

# **Acustica**

Fondamenti e applicazioni

*a cura di*  
Renato Spagnolo





www.utetuniversita.it

Proprietà letteraria riservata  
© 2015 De Agostini Scuola SpA – Novara  
1ª edizione: marzo 2015  
*Printed in Italy*

Tutti i diritti riservati. Nessuna parte del materiale protetto da questo copyright potrà essere riprodotta in alcuna forma senza l'autorizzazione scritta dell'Editore.

Fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, comma 4, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni ad uso differente da quello personale potranno avvenire, per un numero di pagine non superiore al 15% del presente volume/fascicolo, solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali, Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano – e-mail: [autorizzazioni@clearedi.org](mailto:autorizzazioni@clearedi.org).

Stampa: Grafiche Battaia – Zibido San Giacomo (MI)

---

|           |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|
| Ristampe: | 0 1  | 2 3  | 4 5  | 6 7  | 8 9  |
| Anno:     | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |

# INDICE

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gli Autori                                                                                | XXI |
| Introduzione                                                                              | XXV |
| <b>Capitolo 1 Una breve introduzione storica</b>                                          |     |
| <i>Adriano Alippi, Renato Spagnolo</i>                                                    |     |
| 1.1 Alle origini . . . . .                                                                | 3   |
| 1.2 I metodi della scienza moderna . . . . .                                              | 5   |
| 1.3 L'acustica e gli scienziati dei secoli XVIII - XIX . . . . .                          | 9   |
| 1.3.1 D'Alembert, Eulero, Lagrange e Chladni: vibrazioni<br>in mezzi elastici . . . . .   | 9   |
| 1.3.2 Helmholtz, Weber, Fechner e la percezione uditiva . . . . .                         | 11  |
| 1.3.3 Daniel Colladon e la misura della velocità del suono<br>nell'acqua . . . . .        | 13  |
| 1.3.4 Un divulgatore dell'Ottocento: John Tyndall . . . . .                               | 13  |
| 1.3.5 Lord Rayleigh: verso l'acustica del Novecento . . . . .                             | 15  |
| 1.4 Gli straordinari progressi del secolo XX . . . . .                                    | 17  |
| 1.4.1 L'apporto dell'elettronica . . . . .                                                | 17  |
| 1.4.2 Linee di sviluppo nei temi del suono udibile . . . . .                              | 17  |
| 1.4.3 L'acustica fisica . . . . .                                                         | 22  |
| Bibliografia . . . . .                                                                    | 27  |
| <b>Capitolo 2 Acustica generale lineare</b>                                               |     |
| <i>Giuliana Benedetto, Roberto M. Gavioso, Alberto Giuliano Albo,<br/>Renato Spagnolo</i> |     |
| 2.1 Onde acustiche in mezzi elastici continui . . . . .                                   | 31  |
| 2.2 Equazione di propagazione delle onde acustiche nei fluidi ideali . . . . .            | 35  |
| 2.2.1 Equazione di Eulero . . . . .                                                       | 36  |
| 2.2.2 Equazione di continuità . . . . .                                                   | 38  |
| 2.2.3 Equilibrio termodinamico: l'equazione di stato . . . . .                            | 39  |
| 2.2.4 Equazione lineare delle onde . . . . .                                              | 40  |
| 2.3 Velocità di propagazione delle onde acustiche . . . . .                               | 42  |
| 2.3.1 Velocità nei gas . . . . .                                                          | 42  |
| 2.3.2 Velocità nei liquidi . . . . .                                                      | 44  |
| 2.3.3 Velocità nei solidi elastici . . . . .                                              | 45  |

