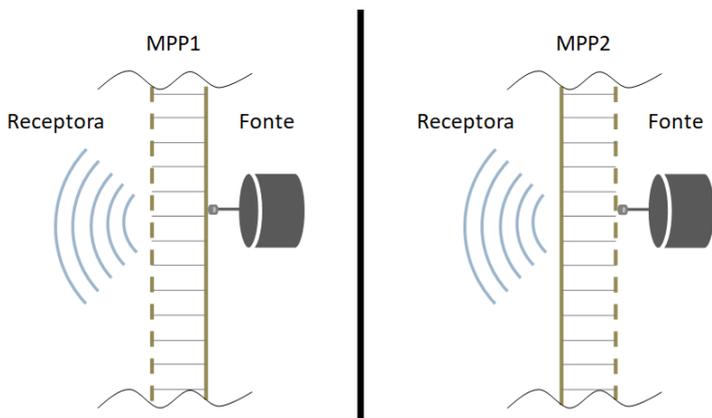


Figura 5.58: Configurações do MPP para os testes de eficiência de radiação.

Os testes de eficiência de radiação foram realizados em ambas as câmaras, conforme a Figura 5.59. O objetivo de testar desta forma é identificar se a perda por radiação média entre os lados radiantes do painel é o mesmo para o MPP1 e MPP2.

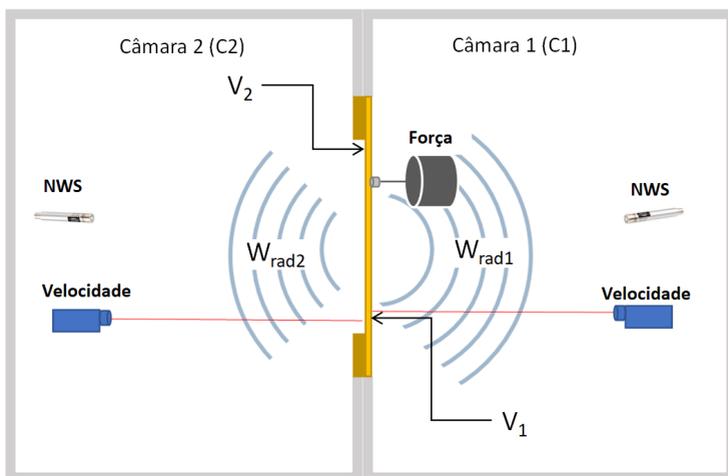


Figura 5.59: Esquema de medição da eficiência de radiação dos dois lados radiantes.

As Figuras 5.60 e 5.61 mostram os resultados da eficiência de radiação nas câmaras C1 e C2, respectivamente, em bandas de

um terço de oitava para a faixa de frequência entre 100 Hz a 10 kHz.

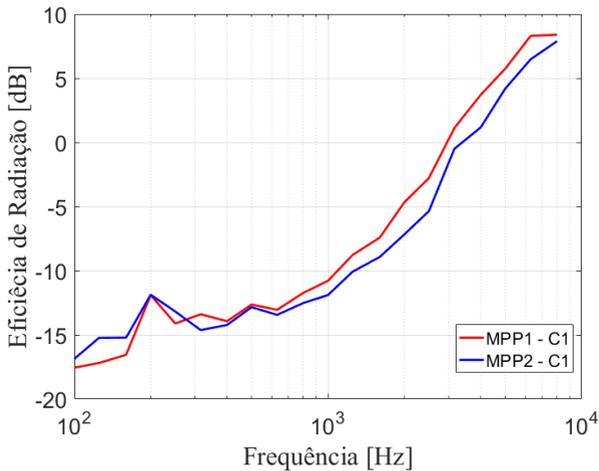


Figura 5.60: Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP na câmara 1.

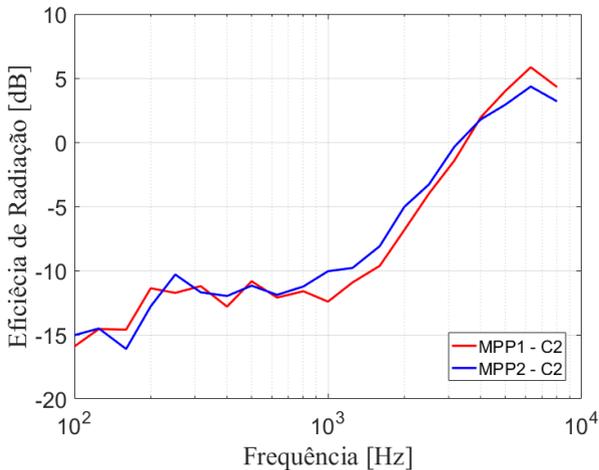


Figura 5.61: Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP na câmara 2.

Em geral a eficiência de radiação para as quatro configurações possuem valores semelhantes. Entretanto, pode-se verificar

maior similaridade para as medições realizadas na mesma câmara. Nota-se também que, para ambas as câmaras, a eficiência de radiação é maior para o lado que não possui perfurações. Isto somente não ocorre nas medições na câmara C2, para frequências acima de 4000 Hz. Isto deve-se, provavelmente, às condições de contorno, as quais dependem da montagem.

A Figura 5.62 apresenta a eficiência de radiação média para ambas as configurações dos painéis.

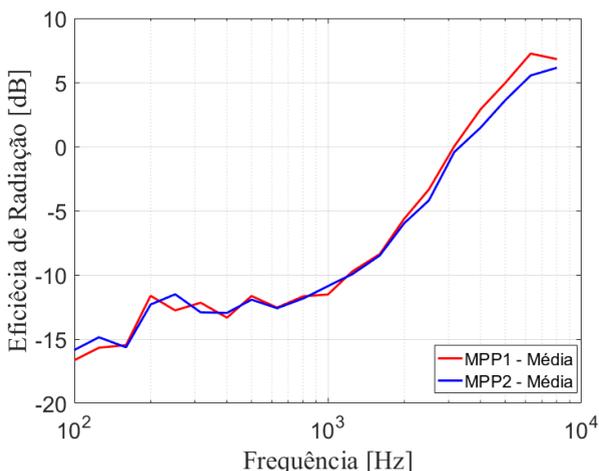


Figura 5.62: Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP e o painel de referência.

Pode-se notar que as curvas são coincidentes até 3000 Hz, com pequena divergência acima desta frequência. Isto indica que a perda por radiação dos painéis é muito semelhante, entretanto, quando se analisa apenas um dos lados radiantes, o lado perfurado radia menos.

A Figura 5.63 apresenta a comparação dos resultados entre MPP1, MPP2 e *baseline* obtidos na câmara 2.

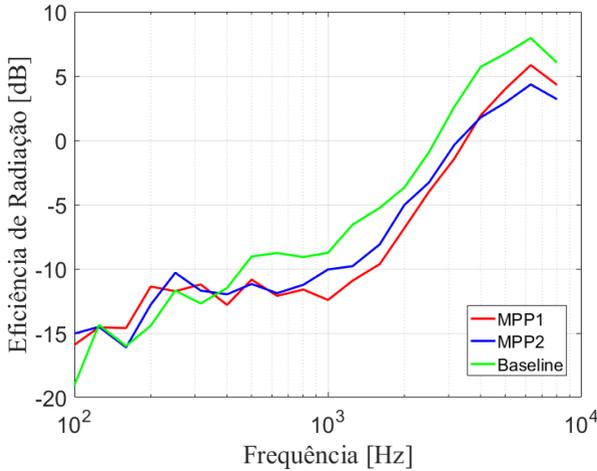


Figura 5.63: Eficiência de radiação obtidos para as duas configurações do MPP e o painel de referência.

As curvas indicam uma menor radiação global para ambas as configurações do painel MPP em comparação ao painel de referência. Nota-se que o painel microperfurado radia mais na faixa de frequência em que há absorção (entre 800 Hz e 3500 Hz) quando as perfurações estão voltadas para a câmara fonte (MPP2). Isto corrobora os resultados obtidos por Toyoda [2007].

5.6 Perda por Amortecimento Estrutural

Existem vários métodos utilizados para a determinação do amortecimento estrutural, como os métodos gráficos, o método do decaimento e o método da potência de entrada. Optou-se por medir o amortecimento estrutural pelo método do decaimento, tendo em vista o baixo peso dos painéis e os valores relativamente baixos de amortecimento, o que gera incertezas na determinação do amortecimento pelo método da potência injetada, o qual utiliza um excitador eletrodinâmico.

O método do decaimento é baseado no decremento logarítmico da resposta estrutural transiente, obtido do registro de um espectro de vibração ou ruído, cuja excitação é interrompida

subitamente. Desta forma, a taxa de decaimento da energia vibratória é expressa em termos do tempo de reverberação, T_{60} . O tempo de reverberação corresponde ao tempo necessário para o sinal de resposta (aceleração ou pressão sonora) decair 60 dB do seu valor inicial, ou seja, representa um decaimento de energia vibratória à um milionésimo do valor inicial. O amortecimento, na forma de fator de perda, é calculado pela expressão:

$$\eta = \frac{2,2}{f_c T_{60}}, \quad (5.18)$$

onde f_c é a frequência central da banda de um terço de oitava.

Os decaimentos das respostas estruturais dos painéis foram obtidos em 16 pontos com acelerômetro e microfones. Segundo Lenzi [2009], a influência da massa dos acelerômetros fixados pode ser desprezada quando a amostra é relativamente grande ($> 1 \text{ m}^2$). Foi utilizado um martelo de impacto em 4 pontos de excitação. A excitação foi realizada no lado oposto aos transdutores. As medições foram realizadas na câmara semi-aneecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) de forma que o campo acústico gerado não influencie na medição. Para garantir a condição de contorno livre, foram utilizados fios de náilon para suspender a amostra. A Figura 5.64 ilustra a montagem do teste de amortecimento estrutural com microfones.

