

Projetando caixas tipo **SUSPENSÃO ACÚSTICA**

Veja como projetar corretamente caixas do tipo fechado ou suspensão acústica empregando o método de Thiele-Small, através de práticas tabelas

por Homero Sette Silva

INTRODUÇÃO

O projeto de caixas tipo Suspensão Acústica pode ser executado com grande simplicidade se utilizarmos os parâmetros T-S, descritos em nosso artigo anterior, e seguirmos o método de análise e síntese proposto por SMALL.

Uma caixa tipo Suspensão Acústica compreende um gabinete totalmente fechado, exceto pelas aberturas necessárias à instalação dos transdutores o que, aliás, deve ser feito com todo o cuidado no sentido de se evitar vazamentos de ar, não só por imperfeições eventuais na justaposição dos painéis da caixa, bem como através de frestas deixadas quando da instalação do(s) falante(s) ou ainda, vazamentos de ar no próprio alto-falante, em geral causados pelo anel da suspensão externa (faz o acoplamento flexível entre o cone e a carcaça) quando feito de tecido com trama excessivamente aberta. Este problema deve ser resolvido através da aplicação de um impermeabilizante, que não perca a flexibilidade após a secagem, ou pela troca do referido anel (os de borracha oferecem boa vedação) ou ainda, rejeitando-se o falante.

Um determinado volume de ar, que confinado no interior de uma caixa comporta-se como se fosse um capacitor, assemelha-se a um indutor ao deslocar-se livremente, mas exibe um comporta-

mento resistivo quando forçado a atravessar estreitos orifícios, o que reduz o Fator de Qualidade da Caixa (QL ou QB), e implica na diminuição do rendimento e em alterações na curva de resposta.

Quando V_{as} , o volume equivalente do falante, é muito menor que o volume interno V_b da caixa onde está instalado, o sistema comporta-se como um Baffle Infinito; sendo V_{as} maior que V_b , teremos o comportamento preconizado para a Suspensão Acústica. No entanto, os dois casos serão indistintamente resolvidos pelo processo que utilizaremos.

CAIXA FECHADA X REFLETOR DE GRAVES

Como a Caixa Fechada (Closed Box) não possui duto, desaparecem os cuidados necessários à correta sintonia do mesmo, que é algo da mais alta importância para o perfeito desempenho das caixas tipo Refletor de Graves (Bass Reflex), o que torna a construção de Caixas Fechadas algo mais simples de se fazer e menos sujeito aos desagradáveis resultados obtidos com dutos incorretamente sintonizados.

Por outro lado, um falante instalado em uma caixa Refletora de Graves produz uma frequência de corte F_3 menor (mais graves) que a obtida quando funcionando em uma Caixa Fechada de igual volume, conforme vemos na Fig. 1.

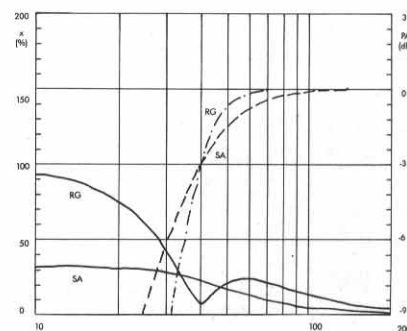


Fig. 1 -

Respostas Butterworth com o corte em 40 Hz obtidas em caixas tipo Refletor de Graves e Suspensão Acústica, com $V_b = 100$ litros

Falante RG: $F_s = 40$ Hz, $Q_{ts} = 0.4$, $Q_{es} = 0.5$, $V_{as} = 113$ litros
 $N_o = 1.4\%$

Falante SA: $F_s = 22.6$, $Q_{ts} = 0.4$, $Q_{es} = 0.5$, $V_{as} = 212$
 $N_o = 0.47\%$

