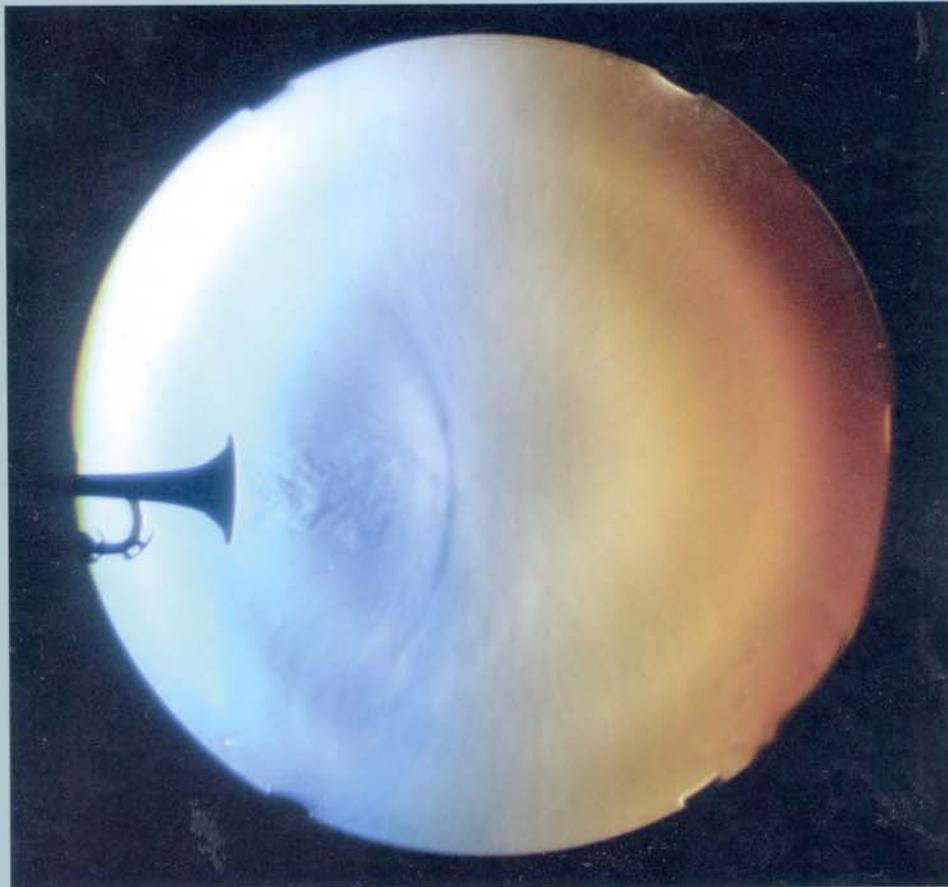


LUÍS L. HENRIQUE

ACÚSTICA MUSICAL



Inclui CD

SERVIÇO DE EDUCAÇÃO E BOLSAS
FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN

PREFÁCIO

A acústica musical é uma área do conhecimento muito vasta, quer pelas matérias que engloba, quer pelo seu carácter interdisciplinar. O número de artigos científicos publicados e de congressos realizados nos últimos anos atestam bem o seu desenvolvimento e o interesse crescente que desperta em investigadores e estudiosos.

Tanto quanto sei, em Portugal praticamente não existe material publicado neste domínio. Pareceu-me oportuno a publicação de uma obra em português de carácter pedagógico, que desse uma panorâmica dos principais assuntos que tradicionalmente se associam à acústica musical, preenchendo assim uma lacuna que se sentia cada vez mais urgente colmatar.

Tratando-se de uma área de carácter essencialmente científico, não é possível abordar a maioria dos assuntos com o mínimo de profundidade e rigor, sem utilizar como ferramentas de base, uma série de noções de física e de matemática. Na grande maioria dos livros existentes sobre acústica musical os autores optaram, ou por uma exposição simples, qualitativa, evitando qualquer fórmula matemática ou conceito físico, ou por uma exposição bastante exigente do ponto de vista físico-matemático, tornando as obras inacessíveis à maioria dos leitores. No presente trabalho tentei uma abordagem relativamente simples do ponto de vista físico-matemático, mas sem evitar a utilização de determinadas fórmulas e conceitos, quando os assuntos assim o exigiam.

