

CARLA BASÍLIO MARCELO

## SONS E FORMAS

### AS BARREIRAS ACÚSTICAS NA ATENUAÇÃO DO RUÍDO NA CIDADE

Dissertação apresentada à Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovado em \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2006.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ladislao Szabo  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Dr. Milton Granado Júnior  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Dr. Sylvio R. Bistafa  
Universidade de São Paulo

*Aos meus quatro melhores amigos,  
meus pais e meus irmãos...*

.....

## AGRADECIMENTOS

*Ao meu querido orientador, Prof. Dr. Ladislao Szabo, pelo apreço que dedicou a esta dissertação, sempre com competência, paciência e, principalmente, alegria.*

*À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gilda Collet Bruna, pelo constante acompanhamento e carinho, a quem devo, inclusive, a oportunidade de ter realizado este mestrado.*

*Ao Prof. Dr. Milton Granado Júnior, por compartilhar seu conhecimento, pela incansável dedicação a estes textos e pelo espaço para o meu estágio docente.*

*Ao Dr. Sylvio Bistafa e Dr. Ualfrido Del Carlo, pelos importantes esclarecimentos e contribuições.*

*Ao Prof. Dr. José Geraldo Simões, pelo incentivo antes mesmo do início do curso.*

*Aos ilustres professores do Mestrado de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Presbiteriana Mackenzie, pelas excelentes aulas e pela amizade.*

*À Universidade Presbiteriana Mackenzie, pela oportunidade, ao Mackpesquisa, pelo apoio financeiro e à CAPES/PROSUP, pela bolsa concedida.*

*À nova amiga Margô Negro, pela dedicação e carinho nas revisões dos textos.*

*À minha grande amiga Alessandra Horschutz, pela companhia perfeita desde o momento em que o mestrado era só uma idéia, até a entrega desta dissertação.*

*À amiga Thatiana Carolo e a todos os amigos conquistados durante o curso, especialmente Aline Regino, Fernanda Alpiste, Rodrigo Rodrigues e Fábio Almada, por tornarem tudo mais fácil, divertido e seguro.*

*Aos amigos que fizeram o curso "indiretamente" comigo, por acompanharem todas as etapas de perto, compreendendo meus momentos de reclusão e irritação, especialmente André Schmidt, Anna Cláudia Viola, Rodrigo Bartholomeu e minhas primas Susana Mendonça, Cátia Lúcia e Patrícia Caldeira.*

*Ao meu primo e "irmãozinho" Renato Mendonça, pelo amor e disposição todas as vezes que gritei por um "help" no PC.*

*Ao meu priminho Bruno dos Santos, pela valiosa e carinhosa ajuda.*

*Aos amigos da Academia Brasileira de Artes, especialmente aos meus alunos queridos, por aceitarem minha ausência, ao Prof. Valmir Ramos, pelo carinho na ilustração da capa, e ao diretor Laerte Galessio, a quem devo muita compreensão e incentivo por mais de dez anos.*

*À minha ex-aluna, hoje amiga, Isabel Zeck, pelo material concedido.*

*A todos da minha família, especialmente aos meus avós (in memoriam), que representam até hoje uma referência de valores e princípios na minha vida.*

*Aos meus irmãos, Andréa e Fernando, meus companheiros por toda a vida, pelo amor e dedicação em todos os momentos que precisei deles.*

*E aos meus pais, Marcelo e Cecília, minha eterna gratidão, por mais essa ajuda nessa importante etapa da minha vida, assim como pela minha educação, formação e, principalmente, por sempre estarem por perto, sorrindo ou chorando, nunca por mim, mas sempre comigo.*

*Inevitável agradecer, ainda que tarde, ao Prof. Dr. Roberto Starck, pelo muito que me ensinou na graduação e por ser, mesmo sem saber, o maior responsável pelo meu fascínio pela Acústica.*

*Mas se eu pudesse fazer apenas um agradecimento seria a Deus, por colocar todas estas pessoas lindas na minha vida e assim tornar tudo isto possível... Obrigada!*

Planejar não é utopia. É a maneira correta de enfrentar efetivamente a realidade, com economia e sem desperdícios (Rino Levi).