As Figuras 5.65 e 5.66 apresentam os resultados obtidos do fator de perda para os painéis de interior nas configurações MPP1, MPP2 e *baseline* obtidos com microfone e acelerômetro, respectivamente. Nota-se que os resultados obtidos com acelerômetro e microfone são similares até 1600 Hz. Na medição com microfones, após 1600 Hz, os resultados são todos iguais, o que indica que pode haver interferência de ruído. Os resultados para o MPP1 e MPP2 são praticamente iguais, com divergência acima de 5000 Hz. Já o painel *baseline* apresenta amortecimento mais baixo até 1600 Hz.

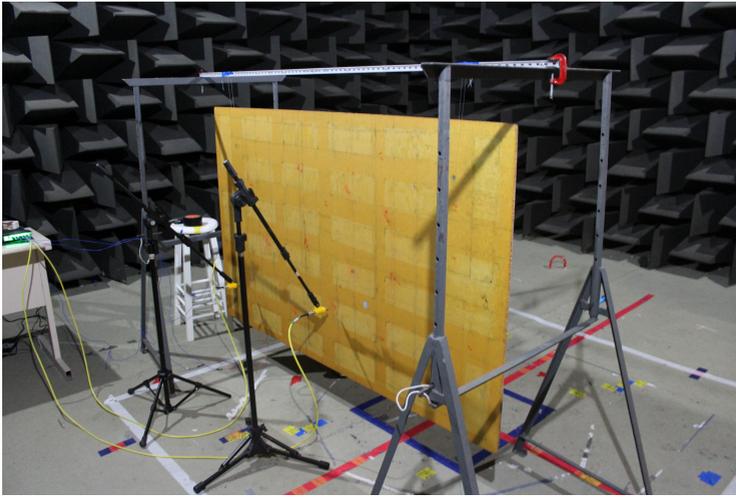


Figura 5.64: Montagem de teste da perda por amortecimento estrutural.

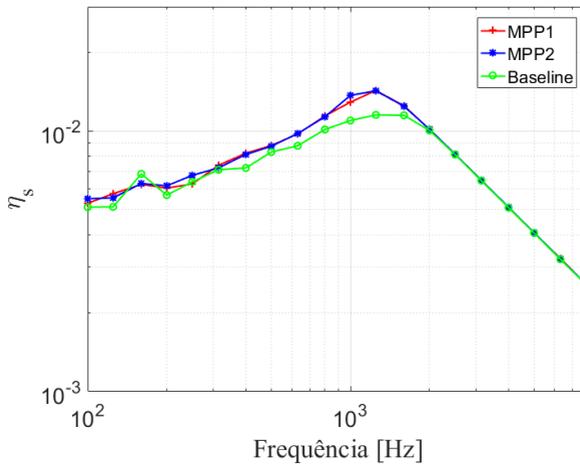


Figura 5.65: Valores da perda estrutural por amortecimento para os painéis de interior obtidos com microfone.

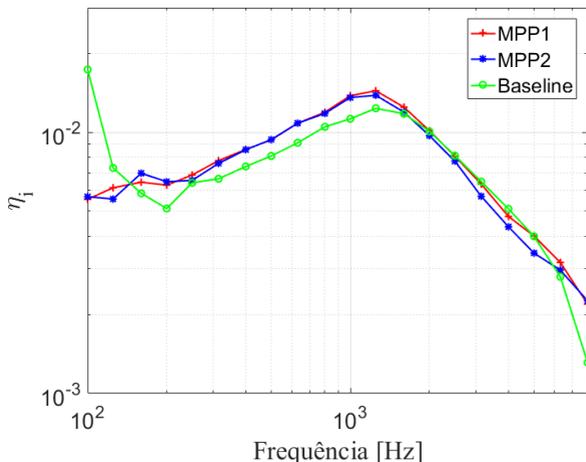


Figura 5.66: Valores da perda estrutural por amortecimento para os painéis de interior obtidos com acelerômetro.

5.7 Perda de Transmissão

A capacidade de isolamento de um componente tem como principal indicador a perda de transmissão (PT), que é a razão entre a potência sonora incidente e a transmitida de um ambiente ao outro através de um dispositivo isolador. Valores altos da perda de transmissão tem como significado físico uma baixa transmissão de energia acústica, e vice-versa. Por definição, a perda de transmissão relaciona-se logaritmicamente com o inverso do coeficiente de transmissão sonora, sendo expresso por:

$$PT = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right), \quad (5.19)$$

onde o coeficiente de transmissão sonora representa a relação entre potências transmitida W_t e incidente W_i .

O procedimento experimental utilizado para determinar a perda de transmissão de um painel é definido pela norma ISO 10140:2010 [2010]. Duas câmaras reverberantes adjacentes

são dispostas com um abertura entre elas na qual o painel é instalado. Através de um sistema de geração, amplificação e reprodução de áudio, cria-se um campo sonoro difuso com espectro relativamente plano utilizando um ruído branco na câmara 1, denominada como fonte. O único caminho significativo da transmissão sonora deve ser através do painel. Mede-se o nível de pressão sonora (NPS) em ambas as câmaras. A Figura 5.67 apresenta uma representação esquemática do método de teste.

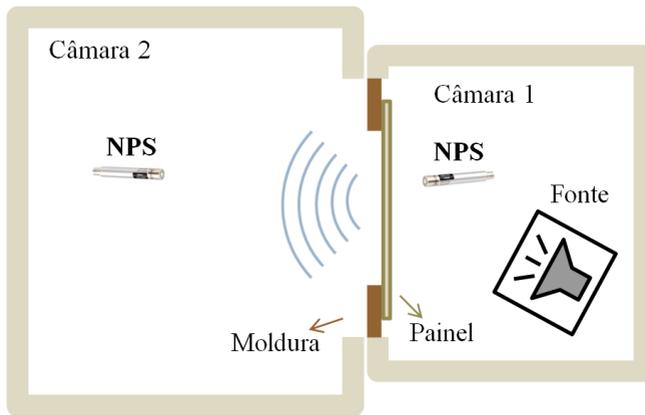


Figura 5.67: Representação esquemática do método de medição da perda de transmissão.

A perda de transmissão é calculada através da seguinte equação:

$$PT = NPS_1 - NPS_2 + 10 \log(S/A_2), \quad (5.20)$$

sendo S a área do painel e A_2 a absorção sonora na câmara receptora. A absorção da câmara é obtida conforme a norma ISO 354 [1998] pela equação 5.14.

A Figura 5.68 apresenta os resultados para a perda de transmissão do painel de interior microperfurado em comparação ao referênci. As medições foram realizadas em bandas de um terço de oitava para a faixa de frequência entre 100 Hz a 10 kHz. Pode-

se verificar uma tendência similar entre 250 Hz e 900 Hz, o que corresponde à faixa de frequência da lei da massa. As curvas para MPP1 e MPP2 são praticamente iguais, o que corrobora os resultados da eficiência de radiação média, conforme Figura 5.62. Nota-se uma diferença (± 3 dB) entre 1500 Hz e 3000 Hz entre a perda de transmissão do MPP e do *baseline*, que é a faixa do pico de absorção do painel MPP. Isto corrobora os resultados obtidos por Toyoda [2008]. Abaixo de 200 Hz a divergência pode ser devido à frequência de corte da câmara reverberante.

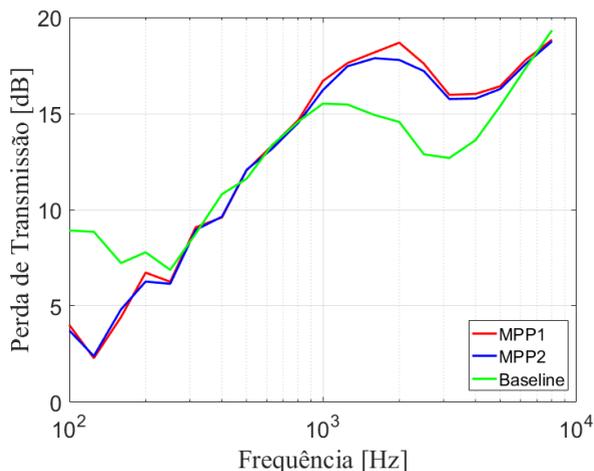


Figura 5.68: Perda de Trasmisão obtidos para as duas configurações do MPP e o painel de referência.

5.8 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo foram apresentados os métodos para a caracterização vibroacústica dos painéis de interior aeronáuticos. Uma análise inicial em microscópio dos tipos de perfuração foi realizada a fim de determinar as variações dos diâmetros e forma das perfurações. Os efeitos destas variações foram analisadas através dos resultados experimentais em comparação aos modelos descritos no Capítulo 3.

Testes para a análise da influência do núcleo em *honeycomb*

no coeficiente de absorção foram realizados. O modelo proposto para painéis microperfurados com cavidade subdividida demonstrou bons resultados para distribuição não-homogênea de diâmetros e, para aplicações em que menos de 100% dos núcleos são microperfurados, enquanto que os modelos clássicos não conseguem prever estas aplicações. Entretanto, para que os modelos estimem satisfatoriamente o coeficiente de absorção, os parâmetros geométricos dos painéis e perfurações devem ser estimados/medidos com precisão. Para isso, desenvolveu-se um método inverso baseado no algoritmo de otimização Evolução Diferencial, o qual utiliza medições do coeficiente de absorção por incidência normal. Este método demonstrou-se robusto e, em conjunto com o modelo de painéis microperfurados com cavidade subdividida, gerou bons resultados.

Uma caracterização vibroacústica do painel de interior aeronáutico foi realizada, indicando que microperfurações em uma das faces aumenta consideravelmente o coeficiente de absorção e também atuam de forma positiva na eficiência de radiação, perda por amortecimento estrutural e perda de transmissão, quando comparados a um painel sem perfurações.

6 Impacto no Ruído Interno de Aeronaves

Neste Capítulo é analisado o impacto causado no ruído interno de aeronaves pela utilização de painéis de interior com microperfurações.

