

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
GABINETE DE CONSTRUÇÕES CIVIS

ANTÓNIO PEDRO OLIVEIRA DE CARVALHO

**ESTUDO ACÚSTICO
DE
DIVISÓRIAS AMOVÍVEIS**

ANÁLISE MODELAR E DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES

PORTO
1988

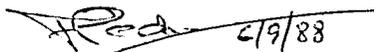
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
GABINETE DE CONSTRUÇÕES' CIVIS

Sr. Prof. Barbosa de Azevedo,

Como a liberdade de lhe oferecer o
1º exemplar de 1ª Tese de Mestrado.

ANTÓNIO PEDRO OLIVEIRA DE CARVALHO
ENGENHEIRO CIVIL (U.P.)

Com os meus melhores cumprimentos


4400 VILA NOVA DE GAIA

RUA DE TIMOR, 16-R/C DT.º
TELEF. 301989

ESTUDO ACÚSTICO DE DIVISÓRIAS AMOVÍVEIS
ANÁLISE MODELAR E DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES

ANTÓNIO PEDRO OLIVEIRA DE CARVALHO
ENG.º CIVIL (U.P.)

TESE APRESENTADA PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CONSTRUÇÃO DE
EDIFÍCIOS PELA FACULDADE DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

PORTO, 1988

624(743)/CAR-2/EST

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca	
Nº	84032 7
CDU	624(743)
Data	4 1 9 1 9

A S.A.R. D. Duarte, Duque de Bragança
e pela RESTAURAÇÃO de PORTUGAL.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho quero deixar expresso o meu reconhecido agradecimento a todos que de alguma forma contribuíram para a sua realização:

Ao Professor Pedro Martins da Silva, pela eficaz orientação deste estudo, pela leitura extremamente atenta e a crítica cuidada deste texto e muito em especial, pelos estímulos e incentivos constantes e amigos que sempre me soube transmitir, que profundamente agradeço, e sem os quais não seria possível a conclusão deste trabalho;

Aos Professores Vitor Abrantes e Barbosa de Abreu pelas sugestões oportunas, palavras amigas e apoio constante;

Ao Professor Jürgen Gruber, o acolhimento amigo durante a curta estadia na Universidade Técnica de Berlim;

As Engenheiras Conceição Oliveira e Helena Rosmaninho, pelo acompanhamento e empenho concedidos à orientação da execução dos painéis nas empresas corticeiras envolvidas;

Ao Engenheiro Ribeiro dos Santos a confiança e o incentivo transmitidos;

Ao Professor Bento Coelho e ao Engenheiro Lemos Salta pela preciosa ajuda na pesquisa bibliográfica e pela cedência de numerosos textos;

Ao Centro de Engenharia Civil da Universidade do Porto, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e às firmas Corticeira Amorim, Lda e Ipocork S.A., os apoios recebidos que foram indispensáveis à concretização deste trabalho.

Pela laboriosa realização do trabalho agradeço a colaboração dos experimentadores do L.N.E.C. Fernando Mateus e José Carvalho, o empenho dedicado de Maria de Lurdes Lopes na dactilografia do texto e o auxílio constante da funcionária Balbina Bernardes.

Finalmente, aos meus colegas do Gabinete de Construções Cívicas de quem tive sempre uma palavra amiga e muito, muito em especial, ao meu amigo Engenheiro Rui Calejo pelo seu constante, profundo e activo empenhamento (por vezes mesmo violento...) com que acompanhou (e "empurrou") todo o evoluir deste trabalho e ao qual se fica a dever a criação do estado de espírito necessário à sua conclusão.

ESTUDO ACÚSTICO DE DIVISÓRIAS AMOVÍVEIS
Análise modelar e desenvolvimento de soluções

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento acústico de paredes divisórias leves, em especial as vulgarmente denominadas do tipo sanduíche e a sua aplicação experimental a um género concreto de divisórias, constituídas por gesso cartonado e aglomerados de cortiça. Igualmente apresenta um novo modelo matemático para a quantificação do isolamento sonoro desse tipo de divisórias.

No primeiro Capítulo faz-se uma revisão dos conhecimentos teóricos relativos ao domínio em estudo. No segundo Capítulo aborda-se a modelação físico-matemática deste caso e apresentam-se diversas formulações sugeridas por vários autores. Propõe-se uma nova modelação, de formulação simples, para o problema em estudo.

No terceiro Capítulo descreve-se o desenvolvimento experimental empreendido sendo descritas as instalações e técnicas de ensaio. No quarto Capítulo apresenta-se o conjunto de resultados obtidos bem como a comparação dos mesmos com os determinados por aplicação do modelo proposto. No último Capítulo analisa-se a legislação aplicável e fornecem-se pistas para desenvolvimentos futuros do tema.

Em Apêndice analisam-se alguns programas para micro-computador criados no desenvolvimento deste estudo.

ÍNDICE

	Pág.
Índice de Figuras e Quadros	12
Lista de Símbolos	24
INTRODUÇÃO GERAL	27
Capítulo I - DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO EM ESTUDO	
1 - Introdução	29
2 - Diferentes tipos de ruídos nos edifícios	31
3 - Definição de Isolamento. Generalidades	
3.1 - Isolamento entre recintos fechados	
3.1.1 - Isolamento sonoro efectivo	35
3.1.2 - Isolamento sonoro corrigido	36
3.1.3 - Coeficiente de transmissão e índice de redução sonora	36
3.1.4 - Índice de redução sonora a sons aéreos	37
3.1.5 - Relação entre isolamento sonoro efectivo e índice de redução sonora	38
4 - Isolamento de ruídos interiores	
4.1 - Tipos de elementos verticais de separação	39
4.2 - Caracterização sumária do campo sonoro para estudo modelar	42
5 - Divisórias homogéneas	
5.1 - Introdução	43
5.2 - Evolução do estudo	43
5.3 - Modelação matemática	
5.3.1 - Modelo inercial	45

	Pág.
a) incidência normal	48
b) segundo um ângulo de incidência	48
c) campo difuso	50
5.3.2 - Modelo elasto-dinâmico	51
a) coincidência	52
b) amortecimento interno	54
 6 - Conclusão	 57
 Capítulo II - DIVISÓRIAS NÃO HOMOGÊNEAS	
 1 - Introdução	 58
 2 - Evolução do estudo	 60
 3 - Caracterização do problema	
3.1 - Parâmetros influentes e objectivos a atingir	64
a) camadas	65
b) condições de execução	65
c) características físicas	66
d) outros factores	67
3.2 - Tipos de abordagem teórica	68
a) tipo N	69
b) tipo M	69
 4 - Modelação matemática	
4.1 - Generalidades	71
4.2 - Modelo HICKMAN	
4.2.1 - Desenvolvimento teórico	71
4.2.2 - Desenvolvimento experimental	74
4.3 - Modelo KURTZE	
4.3.1 - Desenvolvimento teórico	76
4.3.2 - Desenvolvimento experimental	79
4.4 - Modelo SHARP	
4.4.1 - Desenvolvimento teórico	79
4.4.2 - Desenvolvimento experimental	82

	Pág.
4.5 - Modelo MEIER	
4.5.1 - Desenvolvimento teórico	84
4.5.2 - Desenvolvimento experimental	89
4.6 - Modelo VAL	
4.6.1 - Desenvolvimento teórico	91
4.7 - Modelo DYM	
4.7.1 - Desenvolvimento teórico	94
4.7.2 - Desenvolvimento experimental	97
4.8 - Modelo MOORE	
4.8.1 - Desenvolvimento teórico	99
4.8.2 - Desenvolvimento experimental	104
4.9 - Modelo GUYADER	
4.9.1 - Desenvolvimento teórico	109
4.9.2 - Desenvolvimento experimental	
4.9.2.1 - Incidência oblíqua	112
4.9.2.2 - Campo difuso	116
4.10 - Modelo ORDUBADI	
4.10.1 - Desenvolvimento teórico	117
4.10.2 - Desenvolvimento experimental	119
4.11 - Modelo proposto	
4.11.1 - Justificação	122
4.11.2 - Hipóteses de trabalho	123
4.11.3 - Divisória equivalente	128
a) massa equivalente	129
b) rigidez equivalente	129
5 - Conclusão	131
Capítulo III - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	
1 - Introdução	123
2 - Descrição da instalação de ensaio	
2.1 - Características físicas	134
2.2 - Características técnicas	
2.2.1 - Campo difuso	137

	Pág.
2.2.2 - Dimensões do painel - frequência limite	138
2.2.3 - Transmissão marginal	138
3 - Técnica de ensaio	
3.1 - Obtenção dos dados	
3.1.1 - Procedimento	139
3.1.2 - Equipamento utilizado	
3.1.2.1 - Equipamento de produção do campo sonoro	141
3.1.2.2 - Equipamento de medição e registo	141
3.1.2.3 - Instalação	142
3.2 - Tratamento dos dados	
3.2.1 - Cálculo	144
3.2.2 - Tratamento informático	
3.2.2.1 - Descrição breve	146
3.2.2.2 - Apresentação de resultados	147
4 - Caracterização das divisórias ensaiadas	
4.1 - Justificação	148
4.2 - Constituição	154
a) gesso cartonado	156
b) aglomerado composto de cortiça	158
c) rubbercork	158
4.3 - Execução e montagem	
4.3.1 - Utilização em laboratório	159
4.3.2 - Utilização in situ	160
5 - Conclusão	165
 Capítulo IV - RESULTADOS OBTIDOS - CONCLUSÕES	
1 - Introdução	166

2 - Resultados	
2.1 - Divisória D1	168
2.2 - Divisória D2	173
2.3 - Divisória D3	178
2.4 - Divisória D4	183
2.5 - Divisória dupla DD1/2	188
2.6 - Análise comparativa	194
3 - Conclusões	
3.1 - Comentários aos resultados dos ensaios	
3.1.1 - Análise individual	
3.1.1.1 - Divisória D1	201
3.1.1.2 - Divisória D2	202
3.1.1.3 - Divisória D3	202
3.1.1.4 - Divisória D4	203
3.1.1.5 - Divisória DD1/2	204
3.1.2 - Análise comparativa	205
3.2 - Comentários à aplicação do modelo proposto	210
Capítulo V - CONSIDERAÇÕES FINAIS	
1 - Análise à legislação portuguesa aplicável	215
2 - Pistas para desenvolvimento futuro	
2.1 - Desenvolvimento deste estudo	222
2.2 - Desenvolvimento do tema	224
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	225
APÊNDICE	
I - Quadro de características de alguns materiais utilizados na construção de edifícios	234

II - Programas de análise acústica para micro-computador

1 - Introdução	237
2 - Descrição dos programas	
2.1 - Análise geral	237
2.2 - Análise individual	
2.2.1 - Programa FRIA	238
2.2.2 - Programa PERCUTE	240
2.2.3 - Programa IA	242
2.2.4 - Programa IP	243
2.2.5 - Programa LDBA	243
2.2.6 - Programa MULTIGRA	244
3 - Folhas de dados	245
4 - Saídas Gráficas. Exemplos	248
5 - Listagens	
5.1 - Programa FRIA	268
5.2 - Programa PERCUTE	275
5.3 - Programa IA	282
5.4 - Programa IP	286
5.5 - Programa LDBA	290
5.6 - Programa MULTIGRA	293

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
CAPÍTULO I	
Fig. 1 - Som ou Ruído?	30
Fig. 2 - Comparação dos ruídos aéreos e dos ruídos de percussão.	32
Fig. 3 - Vibração e radiação acústica de um edifício submetido a ruídos de percussão.	33
Fig. 4 - Processos de transmissão de sons aéreos.	34
Fig. 5 - Tipos de Paredes Simples.	40
Fig. 6 - Tipos de Paredes Múltiplas.	41
Fig. 7 - Reforço de isolamento de uma parede.	41
Fig. 8 - Variação do ângulo de incidência para campo difuso.	42
Fig. 9 - Geometria do painel sanduíche infinito e das ondas acústicas.	47
Fig. 10 - Lei da Massa para um ângulo de incidência nulo (A) e variação de R_0 em função da frequência (B).	50
Fig. 11 - Índices de Redução Sonora para divisórias infinitas.	51
Fig. 12 - Evolução do isolamento sonoro efectivo de um elemento de compartimentação em função da frequência.	52

- Fig. 13 - Curva tipo do índice de redução sonora R em função da frequência, para um campo incidente difuso. 55
- CAPÍTULO II
- Fig. 14 - Transmissão através de um painel sanduíche aço-água-aço em função do ângulo de incidência para uma separação fixada ($g = 1.67$ cm; $h = 0,256$ cm; $f = 18$ KHz). 75
- Fig. 15 - Esquema da placa sanduíche e de circuito eléctrico equivalente. 77
- Fig. 16 - Índices de redução sonora do painel sanduíche aço-borracha-aço (os pontos indicam valores médios e a linha valores teóricos). 83
- Fig. 17 - Efeito teórico de espessuras diferentes dos paramentos (tracejado para espessura de 1.6 mm de aço e traço contínuo para espessura de 3,2 mm) com núcleo de borracha. 83
- Fig. 18 - Efeito teórico da espessura do núcleo de borracha em painel sanduíche com paramentos de aço com 3,2 mm de espessura (a-100 mm esp. núcleo; b-52 mm esp. núcleo; c-26 mm esp. núcleo; d-12 mm esp. núcleo). 83
- Fig. 19 - Efeito teórico da rigidez do material do núcleo, tendo paramentos de aço com $E = 200$ GPa (tracejado para $E = 500$ MPa e traço contínuo para $E = 5$ MPa). 83
- Fig. 20 - Elemento infinitesimal de painel sanduíche. 85

- Fig. 21 - Índice de Redução Sonora versus frequência, calculado para placas sanduíche com intervalo de integração de 0 a 82,5 graus ($h_3/h_1 = 1$, $h_2/h_1 = 20$). 89
- Fig. 22 - Índice de Redução Sonora versus frequência (a - valores medidos; b - valores calculados com intervalo de integração de 0 a 82,5 graus). 90
- Fig. 23 - Índices de Redução Sonora medidos. Lei da Massa para comparação. 90
- Fig. 24 - Índices de Redução Sonora versus frequência. Previsão para divisória de alto poder isolante. 93
- Fig. 25 - Vibração simétrica e anti-simétrica. Deslocamentos das faces. 94
- Fig. 26 - Impedâncias simétricas e anti-simétricas para incidência rasante (tracejado imp. simétrica; linha contínua impedância anti-simétrica). 98
- Fig. 27 - Índice de Redução Sonora - comparação. Otimização. 99
- Fig. 28 - Deslocamentos simétricos e anti-simétricos e forças por unidade de área de um painel composto. 100
- Fig. 29 - Resultados experimentais para o Índice de Redução Sonora e para painel sanduíche de 76 mm de espessura (núcleo de poliestireno expandido). 105

- Fig. 30 - Resultados para o Índice de Redução Sonora para painel sanduíche de 38 mm de espessura (núcleo de poliestireno expandido). 106
- Fig. 31 - Resultados para o Índice de Redução Sonora para painel sanduíche de 76 mm de espessura (núcleo de "favo de mel"). 107
- Fig. 32 - Resultados para o Índice de Redução Sonora para painel sanduíche (núcleo de "favo de mel" flexível). 108
- Fig. 33 - Índice de Redução Sonora de painel sanduíche (material plástico com núcleo de Néoprène). Comparação teoria-experiência (tracejado para valores teóricos, traço contínuo para valores experimentais). 113
- Fig. 34 - Índice de Redução Sonora de painel sanduíche (paramentos de aço e núcleo de material plástico). Comparação teoria-experiência (tracejado para valores teóricos, traço contínuo para valores experimentais). 113
- Fig. 35 - Influência do amortecimento da camada interna (núcleo). 115
- Fig. 36 - Influência da colagem no amortecimento. 116
- Fig. 37 - Índice de Redução Sonora. Influência dos paramentos. 116
- Fig. 38 - Índice de Redução Sonora de painel sanduíche, aço-fibra de vidro compósita-aço (tracejado para valores experimentais, traço contínuo para valores teóricos). 117

- Fig. 39 - Efeito teórico do amortecimento no núcleo (tracejado para $\eta = 0,1$; traço contínuo para $\eta = 0,005$). 117
- Fig. 40 - Índice de Redução Sonora de painel sanduíche de 76 mm de espessura do núcleo (poliestireno) e 6 mm de espessura dos paramentos em contraplacado (traço contínuo para valores previstos e círculos para valores medidos). 120
- Fig. 41 - Índice de Redução Sonora de painel sanduíche de 76 mm de espessura do núcleo (poliestireno) e 10 mm de espessura dos paramentos em contraplacado (traço contínuo para valores previstos e círculos para valores medidos). 121
- Fig. 42 - Índice de Redução Sonora versus frequência. Efeito por variação do amortecimento e outras características. 124
- Fig. 43 - Esquema de divisória sanduíche. 129
- CAPÍTULO III
- Fig. 44 - Instalação de ensaio (L.N.E.C.). 136
- Fig. 45 - Esquema da instrumentação para a determinação do tempo de reverberação. 142
- Fig. 46 - Esquema da instrumentação utilizada nos ensaios efectuados. 143
- Fig. 47 - Quadro comparativo de custos de mão-de-obra (especializada e não especializada), em diversos países. 150

	Pág.
Fig. 48 - Quadro comparativo de custos por metro quadrado de apartamentos e edifícios unifamiliares, em diversos países.	152
Fig. 49 - Quadro comparativo de preços por metro quadrado de apartamentos (novos e usados) em diversos países da Comunidade Económica Europeia.	152
Fig. 50 - Esquema das paredes divisórias sanduíche testadas (D1 a D4).	155
Fig. 51 - Esquema da parede divisória dupla (DD1/2) com os dois sentidos de emissão do som (1 e 2).	155
Fig. 52 - Esquema de placas de gesso cartonado.	157
Fig. 53 - Gama de produção de placas de gesso cartonado.	157
Fig. 54 - Esquema de montagem de paredes divisórias com painéis amovíveis.	160
Fig. 55 - Esquema e cortes de painéis amovíveis. Pormenores de fixação.	161
Fig. 56 - Pormenor de ligação da divisória amovível com o pavimento.	162
Fig. 57 - Pormenor de ligação da divisória amovível com o pavimento em zonas húmidas.	162
Fig. 58 - Pormenor de ligação da divisória amovível com o tecto.	163
Fig. 59 - Fases de tratamento das juntas entre painéis.	163

Fig. 60 - Tipos de elementos de fixação para painéis amovíveis. 164

CAPÍTULO IV

Fig. 61 - Esquema da parede divisória amovível D1. 168

Fig. 62 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D1. 169

Fig. 63 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisória D1 (resultados experimentais). 170

Fig. 64 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do Índice de Redução Sonora para a divisória D1. 171

Fig. 65 - Folha de "Listagem de Dados" da divisória D1. 172

Fig. 66 - Esquema da parede divisória amovível D2. 173

Fig. 67 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D2. 174

Fig. 68 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisória D2 (resultados experimentais). 175