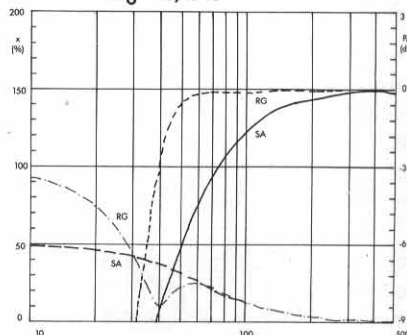


Fig. 2 -

Respostas obtidas com um mesmo falante ($F_s = 40$ Hz, $Q_{ts} = 0.4$, $Q_{es} = 0.5$, $V_{as} = 100$ e $N_o = 1.2\%$) colocado em caixas Refletor de Graves e Suspensão Acústica, as duas com $V_b = 100$ litros

Quando projetadas para um mesmo tipo de resposta, com iguais volume e frequência de corte, o Refletor de Graves será significativamente mais eficiente, o que justifica a atual preponderância desse sistema, e é ilustrado pela Fig. 2.

Sob o ponto de vista do deslocamento do cone, os dois sistemas também apresentam diferenças importantes, que podem ser visualizadas nas escalas X(%) das Figs. 1 e 2. O Refletor de Graves, com um deslocamento muito pequeno no cone para frequências em torno de F_b (frequência de sintonia do duto), apresenta um deslocamento relativo de 100% para frequências extremamente baixas; já na Caixa Fechada, o deslocamento relativo nas frequências inferiores a F_c tenderá para um valor proporcional ao quadrado de F_s/F_c (sempre inferior a 1, excetuando o caso do Baffle Infinito, onde $F_c = F_s$), ou seja, o deslocamento do cone para frequências infra-sônicas será muito menor que no caso do Refletor de Graves.

Por esta razão, recomenda-se o uso de filtros de "rumble" em sistemas Bass Reflex, cujo corte poderia estar em F_b , ou um pouco mais abaixo.

No entanto, a Caixa Fechada, por ser um sistema de segunda ordem, tende a oferecer uma melhor resposta transitória que o Bass Reflex, de quarta ordem, o que decide a questão por parte de alguns audiófilos, que não abrem mão do sistema Caixa Fechada.

TIPOS DE RESPOSTA

A resposta de frequência em uma Caixa Fechada é essencialmente dependente do Fator de Qualidade do Sistema, Q_{tc} , que está relacionado com o Fator de Qualidade do falante Q_{ts} através da equação 1.

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{1 + \alpha} \quad (1)$$

$$\text{onde: } \alpha = V_{as}/V_b \quad (2)$$

Como α deverá ser sempre positivo, Q_{tc} não poderá ser inferior a Q_{ts} . Assim, com um falante de $Q_{ts} = 0.8$ não poderemos ter $Q_{tc} = 0.7$.

Da mesma maneira que um falante ao ar livre (ou em um Baffle Infinito) apresenta um pico na curva da impedância da bobina, exatamente na Frequência de Ressonância F_s , ao ser instalado em uma caixa fechada, esse pico passa a ocorrer em uma frequência F_c , sempre maior que F_s :

$$F_c = F_s \sqrt{1 + \alpha} \quad (3)$$

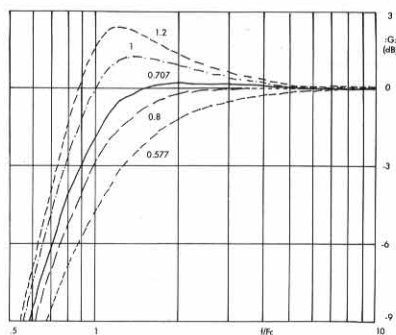


Fig. 3 -

Respostas obtidas em caixas tipo Suspensão Acústica para diversos valores de Q_{tc}

A Fig. 3, cuja escala horizontal está normalizada em relação a F_c , mostra a decisiva influência de Q_{tc} no aspecto da curva de resposta que, para valores de Q_{tc} superiores a 0.707 passa a exibir um pico. Para transformar os valores relativos do eixo horizontal em frequência, basta multiplicá-los pelo valor de F_c em questão. Assim, para $F_c = 40$ Hz, no lugar das graduações 0.5, 1 e 10 deveremos ler 20, 40 e 400 Hz, respectivamente, o que permite o uso da figura para qualquer valor de F_c .