O problema que se colocou inicialmente foi, portanto, o de definir o nível físico-matemático da exposição. Sendo este livro dirigido principalmente a músicos – estudantes, professores e executantes –, pôs-se a questão central da sua preparação a nível científico. Para permitir aos leitores, sejam quais forem os seus conhecimentos científicos, a compreensão integral do texto, optei por elaborar alguns apêndices onde são expostas as noções de física e matemática consideradas necessárias. Deste modo, nos Apêndices A, B e C foram reunidas uma série de noções e conceitos bastante diversificados que permitirão ao leitor compreender os aspectos de carácter científico focados no livro.

A abordagem escolhida poderá afastar alguns potenciais leitores, mas a alternativa seria uma exposição superficial, essencialmente qualitativa que não permitiria abordar muitas questões importantes que são focadas, enquanto que outras não seriam expostas cabalmente.

Pensando nos leitores que não estão minimamente motivados para a explicação científica dos fenómenos, foi criado outro nível de leitura: ao longo do livro, encontrarão uma série de Caixas onde são focados assuntos interessantes, tratados de uma maneira qualitativa.

Nos dois níveis de leitura, espero de algum modo ter contribuído para desmistificar a ideia de que uma abordagem científica dos fenómenos se opõe ao espírito artístico. Tradicionalmente, uma parte dos músicos não está à partida sensibilizada para abordar os fenómenos físicos inerentes à própria música, desconhecendo os benefícios a vários níveis que uma mudança de atitude lhes traria. A intuição e o seu sentido artístico não serão certamente diminuídos pela compreensão científica dos fenómenos. No caso concreto da acústica musical, pode ser útil em vários aspectos, dos quais destaco: melhorar as condições de execução e de audição, dos músicos entre si e do público; melhorar a qualidade dos instrumentos musicais; permitir uma melhor compreensão de muitos fenómenos e problemas bem conhecidos dos músicos da sua prática instrumental quotidiana.

Tendo a acústica musical como objectivo o estudo, compreensão e análise de fenómenos musicais, a música nunca deverá ser perdida de vista. Analisar e dissecar os sons isoladamente, não deverá fazer alterar a sensação única que se tem ao ouvir um trecho no seu todo.

Contando com a prestimosa colaboração de um grupo de músicos, gravei uma série de sons de instrumentos musicais que foram analisados e comentados, os quais são apresentados no disco compacto incluído neste livro. A preceder cada exemplo sonoro o músico executa um pequeno solo de apresentação do seu instrumento.

Este livro não se destina apenas a músicos. Estudiosos de outras áreas, poderão também encontrar nele motivos de interesse. A acústica musical é, para todos os efeitos, um ramo da acústica, ciência que estuda o som. Em todos os momentos e situações do quotidiano, o som está presente, e os mecanismos da sua produção, transmissão e recepção são idênticos em qualquer área. A acústica não tem sido devidamente contemplada do ponto de vista curricular em áreas em que é fundamental, como física, engenharia, arquitectura, fonética, e como tal, espero que o presente trabalho possa também interessar a leitores dessas áreas.

O presente projecto, é de certo modo complementar do livro Instrumentos Musicais publicado pela Fundação Calouste Gulbenkian nesta mesma série.