Fig. 69 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do Índice de Redução Sonora para a divisória D2. 176

	Pág.
Fig. 70 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória D2.	177
Fig. 71 - Esquema da parede divisória amovível D3.	178
Fig. 72 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D3.	179
Fig. 73 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisória D3 (resultados experimentais).	180
Fig. 74 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do Índice de Redução Sonora para a divisória D3.	181
Fig. 75 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória D3.	182
Fig. 76 - Esquema da parede divisória amovível D4.	183
Fig. 77 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D4.	184
Fig. 78 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisória D4 (resultados experimentais).	185
Fig. 79 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do Índice de Redução Sonora para a divisória D4.	186
Fig. 80 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória D4.	187

	Pág.
Fig. 81 - Esquema da parede divisória dupla DD1/2 (com os dois sentidos de emissão do som: 1 e 2).	188
Fig. 82 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória DD1/2.1.	189
Fig. 83 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória DD1/2.2.	190
Fig. 84 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisória DD1/2 (resultados experimentais para os dois casos de sentidos de emissão do som: 1 e 2).	191
Fig. 85 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória DD1/2.1.	192
Fig. 86 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória DD1/2.2.	193
Fig. 87 - Diagrama comparativo dos Índices de Redução Sonora das divisórias D1 e D2.	196
Fig. 88 - Diagrama comparativo dos Índices de Redução Sonora das divisórias D1 e D3.	197
Fig. 89 - Diagrama comparativo dos Índices de Redução Sonora das divisórias D3 e D4.	198
Fig. 90 - Diagrama comparativo dos Índices de Redução Sonora das divisórias D1, D4 e DD1/2.1.	199
Fig. 91 - Quadro comparativo dos índices caracterizadores do isolamento sonoro para as diversas paredes divisórias.	200

- Fig. 92 - Quadro comparativo dos índices de isolamento sonoro a sons aéreos, I_a , obtidos por ensaio e por aplicação do modelo. 212

CAPÍTULO V

- Fig. 93 - Quadro comparativo dos valores mínimos do índice de Isolamento Sonoro a sons aéreos estipulados no Regulamento Geral sobre o Ruído e para os diversos tipos de edifícios. 217
- Fig. 94 - Índice de isolamento sonoro para os sons por condução aérea (I_a) em edifícios escolares. 218
- Fig. 95 - Índice de isolamento sonoro para sons por condução aérea (I_a) em edifícios destinados ao ensino de deficientes auditivos. 218
- Fig. 96 - Diagrama comparativo entre os índices de Redução Sonora obtidos para a divisória DDI/2.1 e para a divisória de alvenaria de tijolo de 7 cm com 1 cm de reboco em cada face. 221

APÊNDICE

- Fig. 97 - Folha de Dados para ensaios acústicos de divisórias (programa FRIA). 246
- Fig. 98 - Folha de Dados para ensaios acústicos de revestimentos de pisos (programa PERCUTE). 247
- Fig. 99 - Exemplo de folha de "Saída de Resultados" do programa FRIA. 249

Fig. 100 - Exemplo de folha de "Listagem dos Dados" do programa FRIA.	250
Fig. 101 - Exemplo de saída gráfica do programa FRIA.	251
Fig. 102 - Exemplo de saída gráfica do programa FRIA. (variação no tamanho dos pontos e na escala das ordenadas).	252
Fig. 103 - Exemplo de folha de "Saída de Resultados" do programa PERCUTE.	253
Fig. 104 - Exemplo de folha de "Listagem dos Dados" do Programa PERCUTE.	254
Fig. 105 - Exemplo de saída gráfica do programa PERCUTE.	255
Fig. 106 - Exemplo do diálogo utilizador-terminal do programa IA.	256
Fig. 107 - Exemplo de saída de resultados do programa IA.	257
Fig. 108 - Exemplo do diálogo utilizador-terminal programa IP.	258
Fig. 109 - Exemplo de saída de resultados do programa IP.	259
Fig. 110 - Exemplo de saída gráfica do programa IP.	260
Fig. 111 - Exemplo do diálogo utilizador-terminal do programa LDBA.	261
Fig. 112 - Exemplo de saída de resultados do programa LDBA.	262

- Fig. 113 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA
(um só gráfico, pontos de tamanho médio). 263
- Fig. 114 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA
(dois gráficos, pontos de tamanho reduzido). 264
- Fig. 115 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA
(três gráficos, pontos de tamanho reduzido,
escala dinâmica nas ordenadas). 265
- Fig. 116 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA
(quatro gráficos, pontos omitidos, título di-
verso). 266

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
A	Área de absorção equivalente
a	dimensão da placa
B	Módulo de rigidez à flexão da parede
b	dimensão da placa
c	Velocidade de propagação do som
co	Velocidade de propagação do som no ar
ct	Velocidade de propagação das ondas transversais
D	Isolamento global
Dc	Isolamento sonoro corrigido
De	Isolamento sonoro efectivo
E	Módulo de elasticidade do material (Young)
f	Frequência
fc	Frequência crítica
G	Módulo de elasticidade transversal (ou módulo de Coulomb)
h	Espessura
Ia	Índice de isolamento sonoro a sons aéreos
Ii	Intensidade de som incidente
It	Intensidade de som transmitido
i	$\sqrt{-1}$
k	Número de onda
L	Nível sonoro

m	Massa superficial por unidade de área (kg/m ²)
mt	Massa superficial total por unidade de área (kg/m ²)
R	Índice de redução sonora
Rd	Índice de redução sonora para campo difuso (teórico)
Rf	Índice de redução sonora para campo difuso (empírico - sem a consideração das ondas rasantes)
S	Área do elemento separador entre recintos contíguos
T	Tempo de reverberação
u	Deslocamentos na direcção x1
v	Deslocamentos na direcção x2
V	Volume
Z	Impedância
Za	Impedância anti-simétrica
Zs	Impedância simétrica
Zo	Impedância do ar "modificada" ($= \rho_0 c_0 / \cos\theta$)
w	Deslocamentos na direcção x3
Δw	Largura da banda centrada na frequência crítica
η	Factor de perdas
θ	Ângulo de incidência

λ	Comprimento de onda
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Massa específica
ρ_0	Massa específica do ar
σ_{xy}	Tensões (para o plano dado)
τ	Coefficiente de transmissão
$\tau(\theta)$	Coefficiente de transmissão para ângulo de incidência
τ_d	Coefficiente de transmissão para campo difuso
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento (segundo o plano dado)
ϕ	Ângulo azimutal
w	Pulsção do movimento (frequência angular)
w_c	Pulsção do movimento (frequência angular) para a frequência crítica

INTRODUÇÃO GERAL

O objectivo deste trabalho é o estudo do isolamento sonoro de paredes divisórias. Nestas interessar-nos-emos pelas divisórias leves não homogéneas (multicamadas) e em especial as vulgarmente denominadas do tipo sanduíche. Para isso iremos estudar em particular os parâmetros caracterizadores da respectiva transmissão acústica entre compartimentos vizinhos.

O Capítulo I dá uma visão do domínio em estudo nomeadamente definindo os factores, características e parâmetros intervenientes mais importantes. É feita igualmente uma breve análise aos modelos clássicos de formulação matemática do comportamento acústico de paredes homogéneas, nomeadamente modelos inercial e elasto-dinâmico.

O Capítulo II detém-se exclusivamente nas divisórias não homogéneas. Após descrição da evolução do estudo deste tipo de paredes, o problema é definido através da análise dos parâmetros intervenientes e dos diversos tipos de abordagem teórica. Aborda de seguida a modelação matemática deste problema apresentando diversas formulações, sugeridas por vários autores, sobre este tema. Detém-se em particular nas expressões analíticas para o coeficiente de transmissão e/ou índice de redução sonora. Finalmente apresenta uma nova formulação que se pretende simples, e que permita obter resultados aceitáveis.

O Capítulo III trata do desenvolvimento experimental empreendido. São descritas as instalações e as técnicas de ensaio utilizadas. São caracterizadas as diversas divisórias amovíveis ensaiadas.

O Capítulo IV apresenta o conjunto de resultados obtidos bem como a comparação dos dados experimentais com a nova formulação proposta pelo autor. A validade dessa formulação é

analisada.

O Capítulo V analisa o comportamento das divisórias amovíveis à luz da legislação portuguesa aplicável e fornece pistas para desenvolvimento futuro do tema, nomeadamente a optimização de paredes amovíveis do tipo das testadas.

Em Apêndice a este texto são fornecidos e analisados alguns programas para micro-computador, utilizados na evolução e desenvolvimento deste estudo, sendo os mesmos descritos no essencial.

Em todo este trabalho procurou o autor seguir com rigor a terminologia de acústica instituída pela normalização portuguesa e em especial a da Norma-Portuguesa nº3225/1 a 4 de 1986 (34).

CAPÍTULO I

DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO EM ESTUDO

1 - INTRODUÇÃO

Tal como já Chaplin sugeria, os "Tempos Modernos" em que vivemos são caracterizados essencialmente por uma mecanização generalizada e promovem, por essa razão, a criação de uma envolvente acústica cada vez mais ruidosa.

Para o gradual aumento do nível sonoro da generalidade dos ambientes em que nos enquadrámos não é estranho o desenvolvimento da concentração urbana com a geração de tráfego (e de ruído) inerente a tal situação.

Mais grave do que assistir só ao "betonar" da paisagem é verificar que, de dia para dia, se está a "sonorizar" essa paisagem quase tornando as cidades em novas "Metropolis" de vida desagradável e angustiante.

Com o aproximar do novo século, as preocupações sociais pela qualidade do ambiente alastram e generalizam-se. Por todo o lado a análise e o estudo dos temas inerentes ao ruído se aprofundam e se tornam prioritárias. Um ambiente ruidoso começa a ser encarado, pela generalidade da população, como um MAU AMBIENTE e mesmo como um AMBIENTE POLUÍDO.

Mas separar e classificar os sons em ruídos agradáveis ou funestos não é tarefa linear nem isenta de dificuldades.

Um som pode ser considerado agradável para uma pessoa e tornar-se um ruído incomodativo para outra (Fig. 1). É vulgar ouvir-se dizer que só são desagradáveis os ruídos provocados pelos outros.

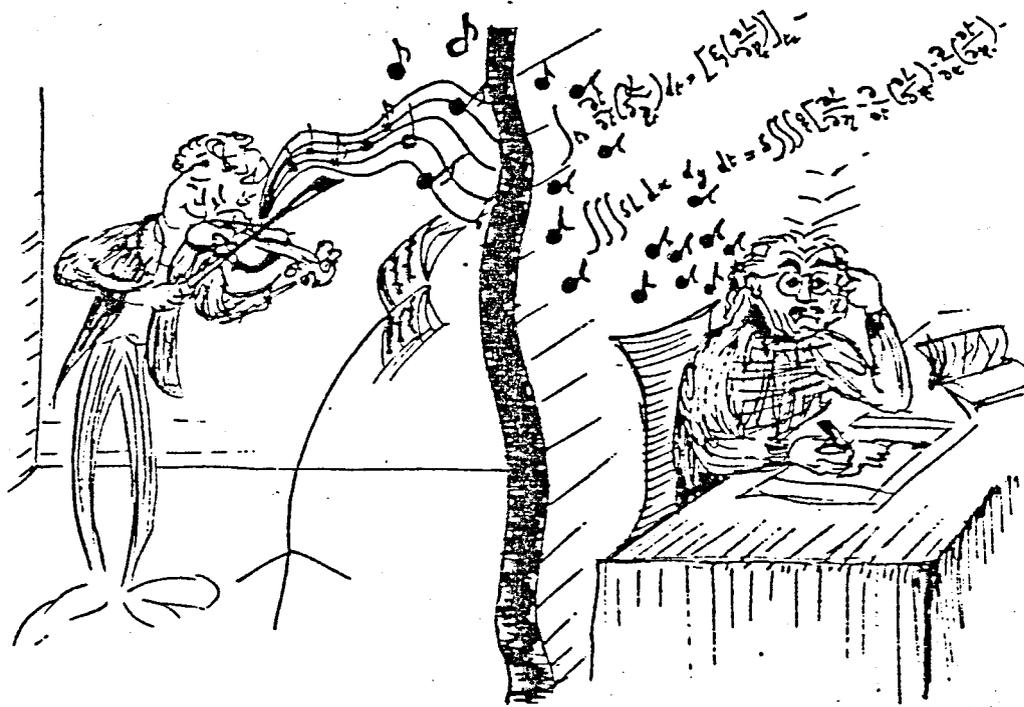


Fig. 1 - Som ou Ruído?

É geralmente no interior dos edifícios que o ruído é mais sentido como factor incomodativo, pois é aí onde se desenrola quase toda a vida quotidiana.

Incomodativo porque provoca perda de concentração, interferência na conversação, perturbação do sono, em suma, cansaço e irritação.

Todo o estudo relatado neste texto se desenvolve para situações de ruído dentro dos edifícios (não industriais), tendo em atenção que é aí que normalmente se pretendem criar condições de privacidade e sossego mais rigorosas.

2 - DIFERENTES TIPOS DE RUÍDOS NOS EDIFÍCIOS

O campo sonoro que envolve os ocupantes de um edifício é originado por ruídos cada vez mais numerosos e diferentes, quer em natureza quer em intensidade.

Podem distinguir-se, antes de qualquer outra análise, os ruídos INTERIORES dos ruídos EXTERIORES.

Os EXTERIORES são devidos essencialmente à circulação dos veículos de todo o tipo, desde os rodoviários aos ferroviários não esquecendo, em algumas zonas próximas de aeródromos, os aviões e helicópteros.

Os INTERIORES são produzidos principalmente pela utilização inerente do edifício e por uma multiplicidade de fontes. Desde equipamentos colectivos tais como bombas e sistemas de distribuição de água, monta-cargas, elevadores, até equipamentos individuais como por exemplo aspiradores ou batadeiras.

Mas também não é possível esquecer o próprio ruído dos habitantes e utilizadores desses imóveis devido a conversas, passos, arrastar de móveis, etc. e também aos dos aparelhos mecânicos que tornam essa permanência no edifício mais confortável: ventiladores, exaustores, ar condicionado, etc.

Cada uma destas duas categorias de ruídos requerem um tipo de protecção particular.

São especialmente as paredes divisórias interiores e os pavimentos que se tenta isolar aos ruídos interiores e as fachadas e coberturas aos ruídos exteriores.

Neste texto iremos preocupar-nos, quase exclusivamente, com ruídos interiores e é a esses que continuaremos a dedicar a nossa atenção.

Na transmissão de ruídos interiores nos edifícios poder-se-ão distinguir duas formas que podem existir em simultâneo: uma correspondente aos sons AÉREOS e outra aos sons de PERCUSSÃO (Fig. 2) (46).

Os sons AÉREOS serão aqueles donde a maior parte da energia é radiada directamente para o ar envolvente da fonte sonora: caso de um altifalante de um receptor de rádio ou de televisão, por exemplo (Fig. 2A).

Os sons de PERCUSSÃO são aqueles resultantes duma acção directa (choque) sobre os elementos de construção ou seja, na comunicação directa da energia às paredes, lajes ou pilares (Fig. 2B).

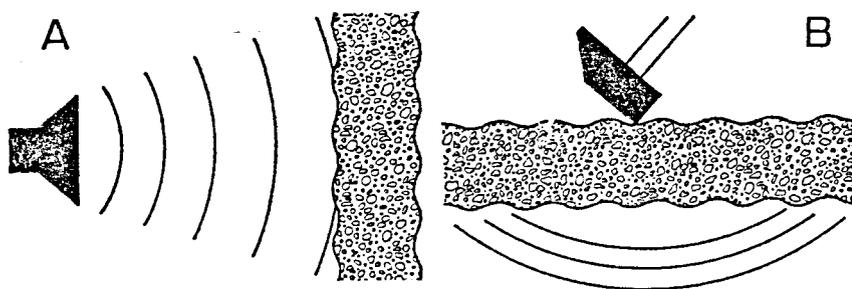


Fig. 2 - Comparação dos ruídos aéreos e dos ruídos de percussão.

Os ruídos aéreos emitidos num dado compartimento, em geral, só molestam os ocupantes dos compartimentos imediatamente próximos, enquanto os de percussão podem incomodar todo um imóvel, já que a energia comunicada directamente ao elemento

de construção se reparte rapidamente por todo o edifício através dos elementos que lhe estão rigidamente ligados (Fig. 3) (47).

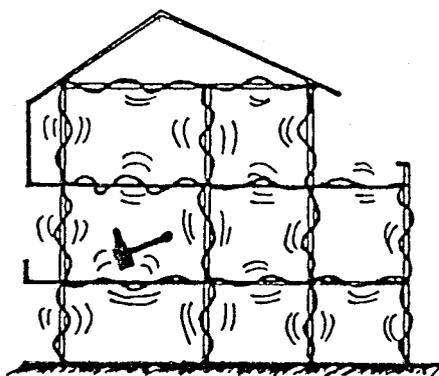
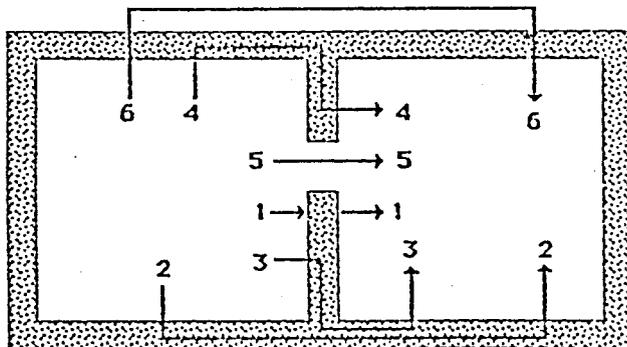


Fig. 3 - Vibração e radiação acústica de um edifício submetido a ruídos de percussão.

Os ruídos aéreos serão os únicos que se abordam neste texto, em especial até por serem estes os que, vulgarmente, causam maior número de reclamações nos edifícios de habitação onde os principais ruídos são aqueles do ocupante: conversas, gritos, cantos e dos seus aparelhos de distração: receptores de rádio e televisão, aparelhos de alta-fidelidade, etc.

Há contudo ainda que distinguir, nos ruídos aéreos, a transmissão Directa através do elemento que separa o local de emissão do de recepção, da Marginal (também chamada Secundária ou Indirecta) através dos outros elementos que lhe estão interligados (Fig. 4).

Este estudo versa particularmente as paredes divisórias leves pelo que, ao longo de todo este texto, considera-se desprezável a contribuição das transmissões marginais facto que, na generalidade dos casos se pode considerar aceitável tendo também em atenção a imprecisão e desconhecimento de alguns outros factores em jogo.



- 1 - Transmissão directa
 2 3 4 - Transmissão marginal
 5 - Transmissão acústica por aberturas
 6 - Transmissão marginal por salas contíguas

Fig. 4 - Processos de transmissão de sons aéreos.

