

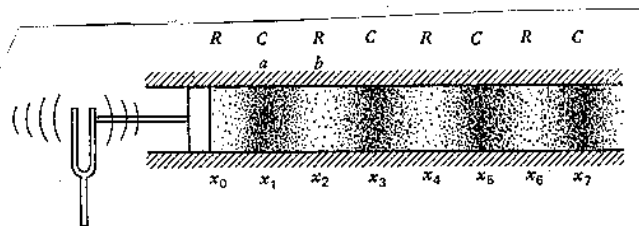
Som e Acústica

Natureza do som

O som é uma sensação auditiva que nossos ouvidos são capazes de detectar. Esta sensação é produzida pelo movimento organizado das moléculas que compõem o ar. Ao estalarmos os dedos, por exemplo, provocamos uma *perturbação* que faz vibrar o ar e que se propaga até ser captada por nossos ouvidos, constituindo o que chamamos de som. Essa perturbação é um movimento ondulatório, caracterizado por uma intensidade, uma frequência e uma velocidade de propagação. Os três fatores envolvidos na sensação de som são o agente emissor, o agente transmissor e o receptor. Uma campainha, por exemplo (agente emissor) ao ser tocada fará vibrar as moléculas de ar mais próximas. Estas moléculas formam o agente transmissor, pois os choques moleculares fazem com que o som se propague na forma de ondas. Assim elas chegam ao ouvido (agente receptor).

Podemos obter uma idéia intuitiva do mecanismo de propagação de uma onda sonora considerando o que acontece quando se golpeia um gongo. A placa do instrumento vibra entre duas posições extremas, comprimindo as porções adjacentes da atmosfera. Essa compressão vai-se transmitindo sucessivamente de cada camada às camadas adjacentes (onda de compressão). Quando o gongo retorna para trás, cria-se uma zona de rarefação e o ar da região contígua se desloca para preenchê-la, produzindo uma onda de expansão. O deslocamento de ar provocado pelo gongo muda a densidade do ar na camada adjacente, o que provoca uma mudança de pressão (compressão ou descompressão). A variação de pressão produz o deslocamento da camada de ar contígua, e assim por diante. As moléculas vibram na direção em que o som se propaga e, por isso são chamadas ondas *longitudinais*. É importante salientar que o som não se propaga no vácuo. Ele sempre necessita de um meio material (sólido, líquido ou gasoso) para se propagar. A figura 1 mostra as regiões de rarefação (R) e de compressão (C) produzidas num tubo com ar excitado por um diapasão.

Fig. 1



A onda sonora é caracterizada pela sua *frequência* f , que corresponde ao número de vibrações por segundo (medida em hertz, Hz), e pelo seu *comprimento de onda* λ , que é a distância entre a crista de uma onda e da seguinte (medida em metros). O ouvido humano percebe frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz. Quando a frequência é menor que 20 Hz, as ondas denominam-se *infra-sônicas* e, quando maior que 20.000 Hz, *ultra-sônicas*. O valor da **velocidade do som** é diferente para cada meio. No ar a 20°C, por exemplo, $v = 340$ m/s. Na água a 20°C $v = 1450$ m/s e, no alumínio, 5100 m/s. É importante ressaltar que, nas ondas periódicas, a velocidade, o comprimento de onda λ e a frequência f relacionam-se por: $v = \lambda f$. Assim, o λ da nota lá₄ (o lá de afinação), é $\lambda = v/f = (340)/(440) = 77$ cm. A

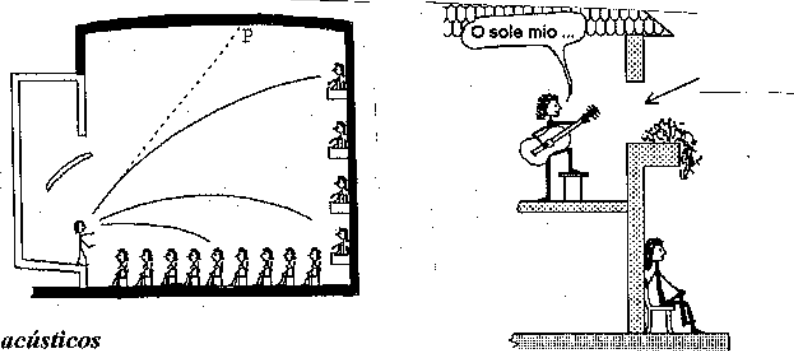
figura 2 indica a frequência (em Hz) das notas de um piano, cuja oitava central vai desde o Do_4 ($f = 261.63$ Hz) até o Si_4 ($f = 493.88$ Hz). A nota Lá central ou “Lá de afinação”, de frequência $f = 440$ Hz, está indicada por um asterisco na figura 2.

