

FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

DA ACÚSTICA AMBIENTAL



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitor Carlos Gilberto Carlotti Junior
Vice-reitora Maria Arminda do Nascimento Arruda

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

Pró-reitor Aluisio Augusto Cotrim Segurado



EDITORA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Diretor-presidente Sergio Miceli Pessoa de Barros

COMISSÃO EDITORIAL

Presidente Rubens Ricupero
Vice-presidente Maria Angela Faggin Pereira Leite
Carlos Alberto Ferreira Martins
Clodoaldo Grotta Ragazzo
Laura Janina Hosiasson
Miguel Soares Palmeira
Rubens Luis Ribeiro Machado Júnior
Suplentes Marta Maria Geraldtes Teixeira
Primavera Borelli Garcia
Sandra Reimão

Editora-assistente Carla Fernanda Fontana
Chefe Div. Editorial Cristiane Silvestrin

FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DA ACÚSTICA AMBIENTAL

José Elias Laier



PRÓ-REITORIA
DE GRADUAÇÃO

Copyright © 2022 by José Elias Laier

Apoio da Pró-reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo
Programa de Incentivo à Produção de Livros Didáticos para o Ensino de Graduação

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Laier, José Elias

Fundamentos Matemáticos da Acústica Ambiental/ José
Elias Laier. – São Paulo: Editora da Universidade de São
Paulo, 2022. – (Acadêmica; 114).

Bibliografia.

ISBN 978-65-5785-055-8

1. Acústica. 2. Controle Acústico. 3. Engenharia acústica. 4. Poluição Sonora. 5. Ruído – Controle. 6. Ruído – Efeito fisiológico. I. Título. II. Série.

21-90413

CDD-620.23

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia acústica 620.23

Maria Alice Ferreira – Bibliotecária – CRB-8/7964

Direitos reservados à

Edusp – Editora da Universidade de São Paulo
Rua da Praça do Relógio, 109-A, Cidade Universitária
05508-050 – São Paulo – SP – Brasil
Divisão Comercial: tel. (11) 3091-4008 / 3091-4150
www.edusp.com.br – e-mail: edusp@usp.br

Printed in Brazil 2022

Foi feito o depósito legal

SUMÁRIO

Apresentação.....	11
1. Introdução	15
1.1 Propriedades do Ouvido Humano	23
1.2 Escalas Musical e Técnica.....	24
1.3 Escala Logarítmica	25
1.4 Histórico	29
1.5 Natureza do Som	30
2. Equação de Movimento.....	33
2.1 Introdução	33
2.2 Fundamentos	33
2.3 Leis de Newton	38
2.4 Sistema com um Grau de Liberdade	39
2.5 Integração da Equação Homogênea em Casos Simples..	42
2.6 Integração da Equação Homogênea Combinando Casos Simples	44
2.7 Integração da Equação Homogênea no Caso Geral.....	50

2.8	Solução Particular em Casos Simples Submetidos à Solicitação Harmônica.....	53
2.9	Solução Particular no Caso Geral Submetido à Solicitação Harmônica.....	54
2.10	Solução Completa no Caso Geral Submetido à Solicitação Harmônica.....	56
2.11	Movimento Permanente	58
2.12	Exercícios Resolvidos	61
2.13	Exercícios Propostos	62
3.	Onda Sonora.....	65
3.1	Onda Sonora Plana	67
3.2	Reflexão de Onda Sonora Plana.....	74
3.3	Propagação de Energia Sonora	76
4.	Parâmetros Acústicos.....	79
4.1	Introdução	79
4.2	Nível de Pressão Sonora: Escala Logarítmica	87
4.3	Exemplo de Aplicação	89
4.4	Exercícios Propostos	90
5.	Ouvido Humano, Audição e Ponderações A, B, C.....	91
5.1	Introdução	91
5.2	Audibilidade	92
5.3	Exemplo de Aplicação	96
5.4	Observações Finais	97
5.5	Exercícios Propostos	98
6.	Poluição Sonora e Barreira Acústica	101
6.1	Introdução	101
6.2	Ruído Rodoviário	103
6.3	Ruído Ferroviário	105
6.4	Ruído Aeroportuário	106
6.5	Ruído e Comunidade	110
6.6	Barreira Acústica (Mitigação do Ruído)	110
6.7	Exemplos de Aplicação	113
6.8	Exercícios Propostos	115

7. Onda Sonora Esférica e Som Difuso	117
7.1 Introdução	117
7.2 Fator de Diretividade	123
7.3 Intensidade Sonora em Campo Difuso	123
8. Tempo de Reverberação	127
8.1 Introdução	127
8.2 Intensidade Sonora em Ambiente Fechado	131
8.3 Exemplos de Aplicação	134
8.4 Exercícios Propostos	137
9. Isolação Acústica.....	139
9.1 Introdução	139
9.2 Modelo Aproximado	140
9.3 Correção de Zeller	145
9.4 Transmissão por Portas ou Janelas Fechadas	146
9.5 Isolação de Parede Dupla	146
9.6 Exemplos de Aplicação	147
9.7 Exercícios Propostos	148
10. Tratamento Digital de Medidas Acústicas.....	151
10.1 Introdução	151
10.2 Medição Digitalizada.....	153
10.3 Anomalias na Amostragem Digitalizada	154
10.4 Análise da Frequência	156
10.5 Análise de Fourier.....	157
10.6 Identidade de Parseval.....	158
10.7 Espectro de Fourier	159
Apêndice A. Série de Taylor.....	165
A.1 Aplicação na Solução de Equações Diferenciais	
Lineares	166
Apêndice B. Caminho Livre Médio em Ambientes Fechados	171
Apêndice C. Equações da Acústica	177
Bibliografia.....	181
Créditos das Imagens	183
Sobre o Autor	185