Assim resumindo, da gama de ruídos exteriores e interiores, circunscribe-se este trabalho aos interiores; dos ruídos interiores aéreos e dos de percussão abordam-se só os aéreos; da transmissão desses por via directa ou marginal considera-se exclusivamente só a primeira, a directa.

3 - DEFINIÇÃO DE ISOLAMENTO. GENERALIDADES

3.1 - Isolamento entre recintos fechados

Considerem-se dois recintos fechados contíguos (adjacentes ou sobrepostos) num dos quais existe uma fonte sonora.

O isolamento D do local de recepção ($n^{\circ}1$) face ao local de emissão ($n^{\circ}2$) define-se pela diferença existente entre os

níveis de pressão sonora dos sons reverberados nos locais 1 e 2.

$$D = L_1 - L_2$$

A transmissão do som entre recintos é fortemente dependente da frequência do som incidente, em qualquer circunstância considerada. Como adiante se verá, sons de frequência baixa (sons graves) transmitem-se (para o mesmo elemento separador e em casos gerais) mais facilmente para o compartimento vizinho do que sons de frequência alta (sons agudos). O domínio de frequências com interesse neste estudo situa-se na gama do audível, isto é, entre os 20 Hz e os 20 kHz.

O nível sonoro no local receptor depende da transmissão da energia pela parede de separação e pelos restantes elementos (paredes laterais, pavimentos e tectos) comuns aos dois locais e das características do local receptor.

Para atender a este último factor introduzem-se duas definições de isolamento global.

3.1.1 - Isolamento sonoro efectivo

$$D_e = L_1 - L_2$$

- De - Isolamento sonoro efectivo (ou bruto ou puro);
- L1 - Nível sonoro no local emissor;
- L2 - Nível sonoro no local receptor.

Denomina-se efectivo porque é o isolamento que se encontra em locais tais como estão mobilados. Depende da natureza e superfície dos elementos separadores e das características so-

noras do local receptor.

3.1.2 - Isolamento sonoro corrigido

Para ser possível comparar isolamentos obtidos com diferentes tipos de construção, torna-se necessário corrigi-lo (normalizando-o) para um local de referência.

Em Portugal normaliza-se a área de absorção sonora equivalente e calcula-se qual seria o isolamento se o local receptor tivesse uma área de absorção sonora equivalente de 10 m².

$$D_c = D_e - 10 \log(A/10) = L_1 - L_2 - 10 \log(A/10)$$

D_c - Isolamento sonoro corrigido (ou normalizado);

A - Área de absorção sonora equivalente da sala de recepção.

Outros países normalizam-no de modo diverso. Por exemplo em França utiliza-se o Tempo de Reverberação de 0,5 segundo para valor de referência.

3.1.3 - Coeficiente de Transmissão e Índice de Redução Sonora

Para conhecer unicamente o valor do isolamento da parede de separação, há que considerar apenas a transmissão directa (eliminando todas as transmissões marginais) e a influência do local receptor.

Introduz-se então o COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO (ou transparência acústica para alguns autores de língua francesa):

$$\zeta = I_t/I_i$$

I_t - Intensidade da energia sonora transmitida pelo elemento de construção para o lado da recepção;

I_i - Intensidade da energia sonora incidente no elemento de construção do lado da emissão.

Vulgarmente utiliza-se uma outra grandeza, derivada desta, que se denomina ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA.

$$R = - 10 \log \zeta$$

Autores de língua francesa denominam esta grandeza por "atenuação acústica" (T) e os da língua inglesa por "perda por transmissão" (TL ou R).

Exprime-se em decibel (dB) e mede-se directamente numa dupla câmara reverberante sem transmissões marginais, conforme se analisará em capítulo adequado e de acordo com técnica descrita em (1).

3.1.4 - Índice de Isolamento Sonoro a Sons Aéreos

O índice de redução sonora R, é função da banda de frequências considerada pelo que é vantajoso poder resumir numa só grandeza o comportamento acústico de qualquer elemento de construção à transmissão dos sons aéreos.

Assim surgiu o ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS, I_a . Através de um processo especificado na Norma Portuguesa NP-2073/1983 (2), as descrições, no domínio da frequência, dos índices de redução sonora, são comparadas com descrições de

referência.

O índice de isolamento sonoro a sons aéreos I_a , será então, expresso em decibel (dB), o valor arredondado para número inteiro, da ordenada da curva de referência descrita em (2) para a frequência de 500 Hz determinada segundo o procedimento aí indicado.

3.1.5 - Relação entre Isolamento Sonoro Efectivo e Índice de Redução Sonora

Para efeitos da determinação prática do índice de redução sonora de elementos de construção, utiliza-se a seguinte relação entre Isolamento Sonoro Efectivo e Índice de Redução Sonora:

$$D_e = R + 10 \log(A/S)$$

ou para maior facilidade de utilização em laboratório, com a seguinte forma (usando a fórmula de SABINE):

$$D_e = R + 10 \log(0,16V/ST)$$

- A - Área de absorção sonora equivalente do recinto receptor;
- V - Volume do recinto receptor;
- S - Área da superfície do elemento separador;
- T - Tempo de reverberação médio no recinto receptor.

Neste texto, o objectivo é o estudo do isolamento sonoro de paredes divisórias pelo que será corrente a utilização das grandezas ζ , R e I_a agora definidas.

4 - ISOLAMENTO DE RUÍDOS INTERIORES

4.1 - Tipos de elementos verticais de separação

Na quase generalidade dos edifícios, os compartimentos estão separados por elementos verticais, a toda a altura do pé-direito, que vulgarmente se denominam por paredes divisórias.

É delas que se espera o correcto isolamento sonoro entre os recintos, permitindo em especial, a manutenção da intimidade ou do sossego.

Será este o campo deste estudo.

As paredes divisórias podem, pela sua constituição e apresentação, ser agrupadas em tipos diferentes que, igualmente, possuem um comportamento distinto face à transmissão sonora.

Como separação mais elementar podemos referir-nos a paredes SIMPLES e a paredes MÚLTIPLAS (o caso de paredes duplas é o mais corrente).

As paredes MÚLTIPLAS são aquelas constituídas por duas ou mais folhas separadas entre si. Dado que, sob o ponto de vista acústico, a separação nunca é completa, interessa considerar alguns casos típicos de união entre os 2 (caso corrente) elementos (sem contudo nos determos em análises de uniões elásticas ou rígidas) (Fig. 6).

A separação pode ser estabelecida por caixa de ar entre os elementos ou por material absorvente (Fig. 6A e 6B) (48,49). Um terceiro caso típico é o de paredes com esteios (Fig. 6C) em que os painéis são unidos entre si por pequenas vigas de madeira ou metálicas.

O estudo deste tipo de paredes e do seu comportamento acústico foge ao objectivo deste texto.

As paredes SIMPLES são constituídas por um ou vários materiais dispostos em camadas paralelas mas sólida e completamente unidas entre si, formando uma só estrutura física (Fig. 5).

Dentro destas podemos ainda subdividir em dois outros grupos: paredes HOMOGÉNEAS e NÃO HOMOGÉNEAS (ou multicamadas).

As primeiras (Fig. 5A) em que toda a espessura de parede é constituída pelo mesmo material (embora possa ter constituição isotrópica ou ortotrópica) e as segundas (Fig. 5B) em que na espessura da parede se individualizam várias camadas de materiais diferentes.

Nas paredes divisórias simples, NÃO HOMOGÉNEAS, assinala-se ainda o caso típico de paredes com 3 camadas e de constituição simétrica cuja denominação corrente é a de paredes SANDUÍCHE (Fig. 5B2).

São as paredes SIMPLES, e em especial as NÃO HOMOGÉNEAS que abordaremos neste estudo.

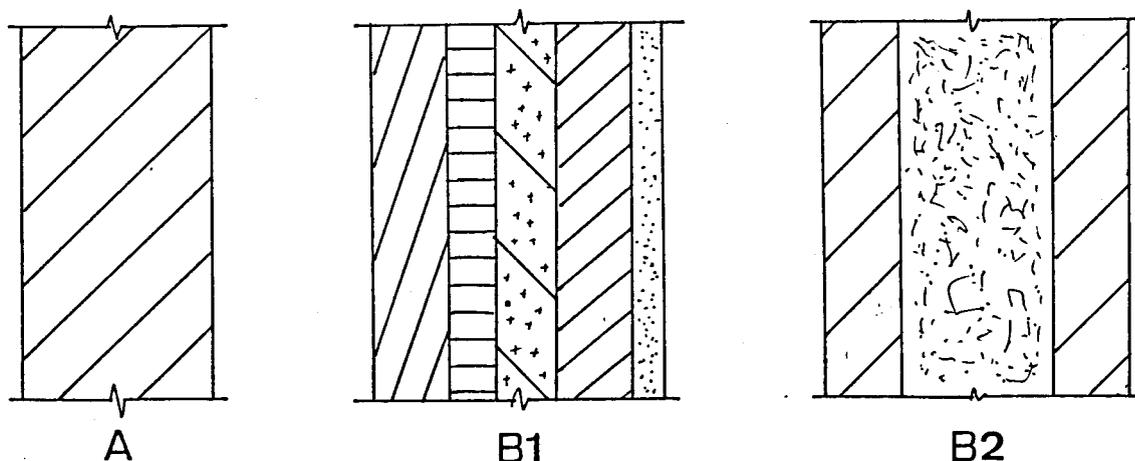


Fig. 5 - Tipos de Paredes Simples.

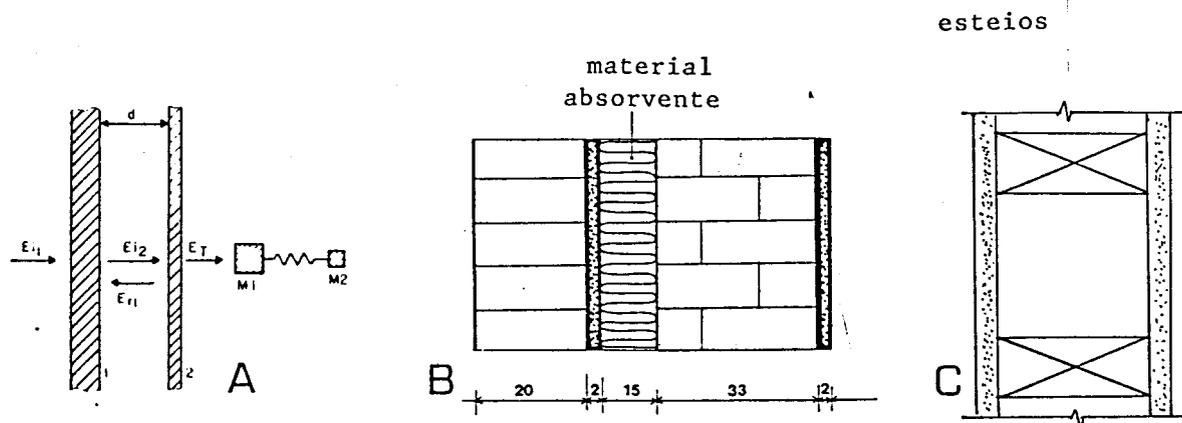


Fig. 6 - Tipos de Paredes Múltiplas.

Não se deve deixar de referir um outro tipo de situação, o REFORÇO DE ISOLAMENTO.

Acontece, por vezes, que o ruído em compartimentos vizinhos entre si, passa ser considerado excessivo e é tomada a decisão de aumentar o isolamento acústico entre eles. Aqui surge uma reabilitação da função isolamento acústico que é conseguida à custa da colocação, sobre a parede primitiva, de um material exclusivamente com o objectivo de lhe melhorar o comportamento face à transmissão de ruídos. Surge assim o Reforço de Isolamento (Fig. 7).

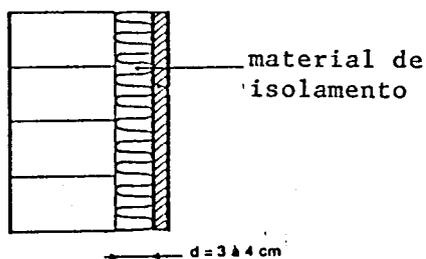


Fig. 7 - Reforço de isolamento de uma parede.

4.2 - Caracterização sumária do campo sonoro para estudo modelar

Qualquer fonte sonora poderá ser eficazmente caracterizada pela sua potência acústica e pela direccionalidade da sua radiação.

Em termos gerais poderemos caracterizar o campo sonoro instalado em qualquer dependência corrente e mobilada de um edifício, com um Campo Difuso, isto é, em que a distribuição direccional da intensidade incidente é proveniente de todas as direcções com igual probabilidade (Fig. 8).

Será este o tipo de campo sonoro considerado presente no desenvolvimento seguinte do texto.

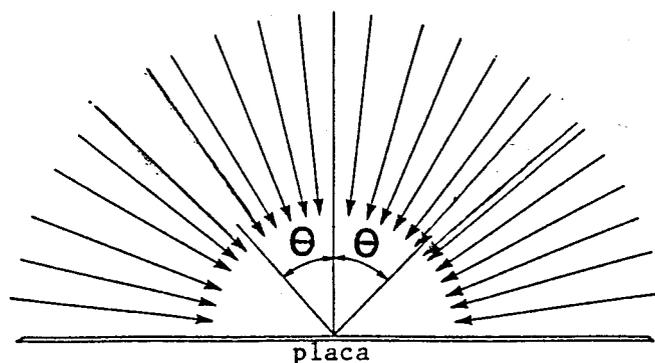


Fig. 8 - Variação do ângulo de incidência para campo difuso.

5 - DIVISÓRIAS HOMOGÊNEAS

5.1 - Introdução

Antes de se abordar o comportamento acústico das divisórias Não Homogêneas e das divisórias sanduíche em particular, que são o objecto deste estudo, não podemos deixar de nos centrar nas divisórias homogêneas pois as primeiras são, em muitos aspectos, deriváveis destas, como numa evolução conceptual.

A própria modelação matemática das divisórias sanduíche parte necessariamente da base mais simples que são as divisórias Homogêneas.

5.2 - Evolução do estudo

A análise e o estudo da transmissão acústica das paredes esteve muito tempo limitada à consideração única do efeito da massa. Os resultados obtidos só permitiam ter uma primeira aproximação e não permitiam explicar todos os fenómenos observados (como por exemplo a coincidência).

A necessidade de conceber teorias que explicassem melhor todos os factos presentes era evidente e sucessivamente os autores iriam desenvolver modelos mais complexos.

CREMER em 1942 (3) introduz a elasticidade no quadro de uma esquematização de placa infinita. Surge então um fenómeno importante: a coincidência (cf. 5.3.2.a). Para a banda de frequências onde tal efeito se verifica (frequência crítica) observa-se um assinalável aumento da transmissão de energia.

A hipótese de placa infinita é retomada por LONDON que em

1949 (4) estuda a redução sonora da parede simples em campo difuso e em 1950 (5) da parede dupla.

Estas teorias têm um grande interesse prático pois indicam tendências seguras de comportamento. Contudo, mostram-se incapazes de lidar com fenômenos de pormenor, especialmente em baixa frequência.

O estudo de VOGEL de 1947 (6) que trata de placas finitas constitui um passo importante. A introdução do Esquema Modal permitiu compreender melhor o fenômeno em estudo mas também obter leis mais precisas.

A modelação descrita por VOGEL é a seguinte: A placa finita é submetida a vibração de flexão e ela separa dois meios (emissor e receptor) indefinidos com impedância acústica igual a ρc . As ondas incidentes são planas.

Esta evolução aqui descrita representa o já quase longínquo início da evolução dos estudos nestes domínios. Os trabalhos posteriores foram múltiplos e variados e introduziram hipóteses menos restritivas onde três pontos principais foram sendo desenvolvidos:

- Meios emissor e receptor finitos;
- Estudo da radiação de parede;
- Introdução do amortecimento interno do material constituinte da parede.

Um dos estudos mais completos da redução sonora das paredes simples ou múltiplas é o contido no trabalho de SPRONCK de 1971 (7). Aí ele considera um modelo reológico do tipo KELVIN-VOIGT e dá-nos expressões para o coeficiente de transmissão de uma placa homogênea e isotrópica, em flexão pura.

5.3 - Modelação matemática

A modelação matemática do comportamento acústico das paredes homogéneas introduz-se obrigatoriamente pelos modelos matemáticos clássicos, nomeadamente os:

- Modelo Inercial;
- Modelo Elasto-Dinâmico.

Do modelo inercial surge a vulgarmente chamada Lei da Massa e do modelo elasto-dinâmico aparecem as teorias da Ressonância e da Coincidência que passamos a referir um pouco mais em pormenor pois são necessárias para uma melhor compreensão do texto subsequente.

5.3.1 - Modelo Inercial

O Modelo Inercial representa uma primeira análise ao comportamento acústico de paredes divisórias em que não intervém nem o efeito da rigidez da parede nem o do seu amortecimento interno.

É pois considerada uma parede plana, homogénea, de espessura constante, desligada de outras, desprovida de elasticidade e indeformável na sua espessura (uma lâmina de chumbo ou um muro constituído por tijolos empilhados uns sobre os outros, sem argamassa, assemelham-se bastante a uma parede nessas condições).

Nesse caso a expressão do coeficiente de transmissão τ , é facilmente dedutível (8) (9) e, para o caso de ondas planas com incidência normal, obtém-se:

$$\tau = 1/[1 + (w.m/2 \rho_0 c)^2]$$

Para o caso mais geral em que fazemos intervir o ângulo de incidência θ (Fig. 10) das ondas planas incidentes, temos:

$$\zeta(\theta) = 1 / [1 + (w.m.\cos\theta/2 \rho_0 c)^2]$$

Considerando que $w.m.\cos\theta \gg 2 \rho_0 c$ (facto que é correntemente verificável excepto para $\theta \approx \pi/2$) a expressão pode ser simplificada para:

$$\zeta(\theta) = (w.m.\cos\theta/2 \rho_0 c)^{-2}$$

Nas situações correntes, as ondas sonoras incidem simultaneamente nas paredes provenientes de variados ângulos (ver Capítulo I.4.2.).

Nas situações correntes a distribuição direccional das ondas incidentes não é conhecida e por isso é idealizado um campo difuso no qual as ondas planas incidem de todas as direcções com igual probabilidade.