Porto, Outubro de 2002

O autor

ÍNDICE GERAL

Introdução A ACÚSTICA MUSICAL	1
1 Arte e ciência; 2 Música: som e silêncio; 3 Domínio da acústica musical; 4 Notas.	
Capítulo 1 BREVE HISTÓRIA DA ACÚSTICA MUSICAL	13
1.1 Antiguidade; 1.2 Idade Média; Ciência muçulmana; 1.3 Renascença; 1.4 Século dezassete; Academias científicas; Propagação do som; Origem da palavra <i>acústica</i> ; 1.5 Século dezoito; Sons de combinação; 1.6 Século dezanove; 1.7 Século vinte; Publicações; Investigadores e unidades de investigação.	
Capítulo 2 SISTEMAS VIBRATÓRIOS SIMPLES	43
2.1 Movimento e oscilação; Vibrações mecânicas e acústicas; 2.2 Frequência, período e amplitude; Sistema massa/mola; 2.3 Sistemas com um grau de liberdade; 2.4 Oscilador simples; Osciladores; Movimento harmónico simples; Propriedades do MHS; Constante de rigidez; Importância do MHS; Energia de um oscilador livre; 2.5 Frequência própria de um oscilador; Pêndulo gravítico simples; A “mola de ar”; 2.6 Ressonador de Helmholtz; 2.7 Fase das oscilações; Fase e timbre; 2.8 Oscilações livres; Equação do movimento; Amortecimento; Modelos de dissipação; Tempo de decaimento; 2.9 Oscilações forçadas; Factor de qualidade; Regime transitório e regime forçado; 2.10 Exemplos ilustrativos; Ressonância; Diapasão; Vibração por simpatia; 2.11 Dissipação nos instrumentos musicais.	
Capítulo 3 SISTEMAS VIBRATÓRIOS COMPLEXOS	99
Sistemas vibro-acústicos e a sua modelação	
3.1 Conceito de sistema; Classificação dos sistemas; Sistemas sem memória e sistemas com memória; 3.2 Modelação física de um sistema; Condições iniciais e condições aos limites; Algoritmos; Simulação numérica; 3.3 Efeitos não-lineares; Princípio da sobreposição; Sons de combinação ou resultantes; Distorção; Distorções não-lineares importantes; Efeito de salto; Conclusões sobre os efeitos não-lineares; 3.4 Linearização de sistemas; Aproximação linear de uma função; Aproximação polinomial de uma função; Integração numérica das equações diferenciais; 3.5 Sistemas auto-excitados; Ciclos-limite; Linearmente instável, não-linearmente estável; 3.6 Sistemas com vários graus de liberdade; 3.7 Sistemas contínuos; 3.8 Discretização de um sistema; Sistemas contínuos e sistemas discretos; Método dos elementos finitos; 3.9 Modos vibratórios; “Receita vibratória”; Modos de corpo rígido; Ressonadores múltiplos; Conceito de função de transferência; 3.10 Ondas estacionárias; Ondas estacionárias/Modos vibratórios.	
Componentes essenciais dos instrumentos musicais	
3.11 Tubos; Ondas estacionárias; Comprimento acústico de um tubo; 3.12 Cordas; Vibração transversal; Vibração longitudinal; Vibração torcional; Vibração de oitava; 3.13 Barras e placas; 3.14 Membranas.	
Considerações sobre os sons musicais	
3.15 Sons audíveis, ultra-sons e infra-sons; 3.16 Características do som; Frequência; Intensidade; 3.17 Análise de um som musical; Períodos transitórios e de estabilidade; Regime transitório/Regime permanente; Informação contida num som musical; Formantes; 3.18 Som puro: a unidade básica; 3.19 Sons complexos; Som fundamental; Sub-harmónicos; 3.20 Série dos harmónicos; 3.21 Teorema de Fourier; Série de Fourier; 3.22 Inarmonicidade dos parciais; Bloqueamento de frequências.	
Capítulo 4 ONDAS	193
4.1 O que é uma onda; Ondas de diferente natureza; Direcção de propagação; Ondas dispersivas e não-dispersivas; 4.2 Comprimento de onda; 4.3 Propagação do som; Frente de onda; Ondas sonoras; Dimensão do meio de propagação; 4.4 Velocidade de propagação; Meios gasosos; Meios sólidos; Meios líquidos; 4.5 Equação de propagação das ondas; Equação de onda; Impedância; 4.6 Impedância acústica específica; Impedância acústica; Impedância mecânica; 4.7 Interferência de ondas; Batimentos; Efeito coral; 4.8 Ondas estacionárias; 4.9 Radiação sonora; Monopolos, dipolos e quadripolos; Radiação de um diapasão; Eficiência de radiação; Direcionalidade; 4.10 Absorção; 4.11 Reflexão; 4.12 Difracção; 4.13 Refracção; Efeito da temperatura; Efeito do vento; 4.14 Efeito Doppler; Aplicações do efeito Doppler; Ondas de choque; 4.15 Campos sonoros; 4.16 Grandezas acústicas características; O decibel; 4.17 Energia e potência de uma fonte sonora; Lei do inverso do quadrado da distância; Densidade de energia; 4.18 Intensidade sonora; 4.19 Pressão acústica; Pressão sonora e direcionalidade da fonte; Medição de níveis de pressão sonora; 4.20 Combinação de fontes sonoras; Fontes coerentes e fontes incoerentes.	
Capítulo 5 ANÁLISE DE SONS E INSTRUMENTAÇÃO ACÚSTICA E VIBRATÓRIA	255
Métodos teóricos e experimentais de análise de sons	
5.1 Representações temporais; 5.2 Representações espectrais e análise de Fourier; Análise de Fourier; Desenvolvimento da série de Fourier; Transformação de Fourier; Transformação rápida de Fourier; 5.3 Representações temporais-frequenciais; Resolução no tempo e resolução em frequência; Transformação por ondículas; Limpeza do ruído de fundo; 5.4 Análise e processamento de sinais; 5.5 Filtros; Bandas de frequências; 5.6 Curvas de impedância e curvas de admitância; Modos vibratórios de uma barra; Modos acústicos de um tubo; 5.7 Identificação modal; 5.8 Outros métodos de análise; Análise cepstral; Densidade de probabilidade em amplitude;	