Fig. 2

La	27,500	29,135	Do	30,863	32,703	34,648	Re	36,591	38,581	Mi	40,624	42,721	Fa	44,864	47,061	So	49,388	51,755	La	54,186	56,678	Si	59,232	61,850	Do	64,498	67,246	Re	70,813	73,699	Mi	76,813	79,854	Fa	83,091	86,321	So	89,648	93,073	La	96,591	100,203	Si	103,913	107,724	Do	111,755	115,699	Re	119,699	123,724	Mi	127,724	131,850	Fa	135,979	140,203	So	144,427	148,724	La	153,000	157,246	Si	161,850	166,124	Do	170,203	174,591	Re	179,246	183,724	Mi	188,724	193,246	Fa	198,724	203,246	So	208,724	213,246	La	218,724	223,246	Si	228,724	233,246	Do	238,724	243,246	Re	248,724	253,246	Mi	258,724	263,246	Fa	268,724	273,246	So	278,724	283,246	La	288,724	293,246	Si	298,724	303,246	Do	308,724	313,246	Re	318,724	323,246	Mi	328,724	333,246	Fa	338,724	343,246	So	348,724	353,246	La	358,724	363,246	Si	368,724	373,246	Do	378,724	383,246	Re	388,724	393,246	Mi	398,724	403,246	Fa	408,724	413,246	So	418,724	423,246	La	428,724	433,246	Si	438,724	443,246	Do	448,724	453,246	Re	458,724	463,246	Mi	468,724	473,246	Fa	478,724	483,246	So	488,724	493,246	La	498,724	503,246	Si	508,724	513,246	Do	518,724	523,246	Re	528,724	533,246	Mi	538,724	543,246	Fa	548,724	553,246	So	558,724	563,246	La	568,724	573,246	Si	578,724	583,246	Do	588,724	593,246	Re	598,724	603,246	Mi	608,724	613,246	Fa	618,724	623,246	So	628,724	633,246	La	638,724	643,246	Si	648,724	653,246	Do	658,724	663,246	Re	668,724	673,246	Mi	678,724	683,246	Fa	688,724	693,246	So	698,724	703,246	La	708,724	713,246	Si	718,724	723,246	Do	728,724	733,246	Re	738,724	743,246	Mi	748,724	753,246	Fa	758,724	763,246	So	768,724	773,246	La	778,724	783,246	Si	788,724	793,246	Do	798,724	803,246	Re	808,724	813,246	Mi	818,724	823,246	Fa	828,724	833,246	So	838,724	843,246	La	848,724	853,246	Si	858,724	863,246	Do	868,724	873,246	Re	878,724	883,246	Mi	888,724	893,246	Fa	898,724	903,246	So	908,724	913,246	La	918,724	923,246	Si	928,724	933,246	Do	938,724	943,246	Re	948,724	953,246	Mi	958,724	963,246	Fa	968,724	973,246	So	978,724	983,246	La	988,724	993,246	Si	998,724	1003,246	Do	1008,724	1013,246	Re	1018,724	1023,246	Mi	1028,724	1033,246	Fa	1038,724	1043,246	So	1048,724	1053,246	La	1058,724	1063,246	Si	1068,724	1073,246	Do	1078,724	1083,246	Re	1088,724	1093,246	Mi	1098,724	1103,246	Fa	1108,724	1113,246	So	1118,724	1123,246	La	1128,724	1133,246	Si	1138,724	1143,246	Do	1148,724	1153,246	Re	1158,724	1163,246	Mi	1168,724	1173,246	Fa	1178,724	1183,246	So	1188,724	1193,246	La	1198,724	1203,246	Si	1208,724	1213,246	Do	1218,724	1223,246	Re	1228,724	1233,246	Mi	1238,724	1243,246	Fa	1248,724	1253,246	So	1258,724	1263,246	La	1268,724	1273,246	Si	1278,724	1283,246	Do	1288,724	1293,246	Re	1298,724	1303,246	Mi	1308,724	1313,246	Fa	1318,724	1323,246	So	1328,724	1333,246	La	1338,724	1343,246	Si	1348,724	