Assim o coeficiente de transmissão a considerar será uma média obtida, por exemplo, da seguinte forma (9):

$$\zeta_d = \frac{\int_0^{\pi/2} \zeta(\theta) \lambda \sin\theta \cos\theta \, d\theta}{\int_0^{\pi/2} \lambda \sin\theta \cos\theta \, d\theta} = \int_0^{\pi/2} \zeta(\theta) \lambda \sin 2\theta \, d\theta \quad \text{E1}$$

Mas, em circunstâncias gerais, o coeficiente de transmissão depende igualmente do ângulo azimutal ϕ (Fig. 9).

$$P_{inc} = p_0 e^{i(k_1 x_1 + k_2 x_2 - k_3 x_3 - \omega t)}$$

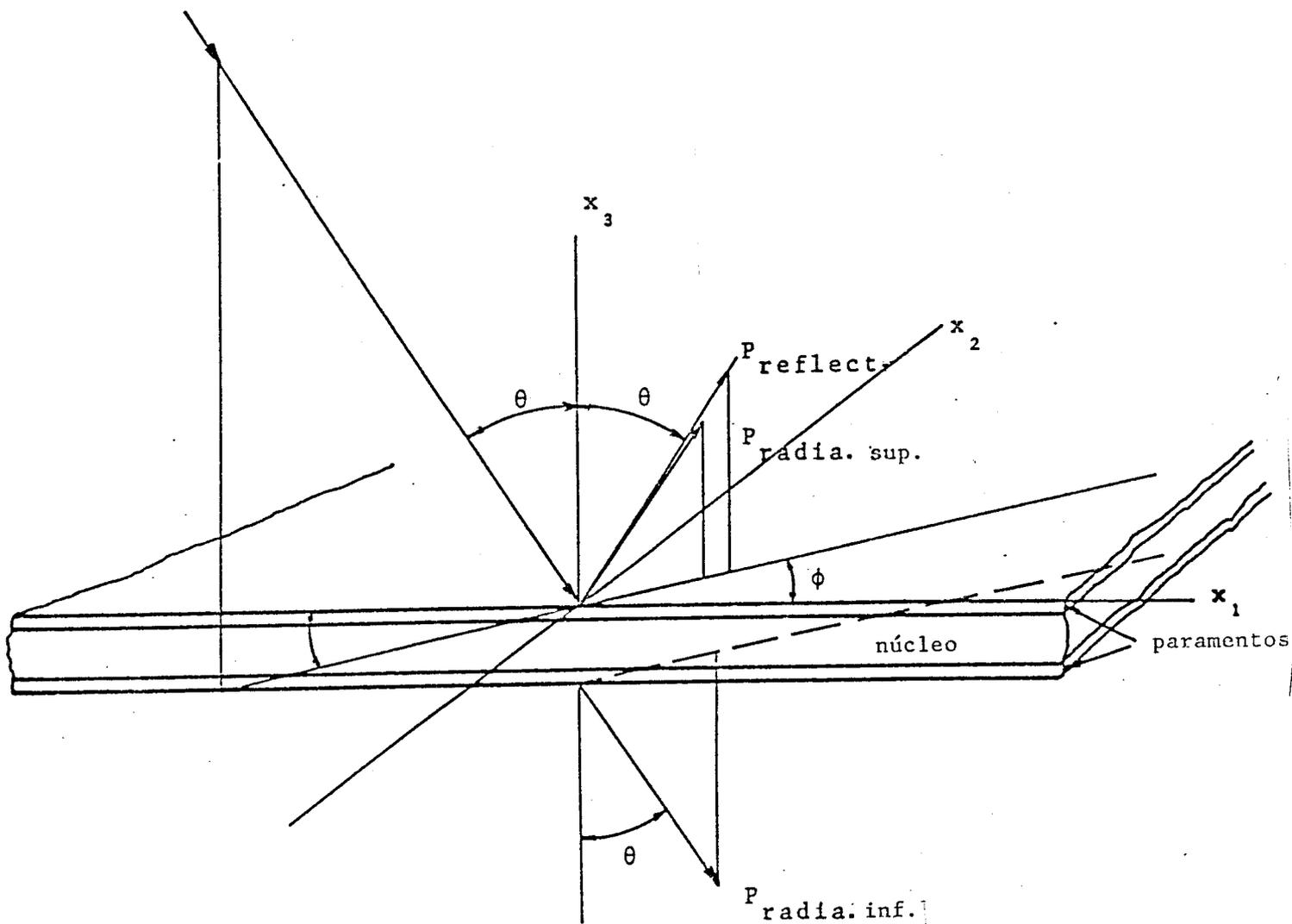


Fig. 9 - Geometria do painel sanduíche infinito e das ondas acústicas.

Assim a integração deverá ser estendida a dois domínios (10):

$$\bar{\tau}_d = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \bar{\tau}(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\phi \, d\theta / \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin \theta \cos \theta \, d\phi \, d\theta$$

$$\bar{\tau}_d = \pi^{-1} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \bar{\tau}(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\phi \, d\theta$$

EIA

Se porém a divisória for isotrópica, $\zeta(\theta, \phi)$ é independente do ângulo ϕ . O plano dos eixos x_1 e x_2 pode ser reorientado para colocar $\phi = 0$, pelo que ζ_d pode ser apresentado como na expressão E1.

Os resultados experimentais levaram contudo a considerar mais correctas as integrações entre os limites de 0° e 78° (e não 0° a 90°). Teorias da transmissão do som através de painéis finitos corroboram a não consideração das ondas perto da incidência rasante porque, em regra, serão pouco prováveis.

Alguns autores utilizam outros valores para o limite superior dessa integração. Por exemplo, SHARP (16) ou MARTINS DA SILVA (39) usam 80° ; MEIER (18) considera $82,5^\circ$ e RUDDER (31) admite como possível atingirem-se os 85° .

Conforme já referimos no Capítulo 3.1.3, o índice de redução sonora obtém-se pela expressão:

$$R = -10 \log \zeta \quad E2$$

Vejamos pois quais as expressões de R correspondentes aos casos acima referidos, obtidos por aplicação da expressão E2:

a) incidência normal

$$R(0) \approx 20 \log(m.w/2 \rho_0 c) \quad \text{ou} \quad R(0) \approx 20 \log(m.f) - 42$$

b) segundo um ângulo de incidência θ

$$R(\theta) \approx 20 \log(m.w.\cos\theta/2 \rho_0 c)$$

Estas expressões são correntemente conhecidas como a LEI TEÓRICA DA MASSA.

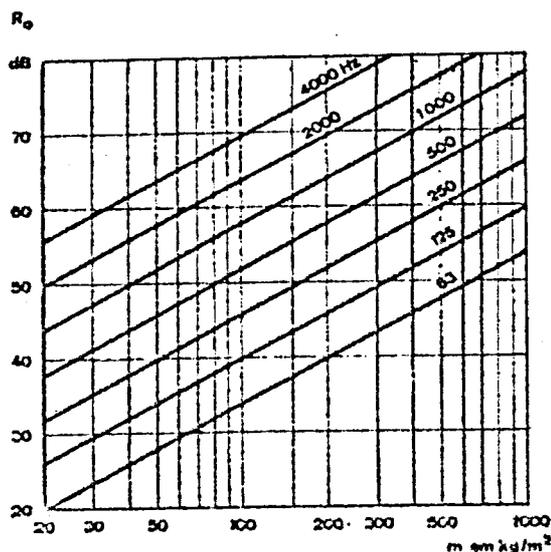
Comparando as expressões para incidência normal e incidência segundo θ qualquer, verifica-se que a diferença aumenta com a aproximação de θ aos 90° (ondas rasantes).

$$R(0) - R(\theta) = 20 \log(\cos \theta)$$

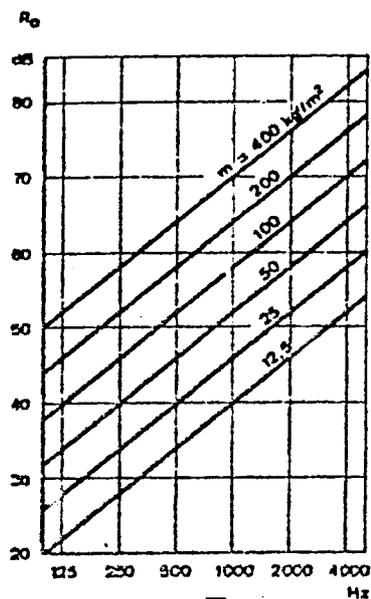
para $0^\circ \approx 0$ dB, $45^\circ \approx -3$ dB.

Destas expressões pode-se concluir que:

- Uma parede não elástica é tanto mais isolante quanto mais pesada. Quando se duplica a sua massa o índice de redução sonora aumenta 6 dB (Fig. 10A) (50).
- Para uma parede e ângulo de incidência dados, o índice de redução sonora cresce à razão de 6 dB cada vez que se duplica a frequência (cresce 6 dB por oitava). Os sons graves transmitem-se pois melhor que os agudos (Fig. 10B).
- Para uma parede e frequência dadas, o índice de redução sonora diminui quando o ângulo de incidência aumenta. As ondas rasantes transmitem-se pois melhor que as normais.



A



B

Fig. 10 - Lei da Massa para um ângulo de incidência nulo (A) e variação de R_0 em função da frequência (B).

c) campo difuso

O resultado matemático da integração conduz-nos a

$$R_d = R(0) - 10 \log[0,23 R(0)]$$

Porém, os resultados experimentais não concordam com a expressão anterior, aproximando-se antes da expressão empírica:

$$R_f = R(0) - 5 \quad \text{ou} \quad R_f = 20 \log(m.f) - 47 \quad E3$$

Estas expressões podem ser aproximadamente obtidas através da integração entre 0° e 78° da expressão respectiva do ζ .

Podemos comparar as 3 curvas, $R(0)$, R_d e R_f na Fig. 11.

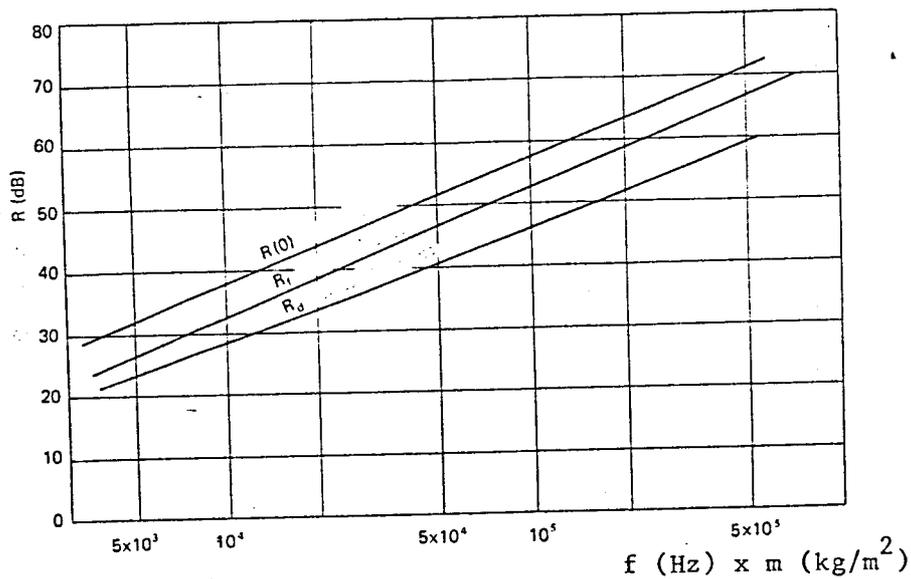


Fig. 11 - Índices de Redução Sonora para divisórias infinitas.

O tipo de paredes estudado é fictício, embora exista um campo de frequências para o qual a hipótese considerada é válida (frequências bem abaixo da frequência crítica).

Torna-se pois necessário ter em conta o comportamento elástico das paredes.

5.3.2 - Modelo Elasto-Dinâmico

Na realidade, o comportamento acústico das divisórias pode generalizadamente ilustrar-se na Figura 12 onde se mostra a evolução típica do isolamento sonoro efectivo de um elemento de compartimentação em função da frequência.

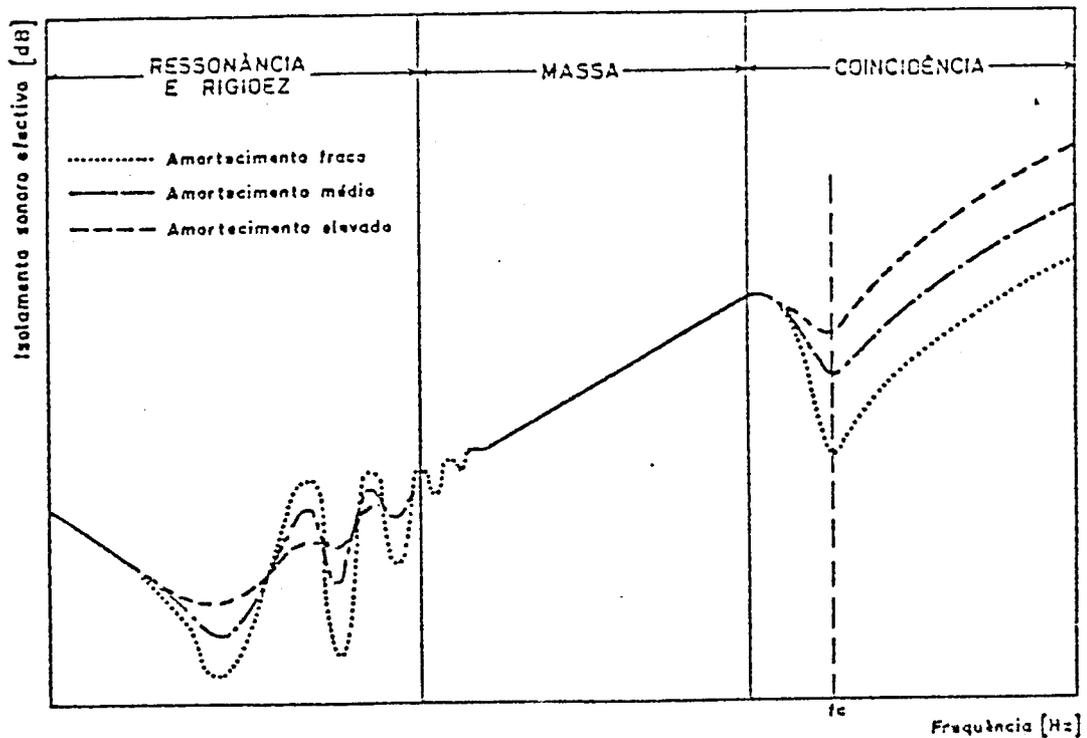


Fig. 12 - Evolução do isolamento sonoro efectivo de um elemento de compartimentação em função da frequência.

Como se pode analisar, a predominância do efeito da massa restringe-se a uma gama de frequências muito apertada. Os fenómenos resultantes da existência de rigidez e de amortecimento interno justificam o comportamento verificado.

Analisemos agora alguns factores importantes:

a) coincidência

As paredes vulgares não funcionam como se fossem constituídas por elementos independentes e uma deformação provocada por uma excitação localizada origina ondas em regime livre que se propagam a toda a massa da parede. Se a espessura da parede é suficientemente reduzida, as ondas que se originam são ondas de flexão.

Chama-se "Coincidência" ao fenômeno da igualdade entre a velocidade de propagação das ondas de flexão em regime forçado ($c/\sin\theta$) e a velocidade de propagação das ondas de flexão em regime livre. Dito de maneira mais simplista, há coincidência quando a velocidade das ondas de flexão na parede é igual à componente paralela à placa da velocidade de propagação do som no meio emissor.

Neste caso, em que existe coincidência entre as ondas aéreas e as ondas de flexão livres, verifica-se uma adaptação perfeita entre a parede e o local para onde o som se propaga, assumindo o isolamento sonoro um mínimo (dependente do amortecimento interno). Para uma certa frequência e um determinado ângulo de incidência das ondas sonoras, as oscilações de flexão da parede são amplificadas e a energia acústica será transmitida através da parede com uma atenuação muito pequena.

Chama-se frequência crítica à frequência de valor mais reduzido para a qual pode ocorrer o fenômeno de coincidência. Ela pode ser obtida pela expressão:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad E4$$

em que B é o módulo de rigidez da parede à flexão e é definido por:

$$B = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \quad E5$$

sendo

- c - velocidade de propagação do som;
- m - massa superficial;

- E - módulo de elasticidade;
- h - espessura;
- ν - coeficiente de Poisson.

b) amortecimento interno

Se fizermos, através de uma pancada, entrar em vibração uma parede, essa vibração cessará tanto mais rapidamente quanto o seu amortecimento interno for mais forte. Este é caracterizado pelo Factor de Perdas η que se pode definir como a fracção da energia mecânica de vibração que é convertida em calor, num ciclo de vibração.

Aumentando o factor de perdas da parede, eleva-se o seu isolamento nas frequências superiores à frequência crítica. Uma parcela da energia sonora é transmitida à parede mas outra é perdida pelo amortecimento da estrutura. Esta será tanto maior quanto mais elevado for o factor de perdas.

Em termos mais alargados podemos considerar o factor de perdas de uma parede subdividido em três parcelas:

η_r - Factor de perdas devido à radiação acústica das faces da parede.

Habitualmente é um valor desprezável face aos outros termos, excepção ao caso de paredes extremamente finas (membranas);

η_c - Factor de perdas devido à condução da energia acústica para as paredes contíguas.

Esta parcela não é fácil de avaliar e está relacionada com o "poder de absorção" das ondas de flexão pelos limites da parede. Este poder de absorção será nulo se existir uma descontinuidade assinalável nos limites da parede (por exemplo um isolamento situado em todo o contorno ou ligação a paredes bastante mais

espesas e pesadas).

η_i - Factor de perdas no interior da parede.

Normalmente da mesma ordem de grandeza (ou menor) do que η_c .

Passemos agora às fórmulas do índice de redução sonora, tendo em consideração os factores referidos e com a ajuda de uma curva tipo que representa, para uma determinada parede, a variação de R em função da frequência (Fig. 13).

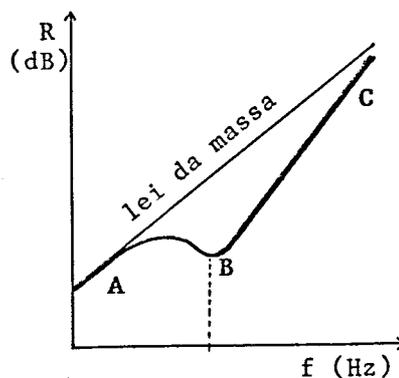


Fig. 13 - Curva tipo do índice de redução sonora R em função da frequência, para um campo incidente difuso.

Este diagrama tipo (para campo difuso e paredes finitas) pode dividir-se em três zonas: A, B e C.

- Zona A, $f < f_c$

R é razoavelmente bem aproximado pela Lei Teórica da Massa, expressão E3:

$$R_f \simeq 20 \log(m \cdot f) - 47$$

E6

- Zona B, $f \approx f_c$

FAHY propõe em (9) a seguinte expressão para o R nesta zona:

$$R = 20 \log(m.f) + 10 \log(2\eta/\eta')(\Delta w/wc) - 42 \quad E7$$

em que Δw é a largura da banda de frequências centrada na frequência crítica.

- Zona C, $f > f_c$

CREMER (3) e FAHY (9) propõem expressões que se assemelham e que reunimos numa única:

$$R = 10 \log\left[(2\eta/\eta')(f/f_c - 1)(m.f)^2\right] - 42 \quad E8$$

Como se pode constatar pelas Figuras 12 e 13 e tal como é referido por MARTINS DA SILVA em (8), o melhor comportamento no referente ao isolamento acústico de uma parede divisória, obtém-se projectando-a de molde a que seja preponderante a contribuição do modelo inercial na gama de frequências com interesse.