Operação de convolução; Funções de autocorrelação e de intercorrelação; Espectro médio de longa duração (*LTAS*); 5.9 Soluções informatizadas.

Instrumentação acústica e vibratória

5.10 Geradores de sinais; 5.11 Fontes sonoras e vibratórias; Métodos de excitação; Varrimento em frequência; Excitação impulsiva; Excitação aleatória; *Shakers*; 5.12 Captadores acústicos e vibratórios; 5.13 Osciloscópio; 5.14 Analisadores espectrais. Freqüencímetro; 5.15 Sonómetros; 5.16 Sonógrafo; 5.17 Estroboscópio; 5.18 Interferometria holográfica; Laser e hologramas; Interferogramas holográficos; 5.19 Intensimetria; 5.20 *RASTI*; 5.21 Câmaras reverberantes e anecóicas.

Capítulo 6 INTRODUÇÃO AOS INSTRUMENTOS MUSICAIS..... 309

6.1 O instrumento musical do ponto de vista físico; Sistema excitador; Sistema ressoador; Sistema radiante; Interação dos sistemas excitador, ressoador e radiante; Aspectos lineares e não-lineares; 6.2 Classificação dos instrumentos; 6.3 Disposição dos instrumentos na orquestra sinfônica; 6.4 Características tímbricas; Duração dos transitórios; Gama dinâmica; Vibrato; Regiões formânticas; 6.5 Radiação e direccionalidade; 6.6 O conceito de qualidade de um instrumento.

Capítulo 7 CORDOFONES FRICCIONADOS..... 333

7.1 Aspectos da construção do violino; *Reversement*; 7.2 Propriedades das madeiras de *lutherie*; 7.3 Verniz; 7.4 Cavalete; 7.5 Alma; 7.6 Surdina; 7.7 Cordas reais e afinação; Estabilização das cordas; Afinação, *flattening* e *jitter*; 7.8 Arco; 7.9 A corda friccionada; 7.10 Modos vibratórios de uma corda; 7.11 *Sul tasto, sul ponticello*; 7.12 Harmônicos; 7.13 Modos vibratórios do violino; Nomenclatura dos modos; Modos da cavidade do ar; Placas livres e violino montado; 7.14 Radiação sonora; 7.15 Nota do lobo; Causas físicas; 7.16 Violoncelo; Comparação de dois violoncelos; 7.17 Viola; 7.18 Contrabaixo.

Capítulo 8 CORDOFONES DEDILHADOS..... 397

8.1 Estrutura da guitarra; 8.2 A corda dedilhada; 8.3 Influência do ataque; 8.4 Espaçamento dos trastos; 8.5 Modos vibratórios da guitarra; 8.6 Modos acústicos da cavidade do ar; 8.7 Qualidade sonora de uma guitarra; 8.8 Radiação sonora; 8.9 Travejamento; 8.10 Cavalete; 8.11 Guitarra portuguesa; 8.12 Guitarra inglesa.

Capítulo 9 CORDOFONES DE TECLA..... 425

9.1 Estrutura do piano; 9.2 Mecânica; Mecânica vienense e mecânica inglesa; 9.3 *Timing* e *toucher*; Sequência temporal dos movimentos (*timing*) da mecânica; 9.4 Cordas; Cordas múltiplas e afinação; Tensão das cordas; Ponto de ataque; 9.5 Modos vibratórios das cordas; 9.6 Inarmonicidade e afinação; Afinação “esticada”; 9.7 Martelo; Comportamento não-linear do martelo; Harmonização dos martelos (*voicing*); 9.8 Interação martelo/corda; 9.9 Modos do tampo harmônico; 9.10 Radiação sonora; direccionalidade; 9.11 Análise do som do piano; Piano: vibração livre ou forçada?; Decaimento sonoro do piano; 9.12 Cravo; 9.13 Clavicórdio.