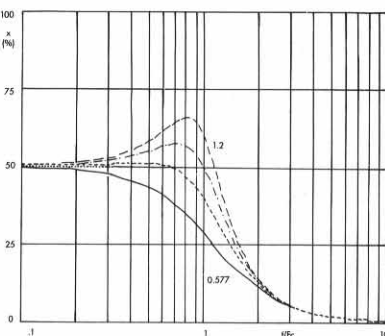


Fig. 4 -

Deslocamento do Cone, para os valores de Q_{tc} da Fig. 3 e F_s igual a 0.7 F_c , em caixa tipo Suspensão Acústica

O deslocamento do cone também é extremamente dependente do valor de Q_{tc} , conforme vemos nas Figs. 4 e 5 on-

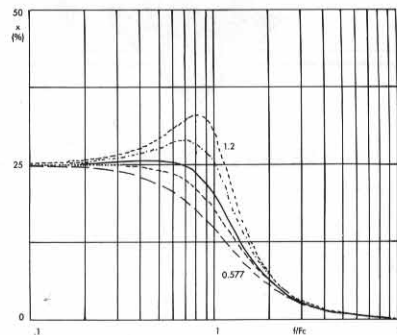


Fig. 5 -

Deslocamento do Cone, para os valores de Q_{tc} da Fig. 3, e F_s igual a 0.5 F_c , em caixa tipo Suspensão Acústica

de o eixo vertical, graduado em porcentagem, representa o produto da constante de deslocamento K_x pelo módulo da Função Normalizada de Deslocamento X . Como $K_x = (F_s/F_c)^2$, o valor para o qual tenderá o deslocamento do cone, para valores de frequência inferiores a F_c , será função também de F_s .

Caso Q_{tc} seja superior a 0.707, haverá também a presença de picos no deslocamento do cone.

O valor 0.707 para Q_{tc} corresponde a chamada resposta Butterworth, que se caracteriza por ser a mais plana de todas; já Q_{tc} 0.577 origina o alinhamento Bessel, onde o retardo é o mais plano possível.

A Tabela 1 mostra, para dez diferentes valores de Q_{tc} , a amplitude do pico na resposta R (dB), a frequência F_{Gp} (normalizada em relação a F_c), onde tal pico deverá ocorrer, a frequência F_{Xp} do pico no deslocamento do cone e o valor correspondente de F_3/F_c , ou seja, a frequência de corte, também normalizada em relação a F_c .

Tabela 1 -

Variáveis de interesse em caixas tipo Suspensão Acústica, para diversos valores de Q_{tc}

Q_{tc}	R (dB)	F_{Gp}/F_c	F_{Xp}/F_c	F_3/F_c
0.500	—	—	—	1.5538
0.577	—	—	—	1.2731
0.600	—	—	—	1.2091
0.707	—	—	—	1.0000
0.800	0.2130	2.1381	0.4677	0.8972
0.900	0.6878	1.6164	0.6186	0.8295
1.000	1.2494	1.4142	0.7071	0.7862
1.100	1.8330	1.3055	0.7660	0.7567
1.200	2.4118	1.2377	0.8079	0.7358
1.300	2.9741	1.1917	0.8391	0.7203

EXEMPLO DE PROJETO

Uma maneira bastante simples de projetar caixas do tipo fechado é através de tabelas que, para um determinado valor de Q_{tc} , informa os valores de α correspondentes a diversos valores de Q_{ts} , conforme o fazem as Tabelas 2, 3 e 4 para valores de Q_{tc} respectivamente iguais a 0,577, 0,707 e 1.

Para exemplificar, suponhamos que um falante de $F_s = 25$ Hz, $Q_{ts} = 0.4$ e $V_s = 100$ litros deva ser utilizado em uma caixa tipo Suspensão Acústica, cujo volume queremos determinar, tendo sido escolhido um Q_{tc} igual 1.

Para isso, basta consultar a Tabela 4 para obtermos $\alpha = V_s/V_b = 5,25$ o que dará um V_b igual a $100/5,25$, ou seja, 19 litros.