1353,246	Do	1358,724	1363,246	Re	1368,724	1373,246	Mi	1378,724	1383,246	Fa	1388,724	1393,246	So	1398,724	1403,246	La	1408,724	1413,246	Si	1418,724	1423,246	Do	1428,724	1433,246	Re	1438,724	1443,246	Mi	1448,724	1453,246	Fa	1458,724	1463,246	So	1468,724	1473,246	La	1478,724	1483,246	Si	1488,724	1493,246	Do	1498,724	1503,246	Re	1508,724	1513,246	Mi	1518,724	1523,246	Fa	1528,724	1533,246	So	1538,724	1543,246	La	1548,724	1553,246	Si	1558,724	1563,246	Do	1568,724	1573,246	Re	1578,724	1583,246	Mi	1588,724	1593,246	Fa	1598,724	1603,246	So	1608,724	1613,246	La	1618,724	1623,246	Si	1628,724	1633,246	Do	1638,724	1643,246	Re	1648,724	1653,246	Mi	1658,724	1663,246	Fa	1668,724	1673,246	So	1678,724	1683,246	La	1688,724	1693,246	Si	1698,724	1703,246	Do	1708,724	1713,246	Re	1718,724	1723,246	Mi	1728,724	1733,246	Fa	1738,724	1743,246	So	1748,724	1753,246	La	1758,724	1763,246	Si	1768,724	1773,246	Do	1778,724	1783,246	Re	1788,724	1793,246	Mi	1798,724	1803,246	Fa	1808,724	1813,246	So	1818,724	1823,246	La	1828,724	1833,246	Si	1838,724	1843,246	Do	1848,724	1853,246	Re	1858,724	1863,246	Mi	1868,724	1873,246	Fa	1878,724	1883,246	So	1888,724	1893,246	La	1898,724	1903,246	Si	1908,724	1913,246	Do	1918,724	1923,246	Re	1928,724	1933,246	Mi	1938,724	1943,246	Fa	1948,724	1953,246	So	1958,724	1963,246	La	1968,724	1973,246	Si	1978,724	1983,246	Do	1988,724	1993,246	Re	1998,724	2003,246	Mi	2008,724	2013,246	Fa	2018,724	2023,246	So	2028,724	2033,246	La	2038,724	2043,246	Si	2048,724	2053,246	Do	2058,724	2063,246	Re	2068,724	2073,246	Mi	2078,724	2083,246	Fa	2088,724	2093,246	So	2098,724	2103,246	La	2108,724	2113,246	Si	2118,724	2123,246	Do	2128,724	2133,246	Re	2138,724	2143,246	Mi	2148,724	2153,246	Fa	2158,724	2163,246	So	2168,724	2173,246	La	2178,724	2183,246	Si	2188,724	2193,246	Do	2198,724	2203,246	Re	2208,724	2213,246	Mi	2218,724	2223,246	Fa	2228,724	2233,246	So	2238,724	2243,246	La	2248,724	2253,246	Si	2258,724	2263,246	Do	2268,724	2273,246	Re	2278,724	2283,246	Mi	2288,724	2293,246	Fa	2298,724	2303,246	So	2308,724	2313,246	La	2318,724	2323,246	Si	2328,724	2333,246	Do	2338,724	2343,246	Re	2348,724	2353,246	Mi	2358,724	2363,246	Fa	2368,724	2373,246	So	2378,724	2383,246	La	2388,724	2393,246	Si	2398,724	2403,246	Do	2408,724	2413,246	Re	2418,724	2423,246	Mi	2428,724	2433,246	Fa	2438,724	2443,246	So	2448,724	2453,246	La	2458,724	2463,246	Si	2468,724	2473,246	Do	2478,724	2483,246	Re	2488,724	2493,246	Mi	2498,724	2503,246	Fa	2508,724	2513,246	So	2518,724	2523,246	La	2528,724	2533,246	Si	2538,724	2543,246	Do	2548,724	2553,246	Re	2558,724	2563,246	Mi	2568,724	2573,246	Fa	2578,724	2583,246	So	2588,724	2593,246	La	2598,724	2603,246	Si	2608,724	2613,246	Do	2618,724	2623,246	Re	2628,724	2633,246	Mi	2638,724	2643,246	Fa	2648,724	