Capítulo 10 MEMBRANOFONES..... 471

10.1 Vibração de membranas; Figuras de Chladni; Membrana ideal; Membrana real; Decaimento dos modos; 10.2 Baquetas; 10.3 Timbales; Influência do corpo do timbale; 10.4 Modos que definem a altura; 10.5 Análise tímbrica do timbale; Influência do ponto de ataque; Radiação sonora; 10.6 Caixa; Radiação sonora; 10.7 Bombo; 10.8 *Tabla*; 10.9 Adufe; 10.10 Outros membranofones.

Capítulo 11 IDIOFONES..... 499

11.1 Vibração de barras e varas; 11.2 Idiofones auto-excitados; 11.3 Harmônica de vidro; 11.4 “Afinação” das barras; 11.5 Ressoadores; 11.6 Diapasão; Instrumentos com diapasões; 11.7 Xilofone; 11.8 Marimba; 11.9 Vibrafone; 11.10 Glockenspiel; 11.11 Sinos tubulares; 11.12 Triângulo; 11.13 Placas vibrantes; 1.14 Pratos; *Zildjian*; 11.15 Sinos.

Capítulo 12 AEROFONES I: FLAUTAS..... 527

12.1 Tubos aberto-aberto e fechado-aberto; Velocidade e pressão das partículas; 12.2 Influência da conicidade do tubo; 12.3 Frequência de corte; 12.4 Efeito acústico dos orifícios laterais; 12.5 Influência do material do tubo; 12.6 Mecanismos de produção do som; Flauta de bisel; 12.7 Flauta transversal; 12.8 Radiação sonora; 12.9 Sons multifônicos; 12.10 Traverso; Comparação do traverso com a flauta moderna; 12.11 Flauta de bisel; 12.12 Flautim; 12.13 Geometria da embocadura; Turbulência e vorticidade.

Capítulo 13 AEROFONES II: PALHETAS..... 563

13.1 Sistema acoplado palheta/tubo; 13.2 Palhetas rígidas e flexíveis; 13.3 Comportamento não-linear da palheta; 13.4 Pressão de sopro e fluxo de ar; 13.5 Ar exalado e afinação; 13.6 Oboé; 13.7 Oboé de amor; 13.8 Corne inglês; 13.9 Fagote; 13.10 Fagote barroco; 13.11 *Dulcian*; 13.12 Contrafagote; 13.13 Clarinete soprano; 13.14 Clarinete baixo; 13.15 Radiação sonora; 13.16 Saxofone; 13.17 Cromorne; 13.18 Multifônicos.