A maioria dos estudos de ruído interno em aeronaves tem se preocupado com a transmissão do ruído induzido pelo escoamento devido à camada limite turbulenta (TBL) em painéis de fuselagem de aeronave. Devido à complexidade dos modelos, uma solução analítica não é viável. Com o avanço da tecnologia computacional, várias ferramentas de predição voltados para a engenharia de controle de ruído surgiram nos últimos anos. Os métodos de elementos finitos (FEM - *Finite Element Method, em inglês*) e de elementos de contorno (BEM - *Boundary Element Method, em inglês*) tem sido altamente utilizados. Estes métodos possibilitam modelar geometrias complexas em alto detalhe [Bolduc, 2007]. Entretanto, estes métodos determinísticos possuem limitações em regiões de alta frequência, o que ocasiona em malhas extremamente finas e, consequentemente, alto custo computacional.

O método mais utilizado para estimar respostas de alta frequência para problemas vibroacústicos é a Análise Estatística Energética (SEA - *Statistical Energy Analysis, em inglês*). SEA é um método introduzido nos anos sessenta com o intuito de estimar a resposta vibroacústica de estruturas complexas por uma abordagem estatística [Lafont *et al.*, 2004].

Em SEA, normalmente, uma análise envolve o acoplamento entre dois ou mais subsistemas estruturais ou acústicos complexos. Neste contexto, as altas frequências se referem à região de frequência onde o sistema em estudo possui um grande

número de modos por banda de frequência.

Neste método, o sistema é dividido em subsistemas acoplados, os quais possuem grupos de modos ressonantes semelhantes. Estes, podem receber, armazenar, dissipar e transmitir energia. O estado vibroacústico é expresso em termos de energias vibratórias de subsistemas individuais. As excitações aplicadas são expressas em termos de potência de entrada e o acoplamento entre subsistemas é expresso em termos de fluxo de energia [Campolina, 2012].

Este Capítulo está estruturado em duas partes. Primeiramente, utiliza-se o modelo em SEA para a perda de transmissão de painéis de interior microperfurados a fim de validá-lo experimentalmente para esta aplicação. Na sequência, um modelo simplificado de uma aeronave é apresentado com o intuito de avaliar o impacto das microperfurações no ruído de interior.

6.1 Modelo de Perda de Transmissão

Em SEA, a transmissão sonora através de um sistema simples é modelado utilizando três subsistemas. Duas cavidades, fonte e receptora, separadas por um painel. Cada subsistema é representado por um fator de perda por amortecimento (DLF - *Damping Loss Factor*, em inglês), uma densidade modal, um nível de energia e uma potência de entrada. Além disso, o acoplamento entre subsistemas são representados por um fator de perda por acoplamento (CLF - *Coupling Loss Factor*, em inglês).

A equação fundamental do método expressa o equilíbrio de potência para cada subsistema. Toda a potência, Π^i , imposta a um subsistema i deve ser dissipada neste subsistema ou deve ser transmitida a outro subsistema acoplado, assim,

$$\Pi^i = \Pi_{dis}^i + \Pi_{ex}^i, \quad (6.1)$$

em que Π_{dis}^i é a potência dissipada e Π_{ex}^i a potência transmitida.

A transferência de potência entre dois subsistemas acoplados é proporcional à diferença da média temporal de suas energias [Stelzer *et al.*, 2010]. A potência total é vinculada pela perda por amortecimento, η_i , à potência dissipada, como

$$\Pi^i = \omega_c \eta_i E_i + \omega_c \eta_{ij} (E_i - E_j), \quad (6.2)$$

sendo ω_c a frequência angular central, η_{ij} o fator de perda por acoplamento, $E_{i,j}$ a energia dos subsistemas i e j . Os fatores de acoplamento de dois subsistemas são vinculados pela relação de reciprocidade, expresso por

$$n_i \eta_{ij} = n_j \eta_{ji}, \quad (6.3)$$

em que n_i e n_j são as densidades modais dos subsistemas i e j , respectivamente.

No modelo, a placa é acoplada às duas cavidades através de uma junção com área igual à da placa. Esta, representa o caminho de transmissão de fluxo de energia de uma cavidade à outra. A junção permite três caminhos distintos: ressonantes, não ressonantes e vazamentos.

O caminho não ressonante leva em consideração a região onde a eficiência de radiação da placa é baixa, abaixo da frequência crítica, a qual é primeira frequência de coincidência do painel. Esse caminho de transmissão é controlado pela lei da massa. Pode-se calcular η_{12} como uma variação da lei da massa para um campo sonoro difuso, da forma [Stelzer *et al.*, 2010]

$$\eta_{12} = \beta_c I_{12} \frac{c_0}{f_c k_0^2 V_1} \frac{\tau_{12,\infty(0)}}{2 - \tau_{12,\infty(0)}}, \quad (6.4)$$

onde $\tau_{12,\infty(0)}$ é o coeficiente de transmissão sonora para incidência normal, β_c um fator de correção para baixa sobreposição modal, I_{12} é um fator de correção para campo difuso e V_1 o volume da câmara fonte.

Os caminhos de transmissão ressonantes levam em consider-

ação a região da frequência de coincidência e também a região de altas frequências, onde a eficiência de radiação da placa se torna importante [Crocker e Price, 1969]. Neste caso, o fator de perda por acoplamento é representado como perda por radiação, e é relacionado à eficiência de radiação, sendo expresso por

$$\eta_{p2} = \frac{\rho_0 c_0}{\omega_c \rho_p t_p} \sigma_{rad}. \quad (6.5)$$

O sistema de equações de equilíbrio de energia no SEA é

$$\begin{bmatrix} \Pi_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} E_1 \\ E_p \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (6.6)$$

sendo

$$A = \begin{bmatrix} \eta_1 + \eta_{1p} + \eta_{12} & -\eta_{p1} & -\eta_{21} \\ -\eta_{1p} & \eta_2 + \eta_{p1} + \eta_{p2} & -\eta_{2p} \\ -\eta_{12} & -\eta_{p2} & \eta_2 + \eta_{2p} + \eta_{21} \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

Considerando mesmo fluido em ambas as cavidades, $\eta_{p2} = \eta_{p1}$. Os demais fatores de acoplamento são obtidos pela relação de reciprocidade. O fator de transmissão pode, então, ser obtido por [Stelzer *et al.*, 2010]

$$\tau = \frac{p_2^2 A_2}{p_1^2 S_p}, \quad (6.8)$$

em que A_2 é a área de absorção equivalente da câmara receptora e $p_{1,2}$ são os valores efetivos da pressão nas cavidades, calculadas por

$$p_i = \frac{\rho_0 c_0^2 E_i}{V_i}, \quad (6.9)$$

em que i denota a cavidade, sendo 1 a câmara fonte e 2 a

receptora.

A perda de transmissão é calculada por

$$PT = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right). \quad (6.10)$$

Para os modelos em SEA, utilizou-se o *software* comercial VAOne[®]. Primeiramente, são criados os subsistemas que, neste caso, consistem de duas cavidades e uma divisória, na qual se aplica o painel de interior. O painel foi modelado como no experimento demonstrado na seção 5.7, com a moldura em MDF. Excita-se acusticamente a câmara fonte com um campo difuso. Isto é realizado por uma restrição imposta à cavidade com uma pressão de 1 Pa. Desta forma, cria-se um campo difuso homogêneo e não há necessidade de impor uma absorção para a cavidade. Na cavidade que representa a câmara receptora impõe-se as dimensões e absorção. Para tal, utilizou-se um módulo de perda de transmissão do próprio VAOne[®], o qual cria ambas as cavidades e as junções com a divisória. Este módulo considera a densidade modal da câmara fonte dependente apenas do volume. A absorção da câmara receptora é ajustada para a proporção da área de superfície do painel sobre a área de superfície da câmara.

A Figura 6.1 apresenta o modelo com as duas cavidades, o painel de interior e a excitação imposta. A Figura 6.2 mostra, em detalhe, a moldura em MDF e o painel de interior.

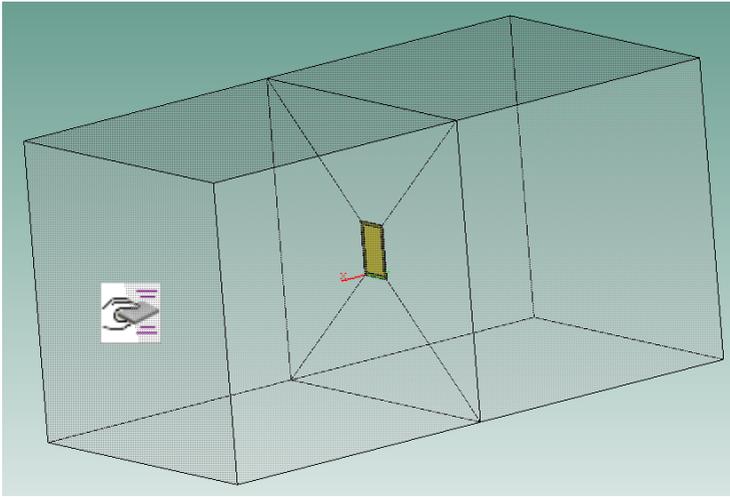


Figura 6.1: Modelo em SEA para a perda de transmissão.

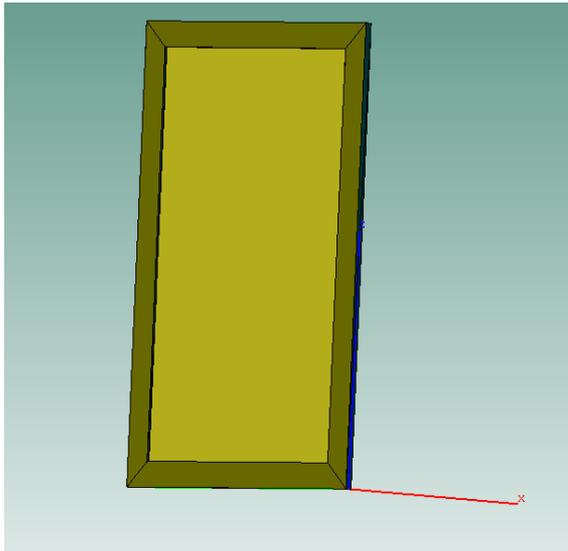


Figura 6.2: Detalhe de montagem do painel no modelo em SEA para a perda de transmissão.