6 - CONCLUSÃO

Fez-se neste Capítulo uma revisão dos conhecimentos teóricos relativos ao domínio em estudo, nomeadamente definindo os factores, características e parâmetros intervenientes mais importantes.

Foi feita igualmente uma breve análise aos modelos clássicos da modelação matemática do comportamento acústico de paredes homogéneas, nomeadamente modelos inercial e elasto-dinâmico.

Foram criadas as condições para uma melhor compreensão do enunciado nos próximos capítulos, em particular o seguinte, onde se aborda a modelação físico-matemática das paredes divisórias não homogéneas.

DIVISÓRIAS NÃO HOMOGÉNEAS

1 - INTRODUÇÃO

O Isolamento Sonoro é uma característica que deve sempre ser tida em conta no projecto e dimensionamento de paredes, pavimentos, coberturas, isto é, de todos os elementos envolventes de um edifício.

Contudo, essa característica ganha maior importância quando se trata de paredes divisórias. Nestas, um bom comportamento à inibição da transmissão do som é uma característica tão fundamental como a própria capacidade de suportar o seu próprio peso.

Conseguir que as divisórias sejam autoportantes e boas isoladoras acústicas com um mínimo de peso e, naturalmente, de reduzido custo é o objectivo a atingir em qualquer procura de soluções optimizadoras na Construção de Edifícios.

Actualmente, em Portugal, a solução tradicional de paredes divisórias na compartimentação interior dos fogos consiste em panos de tijolo de 7 cm rebocado em ambas as faces. É, por isso, uma solução pesada ($\approx 140 \text{ kg/m}^2$) que apresenta um comportamento suficiente na redução da transmissão de sons aéreos na maioria das situações correntes.

Esse tipo de construção requer uma fabricação no local, necessariamente morosa, que tende a ser de custo assinalável e com o inconveniente de não permitir um adequado controle de qualidade do produto acabado.

Por tal motivo começa a generalizar-se a utilização de paredes divisórias leves a amovíveis que, cumulativamente, apresentam as seguintes vantagens: fabrico industrializado em larga escala, baixo peso (inferior a 50 kg/m²), fácil manuseamento, grande versatilidade de utilização, qualidade facilmente controlável, etc.

Divisórias amovíveis que envolvam a construção de estruturas duplas com faces de derivados de madeira ou de metal, separadas por lâminas de ar, estão já disponíveis e embora possam apresentar um razoável comportamento acústico, apresentam alguns inconvenientes de utilização. Necessitam de ser fabricadas com as dimensões exactas já que o corte no local é difícil e dispendioso.

Por tudo isso, um tipo de divisórias não homogéneas leves, constituídas por multicamadas tal como definidas no Capítulo I.4.1., podem apresentar vantagens sobre as restantes, especialmente porque podem ser prefabricadas e cortadas no local de utilização.

Será pois este tipo de paredes que iremos abordar de seguida, em especial as divisórias amovíveis tipo sanduíche (3 camadas com apresentação simétrica, um núcleo e dois painéis de faces de igual espessura).

2 - EVOLUÇÃO DO ESTUDO

Examinaremos, para melhor compreensão do problema, a evolução do estudo das divisórias multicamadas.

Num contexto evolutivo, a análise destes problemas iniciou-se pelas paredes homogêneas, das quais nos referimos já no Capítulo I.5.2.

A passagem para as divisórias não homogêneas deu-se a partir das divisórias duplas (duas paredes delgadas em flexão separadas por um espaço de ar). Pela primeira vez, em 1957, HICKMAN, RISTY e STEWART (11) estudam um tal tipo de parede com um material de fraca rigidez entre as placas externas. Podemos dizer que nasceu aí a abordagem teórica, moderna, das divisórias multicamadas. HICKMAN et al. utilizam um modelo de divisória infinita e só entram em consideração com os efeitos de flexão e extensão da parede. Mais tarde, em 1969, SHARP e BEAUCHAMP retomaram este trabalho.

Em 1959, KURTZE e WATTERS (12) estudam as características de transmissão sonora de paredes de três camadas, nas quais a deformação de cisalhamento, na camada central (núcleo), actuava de modo a diminuir a velocidade de propagação da vibração livre na placa. Uma nova divisória é aí dimensionada de modo a que a região da coincidência fique deslocada para frequências mais elevadas onde a perda da redução sonora, associada a este fenómeno, é de menor importância. Assim, nas bandas de frequência associadas à palavra, a divisória fica regida pela Lei Teórica da Massa. Além do núcleo ser considerado rígido na direcção normal ao plano da placa também os deslocamentos normais, das superfícies exteriores da sanduíche, são tidos como iguais (aquilo a que alguns autores consideram como vibração anti-simétrica).

Igualmente em 1959, ROSS, UNGAR e KERWIN (13) desenvolvem um método para determinar o módulo de rigidez da parede multica-

madras à flexão, elemento que vai ser utilizado mais tarde por alguns autores no desenvolvimento dos seus trabalhos nesta área.

Entre 1966 e 1968 FORD, LORD e WALKER (14) bem como SMOLENSKY e KROKOSKY (15) consideram um modo de vibração adicional, o Simétrico (uma evolução do trabalho de WATTERS e KURTZE) quando os deslocamentos normais das faces do painel sanduíche estão desfasados de 180° . Este modo de vibração possibilita uma outra maneira de utilizar a coincidência para diminuir a transmissão sonora. Relacionado com este modo de vibração, estes autores, determinam a velocidade de fase para as ondas em regime livre.

A evolução continua em 1969, com SHARP e BEAUCHAMP (16) aprofundando o trabalho de HICKMAN já citado, generalizando-o ao caso de N painéis. Este tipo de abordagem será retomada mais tarde por VAL (20).

Ainda em 1969, HOLMER (17) apresenta o dimensionamento de uma divisória de três camadas com deformações de cisalhamento no núcleo em que, pela primeira vez, a região do efeito da coincidência surge na zona das baixas frequências. O abaixamento do isolamento apresenta-se assim abaixo da gama de frequências com interesse. HOLMER obtém valores mais elevados para a redução sonora dos que seria de esperar através da aplicação da Lei Teórica da Massa, para frequências superiores à da região da coincidência, quando na parede, o amortecimento interno é elevado.

Em 1969/1970, MEIER (18) estuda um tipo de painel infinito de três camadas em que cada uma está sujeita à flexão, extensão e cisalhamento e é admitida a continuidade de deslocamentos nas interfaces. MEIER dá-nos uma expressão analítica para o coeficiente de transmissão. Este autor desenvolve em 1979 (32) este trabalho onde obtém reduções sonoras superiores às previsíveis por aplicação da Lei da Massa.

MANING, no ano de 1971 (19), desenvolve o trabalho de HOLMER

já referido, otimizando o tipo de divisórias aí preconizado (de três a cinco camadas). Este autor obtém igualmente expressões para o factor de perdas para o conjunto do painel multicamadas, utilizando os factores de perda parcelares das camadas.

Em 1973, VAL (20), continuando a utilizar as hipóteses iniciais de LONDON e HICKMAN, analisa o mecanismo de transmissão do som nos painéis sanduíche e através de um modelo simples, obtém um tipo de divisória com alto poder isolante.

Entre 1974 e 1976, DYM e LANG (21) (22) (23) avaliam a redução sonora de divisórias de três camadas, considerando os efeitos dos modos de vibração simétrico e anti-simétrico. Estes autores limitam-se a placas sanduíche infinitas e simétricas. O coeficiente de transmissão é obtido adicionando a contribuição dos dois tipos de vibrações. Surgem dois tipos de coincidência: uma correspondente ao efeito clássico de coincidência, em frequências mais baixas e devido às vibrações anti-simétricas e outra devida às vibrações simétricas em frequências mais altas. Em (22) o autor fornece-nos uma optimização das constituintes da placa de modo a poder ser obtida uma redução acústica máxima.

No final da década de 70 surgem algumas teses de doutoramento neste domínio onde podemos destacar pelo seu interesse as de MOORE em 1975 (24) e GUYADER em 1977 (25). Analisemo-las resumidamente:

MOORE considera painéis sanduíche simétricos, com núcleo homogéneo isotrópico ou ortotrópico e determina dois modelos analíticos para as expressões dos índices de redução sonora respectivos. São considerados os efeitos de deformações simétricas e anti-simétricas.

É desenvolvido o dimensionamento de um painel multicamada com elevado índice de redução sonora. São previstos valores de R superiores em 10 dB aos obtidos pela Lei Teórica da Massa nomeadamente pela anulação dos efeitos da vibração simétrica

e anti-simétrica na face oposta à qual a energia acústica é incidente.

Uma divisória foi construída com o objectivo de testar esse modelo de optimização, sendo composta por núcleo de "favos de mel" reorientados segundo uma direcção prevista e painéis de face em contraplacado. Os resultados concordaram razoavelmente com o previsto.

GUYADER no seu texto dá-nos uma expressão para o coeficiente de transmissão das divisórias multicamadas, ortotrópicas e finitas, unicamente em incidência oblíqua. É definida uma nova noção nos fenómenos característicos da transmissão sonora das paredes finitas, as pseudocoincidências. É igualmente desenvolvido um método de cálculo do coeficiente baseado numa combinação das aproximações determinísticas e estatísticas.

É determinado o esquema modal das divisórias multicamadas ortotrópicas e é feito estudo numérico adequado introduzindo a noção de densidade de famílias de modos, sendo desenvolvido um tipo de divisória leve com alto poder isolante.

Em 1979 GUYADER e LESUEUR (10) desenvolvem o trabalho anterior do primeiro autor, acima referido, para o caso de excitação acústica em Campo Difuso. É utilizado um método analítico para obter a média sobre os ângulos de incidência em alternativa ao método da dupla integração. São igualmente abordadas e discutidas a influência do amortecimento interno, ortotropia e número de camadas.

ORDUBADI e LYON entre 1977 e 1979 analisam em dois textos (27) (28) o isolamento de uma placa sanduíche com a particularidade de ter as faces ortotrópicas e para campo difuso. Ao contrário dos estudos até agora analisados, procura-se na ortotropia do material (como por exemplo no contraplacado em (29)), melhorar a redução sonora da divisória.

Nos últimos anos da década de 70 e nos primeiros da de 80 alguns trabalhos sobre este tema foram publicados para o

comportamento de placas leves e delgadas, destinadas a fuselagens de aviões que, por isso, não referiremos.

Pretendemos ter dado uma panorâmica do estudo da transmissão sonora das divisórias multicamadas, feito nas últimas décadas. Não foram referidos, por estarem fora do nosso espírito, textos referentes ao desenvolvimento do comportamento mecânico de placas multicamadas. Não temos, naturalmente, a pretensão de ter abordado todos os autores nem, muito menos, todos os textos que nesta área foram produzidos. A outros caberá um aprofundamento deste desiderato que não se enquadra nos objectivos deste estudo.

3 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 - Parâmetros influentes e objectivos a atingir

De acordo com as considerações gerais expressas no Capítulo II.1, interessa avançar um pouco mais na definição concreta do problema em estudo.

A determinação da redução sonora de uma divisória amovível requer o estudo de diversos aspectos que poderíamos agrupar em três grupos de temas:

- i) A potência acústica das ondas incidentes (no compartimento emissor);
- ii) A resposta mecânica da placa;
- iii) A radiação da placa (que pode ser caracterizada por uma impedância e uma directividade).

Mas, especialmente os dois últimos itens, não são de abordagem simples e directa devido à multiplicidade de parâmetros e características que influenciam o comportamento acústico de uma divisória não homogénea, leve.

Discriminemos, em análise abreviada e superficial, que factores podem interferir directa ou indirectamente na transmissão sonora através deste tipo de divisórias.

a) camadas

A existência de camadas, perfeitamente diferenciadas, é uma característica inerente ao tipo de divisórias que estamos a estudar. Mas muitas das suas características podem condicionar o efeito que se pretende obter, como por exemplo o número de camadas, a sua disposição ou as suas espessuras.

O número total de camadas componentes da placa pode ser par ou ímpar, implicando a possibilidade da estrutura ser simétrica ou assimétrica; a disposição dessas camadas pode apresentar tipos diferentes de alternâncias entre camadas macias e duras; a espessura quer total quer de cada camada componente face ao total, pode variar largamente.

Todas estas circunstâncias interferem na análise global de cada divisória e vão assim tornando complexo o comportamento dessas camadas.

b) condições de execução

Nesta alínea podemos incluir quer as condições de apoio que a parede divisória pode apresentar quer o tipo de união utilizado na justaposição das camadas.

As condições de apoio podem variar desde as situações extre-

mas e téóricas de divisórias simplesmente apoiadas até a encastramentos perfeitos passando por ampla gama de situações intermédias mais próximas da realidade. O tipo de apoio naturalmente irá condicionar o tipo de vibração da placa finita.

O tipo de união mais corrente entre as camadas é a colagem, que pode igualmente variar quer no seu tipo (pontual, em toda a superfície, etc.) quer nas suas características. Este parâmetro, muito negligenciado em alguns modelos téóricas, pode ter uma grande importância na alteração do amortecimento interno ou até na justificação para a dispersão de resultados observados nalguns casos.

Uma das características da colagem a interferir no conjunto é a própria espessura do filme de cola que pode variar entre 0,1 mm e 1,0 mm, podendo chegar-se à dúvida se deveremos mesmo considerar cada filme como mais uma camada na estrutura total. E se assim for, ficaremos com a dificuldade acrescida de definir os parâmetros dessas novas camadas, como por exemplo o módulo de elasticidade.

c) características físicas

Muitas são as características físicas dos constituintes das divisórias que contribuem para a complexidade de qualquer análise completa e exaustiva ao problema em questão.

A massa específica é elemento fundamental no comportamento acústico de qualquer parede tendo em atenção a Lei Teórica da Massa. Porém, para paredes leves, essa influência dilui-se grandemente na multiplicidade de outros factores.

Os módulos de elasticidade E dos materiais constituintes do painel sanduíche e do núcleo em particular, condicionam igualmente o fenómeno em estudo. Aqui salienta-se a dificuldade que existe em determinar correctamente o módulo de Young

de alguns materiais elasto-plásticos tais como o aglomerado de cortiça por exemplo.

O amortecimento interno, caracterizado pelo factor de perdas, tem uma grande importância para a modelação do comportamento acústico de divisórias para frequências superiores ou iguais às da frequência crítica.

Em multicamadas podemos diferenciar dois tipos de amortecimento interno: um do núcleo e outro das faces envolventes, sendo possíveis efeitos diferentes por acréscimos do factor de perdas num ou noutra dos casos.

Também não será de omitir o coeficiente de Poisson em especial na sua interferência na rigidez da divisória.

d) outros factores

Além dos já referidos, poderemos diferenciar alguns outros como a consideração dos efeitos do cisalhamento, inércia rotacional e longitudinal. Embora desempenhe papel pouco sensível na generalidade das placas homogêneas e isotrópicas pode mostrar-se não negligenciável nas placas compósitas.

E a anisotropia qual o seu efeito na zona do fenómeno da coincidência? E a importância, já segura, do quociente rigidez/massa para deslocar a região da coincidência para frequências mais ou menos elevadas? E a humidade, até onde afecta indirectamente outras características?

Todos estes são alguns dos parâmetros que influenciam o estudo neste domínio e que podem induzir efeitos diferentes com excitação acústica de incidência oblíqua ou de características difusas. Estamos mesmo em querer que os efeitos serão menos marcados em campo difuso do que em incidência oblíqua, tal como sugere GUYADER em (10).

A conjugação de todos estes factores, ou pelo menos daqueles considerados mais significativos, para a obtenção de um objectivo comum é o desiderato de qualquer abordagem deste tipo.

O objectivo elementar a tentar atingir é conseguir uma parede divisória que se comporte eficazmente em termos de isolamento sonoro.

As etapas para o obter podem-se subdividir em objectivos parcelares tais como optimizar o número de camadas ou optimizar as espessuras relativas.

Um dos caminhos a seguir genericamente seria, por exemplo, procurar baixar a frequência crítica para frequências inferiores às de interesse, atendendo a que, nesse caso, poderíamos obter reduções sonoras mais elevadas (usando o troço da curva de maior declive na Fig. 13). Mas não será mesmo concretizável a hipótese do abaixamento da redução sonora, para a frequência crítica, se atenuar ou desaparecer pela substituição de divisórias amovíveis homogéneas para não homogéneas? Esta seria outra das vias a percorrer.

3.2 - Tipos de abordagem teórica

Para podermos manusear os parâmetros em jogo para atingir os objectivos básicos, torna-se necessário desenvolver e expressões para determinação do factor caracterizador básico deste domínio, o Coeficiente de Transmissão.

A obtenção de expressões para esse índice é normalmente o resultado de modelações matemáticas, com diferente grau de complexidade, que foram desenvolvidas por alguns autores conforme referido no Capítulo II.2. Com o evoluir do conhecimento nesta área, vamos tendo acesso a expressões, de dia para dia, menos simples e assim de utilização sempre menos

acessível.

Na obtenção de expressões para o coeficiente de transmissão, podemos individualizar dois tipos de abordagem teórica que identificaremos por tipos N e M.

a) tipo N

Neste tipo de abordagem teórica são explicitamente considerados as N camadas constituintes da divisória (daí a denominação que atribuímos).

As equações de movimento e condições de fronteira são escritas para cada camada. São então impostas, como base de partida, as seguintes condições de continuidade de deslocamentos e de tensões:

$$\begin{array}{ll} u(1) = u(2) & \sigma_{zz}(1) = \sigma_{zz}(2) \\ v(1) = v(2) & \tau_{xz}(1) = \tau_{xz}(2) \\ w(1) = w(2) & \tau_{yz}(1) = \tau_{yz}(2) \end{array}$$

Os índices 1 e 2 representam dois pontos em cada lado de uma interface e estas igualdades repetem-se para cada interface separadora de duas camadas consecutivas.

A dificuldade da aplicação desta formulação surge do grande número de parâmetros a ter em consideração. O cálculo matemático torna-se excessivo mesmo para um número pequeno de camadas envolvidas.

b) tipo M

Neste tipo de abordagem teórica a divisória multicamadas é

assemelhada a uma divisória homogénea equivalente. Nessa transposição, uma (ou mais) das características consideradas fundamentais para o comportamento acústico da divisória multicamadas é "homogeneizada" através de uma "média" pesada (daí o M da denominação que atribuímos a esta abordagem).

Os parâmetros possíveis de serem "homogeneizados", por serem os mais representativos, são:

- i) Z impedância;
- ii) η factor de perdas;
- iii) B módulo de rigidez da parede à flexão.

Assim por um processo deste tipo obter-se-ia para a divisória multicamadas um valor fictício para a sua impedância "média" ou compósita ou ainda para o seu módulo de rigidez compósito. Outros parâmetros poderiam ser utilizados ou mesmo a conjugação de dois ou três de entre eles.