Capítulo 14 AEROFONES III: METAIS	601
14.1 Caracterização acústica dos metais; Curvas de impedância de entrada; 14.2 Regimes de oscilação; 14.3 Bocal; 14.4 Pistões e válvulas; 14.5 Surdinas; 14.6 Efeito acústico das surdinas; A mão como surdina; 14.7 Técnica de execução; Embocadura; A condensação indesejável nos metais; 14.8 Trompa; 4.9 Trompa vienense; 14.10 Sons multifônicos; 14.11 Trompete; Imagens de <i>Schlieren</i> ; 14.12 Trombone; 14.13 Tuba; 4.14 Radiação sonora; 14.15 <i>Didjeridu</i> .	
Capítulo 15 AEROFONES IV: ÓRGÃO	641
15.1 Constituição do órgão; 15.2 Tubos labiais; 15.3 Flautas de chaminé; 15.4 Tubos palhetados; 15.5 Mecanismo de produção do som; Modelação física; 15.6 Caracterização do som do órgão; Transitórios; 15.7 Efeito do material do tubo; Vibração das paredes do tubo; 15.8 Afniação; 15.9 Intonação; 15.10 Caracterização acústica da intonação.	
Capítulo 16 AEROFONES V: VOZ	665
16.1 O órgão da voz; 16.2 Cordas vocais; Vibração das cordas vocais; 16.3 Respiração e pressão subglótica; 16.4 Mecanismo da fonação; 16.5 Som laríngeo; Frequência fundamental; 16.6 Glotogramas e electroglotogramas; Electroglotografia (EGG); 16.7 Registos; 16.8 Formantes; Articuladores; 16.9 Vogais; 16.10 Consoantes; 16.11 <i>Jitter</i> e <i>shimmer</i> ; 16.12 Modelação física; 16.13 A voz dos cantores; Formante dos cantores; Ressonância do peito; 6.14 “Afniação” dos formantes; 16.15 Vibrato; 16.16 Voz cantada/voz falada; 16.17 Reconhecimento automático da fala; 16.18 Síntese da fala; Máquinas falantes; Prosódia; Percepção da fala; 16.19 Fonética; 16.20 Transcrição fonética; Alfabeto fonético internacional.	
Capítulo 17 ELECTROFONES E SÍNTESE: DO ANALÓGICO AO DIGITAL	713
17.1 Electrofones; 17.2 <i>Telharmonium</i> ; 17.3 <i>Trautonium</i> ; 17.4 <i>Theremin</i> ; 17.5 <i>Ondas martenot</i> ; 17.6 Analógico versus digital; 17.7 Digitalização e <i>aliasing</i> ; Teorema de Shannon; <i>Aliasing</i> ; 17.8 Introdução à síntese sonora; 17.9 Sintetizadores analógicos e digitais; 17.10 Síntese aditiva; 17.11 Síntese subtractiva; 17.12 Síntese por sons “samlados”; 17.13 Síntese por modelação física; 17.14 Outros processos; Síntese granular; Síntese FM; Estimulação modal; 17.15 MIDI.	
Capítulo 18 EXPERIMENTAÇÃO E INOVAÇÃO NOS INSTRUMENTOS MUSICAIS	733
18.1 Inovação nos instrumentos musicais; 18.2 Violino <i>Savart</i> ; 18.3 Violinos irregulares; 18.4 Octeto de violinos; 18.5 Família de guitarras; 18.6 Experimentação em pianos; O “Imperial”; 18.7 Pianos <i>Fazioli</i> ; 18.8 Piano preparado; 18.9 Instrumentos microtonais; 18.10 Esculturas e estruturas sonoras; <i>Structures sonores</i> ; 18.11 Compósitos e plásticos na construção de instrumentos.	
Capítulo 19 ACÚSTICA DE SALAS	757
19.1 Equacionar a acústica de salas; Objectivo da sala; 19.2 Influência da acústica da sala; Audição dos músicos; 19.3 Evolução das salas; 19.4 Comportamento do som em espaços fechados; 19.5 Absorção sonora; 19.6 Coeficientes de absorção; Absorção do ar; 19.7 Painéis acústicos; 19.8 Difusão sonora; Difusores de Schroeder; 19.9 Tempo de reverberação; Fórmula de Sabine; Fórmula de Eyring-Norris; 19.10 Métodos de medição; 19.11 Correção acústica; 19.12 Modos acústicos; Salas de planta não-rectangular; 19.13 Densidade modal; Coloração; Cantar no chuveiro; 19.14 “Tamanho acústico” de uma sala; Percurso livre médio; 19.15 Som directo e som reflectido; Reflexões da sala e percepção sonora; Efeito de precedência; 19.16 Parâmetros físicos; 19.17 Características subjectivas; 19.18 Projecto acústico; Reflexões laterais; 19.19 Simulação biaural de salas de concerto; 19.20 As “melhores” salas do mundo; 19.21 Outras salas; Grande Auditório da Gulbenkian; Sala de La Chaux-de-Fonds; Konserthuset de G teborg; 19.22 Igrejas.	
Capítulo 20 SISTEMA AUDITIVO	809
20.1 Descrição geral do ouvido; 20.2 Ouvido externo; 20.3 Ouvido médio; Tímpano; Cadeia ossicular; 20.4 Ouvido interno; Labirinto ósseo; Labirinto membranoso; Cóclea; Membrana basilar; Órgão de Corti; 20.5 Função do ouvido externo; Corneta acústica; Efeito de ressonância; 20.6 Mecanismo e função do ouvido médio; Vibração da membrana do tímpano; Trompa de Eustáquio; 20.7 Sistema muscular de protecção auditiva; Movimentos do estribo; 20.8 Adaptação de impedância; 20.9 Órgãos do equilíbrio; 20.10 Células ciliadas; 20.11 Teorias da audição; Primeiras teorias; Teoria de Helmholtz; Teoria de Békésy; 20.12 Mecanismo do ouvido interno; 20.13 Sistema nervoso auditivo periférico; Neurónios, fibras nervosas e nervos; 20.14 Impulso nervoso; Neurónios do sistema auditivo; 20.15 Sistema nervoso auditivo central; 20.16 Emissão coclear e condução óssea; 20.17 Exposição a sons intensos; Danos físicos e psíquicos; 20.18 Prevenção e protecção auditivas.	
Capítulo 21 PERCEPÇÃO DOS SONS MUSICAIS	859
21.1 Diferenças mínimas perceptíveis; 21.2 A não-linearidade do ouvido; Harmónicos aurais; Altura virtual; 21.3 Sensação de altura; Efeito Stevens; Escala de mel; 21.4 Circularidade da sensação de altura; 21.5 Ouvido absoluto; 21.6 Sensação de intensidade; 21.7 Limiares da audição; Limiar de audibilidade; Limiar de dor; 21.8 Timbre; Diagramas <i>tristimulus</i> ; 21.9 Percepção de sons complexos periódicos; Escalas de tempo; Efeito <i>cocktail party</i> ; 21.10	