Foram utilizados valores obtidos experimentalmente da perda por amortecimento estrutural, η_i , o qual é aplicado diretamente como uma propriedade do painel. Já a perda por acoplamento,

η_{ij} , é calculada com os valores obtidos experimentalmente da eficiência de radiação pela da equação 6.5.

As análises foram realizadas com o painel de interior microperfurado (MPP) e sem perfurações (*baseline*). Foram utilizadas as mesmas propriedades mecânicas de ambos os painéis, identificados na Tabela 6.1, como um painel ortotrópico equivalente. Desta forma, é considerada apenas uma camada de painel equivalente.

Tabela 6.1: Propriedades mecânicas equivalentes do painel de interior.

Parâmetro	Valores
$E_{1,2,3}$ [Pa]	3,45e+9
G_{12}, G_{13} [N/m ²]	3,13e+8
G_{23} [N/m ²]	3,13e+7
$\nu_{1,2,3}$	0,15
ρ_p [kg/m ³]	168

A Figura 6.3 apresenta a comparação da perda de transmissão obtidos experimentalmente e no modelo em SEA para o painel de interior sem perfurações (*baseline*). Observa-se uma boa concordância para toda faixa de frequência analisada, exceto abaixo de 200 Hz, onde a medição é afetada pelo baixo número de modos do painel e da câmara reverberante utilizada para a medição da potência sonora transmitida. Esta frequência coincide com a frequência de corte da câmara 2, a qual foi utilizada como receptora. Na região não ressonante (até \approx 1000 Hz) e na frequência crítica (\approx 3000 Hz) há excelente concordância entre as curvas, isto indica uma boa estimativa das propriedades mecânicas do painel. Na região ressonante, observa-se uma pequena divergência (\approx 1 dB), a qual pode ser atribuída a vários fatores como condição de montagem, erro sistemático tanto na medição da eficiência de radiação, quanto na medição da perda de transmissão, entre outros.

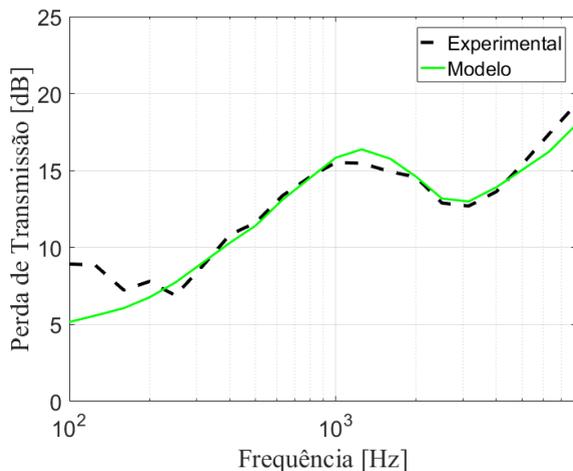


Figura 6.3: Validação experimental da perda de transmissão do painel de interior *baseline* para o modelo em SEA.

A Figura 6.4 apresenta a comparação da perda de transmissão obtidos experimentalmente e no modelo em SEA para o painel de interior microperfurado com perfurações voltadas à câmara receptora. Esta configuração é denominado MPP1, conforme mostrado na Figura 5.58.

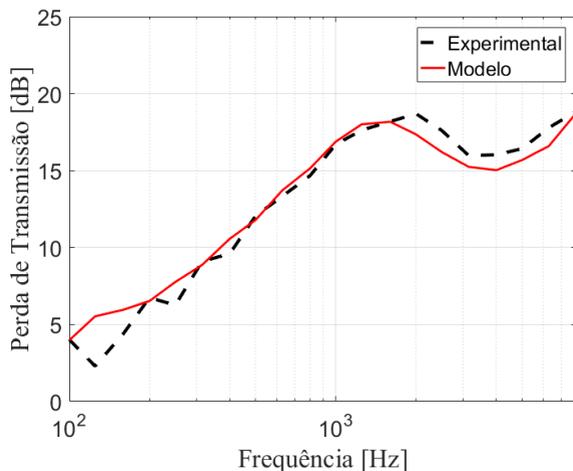


Figura 6.4: Validação experimental da perda de transmissão do MPP1 para o modelo em SEA.

Pode ser observada boa concordância entre os valores experimentais e obtidos pelo modelo para toda faixa de frequência em análise. Na região ressonante há uma leve divergência de, aproximadamente, 1,5 dB, o que é satisfatório. Além disso, o modelo define bem a frequência crítica.

A Figura 6.5 apresenta os resultados da perda de transmissão o painel de interior microperfurado com perfurações voltadas à câmara fonte (MPP2). Novamente há boa concordância entre valores experimental e calculado.

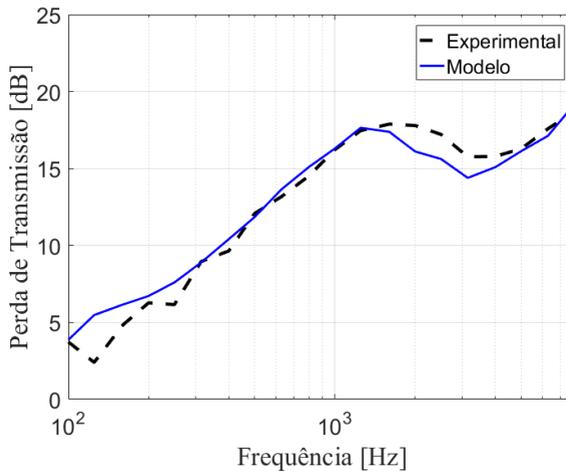


Figura 6.5: Validação experimental da perda de transmissão do MPP2 para o modelo em SEA.

Estas validações indicam que os parâmetros mecânicos estáticos e dinâmicos do painel de interior foram estimados satisfatoriamente e a sua aplicação no modelo em SEA está representativa.

6.2 Modelo para Obtenção do Ruído Interno em Aeronaves

Para analisar a influência do painel de interior microperfurado no ruído interno de aeronaves, desenvolveu-se um modelo

simplificado de uma aeronave no *software* comercial VAOne[®], ilustrado na Figura 6.6.

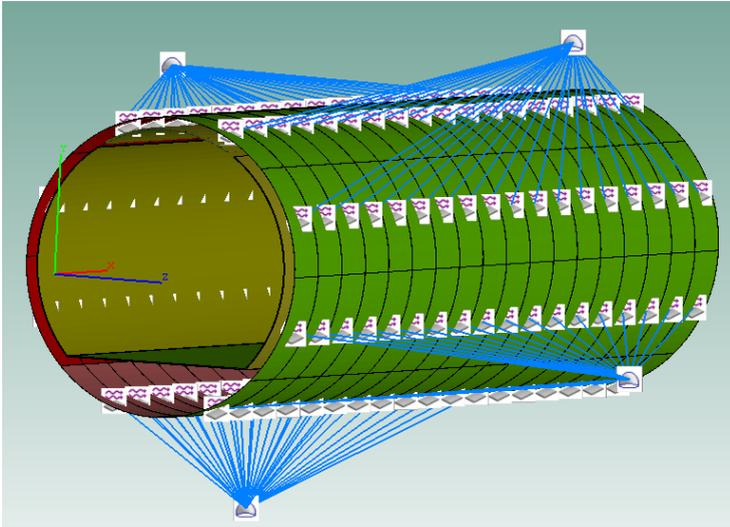


Figura 6.6: Modelo simplificado de uma aeronave no VAOne[®].

Como o objetivo é analisar a influência de microperfurações no painel interno, as propriedades físicas e vibroacústicas inerentes à estrutura externa (fuselagem, vigas de reforço e material poroso), fornecidas pela Embraer, não serão detalhados neste trabalho.

A Figura 6.7 apresenta os elementos estruturais utilizados no modelo.

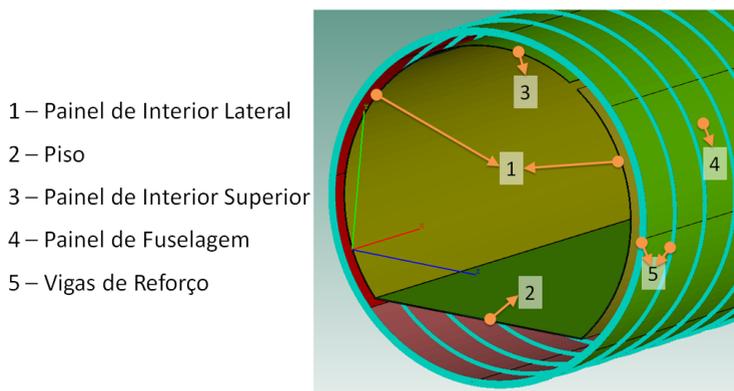


Figura 6.7: Identificação dos elementos estruturais do modelo simplificado de uma aeronave.

Os elementos estruturais do modelo consistem em:

1. painéis de interior laterais com as mesmas especificações detalhadas no Capítulo 5;
2. painel inferior (piso) com as mesmas especificações do painel lateral, porém com 94 mm de espessura;
3. painéis de interior superior (forro) com as mesmas especificações dos laterais;
4. placas de fuselagem em alumínio modeladas com reforço estrutural (*ribbed*, em inglês) e espessura de 1,5 mm. O valores do fator de amortecimento para a fuselagem foram fornecidos pela Embraer e o fator de acoplamento calculado pelo próprio VAOne[®];
5. vigas de reforço em alumínio com 1 % de amortecimento estrutural.

A Figura 6.8 apresenta os elementos acústicos do modelo.