2653,246	So	2658,724	2663,246	La	2668,724	2673,246	Si	2678,724	2683,246	Do	2688,724	2693,246	Re	2698,724	2703,246	Mi	2708,724	2713,246	Fa	2718,724	2723,246	So	2728,724	2733,246	La	2738,724	2743,246	Si	2748,724	2753,246	Do	2758,724	2763,246	Re	2768,724	2773,246	Mi	2778,724	2783,246	Fa	2788,724	2793,246	So	2798,724	2803,246	La	2808,724	2813,246	Si	2818,724	2823,246	Do	2828,724	2833,246	Re	2838,724	2843,246	Mi	2848,724	2853,246	Fa	2858,724	2863,246	So	2868,724	2873,246	La	2878,724	2883,246	Si	2888,724	2893,246	Do	2898,724	2903,246	Re	2908,724	2913,246	Mi	2918,724	2923,246	Fa	2928,724	2933,246	So	2938,724	2943,246	La	2948,724	2953,246	Si	2958,724	2963,246	Do	2968,724	2973,246	Re	2978,724	2983,246	Mi	2988,724	2993,246	Fa	2998,724	3003,246	So	3008,724	3013,246	La	3018,724	3023,246	Si	3028,724	3033,246	Do	3038,724	3043,246	Re	3048,724	3053,246	Mi	3058,724	3063,246	Fa	3068,724	3073,246	So	3078,724	3083,246	La	3088,724	3093,246	Si	3098,724	3103,246	Do	3108,724	3113,246	Re	3118,724	3123,246	Mi	3128,724	3133,246	Fa	3138,724	3143,246	So	3148,724	3153,246	La	3158,724	3163,246	Si	3168,724	3173,246	Do	3178,724	3183,246	Re	3188,724	3193,246	Mi	3198,724	3203,246	Fa	3208,724	3213,246	So	3218,724	3223,246	La	3228,724	3233,246	Si	3238,724	3243,246	Do	3248,724	3253,246	Re	3258,724	3263,246	Mi	3268,724	3273,246	Fa	3278,724	3283,246	So	3288,724	3293,246	La	3298,724	3303,246	Si	3308,724	3313,246	Do	3318,724	3323,246	Re	3328,724	3333,246	Mi	3338,724	3343,246	Fa	3348,724	3353,246	So	3358,724	3363,246	La	3368,724	3373,246	Si	3378,724	3383,246	Do	3388,724	3393,246	Re	3398,724	3403,246	Mi	3408,724	3413,246	Fa	3418,724	3423,246	So	3428,724	3433,246	La	3438,724	3443,246	Si	3448,724	3453,246	Do	3458,724	3463,246	Re	3468,724	3473,246	Mi	3478,724	3483,246	Fa	3488,724	3493,246	So	3498,724	3503,246	La	3508,724	3513,246	Si	3518,724	3523,246	Do	3528,724	3533,246	Re	3538,724	3543,246	Mi	3548,724	3553,246	Fa	3558,724	3563,246	So	3568,724	3573,246	La	3578,724	3583,246	Si	3588,724	3593,246	Do	3598,724	3603,246	Re	3608,724	3613,246	Mi	3618,724	3623,246	Fa	3628,724	3633,246	So	3638,724	3643,246	La	3648,724	3653,246	Si	3658,724	3663,246	Do	3668,724	3673,246	Re	3678,724	3683,246	Mi	3688,724	3693,246	Fa	3698,724	3703,246	So	3708,724	3713,246	La	3718,724	3723,246	Si	3728,724	3733,246	Do	3738,724	3743,246	Re	3748,724	3753,246	Mi	3758,724	3763,246	Fa	3768,724	3773,246	So	3778,724	3783,246	La	3788,724	3793,246	Si	3798,724	3803,246	Do	3808,724	3813,246	Re
----	--------	--------	----	--------	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	--------	----	--------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	---------	----	---------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----	----------	----------	----