Consonância/Dissonância; 21.11 Banda crítica; 21.12 Efeito de máscara; 21.13 Percepção do espaço sonoro; Características direccionais do ouvido; Percepção da direcção do som; Difraccção provocada pela cabeça.

Capítulo 22 REGISTO E REPRODUÇÃO DO SOM	887
22.1 Primórdios do registo sonoro; 22.2 A era do vinil; 22.3 Magnetofone; 22.4 Estereofonia; 22.5 Transdutores electroacústicos; Microfones; 22.6 Microfones dinâmicos; 22.7 Microfones de condensador; 22.8 Microfones especiais; Microfone <i>middle-side</i> (M-S); 22.9 Direccionalidade de um microfone; 22.10 Outras características; 22.11 Componentes de uma cadeia de alta fidelidade; Amplificadores; Altifalantes; 22.12 Não-linearidades dos equipamentos; 22.13 Tipos de distorção; 22.14 Energia acústica dos instrumentos; 22.15 “Fidelidade” na gravação; 22.16 Algumas considerações sobre captação; Usar um ou vários microfones?; 22.17 Audição analítica e audição crítica; 22.18 Pré-produção, produção e pós-produção.	
Capítulo 23 INTERVALOS E AFINAÇÃO	925
23.1 Intervalos acústicos; Números fraccionários e decimais; Savart; 23.2 A unidade cent; 23.3 Oitavas contidas num intervalo; 23.4 Intervalos naturais; 23.5 Intervalos temperados; 23.6 Intervalos microtonais; 23.7 Afinação dos instrumentos; 23.8 Afinação de teclados; 23.9 O temperamento do piano; Contole dos batimentos.	
Capítulo 24 ESCALAS E TEMPERAMENTOS	945
24.1 Porque existem escalas; 24.2 Divisão da oitava; 24.3 O ciclo das quintas; 24.4 Escala pitagórica; 24.5 Escala natural; O intervalo de terceira maior; 24.6 Afinação mesotónica; 24.7 Temperamentos; 24.8 Teclados enarmónicos; 24.9 Temperamento igual; 24.10 Diapasão; 24.11 Evolução do diapasão; Diapasão antigo; Afinação brilhante; 24.12 Afinação durante a execução.	
Apêndice A GRANDEZAS, UNIDADES E DIMENSÕES	967
A.1 Sistema internacional de unidades; Outras unidades; A.2 Dimensões; Homogeneidade dimensional das equações físicas; A.3 Conversão de unidades; A.4 Grandezas escalares e vectoriais; A.5 Coeficientes, factores e módulos; A.6 Alfabeto grego.	
Apêndice B CONCEITOS FÍSICOS FUNDAMENTAIS EM ACÚSTICA	981
B.1 Velocidade; Velocidades média e instantânea; Interpretação gráfica da velocidade; B.2 Aceleração; Aceleração da gravidade; B.3 Força, massa e peso; Forças tractivas, compressivas e de pressão; Forças conservativas e dissipativas; Momento linear; B.4 Trabalho, energia e potência; Energia; Potência; B.5 Movimento circular uniforme; B.6 Atrito; B.7 Estrutura molecular da matéria; B.8 Elasticidade; Estrutura dos sólidos; B.9 Módulo de Young; B.10 Módulo de rigidez; B.11 Módulo de elasticidade volumétrico; B.12 Coeficiente de Poisson; B.13 Fluidos; B.14 Viscosidade; B.15 Massa volúmica; B.16 Pressão; B.17 Hidrostática e hidrodinâmica; Pressão atmosférica; B.18 Aplicação da Equação de Bernoulli; B.19 Temperatura; B.20 Teoria cinética dos gases; Equação dos gases perfeitos; Calores específicos; B.21 Campos.	
Apêndice C NOÇÕES DE MATEMÁTICA	1023
C.1 Algarismos significativos; C.2 Notação científica; C.3 Somatório; C.4 Valor absoluto de um número; C.5 Potenciação e radiciação; C.6 Funções exponencial e logarítmica; C.7 Funções trigonométricas; Funções trigonométricas inversas; C.8 Áreas e volumes; C.9 Derivada de uma função; Derivadas de ordem superior; Derivadas parciais; C.10 Primitiva de uma função; C.11 Valor máximo, média e valor eficaz; C.12 Cálculo de percentagens; C.13 Números complexos; C.14 Introdução às equações diferenciais; C.15 Representação gráfica de funções; Equação de uma recta; C.16 Coordenadas polares; C.17 Escalas lineares e logarítmicas; C.18 Linearidade e não-linearidade; C.19 Paridade de uma função.	
Apêndice D FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA E AMORTECIMENTO NUM OSCILADOR	1065
Apêndice E EFEITOS FÍSICOS DOMINANTES NUM OSCILADOR	1071
Apêndice F LINEARIZAÇÃO DE FORÇAS NÃO-LINEARES	1075
Apêndice G MODOS VIBRATÓRIOS DE UM SISTEMA COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE	1079
Apêndice H CÁLCULO DE BANDAS DE FREQUÊNCIAS	1083
H.1 Número de oitavas numa banda de frequências; H.2 Calibração em décadas; H.3 Divisão de um intervalo; H.4 Frequência central de uma banda; H.5 Tipos de filtros.	
Apêndice I PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS	1091
Apêndice J EXEMPLOS MUSICAIS	1095