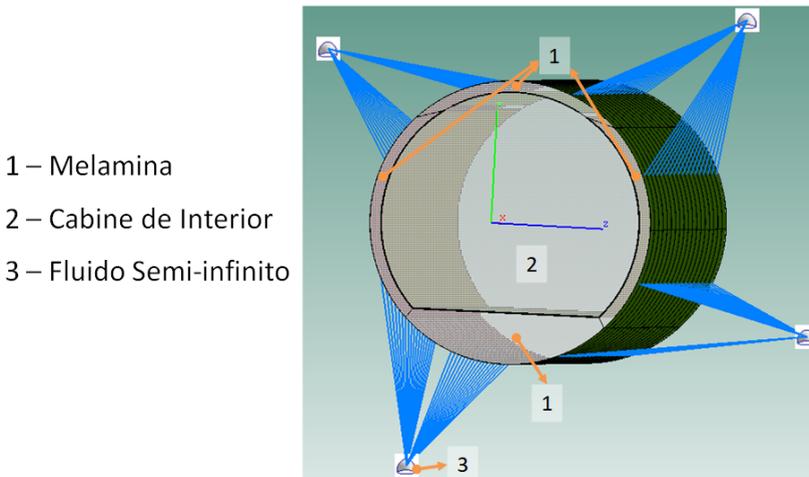


Figura 6.8: Identificação dos elementos acústicos do modelo simplificado de uma aeronave.

Os elementos acústicos do modelo consistem em:

1. material poroso tipo espuma melamina com 50,8 mm de espessura. As propriedades deste material estão descritas na Tabela 5.3, identificado como espuma (A);
2. cabine de interior caracterizada pela absorção;
3. fluido semi-infinito. Este representa um espaço acústico externo sem contornos, onde as ondas acústicas radiadas por um subsistema conectado a um fluido semi-infinito não são refletidas no subsistema.

O material poroso foi considerado através da inclusão de um tratamento na superfície da fuselagem. O tratamento é referenciado no programa como Tratamentos de Controle de Ruído (NCT -*Noise Control Treatment*, em inglês). NCT são materiais multicamadas projetados para absorver ou refletir energia sonora quando aplicados nas superfícies de placas SEA. Neste módulo, defini-se o modelo a ser utilizado (rígido, flexível ou poroelástico), bem como suas propriedades macroscópicas e/ou elásticas.

As propriedades mecânicas, o fator de perda por amortecimento estrutural e o fator de perda por acoplamento foram implementados conforme a Seção 6.1. A absorção do painel pode ser aplicada como NCT ou diretamente como característica da cavidade.

O módulo NCT permite ao usuário a indicar a perda de inserção, a absorção e a massa por área do tratamento. Para a aplicação ao MPP, considerou-se apenas a implementação do coeficiente de absorção do painel, deixando nulas a perda por inserção e a massa. Desta forma, o *software* considera apenas a absorção, sem adicionar amortecimento estrutural ao painel e sem influenciar a perda de transmissão. Pelo módulo NCT, a absorção média equivalente é calculada como uma média ponderada [1922] da forma

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S_t} \sum_i S_i \alpha_i, \quad (6.11)$$

sendo S_t a área de superfície total da cabine. Neste caso, a absorção média é obtida por

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S_t} [S \alpha_p + (S_t - S_p) \alpha_c], \quad (6.12)$$

em que α_c é a absorção interna da cabine e α_p a absorção do painel.

No caso do MPP1, ou seja, com as microperfurações voltadas para o interior da cabine, ao aplicar a absorção do painel pela equação 6.12, subestima-se a absorção total. Isto ocorre devido à diferença proposta $(S_t - S_p)$ na relação de áreas para a absorção medida na cabine. A absorção medida considera a área total, para a qual o painel de interior sem perfurações está incluso. Ao adicionar o painel microperfurado, tem-se a adição de uma área equivalente de absorção à cavidade. Uma forma mais representativa de calcular a absorção média fica

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S_t} [S_p \alpha_p + S_t \alpha_c], \quad (6.13)$$

de forma que considera-se a absorção do ambiente em adição à uma ponderação de área para o coeficiente de absorção do painel microperfurado.

Para o MPP2, com as microperfurações voltadas para a fuselagem, utilizou-se o NCT.

A TBL é usada para modelar uma excitação do fluxo da camada limite sobre a área superficial de um subsistema. O modelo semi-empírico de Efimtsov [1982] e [1984] foi utilizado com valores fornecidos pela Embraer. Este modelo é dependente dos números de Mach, Reynolds e Strouhal, e baseia-se em dados obtidos em testes de voo cruzeiro com diferentes números de Mach e Reynolds. As flutuações de pressão foram medidas em várias posições em uma fuselagem de aeronave, onde a camada limite foi considerada totalmente desenvolvida com gradiente de pressão igual a zero.

Cinco configurações foram analisadas, sendo uma com o painel de interior sem perfurações (*baseline*) e quatro com o painel microperfurado voltado para a cabine (MPP1) e voltado para a fuselagem (MPP2). As configurações consistem em variações na área microperfurada destes painéis. A primeira configuração, C1, indica que somente foram aplicados o fator de amortecimento e o fator de acoplamento, sem absorção. A Tabela 6.2 apresenta as variações em conjunto com a relação entre áreas microperfuradas e a área de superfície da cabine.

Tabela 6.2: Valores das relações de área para as configurações no modelo de ruído interno.

Configuração	C1	C2	C3	C4
NCT Lateral [%]	0	100	50	50
NCT forro [%]	0	0	0	50
Sp/St [%]	0	0,51	0,25	0,33

A Figura 6.9 apresenta os resultados de nível de pressão sonora na cabine obtidos para o painel *baseline*, MPP1 e MPP2 na configuração C1.

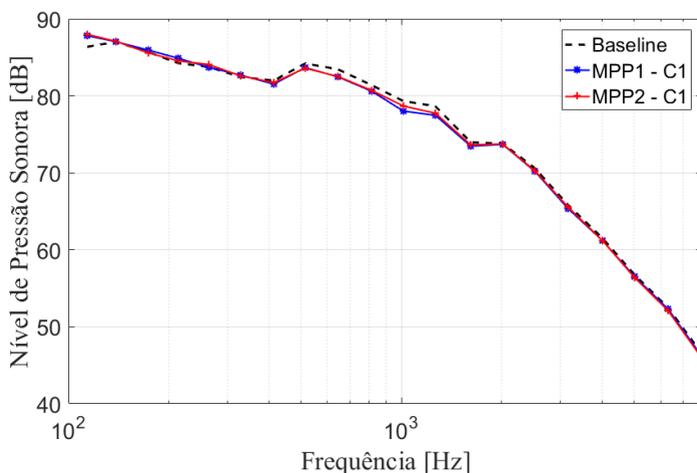


Figura 6.9: Ruído interno na cabine para a configuração C1.

Esta comparação foi realizada com intuito de verificar a influência do fator de amortecimento e de acoplamento no ruído interno. Estes foram aplicados nos painéis laterais do modelo. Observa-se uma pequena melhoria no NPS interno de, aproximadamente, 1 dB entre 700 Hz e 3500 Hz.

A Figura 6.10 apresenta o NPS na cabine obtido para o painel *baseline*, MPP1 e MPP2 na configuração C2.

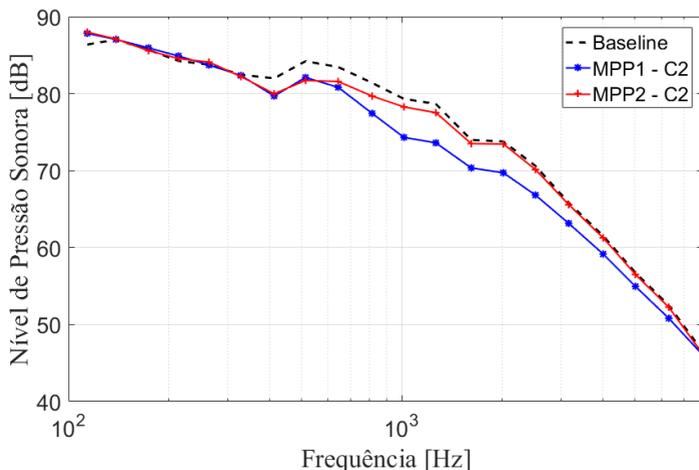


Figura 6.10: Ruído interno na cabine para a configuração C2.

Esta configuração considera aplicação de microperfurações em 100% dos painéis laterais, com uma relação de áreas de 51% entre painéis microperfurados e a cabine. Esta configuração não é realista, do ponto de vista prático, porém demonstra uma aplicação que pode ser extrapolada para outros sistemas. Pode-se observar um comportamento similar para os painéis microperfurados até a banda de 500 Hz, onde o MPP1 começa a apresentar forte absorção. Os ganhos, entre 800 Hz e 3000 Hz chegam a 5 dB para o MPP1, o que indica que, quando as perfurações estão voltadas para a cabine, o MPP apresenta sua melhor performance. Isto ocorre, pois a absorção entre fuselagem e painel de interior é alta, devido ao material poroso e o nível de ruído interno ser proporcional à absorção da cabine.

A Figura 6.11 apresenta o NPS na cabine obtido para o painel *baseline*, MPP1 e MPP2 na configuração C3.

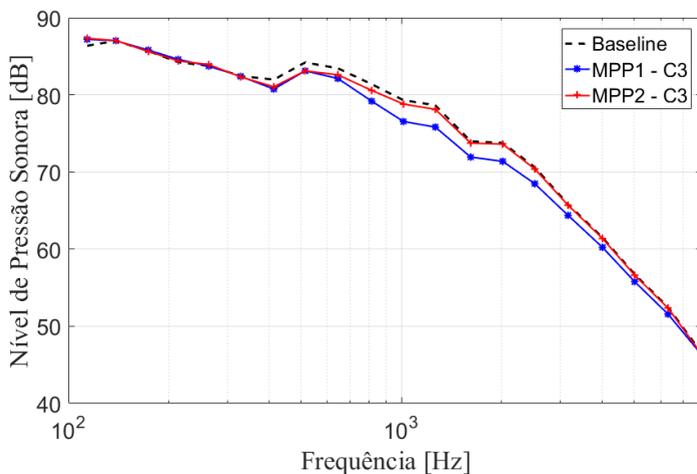


Figura 6.11: Ruído interno na cabine para a configuração C3.

Esta configuração possui relação de área mais realística à aplicação com 25 % da área da cabine com painéis microperfurados. Nota-se uma melhoria na região de absorção do painel, com redução do NPS entre 2 e 2,8 dB. A Figura 6.12 apresenta os valores da redução do NPS na cabine ao aplicar o MPP1 e MPP2 na configuração C3. Nesta Figura, pode-se observar melhor a redução no ruído interno causado pela aplicação do MPP.