refracta o som e favorece a sua propagação até o público. A fig. 3 ilustra também a difração do som, que é a propriedade de propagar-se rodeando obstáculos para chegar a lugares que estão a "sombra". A reflexão do som pode dar origem ao reforço, à reverberação ou ao eco, dependendo do intervalo de tempo entre a percepção pelo ouvinte do som direto (que viaja em linha reta) e do som refletido (fig. 4). O ouvido humano só consegue distinguir dois sons que chegam a ele com um intervalo de tempo superior a um décimo de segundo (0.1 s). Estas considerações têm importância na acústica arquitetônica, pois se algum ponto de uma sala pode ser atingido pelo som direto e o-refletido com uma diferença de caminhos muito grande, a audição será confusa. Exemplo: se a diferença de percursos entre um som direto e um som refletido numa sala de aula for 15 m, o som refletido, que chega com um retardo de quase 0.05 s em relação ao som direto, cria uma audição confusa.

Fig. 3

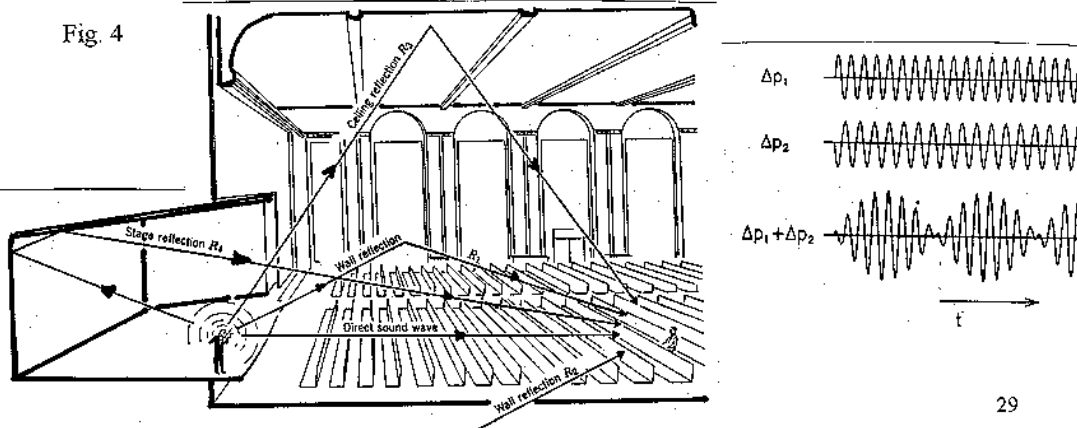


Espelhos acústicos

As superfícies esféricas podem causar também perturbações acústicas importantes porque elas atuam como verdadeiros **espelhos acústicos**, concentrando as ondas sonoras refletidas. Exemplo: uma área de esportes foi desenhada na forma de um domo (abóbada) com raio de curvatura $R = 35$ m montada numa base cilíndrica de 23 m de raio e 9.2 m de altura. A abóbada atua como um espelho esférico com distância focal $f = R/2$, sendo que sua parte superior é o vértice do espelho. Determine a localização da distância focal com relação a superfície do campo. [Ref. M. Fogiel, *Physics Problems Solver*, Research and Education Association, REA, 1995. Problema 829].

Resposta: A altura da abóbada é 17.7 m. O ponto focal do espelho acústico fica exatamente na altura do chão, ou seja todo o ruído dos espectadores é focalizado no centro do campo. Num campo de hockey que foi desenhado desta maneira, o ruído na região central era de tal intensidade que os jogadores não conseguiam escutar a voz do árbitro.

Fig. 4



Superposição

Um outro fenômeno acústico denominado **batimento** ocorre quando ondas sonoras de frequências ligeiramente diferentes se superpoem. A fig. 4 mostra que a intensidade da resultante varia de um som forte (quando as duas ondas interferem construtivamente reforçando-se umas às outras) para um silêncio quase total (quando ocorre interferência destrutiva e as ondas se anulam). A frequência dos batimentos é igual a diferença entre a frequência das duas fontes. Exemplos: (1) escute o batimento causado por dois diapasões de nota lá (440 Hz) quando a frequência de um deles for ligeiramente alterada prendendo uma massinha num dos braços. (2) as quatro cordas dos violinos são afinadas em quintas sucessivas, sol, ré, lá e mi. Para afinar o violino, o executante afina primeiro a corda lá e depois toca duas cordas vizinhas, prestando atenção aos batimentos.

Ressonância

Todas as estruturas mecânicas tem uma ou mais frequências naturais de oscilação e, se a estrutura é submetida a uma força externa periódica cuja frequência coincide com uma das frequências naturais, a amplitude da oscilação resultante atingirá valores elevados que podem levar ao colapso da estrutura. Este fenômeno é denominado **ressonância**. Um exemplo familiar deste fenômeno ocorre quando procuramos impulsionar uma pessoa sentada num balanço. A amplitude de oscilação aumenta fortemente quando a frequência de transmissão dos impulsos se aproxima da frequência de oscilação livre. Um exemplo histórico do fenômeno foi a queda da ponte pênsil do estreito de Tacoma, Estados Unidos, quando ventos soprando sobre a ponte provocaram oscilações de ressonância que levaram a sua destruição em 7 de novembro de 1940, quatro meses depois de ter sido inaugurada.