ÍNDICE DAS CAIXAS

- Caixa 2.1 Cantores que partem vidros?
- Caixa 2.2 Instrumentos de cordas simpáticas
- Caixa 3.1 Modelação física e qualidade de um instrumento
- Caixa 3.2 Um pianista a tocar violino
- Caixa 4.1 Sincronização de grandes massas orquestrais e corais
- Caixa 4.2 Batimentos e afinação de instrumentos
- Caixa 5.1 Partitura musical: uma representação tempo/frequência
- Caixa 6.1 Instrumentos transpositores
- Caixa 6.2 A Orquestra Filarmónica de Viena
- Caixa 6.3 É o músico que “faz” o instrumento?
- Caixa 7.1 Aperfeiçoar um Stradivarius?
- Caixa 7.2 Sons anómalos graves
- Caixa 7.3 Afinação dos cordofones friccionados
- Caixa 8.1 Guitarra com unhas ou sem unhas?
- Caixa 9.1 O *toucher* do pianista
- Caixa 9.2 Pianos verticais ou de cauda?
- Caixa 10.1 “É possível ouvir a forma de um tambor?”
- Caixa 11.1 Do “departamento da cozinha” aos grupos de percussão
- Caixa 11.2 Percussão: um músico, n instrumentos
- Caixa 12.1 Mudar a cabeça
- Caixa 13.1 A curta duração de uma palheta
- Caixa 14.1 Desenhar bocais
- Caixa 14.2 A mão dentro da trompa
- Caixa 15.1 Os órgãos *Angster*
- Caixa 16.1 Como preservar a voz
- Caixa 16.2 Canto difónico
- Caixa 16.3 Tenores e contratenores
- Caixa 17.1 Analógico/digital: a questão da panela de barro
- Caixa 18.1 Autopianos: do rolo perfurado ao MIDI
- Caixa 18.2 O *instrumentarium Baschet*
- Caixa 18.3 O que é um compósito
- Caixa 19.1 O melhor piano do mundo
- Caixa 19.2 *Philharmonic Hall*: um insucesso providencial
- Caixa 19.3 Os arquitectos e a acústica
- Caixa 20.1 A surdez dos músicos
- Caixa 21.1 O metrónomo
- Caixa 22.1 Subjectividade na captação
- Caixa 22.2 Músico e técnico de som: diálogo de surdos?
- Caixa 23.1 Música microtonal
- Caixa 23.2 O lá de Greenwich
- Caixa 24.1 O fascínio da *música antiga*
- Caixa 24.2 Deverá a orquestra afinar pelo oboé?
- Caixa 24.3 Flutuações do diapasão