|        |                                                                                                       |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4    | Onde piane, sferiche e cilindriche nei fluidi . . . . .                                               | 48  |
| 2.4.1  | Onde piane . . . . .                                                                                  | 48  |
| 2.4.2  | Onde sferiche . . . . .                                                                               | 53  |
| 2.4.3  | Onde cilindriche . . . . .                                                                            | 55  |
| 2.5    | Impedenza acustica caratteristica e impedenza acustica specifica                                      | 56  |
| 2.6    | Grandezze acustiche fondamentali e unità di misura . . . . .                                          | 59  |
| 2.6.1  | Densità di energia acustica . . . . .                                                                 | 59  |
| 2.6.2  | Intensità acustica . . . . .                                                                          | 61  |
| 2.6.3  | Potenza acustica di una sorgente . . . . .                                                            | 62  |
| 2.7    | Riflessione, trasmissione e diffrazione delle onde . . . . .                                          | 63  |
| 2.7.1  | Riflessione, trasmissione e rifrazione . . . . .                                                      | 64  |
| 2.7.2  | Trasmissione attraverso uno strato fluido di dimensioni finite . . . . .                              | 70  |
| 2.7.3  | Diffrazione delle onde . . . . .                                                                      | 72  |
| 2.8    | Sovrapposizione degli effetti: battimenti, onde stazionarie . .                                       | 75  |
| 2.8.1  | Il fenomeno dei battimenti . . . . .                                                                  | 76  |
| 2.8.2  | Onde stazionarie . . . . .                                                                            | 78  |
| 2.9    | Effetti dissipativi: assorbimento del suono nei fluidi . . . . .                                      | 80  |
| 2.9.1  | Dissipazione per effetti viscosi e per effetti termici . . . . .                                      | 83  |
| 2.9.2  | Processi di rilassamento termico . . . . .                                                            | 84  |
| 2.9.3  | Rilassamento traslazionale . . . . .                                                                  | 90  |
| 2.9.4  | Assorbimento e dispersione in miscele . . . . .                                                       | 92  |
| 2.10   | Onde elastiche nei solidi . . . . .                                                                   | 93  |
| 2.10.1 | Il tensore di deformazione . . . . .                                                                  | 94  |
| 2.10.2 | Il tensore degli sforzi . . . . .                                                                     | 95  |
| 2.10.3 | Legge di Hooke generalizzata e il potenziale elastico                                                 | 96  |
| 2.10.4 | Parametri elastici di solidi isotropi e omogenei: modulo di Young e coefficiente di Poisson . . . . . | 98  |
| 2.10.5 | Onde elastiche in mezzi solidi isotropi di estensione infinita . . . . .                              | 100 |
| 2.10.6 | Onde di superficie . . . . .                                                                          | 102 |
| 2.10.7 | Superfici di separazione e conversione dei modi . . . . .                                             | 103 |
| 2.11   | Grandezze in scala logaritmica, decibel e livelli sonori . . . . .                                    | 103 |
| 2.12   | Sorgenti acustiche . . . . .                                                                          | 110 |
| 2.12.1 | Sorgenti monopolo e dipolo . . . . .                                                                  | 110 |
| 2.12.2 | Sorgenti lineari . . . . .                                                                            | 114 |
| 2.12.3 | Il pistone piano circolare . . . . .                                                                  | 115 |
| 2.12.4 | Fattore di direttività e indice di direttività . . . . .                                              | 116 |
| 2.12.5 | Indice di direttività e livelli di pressione e di potenza sonora . . . . .                            | 117 |
| 2.13   | L'effetto Doppler . . . . .                                                                           | 120 |
| 2.14   | Composizione in frequenza . . . . .                                                                   | 123 |
| 2.14.1 | Scomposizione di suoni periodici in serie di Fourier . . . . .                                        | 123 |
| 2.14.2 | La trasformata di Fourier . . . . .                                                                   | 126 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Bibliografia . . . . .                                                              | 129 |
| <b>Capitolo 3 Acustica non lineare</b>                                              |     |
| <i>Adriano Alippi, Lucilla Di Marcoberardino</i>                                    |     |
| 3.1 Introduzione . . . . .                                                          | 133 |
| 3.2 L'oscillatore armonico . . . . .                                                | 135 |
| 3.3 L'oscillatore non lineare . . . . .                                             | 137 |
| 3.3.1 Le frequenze armoniche dell'oscillatore non lineare . . . . .                 | 139 |
| 3.3.2 Generazione di frequenze armoniche: il metodo del bilancio armonico . . . . . | 143 |
| 3.3.3 Generazione di frequenze subarmoniche . . . . .                               | 144 |
| 3.3.4 Comportamento caotico dell'oscillatore . . . . .                              | 147 |
| 3.4 Le non linearità in acustica . . . . .                                          | 153 |
| 3.4.1 Equazioni di stato dei mezzi materiali: aeriformi, liquidi, solidi . . . . .  | 155 |
| 3.4.2 L'equazione non lineare della propagazione . . . . .                          | 157 |
| 3.4.3 Generazione di onde armoniche . . . . .                                       | 157 |
| 3.4.4 Il mescolamento di frequenze . . . . .                                        | 163 |
| 3.5 Onde stazionarie in strutture di dimensioni finite . . . . .                    | 165 |
| 3.5.1 Generazione di armoniche . . . . .                                            | 166 |
| 3.5.2 Generazione di subarmoniche e comportamento caotico . . . . .                 | 167 |
| 3.6 Effetti di non linearità: pressione di radiazione e streaming . . . . .         | 170 |
| 3.6.1 Pressione di radiazione . . . . .                                             | 170 |
| 3.6.2 Lo streaming acustico . . . . .                                               | 171 |
| 3.7 Due esempi applicativi: array parametrici e SONAR multi-frequenza . . . . .     | 172 |
| 3.7.1 Array parametrici . . . . .                                                   | 173 |
| 3.7.2 SONAR multi-frequenza . . . . .                                               | 176 |
| Bibliografia . . . . .                                                              | 177 |
| <b>Capitolo 4 Propagazione del suono in atmosfera e infrasuoni</b>                  |     |
| <i>Giuliana Benedetto, Renato Spagnolo</i>                                          |     |
| 4.1 Propagazione del suono all'esterno su grandi distanze . . . . .                 | 179 |
| 4.2 Assorbimento in atmosfera . . . . .                                             | 180 |
| 4.3 Effetto del suolo . . . . .                                                     | 182 |
| 4.4 Gradienti di temperatura e di velocità del vento . . . . .                      | 185 |
| 4.5 Presenza di barriere . . . . .                                                  | 188 |
| 4.6 Attenuazione attraverso la vegetazione . . . . .                                | 189 |
| 4.7 Calcolo dell'attenuazione secondo la norma UNI ISO 9613 . . . . .               | 189 |
| 4.8 Gli infrasuoni e le loro proprietà specifiche . . . . .                         | 192 |
| 4.9 Sorgenti naturali e artificiali di infrasuoni . . . . .                         | 194 |
| 4.10 Canali di propagazione . . . . .                                               | 199 |
| 4.11 Trasduttori per infrasuoni . . . . .                                           | 201 |
| 4.12 Effetti degli infrasuoni sull'uomo . . . . .                                   | 203 |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Bibliografia . . . . .                                                    | 205 |
| <b>Capitolo 5 Acustica subacquea</b>                                      |     |
| <i>Silvano Buogo, Lucilla Di Marcoberardino</i>                           |     |
| 5.1 Campi applicativi dell'acustica subacquea . . . . .                   | 207 |
| 5.2 Velocità del suono nel mare . . . . .                                 | 210 |
| 5.3 Propagazione del suono nel mare . . . . .                             | 214 |
| 5.3.1 Riflessione dalla superficie libera . . . . .                       | 218 |
| 5.3.2 Riflessione dal fondale . . . . .                                   | 219 |
| 5.3.3 Diffusione (scattering) . . . . .                                   | 220 |
| 5.4 Modelli di propagazione . . . . .                                     | 221 |
| 5.5 Assorbimento e attenuazione . . . . .                                 | 224 |
| 5.6 Rumore nell'ambiente marino . . . . .                                 | 228 |
| 5.7 Equazioni SONAR . . . . .                                             | 230 |
| 5.8 Trasduttori per l'acustica subacquea . . . . .                        | 233 |
| 5.8.1 Schiere di trasduttori (Array) . . . . .                            | 237 |
| 5.8.2 Taratura di idrofoni . . . . .                                      | 238 |
| 5.8.3 Riepilogo delle caratteristiche dei trasduttori . . . . .           | 239 |
| 5.9 Sistemi SONAR . . . . .                                               | 240 |
| 5.9.1 Sonar monofascio . . . . .                                          | 240 |
| 5.9.2 Sonar a scansione laterale . . . . .                                | 243 |
| 5.9.3 Sonar multifascio . . . . .                                         | 245 |
| 5.10 Sistemi di comunicazione subacquea . . . . .                         | 246 |
| 5.11 Sistemi di monitoraggio e di navigazione . . . . .                   | 247 |
| 5.12 Sistemi acustici per la sismica offshore . . . . .                   | 249 |
| 5.13 Effetti del rumore subacqueo sulle specie marine . . . . .           | 251 |
| Bibliografia . . . . .                                                    | 253 |
| <b>Capitolo 6 Ultrasuoni: principi e applicazioni</b>                     |     |
| <i>Rugiada Cuccaro, Caterina Guiot, Renato Spagnolo</i>                   |     |
| 6.1 Introduzione agli ultrasuoni . . . . .                                | 255 |
| 6.2 Interazione degli ultrasuoni con i mezzi materiali . . . . .          | 257 |
| 6.2.1 Assorbimento per effetti dissipativi . . . . .                      | 259 |
| 6.2.2 Scattering . . . . .                                                | 260 |
| 6.2.3 Attenuazione . . . . .                                              | 266 |
| 6.2.4 Generazione di calore per assorbimento . . . . .                    | 270 |
| 6.3 Struttura del campo acustico a ultrasuoni . . . . .                   | 272 |
| 6.3.1 Sorgenti piane circolari . . . . .                                  | 273 |
| 6.3.2 Campi focalizzati . . . . .                                         | 281 |
| 6.4 Meccanismi di trasduzione e trasduttori . . . . .                     | 285 |
| 6.4.1 I principali meccanismi di trasduzione . . . . .                    | 287 |
| 6.4.2 Effetto piezoelettrico e materiali piezoelettrici . . . . .         | 289 |
| 6.4.3 Realizzazione di un trasduttore piezoelettrico elementare . . . . . | 292 |
| 6.4.4 Trasduttori a schiera . . . . .                                     | 297 |

|       |                                                   |     |
|-------|---------------------------------------------------|-----|
| 6.5   | Effetti di propagazione non lineare . . . . .     | 300 |
| 6.5.1 | Fenomeno della saturazione acustica . . . . .     | 301 |
| 6.5.2 | Altri effetti di non linearità . . . . .          | 303 |
| 6.6   | Effetti biologici degli ultrasuoni . . . . .      | 304 |
| 6.7   | Principali applicazioni in campo medico . . . . . | 307 |
| 6.7.1 | Applicazioni diagnostiche . . . . .               | 308 |
| 6.7.2 | Applicazioni terapeutiche . . . . .               | 310 |
| 6.8   | Applicazioni in campo industriale . . . . .       | 314 |
| 6.8.1 | Applicazioni macrosoniche . . . . .               | 314 |
| 6.8.2 | Applicazioni a bassa intensità . . . . .          | 320 |
|       | Bibliografia . . . . .                            | 324 |

## Capitolo 7 Onde superficiali nei solidi e dispositivi micro-acustici

*Enrico Verona*

|       |                                                                   |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1   | Mezzi anisotropi, mezzi piezoelettrici . . . . .                  | 331 |
| 7.1.1 | Relazioni costitutive dei mezzi piezoelettrici . . . . .          | 331 |
| 7.1.2 | Onde elastiche in mezzi anisotropi e piezoelettrici . . . . .     | 333 |
| 7.2   | Onde superficiali . . . . .                                       | 335 |
| 7.2.1 | Mezzi semi-infiniti . . . . .                                     | 335 |
| 7.2.2 | Piastre, modi di Lamb e modi di Love . . . . .                    | 339 |
| 7.2.3 | Mezzi stratificati . . . . .                                      | 341 |
| 7.3   | Trasduttori di onde superficiali . . . . .                        | 344 |
| 7.3.1 | Il trasduttore interdigitale . . . . .                            | 347 |
| 7.4   | Dispositivi elettroacustici a onde superficiali . . . . .         | 353 |
| 7.4.1 | Linee di ritardo . . . . .                                        | 354 |
| 7.4.2 | Risonatori . . . . .                                              | 355 |
| 7.4.3 | Filtri passa-banda . . . . .                                      | 357 |
| 7.4.4 | Filtri a codice di fase . . . . .                                 | 359 |
| 7.4.5 | Sorgenti stabili di frequenza . . . . .                           | 361 |
| 7.4.6 | Dispositivi non lineari: convolutori . . . . .                    | 362 |
| 7.5   | Sensori a onde acustiche superficiali . . . . .                   | 363 |
| 7.5.1 | Sensori di grandezze chimiche, biochimiche e biologiche . . . . . | 364 |
| 7.5.2 | Sensori di grandezze fisiche . . . . .                            | 366 |
| 7.5.3 | «Smart tags» e sensori «wireless» . . . . .                       | 369 |
|       | Bibliografia . . . . .                                            | 370 |