RESUMO

À medida que as cidades se desenvolvem, a quantidade de sons incomodativos em seu meio aumenta consideravelmente, fazendo com que o ruído urbano torne-se cada vez mais imponente na paisagem sonora, principalmente das grandes cidades. Nesse contexto, a salubridade e a qualidade de vida das populações envolvidas ficam altamente comprometidas, haja vista que a poluição sonora tem diversos efeitos nocivos ao homem. Assim, esta dissertação pretende destacar a importância das diretrizes acústicas no planejamento urbano e no projeto arquitetônico, para que seja possível melhorar a atenuação do ruído. O primeiro capítulo procura apresentar um panorama geral da evolução da paisagem sonora, ressaltando alguns dos sons mais incomodativos da história e, seqüentemente, analisar a paisagem sonora urbana atual. O segundo capítulo expõe os principais conceitos da Acústica, cuja erudição é fundamental para a leitura ulterior. O terceiro capítulo pretende estudar as barreiras acústicas urbanas, ou seja, os muros de contenção que agem como interceptadores de ondas sonoras entre a fonte e o receptor. Finalmente, o quarto capítulo pretende examinar as barreiras acústicas arquitetônicas, ou seja, formas e dimensões que o edifício pode adotar para um bom isolamento do ruído externo.

Palavras-chaves: acústica - ruído - atenuação sonora.

.....

## ABSTRACT

As the cities are developing, the amount of bothering sounds there increases considerably, making that the urban noise becomes each more imponent at the soundscape, mainly of the big cities. In this context, the salubrity and the quality of life of the involved populations are highly engaged, it has seen that the sonorous pollution has divers harmful effects to the man. In this way, this work intends to detach the importance of the acoustics directrixes in the urban planning and in the architectonic project, to be possible to improve the noise attenuation. The first chapter intends to present an overview of the soundscape evolution, showing some of the most history bothering sounds and, after that, to analyze the current urban sonorous landscape. The second chapter presents the main concepts of the Acoustics, whose knowledge is basic for the further reading. The third chapter intends to study the urban acoustics barriers, which are the contention barrier that act as interceptors of sonorous waves between the source and the receiver.

Finally, the fourth chapter intends to examine the architectonics acoustics barriers, which are forms and dimensions that the building can assume for a better isolation of the external noise.

Key-words: acoustic – noise - isolation.

LISTA DE FIGURAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1.  | Ruído na cidade .....   | cp |
| Figura 2.  | Áreas de estudos da Acústica .....  | 18 |
| Figura 3.  | Epidauro, o teatro grego “perfeito”, construído em IV a.C. ....   | 19 |
| Figura 4.  | Coliseu - planta e vista externa .....  | 19 |
| Figura 5.  | Decolagem e aterrissagem próximos a áreas residenciais.....   | 39 |
| Figura 6.  | Aeroporto de Congonhas integrado ao contexto urbano de São Paulo .....                                      | 39 |
| Figura 7.  | Manifestação dos moradores de um edifício residencial.....  | 40 |
| Figura 8.  | Decibelímetro .....   | 44 |
| Figura 9.  | Escala de níveis sonoros .....  | 46 |
| Figura 10. | Representação do som num sistema tridimensional de coordenadas ortogonais .....                             | 49 |
| Figura 11. | Representação das ondas sonoras por raios .....   | 49 |
| Figura 12. | Orelha externa .....  | 54 |
| Figura 13. | Os sons no seres humanos, do nível físico ao psíquico .....   | 54 |
| Figura 14. | Orelha interna .....  | 55 |
| Figura 15. | Critérios de danos ao ouvido .....  | 59 |
| Figura 16. | Limiares auditivos .....  | 61 |
| Figura 17. | Manifestações populares contra o ruído de bares e boates no bairro da Vila Olímpia, São Paulo.....          | 63 |
| Figura 18. | Gráfico comparativo das intensidades sonoras nos arredores da Universidade Mackenzie e Faculdade FAAP ..... | 64 |
| Figura 19. | Mapa dos pontos de medição nos arredores da Universidade Mackenzie .....                                    | 65 |
| Figura 20. | Mapa dos pontos de medição nos arredores da Faculdade FAAP .....  | 66 |
| Figura 21. | Contornos de mesmo nível de pressão sonora ao redor de um grande transformador de energia elétrica .....    | 73 |
| Figura 22. | Decréscimo do nível sonoro com a distância .....  | 74 |
| Figura 23. | Exemplo de decréscimo do nível sonoro com a distância .....   | 75 |
| Figura 24. | Avião aterrissando no aeroporto de Congonhas, em São Paulo .  | 76 |
| Figura 25. | Registro gráfico, no solo, da variação de nível sonoro de um avião sobrevoando uma área .....               | 77 |
| Figura 26. | Registro gráfico, na beira de uma rodovia, da variação de nível sonoro do tráfego veicular .....            | 78 |