Para a obtenção da Frequência de

Corte F_3 deveremos usar o valor de F_3/F_s correspondente aos Q_{ts} de 0.4 que vale 1,9654 o que nos permite calcular $F_3 = 25 \cdot 1,9654 = 49,1$ Hz que é a frequência de corte do sistema.

Ainda na Tabela 4, através de $F_c/F_s = 2.5$, poderemos comprovar o projeto através da medição do pico na curva de impedância, que deverá ser encontrado em $2,5 \cdot 25$, ou seja, 62,5 Hz, que é o valor de F_c .

Tabela 2

$Q_{tc} = 0.577$			
Q_{ts}	α	F_3/F_s	F_c/F_s
0.1000	32.3333	7.3440	5.7735
0.1100	26.5482	6.6764	5.2486
0.1200	22.1482	6.1200	4.8113
0.1300	18.7239	5.6492	4.4412
0.1400	16.0068	5.2457	4.1239
0.1500	13.8148	4.8960	3.8490
0.1600	12.0208	4.5900	3.6084
0.1700	10.5340	4.3200	3.3962
0.1800	9.2881	4.0800	3.2075
0.1900	8.2336	3.8653	3.0387
0.2000	7.3333	3.6720	2.8868
0.2100	6.5586	3.4971	2.7493
0.2200	5.8871	3.3382	2.6243
0.2300	5.3012	3.1930	2.5102
0.2400	4.7870	3.0600	2.4056
0.2500	4.3333	2.9376	2.3094
0.2600	3.9310	2.8246	2.2206
0.2700	3.5725	2.7200	2.1383
0.2800	3.2517	2.6229	2.0620
0.2900	2.9635	2.5324	1.9909
0.3000	2.7037	2.4480	1.9245
0.3100	2.4686	2.3690	1.8624
0.3200	2.2552	2.2950	1.8042
0.3300	2.0609	2.2255	1.7495
0.3400	1.8835	2.1600	1.6981
0.3500	1.7211	2.0983	1.6496
0.3600	1.5720	2.0400	1.6038
0.3700	1.4349	1.9849	1.5604
0.3800	1.3084	1.9326	1.5193
0.3900	1.1915	1.8831	1.4804
0.4000	1.0833	1.8360	1.4434
0.4100	0.9829	1.7912	1.4082
0.4200	0.8896	1.7486	1.3746
0.4300	0.8028	1.7079	1.3427
0.4400	0.7218	1.6691	1.3122
0.4500	0.6461	1.6320	1.2830
0.4600	0.5753	1.5965	1.2551
0.4700	0.5090	1.5626	1.2284
0.4800	0.4468	1.5300	1.2028
0.4900	0.3883	1.4988	1.1783
0.5000	0.3333	1.4688	1.1547
0.5100	0.2816	1.4400	1.1321
0.5200	0.2327	1.4123	1.1103
0.5300	0.1867	1.3857	1.0893
0.5400	0.1431	1.3600	1.0692
0.5500	0.1019	1.3353	1.0497
0.5600	0.0629	1.3114	1.0310
0.5700	0.0260	1.2884	1.0129