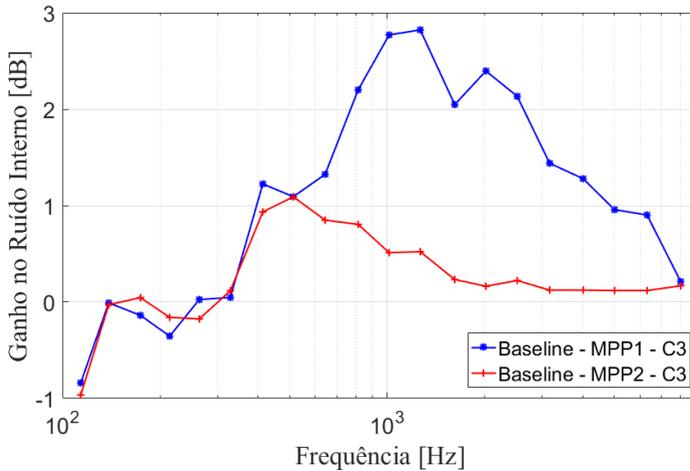


Figura 6.12: Redução do ruído interno na cabine para a configuração C3.

A Figura 6.13 apresenta o NPS na cabine obtido para o painel *baseline*, MPP1 e MPP2 na configuração C4, o qual inclui perfurações em 50 % do forro. Nota-se uma redução no ruído interno de, aproximadamente, 0,5 dB em comparação à configuração C3.

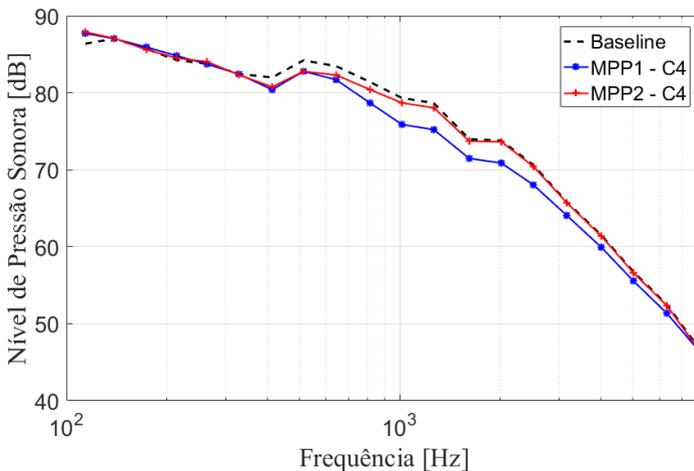


Figura 6.13: Ruído interno na cabine para a configuração C4.

Considerando a configuração C3, a qual é a mais realista do ponto de vista prático, pode-se confirmar uma redução do ruído na cabine interna. Esta redução está relacionada, em grande parte, à absorção gerada pelo painel microperfurado. Os dados de entrada do modelo foram obtidos para o painel perfurado por punções, realizadas à mão e com baixa qualidade, o que confere uma absorção relativamente baixa em relação ao potencial do sistema MPP. Mesmo assim, pôde ser observada uma boa melhoria do ruído interno.

6.3 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo foi desenvolvido um modelo em SEA para estimar a redução no ruído interno de aeronaves com a aplicação de microperfurações nos painéis de interior. Um modelo para a perda de transmissão foi utilizado para validar a implementação das propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas dos painéis microperfurados. Com esta validação, pode-se ter maior confiabilidade na aplicação destes parâmetros no modelo da aeronave.

O modelo simplificado de uma aeronave indicou redução considerável no ruído interno de cabine para a faixa de absorção do sistema MPP. Pôde-se observar que o aumento da absorção, gerado pelo painel MPP, possui maior influência na redução do ruído quando comparado à perda por amortecimento e radiação.

7 Conclusões e Sugestões

Uma análise da aplicação de microperfurações em painéis de interior aeronáuticos foi realizada. Tal solução é altamente viável e promissora, considerando que a maioria das aeronaves comerciais e executivas na atualidade já utilizam o painel composto sem microperfurações.

Uma revisão bibliográfica dos modelos clássicos para o cálculo da impedância de painéis microperfurados foi realizada. Análises dos modelos existentes foram realizadas com intuito de entender os fenômenos físicos envolvidos e explorar o desempenho de tais painéis. Concluiu-se que tais modelos não são adequados para a aplicação em painéis de interior aeronáuticos, pois estes possuem características mais complexas, como placas em fibra de vidro e o núcleo em *honeycomb*.

Um estudo das variações do modelo clássico de Maa considerando fatores de correção obtidos empiricamente ou por meio de dinâmica dos fluidos computacional foi realizado, indicando que o fator de correção da resistência acústica da impedância de painéis microperfurados influencia fortemente o desempenho destes. Resultados experimentais indicam que a variação do modelo de Maa proposta por Allam *et al* [2009] prevê com maior precisão o coeficiente de absorção de sistemas MPP, quando comparado a outros modelos. Concluiu-se que a constante do fator de correção da resistência acústica para bordas agudas, $\beta_r = 4$, representa melhor os painéis de interior de aeronaves microperfurados.

A primeira contribuição inovadora desta Tese consiste em uma modificação do modelo clássico de painéis microperfurados levando em consideração as cavidades subdivididas geradas pelo núcleo em *honeycomb*. Esta modificação permite a modelagem em duas novas aplicações: (1) quando o número de

núcleos perfurados é menor que o número total de núcleos; e (2) quando há mais de um diâmetro de perfuração na distribuição entre superfície e núcleo. Uma análise da nova formulação, concentrada na porosidade relativa, revela que os modelos clássicos não conseguem estimar o coeficiente de absorção para ambos os casos. Nesta formulação a porosidade estimada é dividida em duas partes. A primeira é uma modificação simples do modelo clássico que considera a relação de área aberta para cada núcleo. A segunda relaciona a área de núcleos perfurados e a área de amostra total para cada diâmetro diferente e corrige a impedância calculada. Uma análise de sensibilidade demonstrou que a porosidade relativa pode mudar drasticamente a magnitude do coeficiente de absorção. A analogia a um circuito elétrico equivalente foi utilizada para obter uma equação genérica para a impedância em paralelo da distribuição não homogênea de diferentes diâmetros de perfuração. Esta aplicação provou-se promissora, pois melhora a largura de banda de absorção sem alterações em qualquer parâmetro intrínseco ao painel. Os resultados experimentais do coeficiente de absorção de incidência normal validaram o modelo proposto para ambas as aplicações.

Aplicou-se o equacionamento para MPP com cavidades subdivididas no método da função de transferência a fim de modelar sistemas mais complexos em série e em paralelo. Os resultados indicam que a TMM aplicada em paralelo proposta por [Verdiere *et al.*, 2013] não consegue prever o efeito da distribuição do MPP com cavidades subdivididas, pois realiza a soma das admitâncias para elementos em paralelo e, posteriormente realiza o acoplamento das camadas em série. A variação do método da matriz de transferência proposta neste trabalho, a qual pode ser indicada como um segundo item inovador desta Tese, inicialmente acopla os elementos em série e, posteriormente faz a soma das admitâncias e, desta forma, identifica com boa precisão os picos individuais gerados para cada conjunto de diâmetros em paralelo. Os resultados foram

validados experimentalmente.

Um método de otimização para a maximização do coeficiente de absorção de painéis microperfurados baseado no algoritmo de Evolução Diferencial foi desenvolvido. Três configurações de MPP foram testadas: MPP simples e duplo sem divisões na cavidade e MPP com cavidades divididas com distribuição não-homogênea de diâmetros de perfuração em paralelo. Os resultados indicam que, para uma mesma restrição de espaço (representado pela profundidade da cavidade), o painel com cavidade subdividida apresenta maior faixa de frequência de atuação. Para a faixa de frequência na qual a restrição de espaço permite melhor absorção (entre 2500 Hz e 3500 Hz) nas três configurações, o MPP com cavidade subdividida apresenta resultados de, aproximadamente, duas vezes superior aos outros. Na literatura, métodos de otimização paramétrica de sistemas MPP já haviam sido apresentados. Entretanto, com a adição do modelo com cavidade subdividida e novos parâmetros, como o fator de arredondamento para a correção do tipo de borda e a porosidade relativa, uma nova abordagem é proposta e, portanto, uma terceira contribuição inovadora.

Uma análise em microscópio da geometria dos tipos de perfuração foi realizada a fim de determinar as variações dos diâmetros e forma das perfurações. Os efeitos destas variações foram analisadas através de resultados experimentais do coeficiente de absorção para incidência normal obtidos em tubo de impedância. Os resultados indicam que as perfurações realizadas por punção possuem valores inferiores aos nominais, pois quebram a placa de fibra de vidro, deixando rebarbas tanto na entrada quanto na saída. Além disso, as perfurações possuem diferentes diâmetros na saída e na entrada. Já as perfurações feitas com broca possuem forma mais definida com diâmetros mais consistentes.

Testes do coeficiente de absorção por incidência normal em tubo de impedância foram realizados para a análise da influência do núcleo em *honeycomb*. O modelo proposto para

painéis microperfurados com cavidade subdividida demonstrou bons resultados para distribuição não-homogênea de diâmetros e, para aplicações em que menos de 100% dos núcleos são microperfurados, enquanto que os modelos clássicos não conseguem prever estas aplicações. Entretanto, para que os modelos estimem satisfatoriamente o coeficiente de absorção, os parâmetros geométricos dos painéis e perfurações devem ser estimados/medidos com precisão. Para isso, desenvolveu-se um método inverso baseado no algoritmo de otimização Evolução Diferencial baseado em medições do coeficiente de absorção. Este método demonstrou-se robusto e, em conjunto com o modelo de painéis microperfurados com cavidade subdividida, geraram bons resultados. Esta abordagem é uma evolução do método inverso para MPP proposto por Liu *et al.* [2014], pois utiliza um algoritmo de otimização para o ajuste de curvas, o que torna o método mais robusto, e leva em consideração todos os parâmetros de projeto de um painel microperfurado, ao contrário do método proposto anteriormente que apenas considera o diâmetro de perfuração e a porosidade. Isto indica uma quarta contribuição inovadora desta Tese.