|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Figura 27. | Registro gráfico, próximo a uma via férrea, da variação de nível sonoro da passagem de um trem .....  | 79  |
| Figura 28. | Mecanismos mais significativos da atenuação sonora ao ar livre  | 80  |
| Figura 29. | A propagação sonora sob efeito de gradiente positivo de temperatura .....   | 81  |
| Figura 30. | A propagação sonora sob efeito de gradiente negativo de temperatura .....   | 82  |
| Figura 31. | A propagação sonora sob efeito da ventilação .....  | 83  |
| Figura 32. | Sons originados no ar e por impacto .....   | 84  |
| Figura 33. | Distribuição da energia sonora em um obstáculo .....  | 85  |
| Figura 34. | Frente de onda refletida .....  | 87  |
| Figura 35. | Ângulo refletido .....  | 88  |
| Figura 36. | Reflexão sonora em superfície côncava (a) e convexa (b) .....   | 88  |
| Figura 37. | Imagens acústicas .....   | 90  |
| Figura 38. | Difração sonora em um orifício .....  | 91  |
| Figura 39. | Difração sonora em uma quina .....  | 91  |
| Figura 40. | Comparação do comportamento de uma onda sonora e uma luminosa em um obstáculo .....   | 92  |
| Figura 41. | Ressonador de cavidade ou de Helmholtz .....  | 95  |
| Figura 42. | Fotos de barreiras acústicas urbanas .....  | 98  |
| Figura 43. | Comparação entre os limites máximos recomendados de ruído em rodovias próximas a zonas residenciais de alguns países da Europa .....  | 100 |
| Figura 44. | Barreira acústica implantada na rodovia dos Bandeirantes para proteger um conjunto habitacional do ruído veicular .....   | 103 |
| Figura 45. | Barreira pública em Saint Moritz e barreira privativa em Zurich, Suíça .....  | 104 |
| Figura 46. | Principais raios sonoros que devem ser contidos por uma barreira .....  | 105 |
| Figura 47. | Difração nas barreiras .....  | 107 |
| Figura 48. | Comportamento de uma barreira acústica .....  | 107 |
| Figura 49. | Barreira mais próxima a fonte sonora .....  | 108 |
| Figura 50. | Barreira mais próxima ao receptor sonoro .....  | 108 |
| Figura 51. | Combinação de barreira acústica, com asfalto silencioso e proteção acústica nas janelas do edifício .....   | 109 |
| Figura 52. | Amostras de superfícies para rodovias: camadas gêmeas de asfalto poroso com revestimento de borracha; camada única de asfalto poroso com revestimento de borracha; asfalto poroso; concreto poroso; asfalto denso ..... | 109 |
| Figura 53. | Morfologia das barreiras .....  | 110 |
| Figura 54. | Proporção entre as partes de uma barreira .....   | 110 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Figura 55. | Topo da barreira como limite horizontal de visibilidade .....   | 111 |
| Figura 56. | Topo da barreira com alinhamento horizontal sinuoso .....   | 111 |
| Figura 57. | Barreira com 20m de altura protegendo uma área residencial na Périphérique, em Paris .....  | 113 |
| Figura 58. | Comprimento reto ou angular de uma barreira .....   | 114 |
| Figura 59. | Barreira com elementos repetitivos .....  | 115 |
| Figura 60. | Barreira como escultura .....   | 115 |
| Figura 61. | Barreira assimétrica .....  | 115 |
| Figura 62. | Vãos para manutenção ou passagem de pedestres nas barreiras .....   | 116 |
| Figura 63. | Barreira nos dois lados da rodovia, paralelas entre si .....  | 117 |
| Figura 64. | A altura de barreiras paralelas .....   | 118 |
| Figura 65. | Barreira inclinada .....  | 119 |
| Figura 66. | Barreira com topo inclinado .....   | 120 |
| Figura 67. | Túnel .....   | 120 |
| Figura 68. | Galerias .....  | 121 |
| Figura 69. | Variações possíveis em barreiras acústicas urbanas .....  | 122 |
| Figura 70. | Barreira com borda em formato de T .....  | 123 |
| Figura 71. | Barreira com bordas múltiplas .....   | 124 |
| Figura 72. | Barreira com borda em formato de Y .....  | 125 |