Tabela 3

$Q_{tc} = 0.707$			
Q_{ts}	α	F_3/F_s	F_c/F_s
0.2000	11.5000	3.5355	3.5355
0.2100	10.3379	3.3672	3.3672
0.2200	9.3306	3.2141	3.2141
0.2300	8.4518	3.0744	3.0744
0.2400	7.6806	2.9463	2.9463
0.2500	7.0000	2.8284	2.8284
0.2600	6.3964	2.7196	2.7196
0.2700	5.8587	2.6189	2.6189
0.2800	5.3776	2.5254	2.5254
0.2900	4.9453	2.4383	2.4383
0.3000	4.5556	2.3570	2.3570
0.3100	4.2029	2.2810	2.2810
0.3200	3.8828	2.2097	2.2097
0.3300	3.5914	2.1427	2.1427
0.3400	3.3253	2.0797	2.0797
0.3500	3.0816	2.0203	2.0203
0.3600	2.8580	1.9642	1.9642
0.3700	2.6523	1.9111	1.9111
0.3800	2.4626	1.8608	1.8608
0.3900	2.2873	1.8131	1.8131
0.4000	2.1250	1.7678	1.7678
0.4100	1.9744	1.7247	1.7247
0.4200	1.8345	1.6836	1.6836
0.4300	1.7042	1.6444	1.6444
0.4400	1.5826	1.6071	1.6071
0.4500	1.4691	1.5713	1.5713
0.4600	1.3630	1.5372	1.5372
0.4700	1.2635	1.5045	1.5045
0.4800	1.1701	1.4731	1.4731
0.4900	1.0825	1.4431	1.4431
0.5000	1.0000	1.4142	1.4142
0.5100	0.9223	1.3865	1.3865
0.5200	0.8491	1.3598	1.3598
0.5300	0.7800	1.3342	1.3342
0.5400	0.7147	1.3095	1.3095
0.5500	0.6529	1.2856	1.2856
0.5600	0.5944	1.2627	1.2627
0.5700	0.5389	1.2405	1.2405
0.5800	0.4863	1.2192	1.2192
0.5900	0.4364	1.1985	1.1985
0.6000	0.3889	1.1785	1.1785
0.6100	0.3437	1.1592	1.1592
0.6200	0.3007	1.1405	1.1405
0.6300	0.2598	1.1224	1.1224
0.6400	0.2207	1.1049	1.1049
0.6500	0.1834	1.0879	1.0879
0.6600	0.1478	1.0714	1.0714
0.6700	0.1138	1.0554	1.0554
0.6800	0.0813	1.0399	1.0399
0.6900	0.0502	1.0248	1.0248

Como $Q_{ts} > 0.707$, existirão picos na resposta e na curva de deslocamento do cone. Para calcular o pico na resposta, basta consultar a Tabela 1 que nos informa ser o mesmo igual a 1,25 dB. Para sabermos sua localização, basta multiplicar o respectivo valor de FGp/Fc , no caso 1,4142, pelo valor de F_c , ou seja, 62,5 o que nos dá 88,4 Hz.

De modo análogo, o pico na curva de deslocamento do cone estará situado em $0,7071 \cdot 62,5 = 44,2$ Hz.

O resultado do projeto poderá ser visto na Fig. 6, onde os valores calculados através das tabelas poderão ser confirmados.

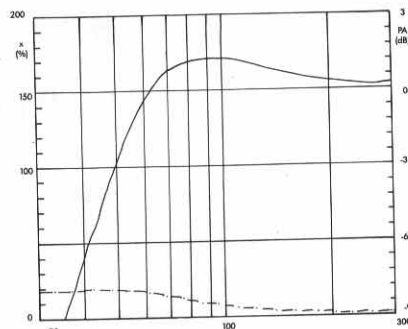


Fig. 6 -

Curvas de Resposta e do Deslocamento Relativo do Cone obtidas em caixa tipo suspensão acústica com 19 litros, $Q_{tc} = 1$ e um falante onde $F_s = 25$ Hz, $Q_{ts} = 0.4$ e $V_{as} = 100$ litros



RELAÇÕES ÚTEIS

O projeto através de tabelas é bastante simples mas tem a limitação de que nem sempre dispomos da tabela apropriada ao caso de interesse. Para esse e outros fins, encontram-se resumidas na Fig. 7 diversas relações de interesse para a análise e o projeto de sistemas do tipo Caixa Fechada.