## Capitolo 8 Cavitazione acustica e sonochimica

*Daniele Madonna Ripa, Adriano Troia*

|       |                                                         |     |
|-------|---------------------------------------------------------|-----|
| 8.1   | Pressioni negative e cavitazione . . . . .              | 373 |
| 8.1.1 | Pressioni negative . . . . .                            | 374 |
| 8.1.2 | Cavitazione . . . . .                                   | 378 |
| 8.2   | Cavitazione acustica: interazione suono-bolle . . . . . | 381 |
| 8.3   | Effetti fisici . . . . .                                | 392 |
| 8.3.1 | Emissioni acustiche . . . . .                           | 393 |

|                                                                             |                                                                                                                                    |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.3.2                                                                       | Sonoluminescenza . . . . .                                                                                                         | 396 |
| 8.4                                                                         | Sonochimica . . . . .                                                                                                              | 404 |
| 8.4.1                                                                       | Effetti della cavitazione acustica nelle reazioni chimiche                                                                         | 405 |
| 8.4.2                                                                       | Applicazioni sonochimiche per la sintesi di materiali                                                                              | 412 |
| 8.4.3                                                                       | Applicazioni in campo ambientale: dalla degradazione di inquinanti allo scale-up . . . . .                                         | 415 |
| 8.4.4                                                                       | Applicazioni in chimica organica: il sonochemical switch                                                                           | 416 |
|                                                                             | Bibliografia . . . . .                                                                                                             | 417 |
| <b>Capitolo 9 Termoacustica</b>                                             |                                                                                                                                    |     |
| <i>Adriano Alippi, Chiara Alippi, Annunziata D'Orazio</i>                   |                                                                                                                                    |     |
| 9.1                                                                         | Introduzione . . . . .                                                                                                             | 421 |
| 9.2                                                                         | Le basi storiche dello sviluppo della termoacustica . . . . .                                                                      | 422 |
| 9.3                                                                         | I dispositivi a onde acustiche . . . . .                                                                                           | 425 |
| 9.3.1                                                                       | Il dispositivo a onda stazionaria . . . . .                                                                                        | 426 |
| 9.3.2                                                                       | Il refrigeratore di Stirling . . . . .                                                                                             | 431 |
| 9.3.3                                                                       | Il dispositivo a onda progressiva . . . . .                                                                                        | 433 |
| 9.4                                                                         | Risultati e applicazioni dei refrigeratori termoacustici . . . . .                                                                 | 437 |
|                                                                             | Bibliografia . . . . .                                                                                                             | 439 |
| <b>Capitolo 10 Velocità del suono e proprietà termodinamiche dei fluidi</b> |                                                                                                                                    |     |
| <i>Roberto M. Gavioso, Alberto Giuliano Albo, Simona Lago</i>               |                                                                                                                                    |     |
| 10.1                                                                        | Introduzione . . . . .                                                                                                             | 441 |
| 10.2                                                                        | Relazioni termodinamiche fondamentali . . . . .                                                                                    | 443 |
| 10.3                                                                        | Determinazione acustica di proprietà termodinamiche in fase gassosa . . . . .                                                      | 447 |
| 10.3.1                                                                      | Equazione di stato viriale . . . . .                                                                                               | 447 |
| 10.3.2                                                                      | Determinazione della densità dei gas da misure di velocità del suono utilizzando potenziali intermolecolari semplificati . . . . . | 452 |
| 10.3.3                                                                      | Equazioni di stato empiriche per la fase gassosa . . . . .                                                                         | 457 |
| 10.3.4                                                                      | Metodi di misura della velocità del suono nei gas . . . . .                                                                        | 459 |
| 10.4                                                                        | Determinazione acustica di proprietà termodinamiche in fase liquida . . . . .                                                      | 471 |
| 10.4.1                                                                      | Metodi di integrazione numerica dell'equazione di stato                                                                            | 472 |
| 10.4.2                                                                      | Metodi di misura della velocità del suono nei liquidi                                                                              | 476 |
| 10.4.3                                                                      | Applicazioni . . . . .                                                                                                             | 485 |
|                                                                             | Bibliografia . . . . .                                                                                                             | 486 |
| <b>Capitolo 11 Termometria acustica</b>                                     |                                                                                                                                    |     |
| <i>Roberto M. Gavioso</i>                                                   |                                                                                                                                    |     |
| 11.1                                                                        | Introduzione . . . . .                                                                                                             | 491 |
| 11.2                                                                        | Termometria acustica primaria . . . . .                                                                                            | 493 |
| 11.3                                                                        | Applicazioni della termometria acustica . . . . .                                                                                  | 500 |



|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Bibliografia . . . . .                                                                             | 511 |
| <b>Capitolo 12 Fotoacustica</b>                                                                    |     |
| <i>Andrea Bettucci</i>                                                                             |     |
| 12.1 Introduzione . . . . .                                                                        | 513 |
| 12.2 Fotoacustica: una storia recente . . . . .                                                    | 514 |
| 12.2.1 Primi studi sperimentali e teorici sull'effetto fotoacustico                                | 515 |
| 12.2.2 1938: la rinascita della fotoacustica . . . . .                                             | 515 |
| 12.2.3 La moderna fotoacustica e le sue principali applicazioni                                    | 516 |
| 12.3 Principi generali della fotoacustica . . . . .                                                | 517 |
| 12.3.1 Effetti fototermici . . . . .                                                               | 521 |
| 12.4 Generazione di onde elastiche per effetto fototermico . . . . .                               | 522 |
| 12.4.1 Generazione fotoacustica diretta prodotta da un fascio<br>laser di piccolo raggio . . . . . | 524 |
| 12.4.2 Generazione fotoacustica diretta prodotta da un fascio<br>laser di grande raggio . . . . .  | 525 |
| 12.4.3 Generazione fotoacustica indiretta . . . . .                                                | 527 |
| 12.5 Impiego della fotoacustica per la realizzazione di immagini in<br>campo biomedico . . . . .   | 529 |
| Bibliografia . . . . .                                                                             | 533 |
| <b>Capitolo 13 Trasduttori, strumenti, tecniche di misurazione</b>                                 |     |
| <i>Alberto Armani, Massimo Garai</i>                                                               |     |
| 13.1 Trasduttori di segnali acustici: microfoni . . . . .                                          | 535 |
| 13.1.1 Il microfono a condensatore . . . . .                                                       | 536 |
| 13.1.2 Risposta in frequenza e range dinamico . . . . .                                            | 538 |
| 13.1.3 Microfoni a pressione . . . . .                                                             | 541 |
| 13.1.4 Microfoni per campo libero . . . . .                                                        | 542 |
| 13.1.5 Microfoni per campo diffuso . . . . .                                                       | 542 |
| 13.1.6 Microfoni prepolarizzati . . . . .                                                          | 543 |
| 13.1.7 Preamplificatori microfonici . . . . .                                                      | 543 |
| 13.1.8 Rumore di microfono e preamplificatore . . . . .                                            | 545 |
| 13.2 Calibratori acustici . . . . .                                                                | 546 |
| 13.2.1 Il pistonofono . . . . .                                                                    | 546 |
| 13.3 Taratura dei microfoni campione . . . . .                                                     | 548 |
| 13.3.1 Il metodo primario della reciprocità . . . . .                                              | 548 |
| 13.3.2 Accoppiamento in pressione . . . . .                                                        | 549 |
| 13.4 Trasduttori per vibrazioni . . . . .                                                          | 550 |
| 13.4.1 Accelerometro piezoelettrico . . . . .                                                      | 550 |
| 13.4.2 Accelerometro con elettronica integrata . . . . .                                           | 552 |
| 13.4.3 Sensibilità e linearità della risposta in frequenza . . . . .                               | 553 |
| 13.4.4 Accelerometri MEMS . . . . .                                                                | 555 |
| 13.5 Calibratori per trasduttori di vibrazioni e verifiche periodiche<br>degli strumenti . . . . . | 556 |