| Figura 73. | Barreira com borda em formato tubular .....   | 125 |
| Figura 74. | Barreiras com elementos de interferência nos topos .....  | 126 |
| Figura 75. | Cálculo de barreira, segundo método usado por Egan .....  | 127 |
| Figura 76. | Talude paralelo a barreira instalada na rodovia dos Bandeirantes, em São Paulo .....  | 128 |
| Figura 77. | Barreira com processo de isolamento e absorção conjugados – Estrutura em concreto compacto, faceada com tiras de concreto granular, em Milão, na Itália ..... | 130 |
| Figura 78. | Barreira com painel absorvente em uma das faces, constituído por chapa metálica com perfurações de 6mm .....  | 131 |
| Figura 79. | Barreiras acústicas em alumínio .....   | 132 |
| Figura 80. | Barreira instalada na Cintura Regional Externa de Lisboa (CREL) .....   | 133 |
| Figura 81. | Barreira metálica combinada com painéis transparentes .....   | 134 |
| Figura 82. | Barreira metálica com painéis transparentes na parte inferior ....  | 134 |
| Figura 83. | Barreira em vidro curvo .....   | 135 |
| Figura 84. | Barreira em acrílico colorido .....   | 135 |
| Figura 85. | Barreira em vidro sobre viaduto de concreto.....  | 136 |
| Figura 86. | Barreira em madeira como limite de jardim residencial .....   | 137 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Figura 87.  | Barreira em concreto com face rugosa .....                              | 138 |
| Figura 88.  | Barreira em concreto com face plana .....                               | 138 |
| Figura 89.  | Barreira em blocos de concreto coloridos .....                          | 139 |
| Figura 90.  | Barreira em plástico colorido .....                                     | 139 |
| Figura 91.  | Elevação de terra como barreira acústica .....                          | 141 |
| Figura 92.  | Composições possíveis de vegetação com muro de contenção acústica ..... | 142 |
| Figura 93.  | Barreiras biológicas x barreiras simples .....                          | 143 |
| Figura 94.  | Barreira biológica .....  | 143 |
| Figura 95.  | Atenuação sonora subjetiva .....  | 144 |
| Figura 96.  | Atenuação subjetiva x ruído .....                                       | 144 |
| Figura 97.  | Superfícies paralelas .....   | 153 |
| Figura 98.  | Possíveis implantações para um edifício isolado .....                   | 153 |
| Figura 99.  | Possíveis implantações para edifícios similares .....                   | 154 |
| Figura 100. | Edifícios perpendiculares a fonte .....                                 | 155 |
| Figura 101. | Edifício rotacionado ao eixo da fonte .....                             | 155 |
| Figura 102. | Edifício rotacionado ao eixo da fonte .....                             | 156 |
| Figura 103. | Edifício com fachada angular .....                                      | 156 |
| Figura 104. | Analogia entre dois trechos urbanos .....                               | 157 |
| Figura 105. | Pátios externos na implantação .....                                    | 158 |
| Figura 106. | Pátio x avenida com tráfego intenso .....                               | 159 |
| Figura 107. | Altura de um edifício barreira .....                                    | 160 |
| Figura 108. | Variações nas plantas .....   | 161 |
| Figura 109. | Planta escalonada .....   | 162 |
| Figura 110. | Altura dos edifícios .....  | 163 |
| Figura 111. | Atenuação na volumetria do edifício .....                               | 165 |
| Figura 112. | Edifício com andares recuados .....                                     | 166 |
| Figura 113. | Terraço como barreira acústica .....                                    | 167 |
| Figura 114. | Perda de transmissão sonora em paredes compostas .....                  | 169 |
| Figura 115. | Abertura das janelas .....  | 172 |
| Figura 116. | Localização das janelas .....   | 173 |