Naturalmente o rigor matemático de uma abordagem mais científica perde-se, mas contudo ganha-se grandemente na simplificação e rapidez de cálculo.

Interessa agora analisar individualmente as modelações matemáticas utilizadas por alguns autores na obtenção do coeficiente de transmissão (e consequentemente do índice de redução sonora, R) para divisórias multicamadas. Modelações matemáticas essas que se enquadram nos dois tipos de abordagem teórica que acabámos de apresentar acima.

Posteriormente proporemos uma modelação para a determinação do coeficiente de transmissão que pretendemos simples, de aplicação fácil e que permita obter resultados aceitáveis.

4 - MODELAÇÃO MATEMÁTICA

4.1 - Generalidades

Apresentam-se nos números seguintes diversas modelações matemáticas identificadas pelo nome do seu autor (ou do primeiro dos seus autores).

São as mesmas apresentadas por ordem cronológica da sua publicação e delas será feita análise sintética.

Iremos deter-nos especialmente nas expressões analíticas para os factores em jogo, nomeadamente o coeficiente de transmissão e/ou o índice de redução sonora.

Sempre que disponíveis, serão igualmente referidos resultados dos ensaios experimentais empreendidos pelos autores correspondentes, para assim se poder avaliar também da concórdância da teoria exposta com a aplicação a um caso concreto.

Após esta sequência de expressões desenvolvidas nos últimos trinta anos, iremos propor uma outra modelação, simples, para esta situação de divisórias amovíveis tipo sanduíche.

4.2 - Modelo HICKMAN

4.2.1 - Desenvolvimento Teórico

Conforme já referido no Capítulo II.2, HICKMAN et al. apresentaram em 1957 (11) uma modelação matemática para o problema em estudo, que iremos descrever brevemente.

Ressalve-se contudo que este estudo de HICKMAN et al. representa a primeira tentativa de abordagem teórica da transmissão sonora em painéis sanduíche.

O autor evoluiu a partir da situação de parede dupla. De um tipo de estrutura desse género, dupla, o autor atinge o painel sanduíche através do preenchimento do pequeno espaçamento entre paramentos com um material de muito fraca rigidez.

A divisória é considerada infinita; a incidência das ondas sonoras é considerada oblíqua e função de θ ; os meios de propagação das ondas são tidos como não dissipativos e são só considerados os efeitos das ondas transversais e longitudinais.

O objectivo experimental básico que presidiu à execução desse estudo foi o de obter placas sanduíche por onde a transmissão do som fosse total, sendo assim a situação inversa à habitualmente pretendida na Construção de Edifícios.

A expressão obtida para o coeficiente de transmissão é a seguinte:

$$\tau(\theta) = \frac{16N^4}{(U^2 - 4M^2 - V^2 \cos 2\phi)^2 + (4UM + V^2 \sin 2\phi)^2} \quad E9$$

sendo:

$$M = \frac{\rho_s \cos \theta}{\rho c} \left[\frac{c_d \cos^2 2\theta_n}{\cos \theta_d \tan(k_d g \cos \theta_d)} + \frac{c_n \sin^2 2\theta_n}{\cos \theta_n \tan(k_n g \cos \theta_n)} \right]$$

$$N = \frac{\rho_s \cos \theta}{\rho c} \left[\frac{c_d \cos^2 2\theta_n}{\cos \theta_d \sin(k_d g \cos \theta_d)} + \frac{c_n \sin^2 2\theta_n}{\cos \theta_n \sin(k_n g \cos \theta_n)} \right]$$

$$U = M^2 - N^2 - 1$$

$$V = M^2 - N^2 + 1$$

$$\phi = k \cdot h \cdot \cos \theta$$

em que:

- c - velocidade de propagação do som no meio envolvente;
- cd - velocidade de propagação das ondas longitudinais no meio sólido;
- cr - velocidade de propagação das ondas transversais no meio sólido;
- g - espessura dos paramentos;
- h - espessura da camada de separação entre as placas;
- k - número de onda no meio envolvente ($= 2\pi f/c$);
- kd - número de onda longitudinal no meio sólido ($= 2\pi f/cd$);
- kr - número de onda transversal no meio sólido ($= 2\pi f/cr$);
- θ - ângulo de incidência;
- θ_d - ângulo de refração das ondas longitudinais no meio sólido;
- θ_n - ângulo de refração das ondas transversais no meio sólido;
- ρ - massa específica do meio envolvente;
- ρ_s - massa específica do meio sólido (paramentos).

O autor obtém igualmente a expressão para a separação necessária entre os paramentos para obter uma transmissão acústica mínima (ou uma redução sonora máxima):

$$h_n (\text{min}) = h_0 + (n\lambda / 4) \cos \theta \quad \text{com } n = 1, 3, 5 \dots$$

sendo

$$h_0 = \frac{\lambda}{4\pi \cos \theta} \tan^{-1} \frac{-4UM}{U^2 - 4M^2}$$

com

λ - comprimento de onda no meio envolvente

O valor para o Coeficiente de Transmissão mínimo seria o seguinte:

$$T(\theta)_{\text{min.}} = 4N^4 \left[(M^2 - N^2)^2 + 2M^2 + 1 \right]^{-2}$$

4.2.2 - Desenvolvimento Experimental

A parte experimental desse estudo desenvolve-se considerando uma placa sanduíche aço-água-aço (paramentos de placas de aço e núcleo de água) tendo como meio exterior envolvente a água (a título informativo note-se que este trabalho foi desenvolvido em laboratórios da Marinha dos Estados Unidos).

Os testes foram feitos em placas sanduíche de 1,23 m x 0,76 m montadas em tanque anecóico e, da multiplicidade de resultados obtidos, interessa reter para o nosso estudo o seguinte (Fig. 14).

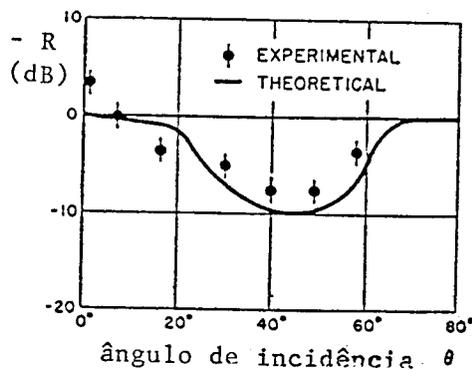


Fig. 14 - Transmissão através de uma "sanduíche" aço-água-aço em função do ângulo de incidência para uma separação fixada ($g = 1.67$ cm; $h = 0,256$ cm; $f = 18$ KHz).

No diagrama da Figura 14 são comparados os valores experimentais com os obtidos analiticamente por aplicação da expressão E9.

A placa sanduíche utilizada era constituída por faces externas de aço com 17 mm de espessura tendo um núcleo de água com 3 mm (espessura esta otimizada para obter transmissão acústica nula para incidência rasante).

Como se pode depreender do diagrama da figura, os resultados obtidos concordaram razoavelmente com a teoria exposta.

Da modelação apresentada interessa reter que a mesma só se aplica para placas de grandes dimensões (muito superiores aos comprimentos de onda nos meios sólidos envolvidos) e a sua validação experimental para situações correntes na Construção de Edifícios daria seguramente resultados mais afastados da realidade do que os expostos.

Fica porém esta análise matemática como um marco no desenvolvimento modelar do comportamento acústico das divisórias multicamadas.

4.3 - Modelo KURTZE

4.3.1 - Desenvolvimento Teórico

Em 1959 vem a público (12) uma modelação para as divisórias tricamadas apresentada por KURTZE e outros.

Nesse estudo, já os factores Rigidez e Amortecimento interno são tidos em consideração no comportamento acústico da divisória sanduíche.

Como fundamento teórico básico o autor considera que uma estrutura laminar que favoreça deformações transversais mais de que deformações de flexão (nas frequências de interesse), apresentaria bom comportamento acústico, visto que a velocidade de propagação das ondas transversais é apreciavelmente menor que a velocidade do som no ar.

Considerando o módulo de Young do material do núcleo muito inferior ao dos paramentos, KURTZE admite que a flexão do núcleo pouco contribui para a rigidez de flexão da placa compósita e que a propagação de ondas transversais é possível.

O fulcro desse trabalho é a obtenção de uma expressão para a Impedância equivalente da placa sanduíche. Ela é conseguida à custa da combinação de uma impedância de flexão e de uma impedância transversal e em que esta é obtida por soma das impedâncias das três camadas componentes da divisória.

A impedância equivalente da divisória é então obtida por:

$$Z = i\omega M + \frac{\kappa^4 B_c}{i\omega} \cdot \frac{2B_1 \kappa^4 / i\omega + \kappa^2 S_3 / i\omega}{\kappa^4 B_c / i\omega + 2\kappa^4 B_1 / i\omega + \kappa^2 S_3 / i\omega} \quad E10$$

sendo:

- M - massa superficial total da placa compósita;
- B1 - rigidez à flexão dos paramentos;
- Bc - rigidez à flexão da placa compósita;
- k - número de onda para ondas transversais ($= w/ct$);
- S3 - rigidez transversal do núcleo ($= \mu.b$).

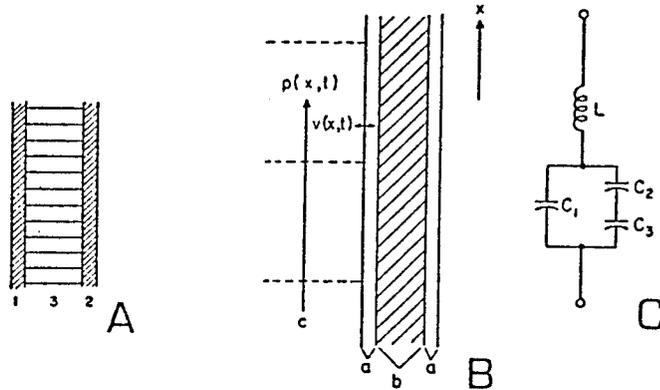


Fig. 15 - Esquema da placa sanduíche e de circuito eléctrico equivalente.

É igualmente feita uma analogia eléctrica com a divisória multicamada conforme se pode ver na Figura 15C e em que:

$$L = M$$

$$C1 = 1/k^4 Bc$$

$$C2 = 1/2k^4 B1$$

$$C3 = 1/k^2 S3$$

sendo:

- L - indutância;
- C - capacitância.

A expressão E_{10} da impedância total é de extrema utilidade pois com ela pode ser obtido o coeficiente de transmissão da globalidade da placa sanduíche. A evolução desta via não é contudo desenvolvida nesse texto.

O autor desenvolve igualmente um processo de otimização de uma divisória tricamada, de acordo com a teoria exposta e de modo a obter uma frequência crítica de valor elevado de modo à parede se comportar de acordo com a Lei da Massa na gama de frequências de interesse. Isso seria conseguido à custa de manter a velocidade das ondas transversais na placa abaixo de um certo limite.

Escolhendo um material para o núcleo de modo a resultar uma velocidade de ondas transversais menor que a velocidade do som no ar, pode-se deslocar a frequência crítica de uma divisória dada, para valores algumas oitavas mais elevados.

KURTZE parte então de duas condições:

1ª - velocidade das ondas transversais é menor ou igual a $2/3$ da velocidade de propagação do som no ar

$$C_s \leq (2/3) C_a$$

2ª - A frequência crítica tem valor elevado (optou pelo valor de 4800 Hz suficientemente elevado para os casos correntes).

Destas duas condições obtém finalmente as seguintes expressões com utilidade no dimensionamento de uma divisória sanduíche, otimizada de acordo com os princípios expostos:

$$E_3 b \leq (5/3) 10^8 M$$

$$E_1 a^3 \leq 10^{10} M \quad (\text{em dine/cm})$$

Assim, definidas as espessuras desejadas (a e b) e a massa total da divisória (M), determina-se a gama de materiais com interesse para o núcleo e paramentos (módulos de elasticidade E1 e E3).

4.3.2 - Desenvolvimento Experimental

A validação experimental apresentada desenvolve-se especialmente na determinação das velocidades de propagação das ondas transversais, pelo que não consideramos com interesse a sua apresentação.

4.4 - Modelo SHARP

4.4.1 - Desenvolvimento Teórico

SHARP et al. (16) apresentam em 1968 uma modelação distinta para a expressão do coeficiente de transmissão em divisórias de três camadas.

Nesse estudo a teoria exposta por HICKMAN (11) para paredes duplas é estendida a paredes múltiplas (com mais do que dois painéis) e a divisórias multicamadas. Os painéis são considerados infinitos e elásticos.

Através da consideração da transmissão e reflexão das ondas em cada painel considerado individualmente, obteve-se a seguinte expressão para o coeficiente de transmissão da globalidade da divisória múltipla de três painéis:

$$Z(\theta) = \frac{-Z_1 Z_3 \exp(-i k_y \overline{d_1 + d_2})}{R_1 R_3 \left\{ Z_2 - Z_2^{-1} \left[\exp(-2 i k_y d_2) / R_2 - R_3 \right] \left[-\exp(-2 i k_y d_1) / R_1 - R_2 \right] \right\}}$$

E11

Sendo T_1, T_3 e R_1, R_3 respectivamente os coeficientes de transmissão e os coeficientes de reflexão dos painéis externos, correspondendo o índice 2 ao painel intermédio cujas expressões individuais são as seguintes:

$$T = -C (Z_b + Z_e) \cos \theta / 2 \rho_0 c_0$$

$$R = -C \left(1 + Z_b Z_e \frac{\cos^2 \theta}{4 \rho_0^2 c_0^2} \right)$$

com

$$C = \left[\left(1 + Z_b \cos \theta / 2 \rho_0 c_0 \right) \left(1 - Z_e \cos \theta / 2 \rho_0 c_0 \right) \right]^{-1}$$

As expressões para as impedâncias de flexão (Z_b) e extensão (Z_e) são:

i) Painéis de pequena espessura

$$Z_b = i (B \kappa_x^4 / \omega - m \omega)$$

$$Z_e = \frac{4 i \rho c_s^2}{\omega h (\sigma - 1)} \left[\frac{2 \kappa_x^2 - (1 - \sigma) \omega^2 c_s^{-2}}{\kappa_x^2 - \omega^2 c_c^{-2}} \right]$$

ii) Solução exacta para painéis de qualquer espessura

$$Z_b = \frac{8 i \rho c_s^4}{\omega^3} \left[\beta \kappa_x^2 \tanh \left(\frac{\beta h}{2} \right) - \left(\kappa_x^2 - \frac{\omega^2}{2 c_s^2} \right) \frac{\tanh \frac{\alpha h}{2}}{\alpha} \right]$$

$$Z_e = \frac{i \rho c_s^4}{\omega^3} \left[-\beta \kappa_x^2 \coth \frac{\beta h}{2} + \left(\kappa_x^2 - \frac{\omega^2}{2 c_s^2} \right)^2 \frac{\coth \frac{\alpha h}{2}}{\alpha} \right]$$

onde

$$\alpha^2 = k_{xc}^2 - \omega^2 / c_c^2$$

$$\beta^2 = k_{xc}^2 - \omega^2 / c_s^2$$

$$k_{xc} = (\omega \cos \theta) / c_0$$

$$k_{y} = (\omega \sin \theta) / c_0$$

os valores das velocidades de propagação das ondas transversais e longitudinais são fornecidos por:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

$$c_c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Sendo

- c_0 - velocidade de propagação do som no ar;
- d - distância entre painéis;
- h - espessura do painel;
- ρ - massa específica do painel;
- ρ_0 - massa específica do ar.

Esta expressão embora se destine a paredes triplas com espaços de ar muito pequenos ($d < 30$ mm), pode igualmente aplicar-se para painéis sanduíche (daí o nosso interesse) conforme validação experimental do autor.

Contudo essa generalização para divisórias sanduíche tem de estar ciente que a obtenção da expressão citada não entrou em consideração com forças tangenciais nas interfaces das cama-

das. Não é pois totalmente correcto aplicá-la para painéis com camadas rigidamente unidas entre si. Assim, quanto mais rígido for o núcleo da divisória e a união com o conjunto, tanto mais a teoria exposta se afasta da realidade.

SHARP, embora aplique experimentalmente esta expressão E11 para divisórias não homogêneas, não deduz a correspondente expressão matemática para esse caso.

Por tal motivo, nós próprios a obtivemos e fornecemos aqui a expressão modificada para situações de divisórias sanduíche com paramentos de igual espessuras e constituição.

$$\zeta(\theta) = \frac{\zeta_1^2 \zeta_2}{R_1^2 [(1/R_1 - R_2)^2 - \zeta_2^2]} \quad \text{E12}$$

4.4.2 - Desenvolvimento Experimental

A validação experimental decorreu em dupla câmara reverberante e foi testada, entre outras, uma divisória leve aço-borracha-aço com 2 cm de espessura total.

A concordância teoria-prática está patente na Figura 16 onde foi utilizada a expressão E12.

Foram também testados os efeitos da variação de alguns parâmetros no comportamento geral da divisória sanduíche (Fig. 17 a 19).

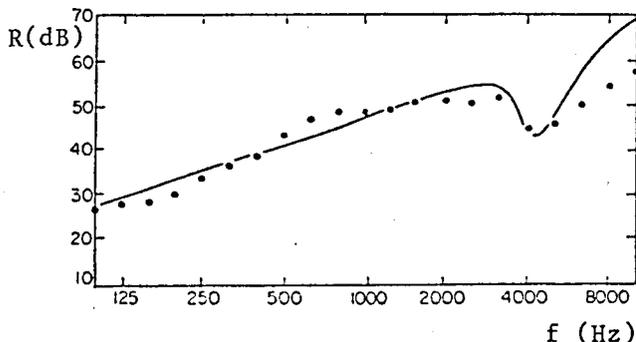


Fig. 16 - Índices de redução sonora do painel sanduíche aço-borracha-aço (os pontos indicam valores médios e a linha valores teóricos).