APRESENTAÇÃO

Este texto contempla tópicos de acústica ambiental abordados nas disciplinas Elementos de Acústica Ambiental e Elementos de Acústica Industrial, oferecidas pelo Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Na primeira disciplina, os assuntos dizem respeito ao comportamento acústico de ambientes abertos, como é o caso da poluição acústica dos tráfegos rodoviário, ferroviário e aeroportuário. Na segunda, estuda-se o comportamento acústico de ambientes fechados, como é o caso da acústica de salas, incluindo-se aí, obviamente, os galpões industriais.

Em se tratando de um texto voltado para estudantes de engenharia e profissionais atuantes na área, considera-se que noções básicas de cálculo diferencial são de domínio dos leitores. Afinal, a matemática é, nesse caso, o idioma no qual a natureza resolveu escrever os elementos da acústica. Lembre-se, a propósito, o que já dizia o astrônomo Johannes Kepler no caso do estudo dos movimentos dos corpos no céu: para se entender a história dos movimentos dos astros no céu, é preciso antes entender em que idioma tal história está sendo escrita; e esse idioma, como sabido, é a matemática.

No capítulo 1, Introdução, chama-se a atenção para o fato de que a questão do controle da poluição acústica é recente em nosso meio, ilustrando-se as primeiras barreiras acústicas construídas nos anos de 1990, bem como algumas das barreiras de outros países. As escalas musicais e a escala técnica do som são discutidas; e, então, é introduzida a clássica escala logarítmica, que é a escala de medida que melhor reflete a reação do corpo humano ou, mais especificamente, do ouvido humano. Um pequeno histórico da acústica é apresentado em seguida, encerrando-se com uma breve discussão sobre a natureza ondulatória do som.

A mecânica newtoniana é apresentada no capítulo 2, que inicia discutindo a medida do tempo e o princípio da causalidade, bem como a formulação das três leis de Newton. É desenvolvida a integração da equação de movimento do sistema de um grau de liberdade – tanto no caso da solução homogênea, como no caso da solução forçada harmônica –, separando-se as contribuições da inércia, do amortecimento e da rigidez, de modo a explicitar melhor o papel de cada uma dessas grandezas e suas contribuições no resultado do conjunto. Encerra-se o capítulo com o desenvolvimento da solução geral no caso de solicitação harmônica.

O capítulo 3 é dedicado ao estudo da onda sonora, bem como à discussão da questão da reflexão do som e propagação da energia sonora. O capítulo 4 aborda os parâmetros acústicos básicos, como período e frequência da onda sonora, picos de pressão, fluxo de energia e intensidade sonora, energia sonora específica e rigidez acústica; e trata também da abordagem da intensidade sonora em escala logarítmica, como usual na prática.

A percepção sonora do ouvido humano é discutida no capítulo 5, com especial destaque para as chamadas curvas de igual audição de Fletcher-Munson e a formulação das escalas de ponderação A, B e C.

A poluição sonora oriunda dos tráfegos rodoviário, ferroviário e aeroportuário é o assunto do capítulo 6, tal como o estudo das barreiras acústicas. São tratados em detalhes os indicadores probabilísticos da poluição sonora e os modernos estimadores do nível de poluição. No entanto, as barreiras acústicas são abordadas sem aprofundamento, visto que a teoria da difração sonora, que governa tal fenômeno, é um assunto de certa complexidade matemática, mais ao

feitio da chamada acústica física. Desse modo, os conceitos básicos que interessam de perto, na prática, são o objeto de apresentação.

O capítulo 7 é voltado para o estudo da onda acústica de propagação esférica – que constitui um ponto de partida para a formulação do som difuso, fundamental no estudo da reverberação – e para o fator de diretividade sonora, que permite a caracterização da propagação sonora em casos mais gerais. O tempo de reverberação em ambientes fechados é o tema do capítulo 8, e a isolamento acústica é trabalhada no capítulo 9. São apresentados, no capítulo 10, os principais conceitos envolvidos no tratamento digital da medição de parâmetros acústicos.

No final do texto, são acrescentados três apêndices. O primeiro (apêndice A) discorre sobre os fundamentos operacionais da série de Taylor, que complementa as técnicas de integração da equação de movimento abordada no capítulo 2. O apêndice B demonstra o chamado caminho livre médio entre reflexões em ambientes fechados, assunto da acústica estatística. Por fim, o apêndice C apresenta a formulação tridimensional da onda acústica e complementa o exposto no capítulo 3.

LANÇAMENTO 2022

JÁ DISPONÍVEL

LIVRARIA VIRTUAL

www.edusp.com.br/loja

LIVRARIAS

www.edusp.com.br/livrarias

INFORMAÇÕES

Divulgação Edusp

divulga@usp.br