|          |                                                                             |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.6     | Misuratori di livello sonoro: Fonometri . . . . .                           | 557 |
| 13.6.1   | Le norme di riferimento . . . . .                                           | 557 |
| 13.6.2   | Dal fonometro analogico a quello digitale . . . . .                         | 558 |
| 13.6.3   | Conversione A/D . . . . .                                                   | 560 |
| 13.6.4   | I processi di analisi . . . . .                                             | 560 |
| 13.6.5   | Time history: profilo storico dei livelli sonori . . . . .                  | 561 |
| 13.6.6   | Identificazione degli eventi sonori . . . . .                               | 562 |
| 13.6.7   | Analisi in frequenza per bande di ottava e di 1/3 di<br>ottava . . . . .    | 563 |
| 13.6.8   | La misura del tempo di riverberazione . . . . .                             | 564 |
| 13.6.9   | Analisi statistica dei livelli sonori . . . . .                             | 565 |
| 13.6.10  | Registrazione audio . . . . .                                               | 567 |
| 13.6.11  | La memoria dati . . . . .                                                   | 568 |
| 13.6.12  | Interfaccia con PC . . . . .                                                | 569 |
| 13.7     | Misuratori di esposizione alle vibrazioni . . . . .                         | 570 |
| 13.7.1   | Strumenti di misura a tre canali . . . . .                                  | 570 |
| 13.8     | Sistemi di monitoraggio del rumore . . . . .                                | 571 |
| 13.8.1   | Le funzioni dei sistemi di monitoraggio . . . . .                           | 573 |
| 13.9     | Analizzatori multicanale . . . . .                                          | 575 |
| 13.9.1   | Cenni storici . . . . .                                                     | 575 |
| 13.9.2   | Gli attuali sistemi di misura multicanale . . . . .                         | 576 |
| 13.9.3   | L'analisi FFT . . . . .                                                     | 577 |
| 13.9.4   | Finestre temporali e overlap . . . . .                                      | 579 |
| 13.9.5   | Media lineare e media esponenziale . . . . .                                | 580 |
| 13.9.6   | Analisi per bande di ottava e di frazioni di ottava . . . . .               | 582 |
| 13.9.7   | Cross-spettro, funzione di trasferimento, funzione di<br>coerenza . . . . . | 583 |
| 13.9.8   | Multi-analisi . . . . .                                                     | 584 |
| 13.9.9   | Analisi tempo-frequenza . . . . .                                           | 586 |
| 13.9.10  | Analisi degli ordini armonici . . . . .                                     | 587 |
| 13.10    | Incertezza di misura . . . . .                                              | 589 |
| 13.10.1  | Generalità . . . . .                                                        | 589 |
| 13.10.2  | Metodologia basata sugli errori di misura . . . . .                         | 590 |
| 13.10.3  | Metodologia basata sull'incertezza . . . . .                                | 591 |
| 13.10.4  | Incertezze di categoria A e B . . . . .                                     | 592 |
| 13.10.5  | Approccio analitico. Modello della misurazione . . . . .                    | 593 |
| 13.10.6  | Valutazione dell'incertezza di categoria A . . . . .                        | 593 |
| 13.10.7  | Valutazione dell'incertezza di categoria B . . . . .                        | 594 |
| 13.10.8  | Determinazione dell'incertezza tipo composta . . . . .                      | 594 |
| 13.10.9  | Determinazione dell'incertezza estesa . . . . .                             | 595 |
| 13.10.10 | Incertezza strumentale . . . . .                                            | 597 |
| 13.10.11 | Incertezza delle misurazioni in ambiente esterno . . . . .                  | 598 |
| 13.10.12 | Approccio sperimentale. Prove inter-laboratorio . . . . .                   | 600 |
| 13.10.13 | Incertezza delle misurazioni di acustica edilizia . . . . .                 | 600 |

|                                                                                      |                                                                                           |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.10.14                                                                             | Incertezza delle misurazioni di tempo di riverberazione                                   | 603 |
| 13.10.15                                                                             | Incertezza delle misurazioni di esposizione a rumore                                      | 604 |
|                                                                                      | Bibliografia                                                                              | 606 |
| <b>Capitolo 14 Principi di analisi numerica dei segnali</b>                          |                                                                                           |     |
| <i>Angelo Farina</i>                                                                 |                                                                                           |     |
| 14.1                                                                                 | Dai segnali analogici ai segnali digitali                                                 | 609 |
| 14.2                                                                                 | Tecniche di filtraggio applicate a segnali audio digitali                                 | 613 |
| 14.3                                                                                 | Dai segnali campionati ai livelli sonori in decibel                                       | 616 |
| 14.4                                                                                 | La trasformata veloce di Fourier (FFT)                                                    | 623 |
| 14.5                                                                                 | Tecniche di analisi spettrale mediante filtri digitali IIR                                | 632 |
| 14.6                                                                                 | Misura della risposta all'impulso di un sistema elettroacustico.<br>Le tecniche MLS e ESS | 638 |
| 14.6.1                                                                               | I segnali MLS                                                                             | 639 |
| 14.6.2                                                                               | Segnali sine sweep                                                                        | 641 |
| 14.7                                                                                 | Calcolo numerico di alcuni parametri acustici                                             | 645 |
| 14.7.1                                                                               | Ricostruzione del decadimento sonoro a partire dalla<br>risposta all'impulso              | 646 |
| 14.7.2                                                                               | Calcolo dei parametri descrittivi della qualità acustica<br>di ambienti                   | 650 |
| 14.8                                                                                 | Esempio di misurazione: lo Speech Transmission Index (STI)                                | 652 |
|                                                                                      | Bibliografia                                                                              | 660 |
| <b>Capitolo 15 L'intensità acustica e la sua misura</b>                              |                                                                                           |     |
| <i>Eleonora Carletti</i>                                                             |                                                                                           |     |
| 15.1                                                                                 | Energia acustica e intensità                                                              | 663 |
| 15.2                                                                                 | Misura dell'intensità acustica                                                            | 669 |
| 15.2.1                                                                               | Il metodo di misura $p-p$                                                                 | 669 |
| 15.2.2                                                                               | Il metodo di misura $p-u$                                                                 | 671 |
| 15.3                                                                                 | Errori nella misura di intensità                                                          | 673 |
| 15.3.1                                                                               | Errori associati al metodo di misura $p-p$                                                | 673 |
| 15.3.2                                                                               | Errori associati al metodo di misura $p-u$                                                | 676 |
| 15.4                                                                                 | Determinazione della potenza sonora                                                       | 679 |
| 15.4.1                                                                               | La norma di riferimento                                                                   | 680 |
| 15.5                                                                                 | Altri campi applicativi                                                                   | 682 |
|                                                                                      | Bibliografia                                                                              | 689 |
| <b>Capitolo 16 Funzione uditiva, psicoacustica, effetti del rumore<br/>sull'uomo</b> |                                                                                           |     |
| <i>Giuliana Benedetto, Arturo Moletti, Renata Sisto</i>                              |                                                                                           |     |
| 16.1                                                                                 | Alcune considerazioni preliminari                                                         | 693 |
| 16.2                                                                                 | Anatomia e fisiologia dell'apparato uditivo                                               | 694 |
| 16.2.1                                                                               | Sensibilità, dinamica e risoluzione in frequenza                                          | 694 |
| 16.2.2                                                                               | Orecchio esterno                                                                          | 695 |
| 16.2.3                                                                               | Orecchio medio                                                                            | 695 |

|      |         |                                                                                   |     |
|------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
|      | 16.2.4  | Orecchio interno - Coclea . . . . .                                               | 697 |
|      | 16.2.5  | Dalla vibrazione della membrana basilare alla percezione uditiva . . . . .        | 704 |
| 16.3 |         | La risposta soggettiva . . . . .                                                  | 705 |
|      | 16.3.1  | Caratteristiche generali della percezione uditiva . . .                           | 705 |
|      | 16.3.2  | Soglia uditiva . . . . .                                                          | 707 |
|      | 16.3.3  | La sensazione sonora . . . . .                                                    | 708 |
|      | 16.3.4  | Curve di ponderazione in frequenza per la misura della pressione sonora . . . . . | 714 |
|      | 16.3.5  | Elaborazione soggettiva delle caratteristiche temporali del suono . . . . .       | 714 |
|      | 16.3.6  | Riflesso aurale . . . . .                                                         | 718 |
|      | 16.3.7  | Analisi in frequenza e mascheramento . . . . .                                    | 719 |
|      | 16.3.8  | Percezione del tono . . . . .                                                     | 723 |
|      | 16.3.9  | Percezione del timbro . . . . .                                                   | 725 |
|      | 16.3.10 | La localizzazione dei suoni . . . . .                                             | 725 |
| 16.4 |         | Tecniche diagnostiche della funzione uditiva . . . . .                            | 727 |
|      | 16.4.1  | Cenni alle principali patologie della funzione uditiva                            | 728 |
|      | 16.4.2  | Tecniche diagnostiche soggettive . . . . .                                        | 729 |
|      | 16.4.3  | Audiometria . . . . .                                                             | 730 |
|      | 16.4.4  | Tecniche diagnostiche obiettive . . . . .                                         | 734 |
|      | 16.4.5  | Impedenziometria, timpanometria, misura del riflesso stapediale . . . . .         | 734 |
|      | 16.4.6  | Tecniche elettrofisiologiche . . . . .                                            | 735 |
|      | 16.4.7  | Emissioni otoacustiche . . . . .                                                  | 737 |
|      | 16.4.8  | Uso di stimoli complessi. Stimolazione controlaterale                             | 740 |
| 16.5 |         | Alterazioni della funzione uditiva, agenti ototossici . . . . .                   | 741 |
|      | 16.5.1  | Presbiacusia e Socioacusia . . . . .                                              | 741 |
|      | 16.5.2  | Effetti dell'esposizione a rumore . . . . .                                       | 741 |
|      | 16.5.3  | Effetti dell'esposizione ad altri agenti ototossici . . .                         | 749 |
|      | 16.5.4  | Principali riferimenti normativi . . . . .                                        | 750 |
|      |         | Bibliografia . . . . .                                                            | 750 |