Uma caracterização vibroacústica do painel de interior aeronáutico foi realizado, indicando que microperfurações em uma das faces aumenta consideravelmente o coeficiente de absorção e também atuam de forma positiva na eficiência de radiação, perda por amortecimento estrutural e perda de transmissão, quando comparados a um painel sem perfurações. Estes dados foram utilizados para validar um modelo em SEA para a perda de transmissão. O fator de perda por acoplamento demonstrou-se o parâmetro dinâmico mais influente na perda de transmissão, afetando as frequências na região da frequência crítica e acima desta.

Foi desenvolvido um modelo em SEA para estimar a redução no ruído interno de aeronaves com a aplicação de microperfurações nos painéis de interior. O modelo consiste de um sistema termo-acústico completo sob excitação por camada

limite turbulenta. Os dados de entrada para o painel de interior foram obtidos pela caracterização experimental vibroacústica. O modelo simplificado de uma aeronave indicou redução considerável no ruído interno de aeronaves para a faixa de absorção do sistema MPP. Pôde-se observar que o aumento da absorção na cabine, gerado pelo painel MPP, possui maior influência na redução do ruído quando comparado à perda por amortecimento e radiação. Encontra-se, na literatura, análises de aplicações de painéis microperfurados simples e duplos para reduzir o ruído interno de cabine. Entretanto, as abordagens encontradas não possuem caráter prático, pois não levam em consideração a estrutura de montagem de um painel de interior, a excitação por TBL e o sistema termo-acústico completo de uma aeronave. A análise numérica em SEA para a influência da aplicação de painéis de interior com núcleo em *honeycomb* microperfurados em aeronaves leva em consideração os itens mencionados, é promissora e factível, principalmente porque painéis compostos são utilizados atualmente na indústria aeroespacial. Esta é a quinta contribuição inovadora deste trabalho.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O método da função de transferência apresentou excelentes resultados quando comparado aos dados experimentais. Isto indica que é uma ferramenta robusta para a estimativa da impedância de sistemas multicamadas, tanto em série quanto em paralelo. Neste trabalho foi apresentada uma modificação da TMM para aplicações em paralelo e em série para painéis microperfurados com cavidades subdivididas. Este método pode ser extrapolado para vários sistemas, porém novas matrizes para a aplicação em paralelo devem ser obtidas para diferentes tipos de camadas através da aplicação da porosidade relativa. Sugere-se um estudo de diferentes tipos de ressonadores e materiais de absorção para desenvolver uma ferramenta genérica que

possa ser aplicada para estimar a impedância característica e de superfície e, conseqüentemente, obter o coeficiente de absorção por incidência normal e campo difuso.

O método de otimização com o algoritmo Evolução Diferencial apresentou resultados promissores. Entretanto, para a aplicação com diferentes diâmetros em paralelo, o tempo de processamento elevou-se consideravelmente. Sugere-se estudar o aprimoramento do algoritmo, ou talvez, a aplicação de outros algoritmos com intuito de reduzir o custo computacional. A otimização foi realizada com os modelos clássicos de MPP e com o modelo de cavidade subdividida. Sugere-se aplicar o método em conjunto com a TMM para configurações mais complexas, como sistemas de múltiplas camadas com material poroso, ressonadores de membrana, etc.

A análise do ruído interno da aeronave com painéis microp-erfurados demonstrou-se promissora. Os parâmetros utilizados para o painel de interior foram obtidos experimentalmente. O painel disponível no LVA foi perfurado manualmente, com baixa qualidade das perfurações. Sugere-se realizar esta análise com painéis otimizados, por faixa de frequência, o que conduzirá a melhores resultados.

Sugere-se o estudo de aplicações alternativas do MPP, tanto para o painel de interior aeronáutico quanto para outras estruturas. Diversas formas alternativas podem ser consideradas para tal sugestão, como a inclusão de membranas no interior do núcleo, perfurações em ambas as faces do painel, perfurações na parede do núcleo, sistemas multicamadas com materiais de acabamento, etc..

Referências Bibliográficas

- S. Allam e M. Abom. A new type of muffler based on microperforated tubes. *Journal of Vibration and Acoustics*, 133 (3):1–8, 2011.
(Citado na página 31)
- S. Allam, Y. Guo, e M. Abom. Acoustical study of micro-perforated plates for vehicle applications. *SAE 2009 Noise and Vibration Conference and Exhibition*, 2009.
(Citado nas páginas xxii, 11, 31, 38, 46, 47, 48, 49, 50, 54, 63, 81, 107, 108, 109, 114, 117 e 181)
- J. F. Allard. *Propagation of Sound in Porous Media*. London: Elsevier, 1993.
(Citado nas páginas 10, 22 e 58)
- Aswani, V. V. Praveen, e S. Thangavelu. Performance analysis of variants of differential evolution on multi-objective optimization problems. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(17), 2015.
(Citado na página 79)
- N. Atalla e F. Sgard. Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *Journal of Sound and Vibration*, 303(1-2):195–208, 2007.
(Citado nas páginas xxi, xxii, 10, 25, 36, 38, 46, 47, 48, 49, 50, 81 e 107)
- Y. Atalla e R. Panneton. Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. *Canadian Acoustics*, 33:11–24, 2005.
(Citado nas páginas 77 e 126)
- M. Bolduc. *Acquiring Statistical Energy Analysis Damping Loss Factor for Complex Structures with Low to High Damping Characteristics*. Tese de doutorado, Universit de Sherbrooke, 2007.

(Citado na página 161)

J. S. Bolton e N. Kim. Use of CFD to calculate the dynamic resistive end correction for microperforated materials. *Acoustics Australia*, 38(3):134–139, 2010.

(Citado nas páginas 11 e 12)

P. Bonfiglio e F. Pompoli. Comparison of different inversion techniques for determining physical parameters of porous media. *19th International Congress on Acoustics, Madrid*, p. 2–7, 2007.

(Citado na página 126)

T. Bravo e C. P. Maury. Optimising the absorption and transmission properties of aircraft microperforated panels. *Applied Acoustics*, 79:47–57, 2014.

(Citado na página 15)

M. Buehren. Differential evolution, 2008. URL <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18593-differential-evolution>.

(Citado nas páginas 78 e 80)

B. Campolina. *Vibroacoustic modelling of aircraft double-walls with structural links using Statistical Energy Analysis (SEA)*. Tese de doutorado, Universit de Sherbrooke; Universit Pierre et Marie Curie-Paris, 2012.

(Citado na página 162)

A. P. O. Carvalho e M. R. M. Sousa. Effect of sample area in reverberant chamber measurements of sound absorption coefficients. *International Congress on Acoustics*, 2016.

(Citado na página 139)

T. Cavalheiro. Avaliação de atenuadores acústicos dissipativos de dutos de sistema de ar-condicionado de aeronaves. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

(Citado na página 75)

- T. Cavalheiro, F. Kulakauskas, J. P. Santana, M. Fessel, L. Kulakauskas, e A. Lenzi. Método inverso para caracterização acústica de materiais porosos. *XXVII Encontro da Soc. Brasileira de Acústica*, 2017.
(Citado na página 64)
- Y. Champoux e J. Allard. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics*, 70: 1975–1979, 1991.
(Citado na página 36)
- J. Y. Chung e D. A. Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. i. theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(3):907–921, 1980.
(Citado nas páginas 102, 104 e 105)
- J. B. Crandall. *Theory of Vibrating Systems and Sound*. New York: Van Nostrand, 1926.
(Citado nas páginas 7, 22, 23 e 30)
- M. Crocker e A. Price. Sound transmission using statistical energy analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 9(3):469–486, 1969.
(Citado na página 164)
- J. P. D'Angelo. *Attenuation of turbulent boundary layer induced interior noise using integrated smart foam elements*. Tese de doutorado, Virginia Techy, 2004.
(Citado na página 1)
- B. M. Efimtsov. Characteristics of the field of turbulent wall pressure fluctuations at large reynolds numbers. *Soviet Physics Acoustics*, 28:289–292, 1982.
(Citado na página 174)
- B. M. Efimtsov. Similarity criteria for the spectra of wall pressure fluctuations in a turbulent boundary layer. *Soviet Physics Acoustics*, 30:33–35, 1984.
(Citado na página 174)

- N. Hillereau, A. A. Syed, e E. J. Gutmark. Measurements of the acoustic attenuation by single layer acoustic liners constructed with simulated porous honeycomb cores. *Journal of Sound and Vibration*, 286(1-2):21–36, 2005.
(Citado na página 14)
- K. Hou. Measurement and modelling of microperforated panels. Dissertação de mestrado, Purdue University, 2009.
(Citado nas páginas 10, 11 e 31)
- K. Hou e J. S. Bolton. Validation of micro-perforated panels models. *Proceedings of Internoise*, 2008.
(Citado na página 25)
- O. Hrstka, A. Kucerova, M. Leps, e J. Zeman. A competitive comparison of different types of evolutionary algorithms. *Computers and Structures*, 81:1979–1990, 2003.
(Citado na página 74)
- U. Ingard. On the theory and design of acoustic resonators. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25(6):1037–1061, 1953.
(Citado nas páginas 7, 21, 25, 26 e 30)
- ISO10140:2010. *Laboratory measurement of sound insulation of building elements*. International Organization for Standardization, Geneva, 2010.
(Citado na página 156)
- ISO10534-2:1998. *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer function method*. International Organization for Standardization, Geneva, 1998.
(Citado nas páginas 102, 105 e 157)
- ISO354:2003. *Measurement of sound absorption in a reverberation room*. International Organization for Standardization, Geneva, 2003.
(Citado nas páginas 137 e 138)