Tabela 4

$Q_{tc} = 1.000$			
Q_{ts}	α	F_3/F_s	F_c/F_s
0.3000	10.1111	2.6205	3.3333
0.3100	9.4058	2.5360	3.2258
0.3200	8.7656	2.4567	3.1250
0.3300	8.1827	2.3823	3.0303
0.3400	7.6505	2.3122	2.9412
0.3500	7.1633	2.2461	2.8571
0.3600	6.7161	2.1838	2.7778
0.3700	6.3046	2.1247	2.7027
0.3800	5.9252	2.0688	2.6316
0.3900	5.5746	2.0158	2.5641
0.4000	5.2500	1.9654	2.5000
0.4100	4.9488	1.9174	2.4390
0.4200	4.6689	1.8718	2.3810
0.4300	4.4083	1.8283	2.3256
0.4400	4.1653	1.7867	2.2727
0.4500	3.9383	1.7470	2.2222
0.4600	3.7259	1.7090	2.1739
0.4700	3.5269	1.6727	2.1277
0.4800	3.3403	1.6378	2.0833
0.4900	3.1649	1.6044	2.0408
0.5000	3.0000	1.5723	2.0000
0.5100	2.8447	1.5415	1.9608
0.5200	2.6982	1.5118	1.9231
0.5300	2.5600	1.4833	1.8868
0.5400	2.4294	1.4558	1.8519
0.5500	2.3058	1.4294	1.8182
0.5600	2.1888	1.4038	1.7857
0.5700	2.0779	1.3792	1.7544
0.5800	1.9727	1.3554	1.7241
0.5900	1.8727	1.3325	1.6949
0.6000	1.7778	1.3103	1.6667
0.6100	1.6875	1.2888	1.6393
0.6200	1.6015	1.2680	1.6129
0.6300	1.5195	1.2479	1.5873
0.6400	1.4414	1.2284	1.5625
0.6500	1.3669	1.2095	1.5385
0.6600	1.2957	1.1911	1.5152
0.6700	1.2277	1.1734	1.4925
0.6800	1.1626	1.1561	1.4706
0.6900	1.1004	1.1394	1.4493
0.7000	1.0408	1.1231	1.4286
0.7100	0.9837	1.1073	1.4085
0.7200	0.9290	1.0919	1.3889
0.7300	0.8765	1.0769	1.3699
0.7400	0.8262	1.0624	1.3514
0.7500	0.7778	1.0482	1.3333
0.7600	0.7313	1.0344	1.3158
0.7700	0.6866	1.0210	1.2987
0.7800	0.6437	1.0079	1.2821
0.7900	0.6023	0.9951	1.2658

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{1 + \alpha} \quad (1)$$

$$\alpha = V_{as}/V_b \quad (2)$$

$$F_c = F_s \sqrt{1 + \alpha} \quad (3)$$

$$K_x = (F_s/F_c)^2 \quad (4)$$

$$F_d = F_s \cdot \sqrt{1 - 1/2Q_{ts}^2} \quad (5)$$

$$X_d = Q_{ts}^2 / \sqrt{Q_{ts}^2 - 0.25} \quad (6)$$

$$R_{(dB)} = 20 \log (Q_{tc}^2 / \sqrt{Q_{tc}^2 - 0.25}) \quad (7)$$

$$F_3 = F_c \sqrt{-1 + 1/2Q_{tc}^2 + \sqrt{(-1 + 1/2Q_{tc}^2)^2 + 1}} \quad (8)$$

Para as demais relações V_{as} em litros, V_d em cm^3 e $20^\circ C$

$$n_o = 9,6 \cdot 10^{-10} F_s^3 \cdot V_{as} / Q_{es} \quad (9)$$

$$n_o(dB) = 10 \log(n_o) \quad (10)$$

$$L_p(dB) = 112 + n_o(dB) \quad (11)$$

$$P_{ED} = \frac{0,447 \cdot 10^{-3} \cdot V_d^2 \cdot F_s \cdot Q_{es}}{V_{as} \cdot K_x^2 \cdot X_d^3} \quad (12)$$

Fig. 7 - Relações úteis para a análise e projeto de sistemas tipo Caixa Fechada

REFERÊNCIAS

1 - CLOSED-BOX LOUSPEAKER SYSTEMS PART I: ANALYSIS

Richard H. Small

JAES, Vol. 20, N° 10, Dezembro de 1972

2 - THE LOUSPEAKER DESIGN COOKBOOK

Vance Dickason

The Marshall Jones Co. Publishers, 1987