## Capitolo 17 La voce

*Andrea Paoloni*

|      |        |                                                                 |     |
|------|--------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 17.1 |        | Premessa: Cos'è la voce? Cos'è la qualità della voce? . . . . . | 755 |
|      | 17.1.1 | Qualità della voce . . . . .                                    | 757 |
|      | 17.1.2 | Origine delle variazioni della voce . . . . .                   | 760 |
| 17.2 |        | La fonetica . . . . .                                           | 761 |
|      | 17.2.1 | Il segnale vocale . . . . .                                     | 762 |
|      | 17.2.2 | Generazione del linguaggio articolato . . . . .                 | 763 |
|      | 17.2.3 | Luogo e modo di articolazione . . . . .                         | 766 |
|      | 17.2.4 | Le vocali . . . . .                                             | 768 |
|      | 17.2.5 | Le consonanti . . . . .                                         | 772 |

|                                                    |                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 17.2.6                                             | La coarticolazione . . . . .                                                           | 777 |
| 17.3                                               | La voce cantata . . . . .                                                              | 778 |
| 17.3.1                                             | L'organizzazione ritmica . . . . .                                                     | 782 |
| 17.3.2                                             | I registri vocali . . . . .                                                            | 783 |
| 17.3.3                                             | Intensità . . . . .                                                                    | 784 |
| 17.3.4                                             | Il vibrato . . . . .                                                                   | 784 |
| 17.3.5                                             | Differenza tra parlato e canto . . . . .                                               | 786 |
| 17.4                                               | Voce: fondamenti neurolinguistici . . . . .                                            | 786 |
| 17.4.1                                             | Elettroencefalografia negli studi di neurolinguistica . . . . .                        | 790 |
| 17.4.2                                             | Potenziali evento-correlati (ERP) nello studio della lingua . . . . .                  | 791 |
| 17.4.3                                             | I risultati più recenti . . . . .                                                      | 792 |
| 17.5                                               | Caratterizzazione del parlante (voice profiling) . . . . .                             | 793 |
| 17.5.1                                             | Identificazione di genere . . . . .                                                    | 794 |
| 17.5.2                                             | Stima delle caratteristiche fisiche (altezza, peso) . . . . .                          | 795 |
| 17.5.3                                             | Identificazione dell'età . . . . .                                                     | 795 |
| 17.5.4                                             | Variabili diastratiche e diatopiche: lo status sociolinguistico del parlante . . . . . | 798 |
| 17.5.5                                             | Fattori extralinguistici alteranti la voce . . . . .                                   | 799 |
| 17.5.6                                             | In conclusione . . . . .                                                               | 799 |
|                                                    | Bibliografia . . . . .                                                                 | 800 |
| <b>Capitolo 18 Bioacustica e ecologia acustica</b> |                                                                                        |     |
| <i>Gianni Pavan</i>                                |                                                                                        |     |
| 18.1                                               | Premessa . . . . .                                                                     | 803 |
| 18.2                                               | Cenni storici . . . . .                                                                | 804 |
| 18.3                                               | La bioacustica . . . . .                                                               | 805 |
| 18.4                                               | Il paesaggio sonoro . . . . .                                                          | 808 |
| 18.5                                               | Ecologia acustica . . . . .                                                            | 810 |
| 18.6                                               | Ecolocalizzazione . . . . .                                                            | 811 |
| 18.7                                               | Bioacustica subacquea . . . . .                                                        | 812 |
| 18.8                                               | Metodi e strumenti per la registrazione e l'analisi dei suoni . . . . .                | 815 |
| 18.9                                               | Impatto del rumore sull'ambiente terrestre . . . . .                                   | 819 |
| 18.10                                              | Impatto del rumore sull'ambiente marino . . . . .                                      | 820 |
|                                                    | Bibliografia . . . . .                                                                 | 824 |
| <b>Capitolo 19 Acustica musicale</b>               |                                                                                        |     |
| <i>Sergio Cingolani, Silvia Lanzalone</i>          |                                                                                        |     |
| 19.1                                               | Alcune considerazioni preliminari . . . . .                                            | 829 |
| 19.2                                               | Gli strumenti a corda sfregata . . . . .                                               | 831 |
| 19.2.1                                             | Le oscillazioni con smorzamento . . . . .                                              | 831 |
| 19.2.2                                             | Come vibra la corda di un violino . . . . .                                            | 832 |
| 19.2.3                                             | Il ponticello . . . . .                                                                | 837 |
| 19.2.4                                             | Il corpo dello strumento . . . . .                                                     | 838 |

|       |         |                                                                       |     |
|-------|---------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
|       | 19.2.5  | Emissione sonora . . . . .                                            | 842 |
| 19.3  |         | Il pianoforte . . . . .                                               | 843 |
|       | 19.3.1  | Principi di funzionamento . . . . .                                   | 843 |
|       | 19.3.2  | Dinamica della corda percossa . . . . .                               | 846 |
|       | 19.3.3  | La tavola armonica . . . . .                                          | 850 |
| 19.4  |         | Aerofoni: generalità . . . . .                                        | 851 |
|       | 19.4.1  | Camerature nei legni e negli ottoni . . . . .                         | 851 |
|       | 19.4.2  | Fori tonali e di registro . . . . .                                   | 853 |
|       | 19.4.3  | L'imboccatura . . . . .                                               | 856 |
|       | 19.4.4  | Diagrammi di impedenza del caneggio . . . . .                         | 857 |
|       | 19.4.5  | Suono degli aerofoni e temperatura . . . . .                          | 859 |
| 19.5  |         | Il clarinetto . . . . .                                               | 860 |
|       | 19.5.1  | Risonanze del caneggio di un clarinetto . . . . .                     | 862 |
|       | 19.5.2  | Emissione di un clarinetto . . . . .                                  | 862 |
| 19.6  |         | Ottoni . . . . .                                                      | 863 |
|       | 19.6.1  | Caneggio e risonanze . . . . .                                        | 863 |
|       | 19.6.2  | Campana e irradiazione sonora . . . . .                               | 864 |
|       | 19.6.3  | Influenza del bocchino . . . . .                                      | 866 |
|       | 19.6.4  | La tromba moderna con valvole . . . . .                               | 868 |
| 19.7  |         | Il flauto traverso . . . . .                                          | 869 |
| 19.8  |         | Il ruolo dei materiali ai fini dell'emissione acustica degli aerofoni | 870 |
| 19.9  |         | Percussioni, membrane e risuonatori . . . . .                         | 871 |
| 19.10 |         | Il timpano . . . . .                                                  | 872 |
|       | 19.10.1 | Effetti dell'aria nel timpano . . . . .                               | 873 |
| 19.11 |         | Gli idiofoni . . . . .                                                | 875 |
| 19.12 |         | Strumenti aumentati . . . . .                                         | 877 |
|       | 19.12.1 | Il gesto «esteso» . . . . .                                           | 878 |
|       | 19.12.2 | Il suono «incarnato» . . . . .                                        | 882 |
|       |         | Bibliografia . . . . .                                                | 888 |

## Capitolo 20 Acustica architettonica: spazi per la musica

*Sergio Cingolani, Carmine Ianniello, Renato Spagnolo*

|      |        |                                                                                |     |
|------|--------|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 20.1 |        | Acustica degli spazi chiusi . . . . .                                          | 895 |
|      | 20.1.1 | Modi propri di uno spazio parallelepipedo . . . . .                            | 896 |
|      | 20.1.2 | Campo acustico in condizioni stazionarie e in condizioni transitorie . . . . . | 903 |
|      | 20.1.3 | Principi dell'acustica geometrica . . . . .                                    | 907 |
|      | 20.1.4 | Teoria statistica e ipotesi del campo perfettamente diffuso . . . . .          | 912 |
|      | 20.1.5 | Decadimento del suono e tempo di riverberazione . . . . .                      | 915 |
|      | 20.1.6 | Densità di energia sonora in condizioni stazionarie . . . . .                  | 918 |
|      | 20.1.7 | Diffusione del suono e diffusori . . . . .                                     | 921 |
| 20.2 |        | Attributi percettivi e parametri oggettivi in sale per la musica               | 926 |
|      | 20.2.1 | Considerazioni preliminari . . . . .                                           | 926 |

|        |                                                                              |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 20.2.2 | L'importanza della risposta all'impulso . . . . .                            | 929 |
| 20.2.3 | Tempi di riverberazione e attributi collegati . . . . .                      | 931 |
| 20.2.4 | Rapporti tra energie e chiarezza . . . . .                                   | 935 |
| 20.2.5 | Indice della robustezza del suono e intensità percepita . . . . .            | 937 |
| 20.2.6 | Intervallo di ritardo iniziale, presenza (intimità) e<br>tessitura . . . . . | 939 |
| 20.2.7 | Parametri collegati alla Spazialità . . . . .                                | 941 |
| 20.2.8 | Una sintesi dei parametri utilizzati . . . . .                               | 950 |
| 20.3   | Sale da concerto e teatri d'opera . . . . .                                  | 951 |
| 20.3.1 | Sale da concerto . . . . .                                                   | 952 |
| 20.3.2 | Specificità dell'opera e dei teatri d'opera . . . . .                        | 958 |
| 20.4   | Gli strumenti musicali e lo spazio architettonico . . . . .                  | 972 |
|        | Bibliografia . . . . .                                                       | 977 |