O fenômeno de ressonância é muito importante na compreensão das propriedades dos instrumentos musicais e o modo como eles produzem seu som característico. O ar contido numa cavidade possuirá uma série de frequências de ressonância associadas aos modos normais de vibração, constituindo uma cavidade acústica ressonante. O “barulho do mar” que se ouve numa concha marinha não passa da excitação dos modos ressonantes da cavidade por ligeiras correntes de ar. O som que se origina das cordas vibrantes de um instrumento musical (violino ou piano) é profundamente influenciado pela “caixa de som” do instrumento.

Exemplo: Frequências de ressonâncias de uma sala retangular. Considere uma onda sonora de frequência f e comprimento de onda λ . Se um número inteiro de $(\lambda/2)$ da onda sonora se acomodam entre as duas paredes opostas de uma sala, se estabelecerá uma onda estacionária. As frequências de ressonância para um recinto de dimensões $l_x \times l_y \times l_z$ são:

$$f_{x,y,z} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Determine as frequências de ressonância para $(n_x, n_y, n_z) = (002), (003), (010), (011), (101), (110), (200)$ e (020) de um box de banheiro de dimensões $0.8 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 2.1 \text{ m}$. Compare seus resultados com as frequências das notas da oitava central do piano e explique porque

esta acústica em particular, com paredes lisas e reflectoras, e tempos de reverberação longos, favorece o “artista” que canta no banheiro, dando uma sensação de uma voz encorpada e ressonante.

Resposta: $f(002)=162$ Hz, $f(003)=243$ Hz, $f(010)=142$ Hz, $f(011)=163$ Hz, $f(101)=227$ Hz, $f(200)=425$ Hz, $f(110)=255$ Hz e $f(020)=283$ Hz. Todas elas ficam muito próximas, reforçando as notas cantadas na região correspondente a oitava central do piano.

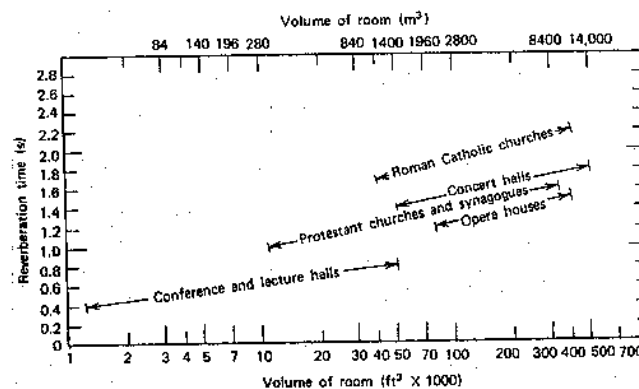
Exercícios:

- 1 – A nota mais baixa do piano é o Lá₀, $f = 27.5$ Hz, e a nota mais alta é o Dó₈, $f = 4186$ Hz. A nota Lá central (La₄) tem frequência $f = 440$ Hz. Considerando a velocidade do som no ar: 343 m/s, qual é o comprimento de onda destas notas no ar? (Sol: 12.5 m, 8.2 e 78 cm)
- 2 – Um som tem intensidade 3×10^{-8} W/m². Qual é o nível do som em dB? (Sol: 44.8 dB)
- 3 – Dois sons tem intensidade de 10 e 500 μ W/m². Qual a diferença em dB? (Sol: 17 dB)
- 4 – Um material acústico atenua de 30 dB o nível de intensidade sonora. Qual o fator de decréscimo da intensidade? (Resposta: fator 1000)
- 5 – Uma impressora num quarto produz um nível de som de 60 dB. Qual o nível quando há três impressoras trabalhando no quarto? (Solução: $\text{dB}_T = 60 + \log(3) = 60.48$ dB)
- 6 – O nível de som médio da voz humana é de 65 dB. Quantas pessoas numa sala, falando ao mesmo tempo, são necessárias para produzir um nível de som de 80 dB? (Sol: ≈ 32).

Acústica:

A percepção sonora em uma sala depende da intensidade e da relação temporal entre o som direto e o som indireto refletido pelas paredes da sala. Considera-se que uma diferença de tempo entre o som direto e o indireto menor que 0.5 seg. é acusticamente favorável. Neste caso, as reflexões não incomodam para entender a voz falada pois elas aumentam a intensidade do som que chega ao ouvido. No caso de música, estas reflexões favorecem a mistura (*amalgama*) dos sons contribuindo para o colorido musical. Quando o som é refletido de forma reiterativa, se tem a **reverberação**. Esta pode-se ser atenuada utilizando superfícies inclinadas ou materiais absorventes. O tamanho da sala afeta diretamente o valor do chamado *tempo de reverberação* (τ): quanto maior a sala mais demora o som em viajar entre as paredes e, maior será o valor de τ . O tamanho de uma sala para música de câmara por exemplo, que requer tempos de reverberação da ordem de 1 seg. para uma boa execução, deve ter um volume entre 500 e 5 mil m³ (Figura 5).