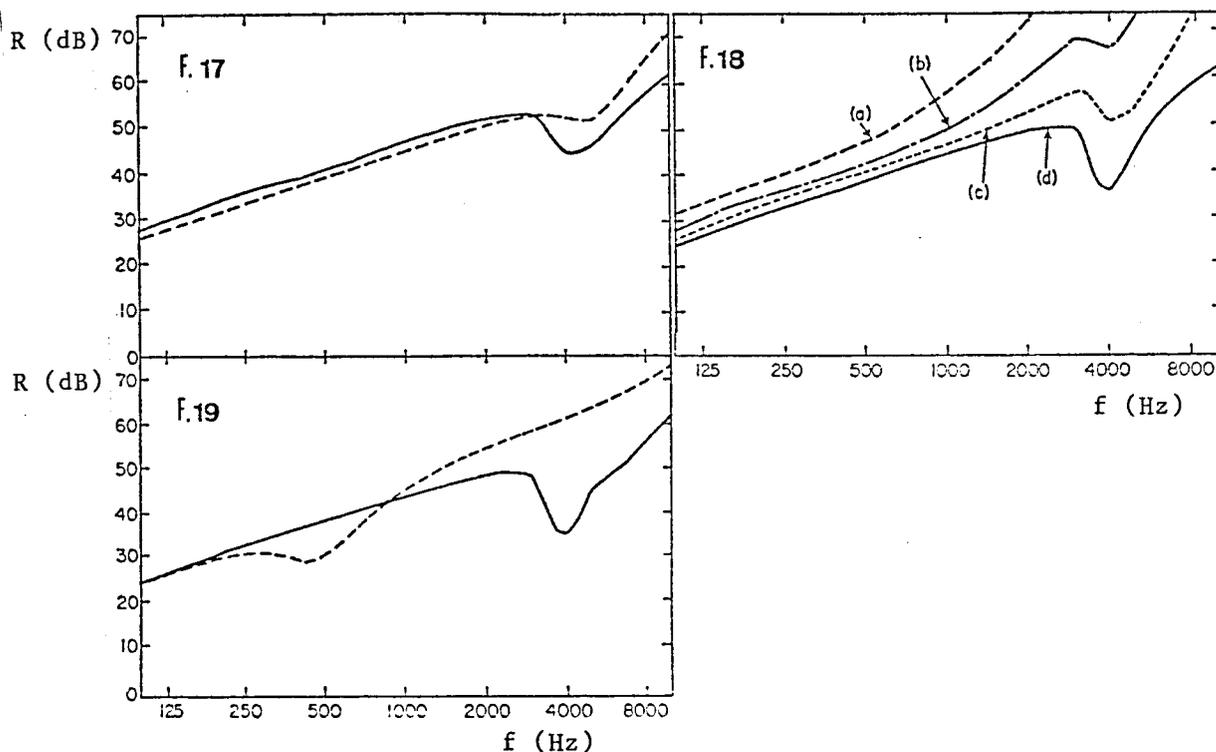


Fig. 17 - Efeito teórico de espessuras diferentes dos paramentos (tracejado para espessura de 1,6 mm de aço e traço contínuo para espessura de 3,2 mm) com núcleo de borracha.

Fig. 18 - Efeito teórico da espessura do núcleo de borracha em painel sanduíche com paramentos de aço com 3,2 mm de espessura (a-100 mm esp. núcleo; b-52 mm esp. núcleo; c-26 mm esp. núcleo; d-12 mm esp. núcleo).

Fig. 19 - Efeito teórico da rigidez do material do núcleo, tendo paramentos de aço com $E = 200$ GPa (tracejado para $E = 500$ MPa e traço contínuo para $E = 5$ MPa).

Na Figura 17 apreciamos o efeito de colocarmos paramentos de espessuras diferentes em alternativa a faces iguais, diminuindo a redução sonora na frequência crítica.

A Figura 18 mostra-nos o efeito obtido por aumento da espessura do núcleo, de 12 mm para 100 mm, respectivamente situações d) e a).

Pela Figura 19 podemos atender ao efeito da variação do valor do módulo de Young do material constituinte do núcleo que faz deslocar a frequência crítica para valores mais baixos.

4.5 - Modelo MEIER

4.5.1 - Desenvolvimento Teórico

MEIER em 1969 desenvolve um trabalho (18), retomado posteriormente em 1979 (32), onde obtém uma expressão para o índice de redução sonora de divisórias não homogêneas com três camadas, unicamente dependente da impedância de transmissão.

Essa impedância de transmissão é obtida para a globalidade do painel tricamada, por um desenvolvimento teórico e matemático mais profundo e exaustivo que qualquer outro surgido, sobre esse tema, até essa data.

A impedância de transmissão é obtida a partir das equações de movimento e das equações de equilíbrio de forças e momentos na secção da peça, não descurando o efeito das tensões de corte entre o núcleo e os paramentos do painel (Figura 20).

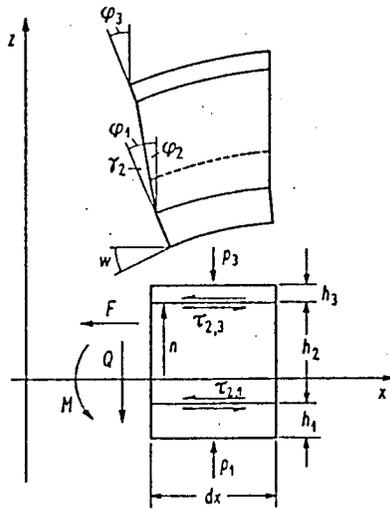


Fig. 20 - Elemento infinitesimal de painel sanduíche.

Após necessário desenvolvimento matemático, é-nos fornecida a expressão para a impedância de transmissão global dessa divi-sória de três camadas (de espessuras e constituições diferen-tes):

$$\begin{aligned}
 Z_m = & \frac{1}{1 + \frac{\omega^2}{c^2} \text{sen}^2 \theta \frac{1}{S_2} \left[B_2 + (h_2 - n) H_1 + n H_3 \right]} \times \\
 & \times \left\{ \frac{\omega^5}{i c^6} \text{sen}^6 \theta \frac{1}{S_2} \left\{ (B_1 - C_1 + B_3 - C_3) \times \left[B_2 + (h_2 - n) H_1 + n H_3 \right] - \right. \right. \\
 & - \left. \left[(h_2 - n)(D_1 - H_1) + n(D_3 - H_3) \right] (B_2 + C_1 + C_3) \right\} + \\
 & + \frac{\omega^3}{i c^4} \text{sen}^4 \theta (B_1 + B_2 + B_3) - \frac{\omega^3}{i c^2} \text{sen}^2 \theta \frac{m}{S_2} \left[B_2 + (h_2 - n) H_1 + \right. \\
 & \left. + n H_3 \right] + i \omega m \left. \right\}
 \end{aligned}$$

E13

em que

B_i - Rigidez à flexão da camada i ;

C_i - Rigidez à flexão da camada i associada com deformação de cisalhamento no núcleo;

D_i - Rigidez à extensão da camada i ;

H_i - Rigidez à extensão da camada i associada com deformação de cisalhamento ao núcleo;

n - Posição do eixo neutro;

S_2 - Rigidez transversal do núcleo.

são obtidos por:

$$B_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} \left[\frac{h_1^2}{12} + \left(h_2 - n + \frac{h_1}{2} \right)^2 \right]$$

$$B_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu^2} \left[\frac{h_2^2}{12} + \left(n - \frac{h_2}{2} \right)^2 \right]$$

$$B_3 = \frac{E_3 h_3}{1 - \nu^2} \left[\frac{h_3^2}{12} + \left(n - \frac{h_3}{2} \right)^2 \right]$$

$$C_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} \left(h_2 - n + \frac{h_1}{2} \right) (h_2 - n)$$

$$C_3 = \frac{E_3 h_3}{1 - \nu^2} \left(n + \frac{h_3}{2} \right) n$$

$$D_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} \left(h_2 - n + \frac{h_1}{2} \right)$$

$$D_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu^2} \left(n - \frac{h_2}{2} \right)$$

$$H_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} (h_2 - n)$$

$$D_3 = \frac{E_3 h_3}{1 - \nu^2} \left(n + \frac{h_3}{2} \right)$$

$$H_3 = \frac{E_3 h_3}{1 - \nu^2} n$$

$$n = \frac{h_2}{2} \cdot \frac{2 + \frac{h_1}{h_2} + \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} - \frac{E_3 h_3^2}{E_1 h_1 h_2} - g \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{E_2 h_2 h_1}{E_3 h_3^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right)}{1 + \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} + \frac{E_3 h_3}{E_1 h_1} - g \left(\frac{1}{2} + \frac{h_1}{2 h_3} + \frac{E_2 h_2}{4 E_1 h_1} + \frac{E_2 h_2 h_1}{4 E_3 h_3^2} \right)}$$

$$g = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\text{sen}^2 \Theta}{G_2 (1 - \nu^2)} \frac{E_3 h_3^2}{G_2 (1 - \nu^2)}$$

$$S_2 = G_2 h_2$$

Em que h_1 , h_2 e h_3 são as espessuras respectivamente do paramento exterior, núcleo e paramento interior e m é a massa superficial total da placa.

Esta expressão E13 pode ser simplificada para a situação que nos interessa particularmente neste texto, a da divisória sanduíche (com paramentos iguais). Assim, embora não seja fornecida por MEIER nesse estudo, executámos esse trabalho e obtivámos:

$$Z_m = \frac{1}{1 + \frac{\omega^2}{c^2} \text{sen}^2 \Theta \frac{1}{S_2} (B_2 + h_2 H_1)} \cdot \left\{ \frac{\omega^5 \text{sen} \Theta}{i c^6 S_2} \left\{ (2B_1 - 2C_1) \times \right. \right.$$

$$\times (B_2 + h_2 H_1) - \left. \left[h_2 (D_1 - H_1) \right] (B_2 + 2C_1) \right\} + \frac{\omega^3 \text{sen}^4 \Theta}{i c^4} \times$$

$$\left. \times (2B_1 + B_2) - \frac{\omega^3 \text{sen}^2 \Theta \cdot m}{i c^2 S_2} (B_2 + h_2 H_1) + i \omega m \right\} \quad \text{E14}$$

agora já só com

$$B_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} \left[\frac{h_1^2}{12} + \left(\frac{h_2}{2} + \frac{h_1}{2} \right)^2 \right]$$

$$B_2 = \frac{E_2 h_2^3}{1 - \nu^2}$$

$$C_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} \left(\frac{h_2}{2} + \frac{h_1}{2} \right) \frac{h_2}{2}$$

$$D_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} \left(\frac{h_2}{2} + \frac{h_1}{2} \right)$$

$$H_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu^2} \left(\frac{h_2}{2} \right)$$

$$S_2 = G_2 h_2$$

O índice de Redução Sonora, para campo difuso, é então obtido pela expressão:

$$R_d = -10 \log \left[\int_0^1 \left| 1 + \frac{Z_m(\lambda \sin^2 \theta) \sqrt{1 - \lambda \sin^2 \theta}}{2 \rho_0 c_0} \right|^{-2} \cdot d(\lambda \sin^2 \theta) \right]$$

Sendo Z_m obtido pelas expressões já referidas.

Note-se porém que o limite superior da integração apresentada deverá ser, no máximo, 0,99 ou 0,98 e não o valor 1, para assim evitar tomar em consideração as incidências rasantes, pelas razões apontadas no Capítulo I.5.3.1.

Utilizando a teoria delineada, é previsto um comportamento para divisórias sanduíche que pode superar o previsível pela Lei Teórica da Massa a partir de uma determinada frequência, denominada frequência de transição, f_t (Figura 21).

Podemos mesmo obter uma expressão para o módulo de elasticidade transversal limite do material constituinte do núcleo

para tal situação acontecer:

$$\phi_2 \geq \frac{J_t \pi}{h_2} \sqrt{2B_1 \cdot m_t}$$

Sendo m_t a massa superficial total da divisória sanduíche.

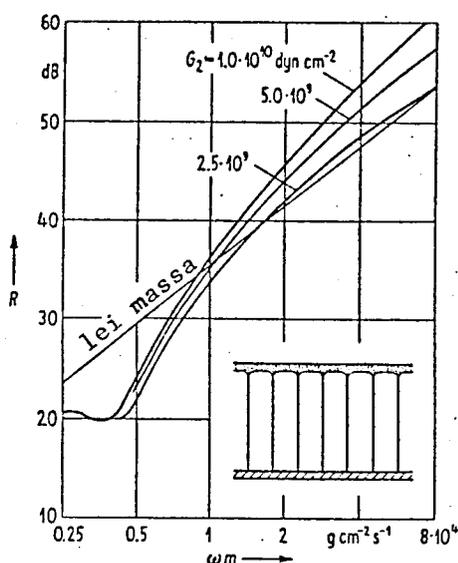


Fig. 21 - Índice de Redução Sonora versus frequência, calculado para placas sanduíche com intervalo de integração de 0 a 82,5 graus ($h_3/h_1 = 1$, $h_2/h_1 = 20$).

4.5.2 - Desenvolvimento Experimental

A validação experimental foi desenvolvida em modelos à escala (0,7 m²) de divisórias leves, nomeadamente em painéis sanduíche com núcleo "favo de mel" e paramentos de alumínio.

Conforme se constata na Figura 22, a concordância entre os valores previstos por aplicação da expressão matemática (b) e os resultados experimentais (a) é francamente boa para frequências médias e altas. Nas frequências baixas, os efeitos

das fronteiras do painel e das ondas de flexão livre são visíveis.

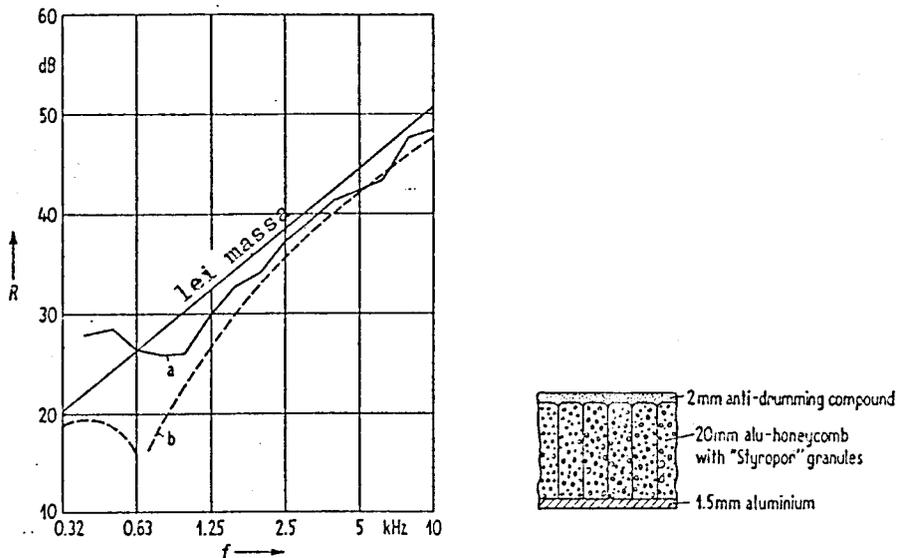


Fig. 22 - Índice de Redução Sonora versus frequência (a - valores medidos; b - valores calculados com intervalo de integração de 0 a 82,5 graus).

Alguns anos mais tarde MEIER apresenta (32) a evolução desta sua abordagem experimental e aí apresenta-nos um dimensionamento de divisórias sanduíche de alto poder isolante e efetivamente com reduções sonoras superiores às previstas pela Lei Teórica da Massa (Figura 23).

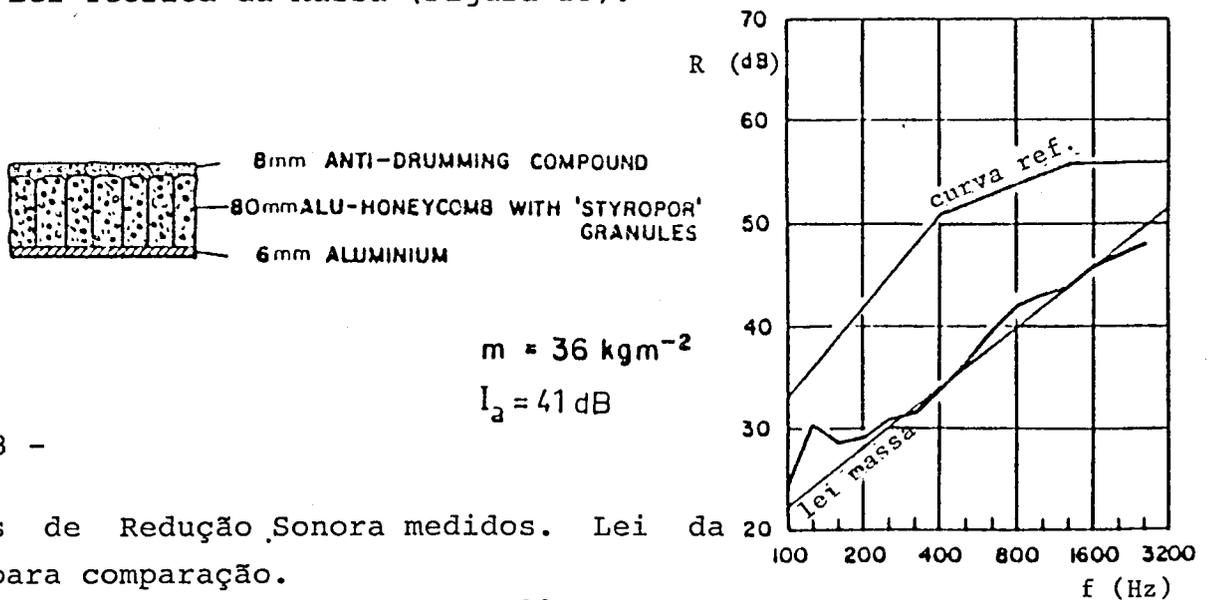


Fig. 23 -

Índices de Redução Sonora medidos. Lei da Massa para comparação.

4.6 - Modelo VAL

4.6.1 - Desenvolvimento Teórico

O engenheiro francês VAL propõe (20) em 1973 uma expressão para o cálculo do índice de redução sonora.

Baseando-se nas teorias de LONDON (4) (5) e de HICKMAN (11), VAL desenvolve a modelação da divisória sanduíche a partir do estudo acústico de um paramento considerado isoladamente, passando de seguida a dois paramentos iguais separados por lâmina de ar e finalmente ao preenchimento desse espaço de ar com material intercalar.

Obtém então a expressão seguinte para o índice de Redução Sonora de uma divisória sanduíche:

$$R(\theta) = 10 \log 2 \int_0^{\pi/2} \left[\text{ch. b. e. } \cos \theta \left(1 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_0} \cos \theta \right) + \right. \\ \left. + \text{sh. b. e. } \cos \theta \left(\frac{Z_m \cos \theta}{Z_0} + \frac{Z_1 Z_2 \cos \theta}{Z_0 Z_m} + \frac{Z_1}{Z_0} \right) \right]^2 \sin \theta \cos \theta \, d\theta$$

E15

Sendo

Z_1, Z_2 - impedâncias dos paramentos (=i.w.m);

Z_0 - impedância do ar ($=\rho_0 c_0$);

Z_m - impedância característica de um material de espessura infinita.

$$Z_m = (-i.K.b)/(w.y)$$

A passagem para um material de espessura finita é feita com o auxílio de Z_e (impedância característica do material com espessura e). Em que

$$Z_e = Z_m \coth b.e$$

(esta conversão está já substituída na expressão E15)

Com

$$b = \alpha + i\beta$$

e

α - coeficiente de absorção do material intercalar;

β - constante de fase;

e - espessura do núcleo;

K - rigidez dinâmica;

y - porosidade do material intercalar.

Esta modelação, além de simplista e não sendo apoiada por validação experimental, leva-nos a algum cepticismo perante afirmações bastante optimistas como, por exemplo, as que chegam a prever pendentes de até 30 dB/oitava para as curvas do índice de redução sonora/frequência em certos casos.