**Capitolo 21 Acustica architettonica: ambienti per la parola, studi di registrazione, modelli di simulazione, riproduzione di campi acustici**

*Arianna Astolfi, Filippo M. Fazi, Marco Fringuellino, Massimo Garai*

|        |                                                                                |      |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| 21.1   | Qualità degli ambienti dedicati all'ascolto della parola . . . . .             | 983  |
| 21.1.1 | La buona ricezione . . . . .                                                   | 985  |
| 21.1.2 | L'intelligibilità del parlato . . . . .                                        | 986  |
| 21.1.3 | L'assenza di disturbo . . . . .                                                | 998  |
| 21.2   | Ambienti scolastici . . . . .                                                  | 1005 |
| 21.2.1 | Il rumore e la riverberazione . . . . .                                        | 1006 |
| 21.2.2 | I requisiti acustici per gli ambienti scolastici . . . . .                     | 1008 |
| 21.2.3 | Documenti normativi sull'acustica degli ambienti sco-<br>lastici . . . . .     | 1010 |
| 21.2.4 | Linee guida per la progettazione acustica di ambienti<br>scolastici . . . . .  | 1013 |
| 21.3   | Open-space . . . . .                                                           | 1017 |
| 21.3.1 | I requisiti acustici per elevate prestazioni in uffici<br>open-space . . . . . | 1018 |
| 21.3.2 | I requisiti per la privacy . . . . .                                           | 1019 |
| 21.3.3 | Linee guida per la progettazione acustica . . . . .                            | 1024 |
| 21.4   | Studi di registrazione . . . . .                                               | 1029 |
| 21.4.1 | Requisiti fondamentali di uno studio di registrazione . . . . .                | 1030 |
| 21.4.2 | Regie: aspetti generali . . . . .                                              | 1032 |
| 21.4.3 | Modelli di regia . . . . .                                                     | 1043 |
| 21.4.4 | Le sale di presa . . . . .                                                     | 1045 |
| 21.5   | Modelli di simulazione e auralizzazione . . . . .                              | 1048 |
| 21.5.1 | Considerazioni generali . . . . .                                              | 1048 |
| 21.5.2 | Metodo delle sorgenti virtuali . . . . .                                       | 1050 |
| 21.5.3 | Metodo del ray tracing . . . . .                                               | 1053 |
| 21.5.4 | Confronto tra sorgenti virtuali e ray tracing . . . . .                        | 1057 |

|        |                                                                 |      |
|--------|-----------------------------------------------------------------|------|
| 21.5.5 | Metodo della radiosità . . . . .                                | 1060 |
| 21.5.6 | Modelli ibridi . . . . .                                        | 1063 |
| 21.5.7 | Linee guida per l'utilizzo . . . . .                            | 1068 |
| 21.5.8 | Auralizzazione e acustica virtuale . . . . .                    | 1073 |
| 21.6   | La riproduzione di campi acustici con array di altoparlanti . . | 1077 |
| 21.6.1 | Considerazioni preliminari . . . . .                            | 1077 |
| 21.6.2 | Wave Field Synthesis . . . . .                                  | 1079 |
| 21.6.3 | Ambisonics . . . . .                                            | 1085 |
|        | Bibliografia . . . . .                                          | 1093 |

## Capitolo 22 Acustica dei materiali e dei sistemi edilizi

*Giuliana Benedetto, Marco Fringuellino, Gino Iannace, Alessandro Schiavi, Renato Spagnolo*

|        |                                                                       |      |
|--------|-----------------------------------------------------------------------|------|
| 22.1   | Potere fonoisolante di divisori semplici, doppi, stratificati . . .   | 1103 |
| 22.1.1 | Principi generali . . . . .                                           | 1103 |
| 22.1.2 | Teoria della trasmissione per il divisorio singolo . . .              | 1106 |
| 22.1.3 | L'effetto coincidenza . . . . .                                       | 1113 |
| 22.1.4 | Teoria della trasmissione per il divisorio doppio . . .               | 1115 |
| 22.1.5 | Divisori multistrato . . . . .                                        | 1118 |
| 22.2   | Modelli matematici per lo studio dell'isolamento acustico . . .       | 1122 |
| 22.2.1 | Analisi classica e metodo delle impedenze progressive                 | 1123 |
| 22.2.2 | Statistical Energy Analysis (SEA) . . . . .                           | 1127 |
| 22.2.3 | Metodo degli elementi finiti (FEM) . . . . .                          | 1129 |
| 22.3   | Assorbimento acustico di materiali e strutture . . . . .              | 1133 |
| 22.3.1 | Proprietà fondamentali . . . . .                                      | 1133 |
| 22.3.2 | Assorbimento per porosità . . . . .                                   | 1136 |
| 22.3.3 | Assorbimento per risonanza di cavità. Pannelli forati                 | 1142 |
| 22.3.4 | Assorbimento per risonanza di membrana . . . . .                      | 1146 |
| 22.3.5 | Elementi e corpi assorbenti . . . . .                                 | 1148 |
| 22.4   | Resistenza e resistività al flusso in materiali porosi e fibrosi .    | 1152 |
| 22.4.1 | Definizioni . . . . .                                                 | 1152 |
| 22.4.2 | Determinazione della resistività al flusso . . . . .                  | 1153 |
| 22.4.3 | Applicazioni . . . . .                                                | 1154 |
| 22.4.4 | Grandezze d'influenza sulla resistività al flusso . . .               | 1156 |
| 22.5   | Proprietà elastiche dei materiali . . . . .                           | 1158 |
| 22.5.1 | Modulo elastico statico e quasi-statico . . . . .                     | 1160 |
| 22.5.2 | Modulo elastico dinamico di un sistema massa-molla<br>reale . . . . . | 1162 |
| 22.5.3 | Il coefficiente di smorzamento . . . . .                              | 1163 |
| 22.5.4 | Applicazioni . . . . .                                                | 1165 |
| 22.5.5 | Cenni sui materiali viscoelastici . . . . .                           | 1172 |
| 22.6   | Trasmissione del suono per via strutturale . . . . .                  | 1173 |
| 22.6.1 | La radiazione sonora generata da strutture in vibrazione              | 1174 |
| 22.6.2 | Trasmissione attraverso le strutture laterali . . . . .               | 1175 |



|         |                                                                                                                |      |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 22.6.3  | Trasmissione di suoni impattivi e isolamento del rumore di calpestio . . . . .                                 | 1178 |
| 22.6.4  | Il rumore degli impianti. La potenza sonora strutturale                                                        | 1181 |
| 22.7    | Proprietà acustiche di materiali di nuova generazione . . . . .                                                | 1185 |
| 22.7.1  | Materiali eco-sostenibili . . . . .                                                                            | 1187 |
| 22.7.2  | Teli acustici perforati . . . . .                                                                              | 1194 |
| 22.7.3  | Pneumatici triturati . . . . .                                                                                 | 1195 |
| 22.7.4  | Le schiume poliuretaniche . . . . .                                                                            | 1197 |
| 22.7.5  | Nanomateriali . . . . .                                                                                        | 1197 |
| 22.8    | Tecniche e procedure normalizzate di misurazione . . . . .                                                     | 1198 |
| 22.8.1  | La normativa ISO EN UNI . . . . .                                                                              | 1198 |
| 22.8.2  | Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea secondo la norma UNI EN ISO 10140-2          | 1201 |
| 22.8.3  | Misurazione in laboratorio dell'isolamento del rumore di calpestio secondo la norma UNI EN ISO 10140-3 .       | 1203 |
| 22.8.4  | Misurazione in opera del potere fonoisolante secondo la norma UNI EN ISO 140-4 . . . . .                       | 1206 |
| 22.8.5  | Misurazione in opera dell'isolamento del rumore di calpestio secondo la norma UNI EN ISO 140-7 . . .           | 1207 |
| 22.8.6  | Il calcolo degli indici di valutazione secondo le norme UNI EN ISO 717-1 e UNI EN ISO 717-2 . . . . .          | 1208 |
| 22.8.7  | Introduzione all'incertezza di misurazione nell'acustica in edilizia secondo la norma UNI EN ISO 12999-1       | 1211 |
| 22.8.8  | Determinazione del coefficiente d'assorbimento acustico per incidenza diffusa a norma UNI EN ISO 354 . . . . . | 1212 |
| 22.8.9  | Il calcolo degli indici di valutazione secondo la norma UNI EN ISO 11654 . . . . .                             | 1214 |
| 22.8.10 | Cenni alle problematiche relative alle misurazioni a bassa frequenza . . . . .                                 | 1215 |
|         | Bibliografia . . . . .                                                                                         | 1216 |