- ISO3741:1999. *Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure: Precision methods for reverberation rooms*. International Organization for Standardization, Geneva, 1999. (Citado na página 146)
- J. Kang e H. V. Fuchs. Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space. *Journal of Sound and Vibration*, 220(5):905–920, 1999. (Citado nas páginas 8 e 9)
- N. N. Kim. Numerical modeling of microperforated acoustical materials. Dissertação de mestrado, Purdue University, 2011. (Citado nas páginas *xxi*, *xxii*, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 46, 47, 48, 49, 50, 81, 107, 108 e 109)
- T. Lafont, N. Totaro, e A. Le Bot. Review of statistical energy analysis hypotheses in vibroacoustics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470, 2004. (Citado na página 161)
- D. H. Lee e Y. P. Kwon. Estimation of the absorption performance of multiple layer perforated panel systems by transfer matrix method. *Journal of Sound and Vibration*, 278(4-5):847–860, 2004. (Citado nas páginas 8 e 61)
- F. C. Lee e W. H. Chen. Acoustic transmission analysis of multi-layer absorbers. *Journal of Sound and Vibration*, 248(4):621–634, 2001. (Citado na página 8)
- Y. Y. Lee, E. W M Lee, e C. F. Ng. Sound absorption of a finite flexible micro-perforated panel backed by an air cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 287(1-2):227–243, 2005. (Citado na página 9)
- M. S. Lenzi. Modelos vibroacústicos de médias e altas frequências de painéis aeronáuticos de compósitos. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. (Citado na página 154)

- J. Liu, X. Hua, e D. W. Herrin. Estimation of effective parameters for microperforated panel absorbers and applications. *Applied Acoustics*, 75(1):86–93, 2014.
(Citado nas páginas 13, 16, 124, 125, 126 e 184)
- K. Liu, F. Jiao, e H. Ding. Effect of the flat panel resonance on the absorption characteristics of a microperforated panel absorber. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(5), 1998.
(Citado na página 9)
- D. Y. Maa. Theory and design of micro-perforated panel sound-absorbing construction. *Science China Mathematics*, 18(1):55–71, 1975.
(Citado nas páginas 3, 5, 7, 19, 22, 25, 26, 27, 30, 31 e 38)
- D. Y. Maa. Microperforated-panel wideband absorbers. *Noise Control Engineering Journal*, 29(3), 1987.
(Citado nas páginas 5, 7, 8, 19, 25, 27 e 38)
- D. Y. Maa. Potential of microperforated panel absorber. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5), 1998.
(Citado nas páginas 5, 7, 19, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 38 e 42)
- D. Y. Maa. Statistical absorption coefficient of microperforated absorbers. *Chinese Journal of Acoustics*, 19(2):97–104, 1999.
(Citado nas páginas 7 e 8)
- D. Y. Maa. Theory of microslit absorbers. *Chinese Journal of Acoustics*, 20:1–10, 2001.
(Citado na página 10)
- P. H. Mareze. *Análise da Influência da Microgeometria na Absorção Sonora de Materiais Porosos de Estrutura Rígida*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
(Citado nas páginas 78, 124 e 127)
- M. L. Munjal. *Acoustics of Ducts and Mufflers*. New York: Wiley, 1987.
(Citado nas páginas 61 e 65)

- J.F. Ning, S.W. Ren, e G.P. Zhao. Acoustic properties of micro-perforated panel absorber having arbitrary cross-sectional perforations. *Applied Acoustics*, 111:135–142, 2016.
(Citado na página 11)
- J. Niresch, S. Neelakrishnan, e S. S. Rani. Investigation and correction of error in impedance tube using intelligent techniques. *Journal of Applied Research and Technology*, 14:405–414, 2016.
(Citado na página 106)
- J. Pan, J. Guo, e C. Ayres. Improvement of sound absorption of honeycomb panels. *Acoustics Australia*, p. 195–200, 2005.
(Citado nas páginas 14 e 50)
- R. Panneton. Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122(6):217–222, 2007.
(Citado na página 58)
- S. H. Park. Acoustic properties of micro-perforated panel absorbers backed by helmholtz resonators for the improvement of low-frequency sound absorption. *Journal of Sound and Vibration*, 332(20):4895–4911, 2013.
(Citado na página 13)
- W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolski, e W. T. Vetterling. *Combinatorial Minimization: Method of Simulated Annealing*. In *Numerical Recipes, The Art of Scientific computing*. Cambridge Press, New York, 1986.
(Citado na página 74)
- R. T. Randeberg. *Perforated Panel Absorbers with Viscous Energy Dissipation Enhanced by Orifice Design*. Tese de doutorado, Norwegian University of Science and Technology, 2000.
(Citado na página 10)
- K. N. Rao e M. L. Munjal. Experimental evaluation of impedance of perforates with grazing flow. *Journal of Sound and Vibration*, 108(2):283–295, 1986.

(Citado na página 8)

J. W. S. Rayleigh. *Theory of Sound*. London: MacMillan, 1929 edition, 1878.

(Citado nas páginas 7 e 22)

H. Ruiz, P. Cobo, e F. Jacobsen. Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing. *Applied Acoustics*, 72:772–776, 2011.

(Citado nas páginas 15 e 16)

W. C. Sabine. *Collected Papers on Acoustics*. Harvard University Press, 1922.

(Citado nas páginas 137 e 173)

K. Sakagami, M. Morimoto, e W. Koike. A numerical study of double-leaf microperforated panel absorbers. *Applied Acoustics*, 67(7):609–619, 2006.

(Citado nas páginas 9 e 14)

K. Sakagami, M. Morimoto, e M. Yairi. Recent developments in applications of microperforated panel absorbers. *International Congress on Sound and Vibration*, p. 1–18, 2007.

(Citado na página 8)

K. Sakagami, M. Morimoto, e M. Yairi. A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers. *Applied Acoustics*, 70(8): 1131–1136, 2009.

(Citado na página 9)

K. Sakagami, I. Yamashita, M. Yairi, e M. Morimoto. Sound absorption characteristics of a honeycomb-backed microperforated panel absorber: Revised theory and experimental validation. *Noise Control Engineering Journal*, 58(2):157–162, 2010.

(Citado nas páginas 3, 8, 14, 51 e 73)

K. Sakagami, S. Kobatake, K. Kano, M. Morimoto, e M. Yairi. Sound absorption characteristics of a single microperforated

- panel absorber backed by a porous absorbent layer. *Acoustics Australia*, 39(3):95–100, 2011.
(Citado nas páginas 4, 12, 58 e 124)
- N. Seera. *Viscoelastic damping of hexagonal honeycomb sandwich panels*. Tese de doutorado, Clemson University, 2011.
(Citado na página 2)
- R. Stelzer, N. Totaro, Goran Pavic, e J. L. Guyader. Prediction of transmission loss using an improved SEA method. *10ème Congrès Français d'Acoustique: Lyon*, 2010.
(Citado nas páginas 163 e 164)
- R. Storn e K. Price. *Differential Evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces*. International Computer Science Institute, Munique, 1995.
(Citado na página 75)
- M. A. Temiz, I. Lopez Arteaga, G. Efraimsson, M. bom, e A. Hirschberg. Acoustic end correction of perforated plates - revisited. *International Congress on Sound and Vibration*, p. 1–7, 2014.
(Citado nas páginas xxi, xxii, 12, 30, 31, 34, 35, 38, 46, 47, 48, 49, 50 e 107)
- M. Toyoda e D. Takahashi. Reduction of acoustic radiation by impedance control with a perforated absorber system. *Journal of Sound and Vibration*, 286:601–614, 2005.
(Citado na página 15)
- M. Toyoda e D. Takahashi. Sound transmission through a microperforated-panel structure with subdivided air cavities. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6):3594–3603, 2008.
(Citado nas páginas 15, 73 e 158)
- M. Toyoda, M. Tanaka, e D. Takahashi. Reduction of acoustic radiation by perforated board and honeycomb layer systems. *Applied Acoustics*, 68:71–85, 2007.
(Citado nas páginas 15, 73 e 153)

- M. Toyoda, R. L. Mu, e D. Takahashi. Relationship between helmholtz-resonance absorption and panel-type absorption in finite flexible microperforated-panel absorbers. *Applied Acoustics*, 71(4):315–320, 2010.
(Citado nas páginas 9 e 10)
- K. Verdier, R. Panneton, S. Elkoun, T. Dupont, e P. Leclaire. Transfer matrix method applied to the parallel assembly of sound absorbing materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134:4648–4658, 2013.
(Citado nas páginas 66, 68 e 182)
- H. R. Villamil. *Acoustic Properties of Microperforated Panels and Their Optimization by Simulated Annealing*. Tese de doutorado, Universidad Politécnica de Madri, 2012.
(Citado nas páginas 7 e 74)
- C. Wang e L. Huang. On the acoustic properties of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers with different cavity depths. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130:208–218, 2011.
(Citado nas páginas 12 e 13)
- M. Yairi, K. Takebayashi, K. Sakagami, e M. Morimoto. Wideband sound absorber obtained by combination of two micro-perforated panel absorbers with different air cavity depths arranged in parallel. *Proceedings of InterNoise, Ottawa, Canada*, p. 1–7, 2009.
(Citado na página 12)
- C. Yang e L. Cheng. Sound absorption of microperforated panels inside compact acoustic enclosures. *Journal of Sound and Vibration*, 360:140–155, 2016.
(Citado nas páginas 21, 27 e 28)
- T. Yoo. *The Modeling of Sound Absorption by Flexible Micro-Perforated Panes*. Tese de doutorado, Purdue University, 2009.
(Citado na página 7)

- T. Yoo, Bolto J. S., D. F. Slama, e J. H. Alexander. An improved model for microperforated absorbers. *Proceedings of NOISE-CON*, 2007.
(Citado na página 8)
- Z. Zhang. The theoretical and application study on a double layer microperforated sound absorption structure. *Journal of Sound and Vibration*, 215(3):399–405, 1998.
(Citado na página 8)
- K. Zielinski, P. Weitkemper, R. Laur, e K. D. Kammeyer. Examination of Stopping Criteria for Differential Evolution based on a Power Allocation Problem. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vancouver, Canada*, p. 6748–6755, 2006.
(Citado na página 78)