\* \* \* \* \*

## LISTA DE TABELAS

|        |     |   |     |
|--------|-----|---|-----|
| Tabela | 1.  | Níveis sonoros das máquinas no período da Revolução Industrial .....                              | 34  |
| Tabela | 2.  | Tabela com as velocidades do som .....  | 42  |
| Tabela | 3.  | Comparação de algumas potências sonoras .....   | 43  |
| Tabela | 4.  | Níveis sonoros de intensidade para sons do cotidiano e sensações subjetivas correspondentes ..... | 45  |
| Tabela | 5.  | Tabela de limites de tolerância para ruídos .....   | 60  |
| Tabela | 6.  | Principais métodos de atenuação sonora .....  | 97  |
| Tabela | 7.  | Índices de atenuação vegetativa .....   | 140 |
| Tabela | 8.  | Ambientes produtores e/ou sensíveis ao ruído .....  | 149 |
| Tabela | 9.  | Atenuação sonora no ar .....  | 152 |
| Tabela | 10. | Atenuações sonoras possíveis em solos vegetativos .....   | 164 |
| Tabela | 11. | Distâncias mínimas entre locais e fontes de ruídos externas ....                                  | 171 |

LISTA DE SÍMBOLOS

|           |  |
|-----------|--|
| $a$       | Coeficiente de absorção                                      |
| $A$       | Absorção equivalente ( $m^2$ )                               |
| $AT$      | Atenuação  |
| $d$       | Coeficiente de dissipação                                    |
| $E$       | Energia  |
| $E$       | Índice de enfraquecimento (ou $TL$ em inglês)                |
| $f$       | Frequência em ciclo / seg (Hz)                               |
| $H$       | Altura   |
| $I$       | Intensidade sonora   |
| $I_0$     | Intensidade de referência $10^{-12}$ watt/ $m^2$ .           |
| $l$       | Comprimento  |
| $L_{ps}$  | Nível de poluição sonora                                     |
| $L_{eq}$  | Nível sonoro equivalente em dB(A)                            |
| $L_r$     | Nível critério   |
| $m, M$    | Massa  |
| $M_s$     | Massa da superfície  |
| $NSI$     | Nível sonoro de intensidade em dB                            |
| $NPS$     | Nível de pressão sonora em dB                                |
| $P$       | Pressão acústica   |
| $P_o$     | Pressão acústica de referência = $2 \times 10^{-5}$ N/ $m^2$ |
| $PT$      | Perda de transmissão ou pressão total                        |
| $R$       | Distância entre fonte, barreira e receptor.                  |
| $r$       | Coeficiente de reflexão                                      |
| $S$       | Área de seção transversal, área de superfície                |
| $t$       | Tempo  |
| $t$       | Coeficiente de transmissão                                   |
| $t$       | Temperatura em $C^\circ$                                     |
| $T$       | Tempo de reverberação  |
| $V$       | Velocidade do som  |
| $V$       | Volume   |
| $W$       | Potência sonora  |
| $\lambda$ | Comprimento da onda  |

\* \* \* \* \*

## SUMÁRIO

|  |     |
|--|-----|
| INTRODUÇÃO .....   | 17  |
| CAPÍTULO 1 ACÚSTICA NA CIDADE .....                                    | 24  |
| 1.1 Evolução da paisagem sonora .....                                  | 27  |
| 1.2 Paisagem sonora atual .....  | 37  |
| 1.3 A poluição sonora .....  | 41  |
| 1.3.1 Som e seus conceitos .....                                       | 41  |
| 1.3.2 Normas e leis brasileiras sobre o ruído urbano .....             | 50  |
| 1.4 Conseqüências do ruído no homem .....                              | 53  |
| 1.5 Conseqüências do ruído na cidade .....                             | 62  |
| CAPÍTULO 2 ACÚSTICA CONCEITUAL .....                                   | 72  |
| 2.1 Principais fontes sonoras na paisagem urbana .....                 | 72  |
| 2.2 Propagação do som na atmosfera .....                               | 80  |
| 2.2.1 Sob efeito da temperatura .....                                  | 81  |
| 2.2.2 Sob efeito da ventilação .....                                   | 82  |
| 2.3 Comportamento das ondas sonoras em um obstáculo .....              | 84  |
| 2.3.1 Reflexão .....   | 87  |
| 2.3.2 Absorção .....   | 94  |
| 2.4 Atenuação sonora .....   | 96  |
| CAPÍTULO 3 BARREIRAS ACÚSTICAS NA CIDADE .....                         | 98  |
| 3.1 Evolução .....   | 99  |
| 3.2 Funcionamento .....  | 105 |
| 3.3 Formas e dimensões .....   | 113 |
| 3.4 Desempenhos acústicos dos principais materiais .....               | 128 |
| 3.5 Vegetação nas barreiras .....                                      | 141 |
| CAPÍTULO 4 BARREIRAS ACÚSTICAS NA ARQUITETURA .....                    | 146 |
| 4.1 Hierarquia na implantação de acordo com a sensibilidade ao ruído.. | 149 |
| 4.2 Distanciamento da fonte .....                                      | 150 |
| 4.3 Inserção do edifício no terreno .....                              | 153 |
| 4.4 Edifício barreira .....  | 159 |
| 4.5 Variações nas plantas .....  | 161 |
| 4.6 Altura do edifício .....   | 163 |
| 4.7 Fachada: plástica, adornos e aberturas .....                       | 165 |

|  |     |
|--|-----|
| CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 174 |
| BIBLIOGRAFIA .....   | 177 |
| ANEXO I .....  | 181 |
| A legislação civil de redução de ruído ao redor do mundo (Schafer, 1997)                       |     |
| ANEXO II .....   | 184 |
| Coeficientes de absorção sonora de materiais e revestimentos de superfícies<br>(Bistafa, 2006) |     |
| ANEXO III .....  | 186 |
| Valores da perda na transmissão para sons aéreos de partições diversas<br>(Bistafa, 2006)      |     |