## Capitolo 23 Vibrazioni meccaniche e sistemi vibranti

*Alessandro Fasana, Stefano Marchesiello*

|        |                                                              |      |
|--------|--------------------------------------------------------------|------|
| 23.1   | Introduzione . . . . .                                       | 1225 |
| 23.2   | Risposta libera del sistema a un grado di libertà . . . . .  | 1226 |
| 23.3   | Risposta forzata del sistema a un grado di libertà . . . . . | 1229 |
| 23.3.1 | Risposta al gradino . . . . .                                | 1229 |
| 23.3.2 | Risposta all'armonica . . . . .                              | 1230 |
| 23.3.3 | Smorzamento isteretico . . . . .                             | 1232 |
| 23.4   | Trasmissibilità . . . . .                                    | 1233 |
| 23.5   | Il decremento logaritmico . . . . .                          | 1234 |
| 23.6   | I punti di metà potenza . . . . .                            | 1236 |
| 23.7   | Introduzione all'analisi modale . . . . .                    | 1237 |

|       |                                                                |      |
|-------|----------------------------------------------------------------|------|
| 23.8  | Problema agli autovalori . . . . .                             | 1240 |
| 23.9  | Sistemi con smorzamento viscoso proporzionale: risposta libera | 1241 |
| 23.10 | Risposta alla forzante armonica . . . . .                      | 1242 |
| 23.11 | Vibrazioni di sistemi a parametri distribuiti . . . . .        | 1246 |
|       | Bibliografia . . . . .                                         | 1249 |

## Capitolo 24 Vibrazioni nei luoghi di lavoro

*Alessandro Peretti*

|         |                                                                                   |      |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| 24.1    | Considerazioni preliminari . . . . .                                              | 1251 |
| 24.2    | Sorgenti delle vibrazioni . . . . .                                               | 1252 |
| 24.3    | Superficie di trasmissione delle vibrazioni e postura degli addetti               | 1253 |
| 24.4    | Effetti delle vibrazioni sull'uomo . . . . .                                      | 1254 |
| 24.5    | Norme e disposizioni di legge . . . . .                                           | 1255 |
| 24.6    | Misura delle vibrazioni . . . . .                                                 | 1256 |
| 24.6.1  | Accelerazione, unità di misura, valore quadratico medio                           | 1256 |
| 24.6.2  | Sistemi di coordinate . . . . .                                                   | 1256 |
| 24.6.3  | Intervalli di frequenza, curve di ponderazione, accelerazione ponderata . . . . . | 1257 |
| 24.6.4  | Catena di misura e calibrazione . . . . .                                         | 1258 |
| 24.6.5  | Accelerometri e loro fissaggio . . . . .                                          | 1258 |
| 24.6.6  | Caratteristiche dello strumento di misura . . . . .                               | 1262 |
| 24.7    | Causa delle vibrazioni e caratteristiche . . . . .                                | 1263 |
| 24.7.1  | Mezzi di trasporto e macchine operatrici e agricole . . . . .                     | 1263 |
| 24.7.2  | Macchine fisse e impianti . . . . .                                               | 1265 |
| 24.7.3  | Macchine utensili portatili . . . . .                                             | 1265 |
| 24.8    | Indagini sul campo . . . . .                                                      | 1267 |
| 24.8.1  | Mezzi di trasporto e macchine operatrici e agricole . . . . .                     | 1267 |
| 24.8.2  | Macchine fisse e impianti . . . . .                                               | 1268 |
| 24.8.3  | Macchine utensili portatili . . . . .                                             | 1270 |
| 24.9    | Elaborazioni dei dati acquisiti . . . . .                                         | 1271 |
| 24.9.1  | Esposizione giornaliera . . . . .                                                 | 1271 |
| 24.9.2  | Vibrazioni impulsive e fattore di cresta . . . . .                                | 1273 |
| 24.9.3  | SEAT, curva di trasmissibilità e frequenza di risonanza                           | 1273 |
| 24.9.4  | Vibrazioni associate a singoli interventi e SEL . . . . .                         | 1274 |
| 24.10   | Aspetti particolari . . . . .                                                     | 1276 |
| 24.10.1 | Sospensioni dei sedili di guida . . . . .                                         | 1276 |
| 24.10.2 | Attrezzi manuali impiegati in edilizia . . . . .                                  | 1277 |
| 24.10.3 | Vibrazioni negli edifici . . . . .                                                | 1277 |
| 24.11   | Interventi di riduzione del rischio . . . . .                                     | 1279 |
| 24.11.1 | Produttori . . . . .                                                              | 1279 |
| 24.11.2 | Utenti . . . . .                                                                  | 1281 |
| 24.11.3 | Consulenti . . . . .                                                              | 1283 |
|         | Bibliografia . . . . .                                                            | 1284 |

## Capitolo 25 Rumore nei luoghi di lavoro

*Alessandro Peretti*

|         |                                                                                          |      |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 25.1    | Premessa . . . . .                                                                       | 1287 |
| 25.2    | Norme e disposizioni di legge . . . . .                                                  | 1288 |
| 25.3    | Indagini riguardanti la valutazione del rischio . . . . .                                | 1289 |
| 25.3.1  | Considerazioni preliminari . . . . .                                                     | 1289 |
| 25.3.2  | Acquisizione dei dati informativi . . . . .                                              | 1290 |
| 25.3.3  | Misurazioni . . . . .                                                                    | 1294 |
| 25.3.4  | Elaborazioni e valutazioni . . . . .                                                     | 1299 |
| 25.3.5  | Altre valutazioni . . . . .                                                              | 1303 |
| 25.3.6  | Effetti extrauditivi del rumore in ambiente di lavoro . . . . .                          | 1305 |
| 25.3.7  | Criticità delle norme tecniche . . . . .                                                 | 1307 |
| 25.4    | Riduzione del rumore negli stabilimenti industriali . . . . .                            | 1309 |
| 25.4.1  | Tipologie degli interventi . . . . .                                                     | 1309 |
| 25.4.2  | Tempi di intervento . . . . .                                                            | 1310 |
| 25.4.3  | Struttura dello stabilimento . . . . .                                                   | 1318 |
| 25.4.4  | Rumore emesso dalle sorgenti . . . . .                                                   | 1319 |
| 25.4.5  | Disposizione delle macchine . . . . .                                                    | 1324 |
| 25.4.6  | Cabinatura delle macchine . . . . .                                                      | 1325 |
| 25.4.7  | Cappottatura delle macchine . . . . .                                                    | 1327 |
| 25.4.8  | Schermi acustici . . . . .                                                               | 1329 |
| 25.4.9  | Trattamenti fonoassorbenti . . . . .                                                     | 1330 |
| 25.4.10 | Impianti di riscaldamento, condizionamento e ventilazione . . . . .                      | 1333 |
| 25.4.11 | Silenziatori . . . . .                                                                   | 1335 |
| 25.4.12 | Cabinatura delle postazioni di lavoro . . . . .                                          | 1338 |
| 25.4.13 | Condizioni operative e manutenzione . . . . .                                            | 1339 |
| 25.5    | Dispositivi individuali di protezione uditiva . . . . .                                  | 1340 |
| 25.5.1  | Considerazioni preliminari . . . . .                                                     | 1340 |
| 25.5.2  | Caratteristiche e impiego . . . . .                                                      | 1341 |
| 25.5.3  | Stima del livello di esposizione a dispositivi indossati . . . . .                       | 1345 |
| 25.5.4  | Criticità dei valori di attenuazione a corredo dei dispositivi . . . . .                 | 1346 |
| 25.5.5  | Valutazione dell'attenuazione dei dispositivi tramite la procedura subject-fit . . . . . | 1348 |
| 25.5.6  | Problemi associati alla variabilità dei valori di attenuazione . . . . .                 | 1349 |
| 25.5.7  | Valutazione dell'attenuazione del dispositivo sul singolo lavoratore . . . . .           | 1349 |
| 25.5.8  | Criticità delle disposizioni di legge . . . . .                                          | 1350 |
| 25.6    | Ultrasuoni negli ambienti di lavoro . . . . .                                            | 1352 |
| 25.6.1  | Macchine e dispositivi . . . . .                                                         | 1352 |
| 25.6.2  | Percezione ed effetti sull'uomo . . . . .                                                | 1353 |
| 25.6.3  | Valori limite . . . . .                                                                  | 1355 |

|        |                                 |      |
|--------|---------------------------------|------|
| 25.6.4 | Indagini e esperienze . . . . . | 1356 |
|        | Bibliografia . . . . .          | 1358 |