Figura 5



O valor típico do tempo de reverberação (τ) para salas de aula é de 0.5 s. Em salas grandes há que cuidar também que o tempo entre o som direto e a primeira reflexão não seja maior que 1/20 s (0.05 seg) pois de outra forma os dois sons não se misturam senão que se escutam como sons separados. Para isto, muitas vezes se suspendem do teto grandes painéis refletores. Mais informações sobre correção acústica de ambientes e isolamento acústico podem ser encontradas em “Acústica Técnica” de E. Cruz da Costa.

Os tempos de reverberação podem ser calculados a partir da absorção A da superfície de área S , a qual se define como: $A = \alpha S$, onde α coeficiente de absorção do material (Tabela)

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Concreto pintado	0.05	0.06	0.07	0.09
Janela de vidro	0.25	0.18	0.12	0.07
Argamassa	0.09	0.07	0.05	0.05
Bloco de concreto	0.44	0.31	0.29	0.39
Piso de pedra	0.01	0.01	0.01	0.02
Piso de madeira	0.11	0.10	0.07	0.06
Piso de carpete	0.05	0.10	0.20	0.45
Telha acústica	0.93	0.83	0.99	0.99

Exemplos

a) Determine a absorção A a uma frequência de 1000 Hz de uma sala de 5 m de largura, 5 m de comprimento e 4 m de altura cujas paredes são de concreto pintado, piso de pedra e teto de argamassa. [Solução: $A = 7.1 \text{ m}^2$ ou 7.1 *sabins*]

b) Determine a absorção para a mesma sala se o teto for coberto com telhas acústicas e o piso for coberto por carpete. [Solução: $A = 35.25 \text{ sabins}$, ou seja a absorção total aumento de 7 a 35 sabins o que leva a uma diminuição do ruído reverberante de 7 dB)

2) As pesquisas de W.A. Sabine levaram a uma relação empírica para o tempo de reverberação τ (em seg), proporcional ao volume V da sala (m^3) e inversamente proporcional a absorção da superfície (em m^2 ou *sabins*):

$$\tau = 0.16 \frac{V}{A}$$

a) Determine o tempo de reverberação a 500 Hz para uma sala de 20 m de comprimento, 15 m de largura e 8 m de altura, cujas paredes são de concreto pintado o teto é de argamassa e o piso é de carpete no concreto.

b) Determine o tempo de reverberação da mesma sala a 2000 Hz

c) Em altas frequências, o ar também contribui para a absorção do som. O tempo de reverberação para um auditório será:

$$\tau = 0.16 \frac{V}{A + mV}$$

onde m representa a absorção do ar ($m = 0.12$ para o ar a 2000 Hz, 20 °C de temperatura e 30% de umidade relativa. *The Science of sound*. Thomas D. Rossing). Determine o tempo de reverberação a 2000 Hz da mesma sala anterior, na qual foram colocados 200 assentos, sendo que metade deles estão ocupados. O coeficiente de absorção da cadeira desocupada é $\alpha = 0.43$, e o da cadeira ocupada, $\alpha = 0.61$. [Solução: (a) 4.5 s (b) 1.9 s (c) 1.1 s]

Critérios de Acústica

Dependendo do uso para o qual um auditório foi projetado (palestras, sala de aula, sala de concertos, etc) é necessário otimizar parâmetros como o tempo de reverberação (τ) e o nível do som reverberante. A utilização de materiais absorventes diminui esses dois parâmetros. Otimizar o tempo de reverberação de uma sala exige um compromisso entre:

- definição ou clareza, o que requer τ curtos
- intensidade do som, o que exige um nível reverberação alto
- vivacidade (*liveness*), que requer τ longos

Um tempo bom de reverberação depende do tamanho do auditório (a razão volume/superfície) e do uso para o qual foi planejado. Um auditório destinado basicamente para palestras deve ter um tempo de reverberação mais curto do que um auditório destinado para música. Os estudos de acústica de auditórios levaram a estabelecer uma série de critérios subjetivos para acústicas:

1. **Aconchego** (*intimacy*). Um auditório tem uma acústica aconchegante quando a música soa como se estivesse sendo executada num pequeno auditório. O intervalo de tempo entre o som direto e o primeiro som refletido deve ser menor que 20 ms para que um auditório seja aconchegante. Em caso contrário, o auditor vai ter a sensação de estar numa caverna.
2. **Vivacidade** (*liveness*). Isso está relacionado basicamente ao tempo de reverberação para médias e altas frequências. O valor ótimo de τ depende do tamanho e a finalidade da sala. Uma sala com τ muito curto terá uma acústica *seca* enquanto que um valor de τ muito alto atrapalha a audição.
3. **Calor** (*warmth*). Isto está relacionado com *liveness* e *fullness* dos tons baixos. O tempo de reverberação abaixo de 250 Hz deve ser um pouco mais longo do que a médias e altas frequências.
4. **Brilho** (*brilliance*). Boa percepção de altas frequências. O valor de τ para altas frequências deve ser maior do que nas médias frequências (500 – 1000 Hz)
5. **Intensidade do som direto** (*loudness*). O auditório deve ser projetado de forma que nenhuma pessoa fique sentada muito longe da fonte de som (o som direto atenua com a distância). Quanto maior for a razão (intensidade do som reverberante / intensidade do som direto) maior o *fullness* do tom.
6. **Nível de som reverberante** (*reverberant sound level*). Este nível deve ser o mesmo em todo o auditório. Ele depende da potência da fonte e do valor de τ .

7. **Definição ou clareza** (*definition or clarity*). O nível do primeiro som direto deve ser maior que o nível do som reverberante em todos os lugares do auditório. Uma boa definição dos tons exige um τ curto e uma razão (intensidade do som reverberante / intensidade do som direto) pequena.
8. **Difusão ou uniformidade** (*diffusion or uniformity*). Uma boa distribuição do som é conseguida por difusão ou por superfícies reflectoras irregulares, evitando-se focalização do som, a produção de ecos e a existência de regiões de "sombras sonoras" (*sound shadows*).
9. **Balance e combinações** (*balance and blend*). Depende do desenho do palco ou estrado do auditório. Se ele tiver uma lagura de ~15 m, o teto deve ser relativamente baixo (10 m ou menos) é de forma irregular.
10. **Conjunto** (*ensemble*). No caso de salas de concerto, devem ser providenciadas superfícies refletoras a ambos lados e acima dos executantes de forma que estes possam escutar-se uns aos outros (*retorno*).
11. **Baixo nível de ruído** (*noise*). Para permitir um intervalo dinâmico amplo, o nível de ruído (*background noise*) deve ser menos de 24 dB a 1000 Hz. Os critérios de nível de ruído estão resumidos na Figura 23.9 do livro de Rossing.

Bibliografia

- Física*, volume 1, Paul Tipler, 4a edição (editora LTC, 2000) Capítulos 14 a 16
Física, volume 2, Resnick + Halliday + Krane, 4a edição (LTC) Capítulos 15, 19 e 20
Física Básica, Vol. 2, H.M. Nussenzveig (Blucher, 1983) Capítulos 5 e 6.
Acústica Técnica, Ennio Cruz da Costa (editora Edgard Blucher, 2003)
The Science of sound, Thomas D. Rossing, 2nd edition (Addison Wesley, 1990)
Physics and the sound of music, J.S. Rigden, 2nd edition (Wiley 1985)
Acoustique et Batiment, B. Grehant (Ed. Tec Doc, Paris, 1994) Acustica, arquitetura.
Instrumentos Musicales: artesanía y ciencia, Massmann & Ferrer (Dolmen, Chile, 1993)
Acústica Técnica, Ennio Cruz da Costa (editora Edgard Blucher, 2003)
Speech intelligibility studies in classrooms, J.S. Bradley, *Journal of Acoustical Society of America* vol. 80 (numero 3) pag. 846–854 (1986)
Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms, M. Hodgson, *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (4) 1810 – 1819 (1999)
Measurements and prediction of typical speech and background noise levels in university classrooms during lectures, M. Hodgson, *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (1) 226 – 233 (1999)
Rating, ranking, and understanding acoustical quality in university classrooms, M. Hodgson, *J. Acoust. Soc. Am.* 112 (2) 568 – 575 (2002)
The acoustics of concert halls, J. Bradley, G. Soulodre, *Physics World* (May 1997)
www.campanellaacoustics.com criterios de acustica para diferentes ambientes, definições de termos e conceitos