## Capitolo 26 Rumore negli ambienti urbani ed extraurbani

*Giovanni Brambilla, Massimo Garai*

|         |                                                                                    |      |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 26.1    | Introduzione . . . . .                                                             | 1367 |
| 26.2    | Sorgenti di rumore nell'ambiente di vita . . . . .                                 | 1368 |
| 26.2.1  | Campionamento del rumore ambientale . . . . .                                      | 1369 |
| 26.2.2  | Campionamento spaziale . . . . .                                                   | 1370 |
| 26.2.3  | Campionamento temporale . . . . .                                                  | 1374 |
| 26.2.4  | Rumore delle infrastrutture di trasporto . . . . .                                 | 1377 |
| 26.2.5  | Sorgenti sonore specifiche . . . . .                                               | 1391 |
| 26.3    | Modelli numerici della propagazione sonora in ambiente esterno                     | 1398 |
| 26.3.1  | Aspetti generali . . . . .                                                         | 1398 |
| 26.3.2  | Classificazione dei modelli . . . . .                                              | 1399 |
| 26.3.3  | Campo di applicazione dei modelli . . . . .                                        | 1401 |
| 26.3.4  | Struttura generale dei modelli . . . . .                                           | 1402 |
| 26.3.5  | Aspetti applicativi . . . . .                                                      | 1404 |
| 26.3.6  | Incertezza dei modelli . . . . .                                                   | 1407 |
| 26.4    | Mappatura acustica . . . . .                                                       | 1408 |
| 26.4.1  | Aspetti generali . . . . .                                                         | 1408 |
| 26.4.2  | Tipologie di mappe acustiche e modalità di rappresentazione . . . . .              | 1409 |
| 26.4.3  | Modelli «ad interim» per l'elaborazione delle mappe acustiche . . . . .            | 1412 |
| 26.5    | Esposizione sonora della popolazione . . . . .                                     | 1413 |
| 26.5.1  | Metodo END (Environmental Noise Directive) . . . . .                               | 1415 |
| 26.5.2  | Metodo VBEB (legislazione tedesca) . . . . .                                       | 1416 |
| 26.5.3  | Metodo ALE (Average Level of Exposure) . . . . .                                   | 1416 |
| 26.5.4  | Confronto tra i metodi . . . . .                                                   | 1417 |
| 26.6    | Effetti extrauditivi dell'esposizione al rumore nell'ambiente di vita . . . . .    | 1418 |
| 26.7    | Aspetti socio-economici dell'esposizione al rumore nell'ambiente di vita . . . . . | 1425 |
| 26.7.1  | La valutazione monetaria dei beni ambientali . . . . .                             | 1425 |
| 26.7.2  | Metodologie per la valutazione economica del rumore                                | 1427 |
| 26.8    | Classificazione acustica del territorio . . . . .                                  | 1430 |
| 26.8.1  | Generalità sui criteri per la classificazione acustica del territorio . . . . .    | 1433 |
| 26.9    | Quadro di riferimento legislativo comunitario e nazionale . . . . .                | 1439 |
| 26.9.1  | Disposizioni comunitarie . . . . .                                                 | 1439 |
| 26.9.2  | Disposizioni nazionali . . . . .                                                   | 1446 |
| 26.10   | La valutazione di impatto ambientale per il rumore . . . . .                       | 1455 |
| 26.10.1 | Lo studio di impatto acustico . . . . .                                            | 1456 |

|                                                    |                                                                    |             |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| 26.10.2                                            | Il clima acustico . . . . .                                        | 1462        |
| 26.11                                              | Tecniche per il risanamento acustico . . . . .                     | 1464        |
| 26.11.1                                            | Generalità . . . . .                                               | 1464        |
| 26.11.2                                            | Criteri per l'individuazione delle soluzioni praticabili . . . . . | 1465        |
| 26.11.3                                            | Interventi diretti sulla sorgente . . . . .                        | 1467        |
| 26.11.4                                            | Interventi sulla propagazione – Barriere . . . . .                 | 1476        |
| 26.11.5                                            | Interventi sul ricettore . . . . .                                 | 1480        |
| 26.11.6                                            | Pianificazione territoriale e urbanistica . . . . .                | 1482        |
| 26.11.7                                            | Progettazione edilizia . . . . .                                   | 1484        |
| 26.11.8                                            | Valutazione dei costi e dei benefici . . . . .                     | 1485        |
|                                                    | Bibliografia . . . . .                                             | 1494        |
| <b>Capitolo 27 Il soundscape: paesaggio sonoro</b> |                                                                    |             |
| <i>Giovanni Brambilla</i>                          |                                                                    |             |
| 27.1                                               | Introduzione . . . . .                                             | 1507        |
| 27.2                                               | Caratteristiche del paesaggio sonoro . . . . .                     | 1509        |
| 27.3                                               | Caratterizzazione del paesaggio sonoro . . . . .                   | 1513        |
| 27.3.1                                             | Acquisizione dei parametri fisici . . . . .                        | 1514        |
| 27.3.2                                             | Acquisizione dei dati percettivi . . . . .                         | 1517        |
| 27.4                                               | Modelli del paesaggio sonoro . . . . .                             | 1521        |
| 27.5                                               | Classificazione del paesaggio sonoro . . . . .                     | 1525        |
| 27.6                                               | Le aree di particolare fruizione . . . . .                         | 1527        |
| 27.7                                               | La progettazione del paesaggio sonoro . . . . .                    | 1529        |
|                                                    | Bibliografia . . . . .                                             | 1531        |
| <b>Appendici</b>                                   |                                                                    | <b>1537</b> |
| <b>Elenco dei simboli</b>                          |                                                                    | <b>1553</b> |
| <b>Indice analitico</b>                            |                                                                    | <b>1567</b> |

# Acustica

*Acustica*, curato da Renato Spagnolo, anche grazie al contributo dei più apprezzati esperti della disciplina è la più completa ed esaustiva opera mai pubblicata sull'acustica. Non solo, tutto il libro è ricco di puntuali e sistematici richiami alle norme tecniche, alle prescrizioni di legge, alle modalità e prassi operative della specifica situazione italiana. Per questo è uno strumento irrinunciabile per i professionisti, oltretutto per i ricercatori, i docenti e gli studenti.

Guardando all'autorevole fonte *Physics and Astronomy Classification Scheme (PACS)* dell'American Institute of Physics (AIP), l'acustica risulta ordinata in dodici aree, che vanno, per citare solo le più note, dall'acustica generale lineare a quella non lineare, all'acustica musicale e alla bioacustica, passando per l'acustica subacquea, gli ultrasuoni e i loro effetti fisici e biologici, le misurazioni acustiche e la strumentazione, l'acustica strutturale e le vibrazioni, gli effetti e il controllo del rumore, l'acustica architettonica, la psicoacustica.

In questo libro tutti questi campi sono esplorati e analizzati approfonditamente: dalla propagazione lineare e non lineare delle onde fino ai temi più specialistici come le tecniche di misura e di analisi numerica del segnale, dall'acustica subacquea alla bioacustica, dalla funzione uditiva alla voce, fino alle applicazioni degli ultrasuoni in campo medico e alle complesse problematiche del rumore e delle vibrazioni nei luoghi di lavoro e di vita.

Renato Spagnolo è stato Dirigente di ricerca dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale «Galileo Ferraris», oggi Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, dove è tuttora ricercatore associato. Insegna Acustica nel corso di Laurea Magistrale in Fisica dell'Università di Torino. Con UTET Università ha già pubblicato, insieme a Caterina Guiot, *Ultrasuoni in medicina* (2010), mentre altri suoi precedenti volumi, *Manuale di acustica applicata* (2001, 2008) e, in collaborazione con Sergio Cingolani, *Acustica musicale e architettonica* (2004, 2008), sono stati pubblicati con i marchi UTET Libreria e CittàStudi Edizioni.

Immagine di copertina: Oria © Shutterstock  
Grafico: Maura Santini  
Art Director: Nadia Maestri

[www.utetuniversita.it](http://www.utetuniversita.it)

Alla pagina web [www.utetuniversita.it](http://www.utetuniversita.it) sono disponibili materiali didattici di supporto per docenti e studenti.

€ 89,00

ISBN 978-88-6008-446-0



9 788860 084460