Além disso a integração apresentada para o campo difuso feita até ao limite de 90° é totalmente inadequada e em nenhuma circunstância deveria ultrapassar o valor limite máximo de 85°.

A não consideração de forças tangenciais entre as camadas afasta igualmente da realidade a teoria exposta. A utilização de um material muito rígido para o núcleo pode destruir, total ou parcelarmente, os benefícios atribuídos a uma boa colocação da frequência de ressonância, pois levará os dois paramentos a uniformizar os seus movimentos em todos os

pontos da estrutura.

VAL, através da evolução da sua análise, obtém um tipo de divisória leve com alto poder isolante (Figura 24), em especial reduzindo o valor da frequência de ressonância para limites abaixo da gama de interesse (próximo dos 125 Hz) através da seguinte expressão:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} K}$$

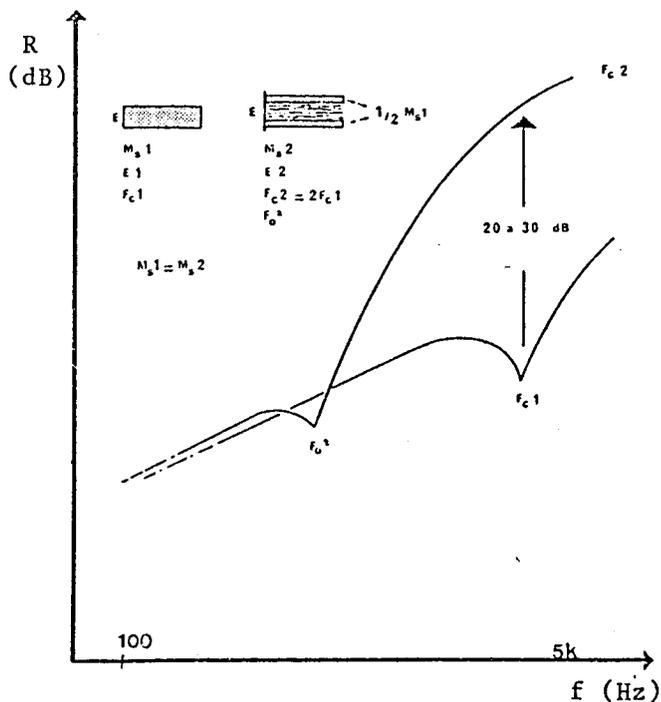


Fig. 24 - Índices de Redução Sonora versus frequência. Previsão para divisória de alto poder isolante.

4.7 - Modelo DYM

4.7.1. - Desenvolvimento Teórico

C. DYM e M. LANG em 1974 tornam público (21) um trabalho, posteriormente corrigido (23), onde consolidam, num único modelo, os principais pontos do comportamento acústico do painel sanduíche.

Analisando os erros e impressões de trabalhos anteriores, nomeadamente os de FORD (14) e SMOLENSKY (15), desenvolvem a sua análise a partir das funções de deslocamentos da placa.

As suas hipóteses de trabalho foram:

- Os paramentos estão sujeitos à flexão e extensão sendo os eixos neutros considerados nas interfaces;
- O corte transversal e a inércia rotacional são negligenciados nos paramentos;
- O núcleo é espesso e as tensões transversais não são nulas contrariamente à hipótese clássica das placas finas;
- O núcleo trabalha ao corte;
- Não é introduzida nenhuma dissipação ou amortecimento;
- A placa é considerada infinita.

São introduzidos dois modos de vibração dos painéis: Simétrico e Anti-simétrico (Figura 25).

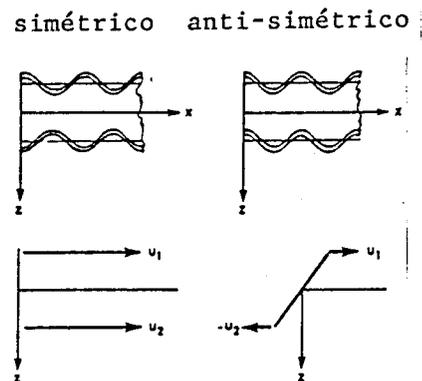


Fig. 25 - Vibração simétrica e anti-simétrica. Deslocamentos das faces.

A partir desta última consideração e das equações de deslocamentos, são estabelecidas as expressões para as energias cinética e potencial dos paramentos e do núcleo.

O desenvolvimento do estudo orienta-se para a obtenção de uma expressão da impedância reflectindo os efeitos dos modos de vibração simétrico e anti-simétrico. A transparência da placa é obtida somando a contribuição destes dois tipos de vibração.

DYM não trabalha em onda estacionária mas sim em propagação. Surgem duas coincidências sendo uma correspondente ao efeito clássico da frequência e devida às vibrações anti-simétricas e outra correspondente às vibrações simétricas; esta surge a frequências mais elevadas que a primeira.

O Índice de Redução Sonora do painel sanduíche pode então ser obtido pela expressão:

$$R = 20 \log \left| \frac{(1 + z_a / 2z_0)(1 + z_\lambda / 2z_0)}{z_\lambda / 2z_0 - z_a / 2z_0} \right| \quad \text{E16}$$

sendo

$$z_0 = \rho_0 c_0 / \cos \theta \quad (\text{impedância do ar "modificada"})$$

e z_s e z_a são as impedâncias simétrica e anti-Simétrica que podem ser obtidas das soluções dos sistemas de equações diferenciais:

$$[D_s] \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \vartheta \end{Bmatrix}_\lambda = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_2 - p_1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$[D_a] \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix}_a = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_1 - p_2 \end{Bmatrix}$$

em que

D_s e D_a são matrizes simétricas de operadores diferenciais que estão explicitamente referidas em Apêndice de (21).

u , w e g representam respectivamente os deslocamentos, as rotações e o termo dilatacional da placa sanduíche.

p_1 e p_2 referem-se às pressões acústicas actuantes em cada paramento do painel.

Da expressão E16 pode-se concluir que o coeficiente de transmissão da placa compósita será:

$$\tau = \left[\frac{2z_0(z_s - z_a)}{(2z_0 + z_a)(2z_0 + z_s)} \right]^2 \quad \text{E17}$$

Verifica-se então que, quando as duas impedâncias (simétrica e anti-simétrica) forem iguais, teoricamente não haverá energia sonora transmitida. Seria pois possível (em teoria) escolher as propriedades do painel de modo a manter um dos paramentos imóvel quando exista uma variação da pressão acústica incidente no paramento oposto.

Considerando que, em geral, as impedâncias simétrica e anti-

-simétrica do painel são muito superiores à impedância do ar "modificada" (Z_0), obtemos:

$$\zeta = \left(\frac{2Z_0}{Z_a} - \frac{2Z_0}{Z_s} \right)^2$$

ou

$$\frac{P_i}{P_t} = \left(\frac{2Z_0}{Z_a} - \frac{2Z_0}{Z_s} \right)^{-1}$$

Resulta então que as duas impedâncias do painel se comportam aproximadamente como se estivessem em paralelo uma com a outra.

4.7.2 - Desenvolvimento Experimental

Uma análise experimental é feita com resultados obtidos em (14) e (33) em painéis respectivamente 1,0 m x 1,0 m e 0,6 m x 0,6 m. Nesses, os efeitos das ressonâncias simétrica e anti-simétrica apresentam-se exagerados devido a que as frequências de ressonância são mais elevadas do que as que seria de esperar em painéis reais de maiores dimensões (por exemplo 2,50 m x 2,50 m) (Figura 26).

Igualmente se verifica que a coincidência simétrica ocorre para frequências inferiores às da coincidência anti-simétrica (Figura 26).

Noutra publicação (22) os autores tentam otimizar os constituintes de uma divisória sanduíche de peso muito baixo, de modo a obter redução sonora máxima.

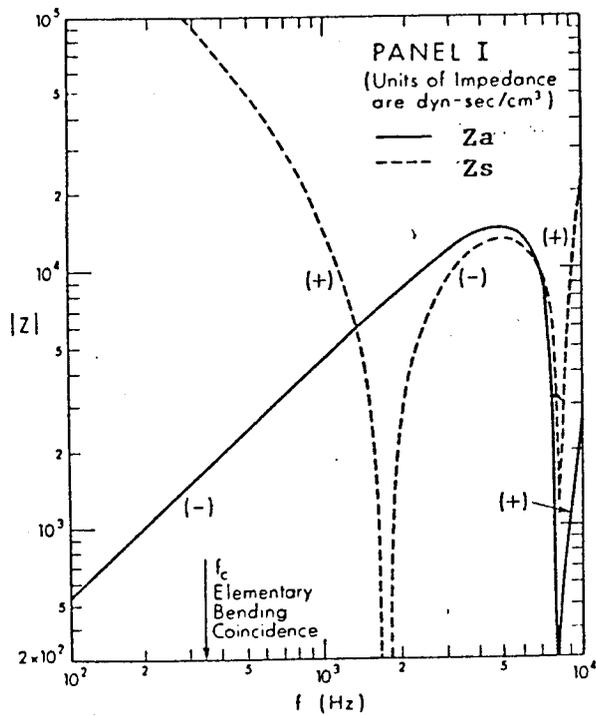


Fig. 26 - Impedâncias simétricas e anti-simétricas para incidência rasante (tracejado imp. simétrica; linha contínua impedância anti-simétrica).

Partindo de quatro casos de possível otimização dos componentes, os autores fixam-se em dois tipos de soluções.

Uma, com pouco interesse prático (para paredes não homogêneas), é a de obter divisórias com elevada massa e fraca rigidez de modo a que o seu índice de redução sonora siga o previsto pela Lei da Massa.

Outra via mais interessante para divisórias sanduíche é a de aumentar a rigidez do núcleo de modo a rejeitar quer a coincidência simétrica em alta frequência quer simultaneamente a coincidência anti-simétrica em baixas frequências (Figura 27). A primeira é quase eliminada e a segunda ocorre para frequências muito baixas.

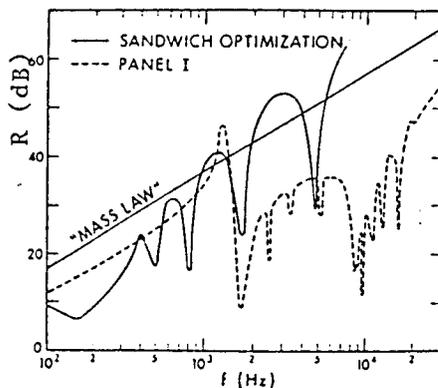


Fig. 27 - Índice de Redução Sonora - comparação. Otimização.

Em virtude do erro existente em (21), os resultados obtidos a partir dessa versão do estudo de DYM, têm valores um pouco incorrectos em questões de pormenor e devem ser vistos com algum cuidado. Uma versão revista deste texto (22) estava prevista pelo autor mas não tivemos conhecimento da sua efectiva publicação.

4.8 - Modelo MOORE

4.8.1. - Desenvolvimento Teórico

Em 1975 JAMES MOORE apresenta ao M.I.T. a sua tese de doutoramento (24) onde desenvolve o estudo da transmissão do som através de paredes não homogéneas de três camadas.

Tal como DYM et al. (21), este autor vai obter uma expressão para o índice de redução sonora função das impedâncias simétrica e anti-simétrica.

Todo o seu estudo está centrado em divisórias de três camadas

com paramentos homogêneos e isotrópicos mas com duas hipóteses de trabalho quanto ao núcleo: Núcleo Isotrópico ou Núcleo Ortotrópico.

Passemos então a descrever brevemente as bases teóricas deste modelo para a situação específica da divisória com núcleo homogêneo e isotrópico.

O painel é considerado infinito e os deslocamentos normais dos paramentos são separados em componentes simétricos e anti-simétricos (Figura 25). Da mesma maneira define forças por unidade de área simétricas e anti-simétricas a actuar em ambas as faces do painel (Figura 28).

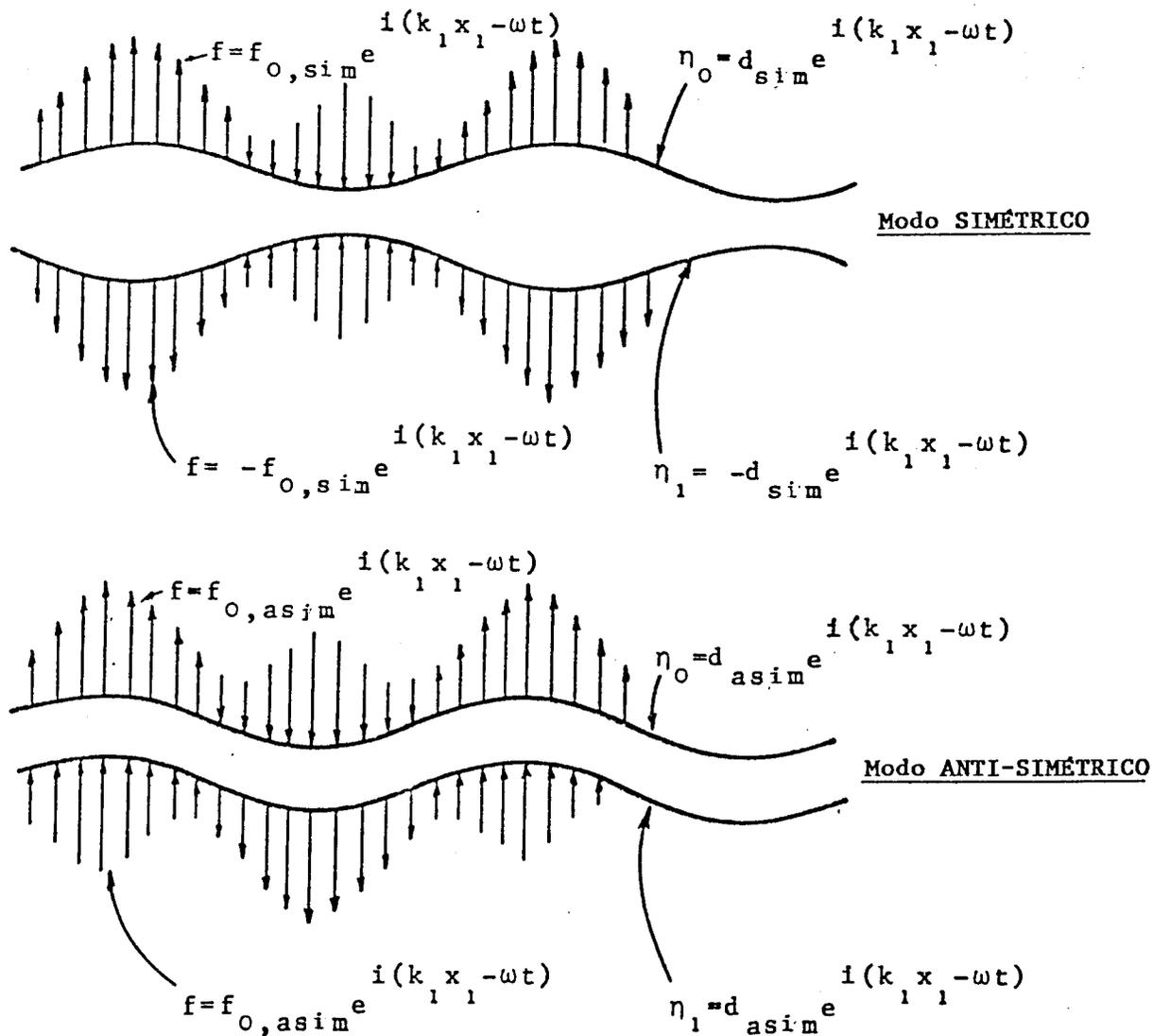


Fig. 28 - Deslocamentos simétricos e anti-simétricos e forças por unidade de área de um painel composto.

As impedâncias simétrica e anti-simétrica são definidas em termos das correspondentes amplitudes dos deslocamentos normais e das forças por unidade de área.

Considerando como separáveis os dois tipos de movimentos, torna-se possível obter soluções individualizáveis para as situações simétrica e anti-simétrica. A solução final completa será então obtida por sobreposição linear dos dois casos.

A expressão para as impedâncias é função das propriedades dos materiais constituintes do núcleo e paramentos, da frequência, do ângulo de incidência e da velocidade de propagação do som no ar.

$$\zeta(\theta) = \left| \frac{z_0(z_s - z_a)}{(z_a + z_0)(z_s + z_0)} \right|^2 \quad \text{E18}$$

em que:

z_a , z_s - impedâncias anti-simétrica e simétrica;
 z_0 - impedância do ar "modificada" ($= \rho_0 c_0 / \cos \theta$).

Esta expressão é muito semelhante aquela por nós obtida (E17) seguindo o trabalho de DYM.

A impedância do painel compósito é pois determinada pela adição em paralelo (tal como referíamos em 4.6.) das impedâncias simétrica e anti-simétrica. Ela é então definida como:

$$z_{\text{comp}} = \frac{(z_a + z_0)(z_s + z_0)}{z_a - z_s} \quad \text{E19}$$

Pela expressão (E18) pode-se verificar que, teoricamente, a transmissão sonora será mínima quando as impedâncias simétri-



ca e anti-simétrica se igualarem e será máxima quando a impedância anti-simétrica for nula sendo a impedância simétrica de valor muito superior à impedância do ar modificada.

Assim:

$$\begin{aligned} \zeta(\theta) &= 0 & \text{se } Z_a &= Z_s \\ \zeta(\theta) &\approx 1 & \text{se } Z_a &= 0 \text{ e } |Z_s| > Z_0 \end{aligned}$$

As expressões para obtenção das impedâncias simétrica e anti-simétrica foram obtidas partindo das equações diferenciais de movimento dos paramentos. Os efeitos do amortecimento interno no núcleo foram incluídos na formulação fazendo com que o módulo de elasticidade transversal e o módulo de Young fossem complexos.

Os dois conjuntos seguintes de expressões são as equações de movimento simétrico e anti-simétrico para a placa compósita.

$$\left\{ D_p k_1^4 - \rho_p \omega^2 + A L_0 + A L_1 + \frac{i k_1 t_p}{2} \quad (AS1-AS0) \right\} d_s + \left\{ AS1-AS0 \right\} L_s = f_o$$

$$\left\{ E_{11}^{fs} t_p k_1^2 - \rho_p \omega^2 + S T_0 - S T_1 \right\} L_s + \left\{ AS0-AS1 + \frac{i k_1 t_p}{2} \quad (ST0-ST1) \right\} d_s = 0$$

$$\begin{aligned} & - \left\{ AS0 + AS1 \right\} L_a + \left\{ D_p k_1^4 - \rho_p \omega^2 + AS0 - A L_1 \right. \\ & \left. - \frac{i k_1 t_p}{2} \quad (AS0+AS1) \right\} d_a = f_o \end{aligned}$$

$$\left\{ E_{11}^{fs} t_p k_1^2 - \rho_p \omega^2 + ST0 + ST1 \right\} L_a$$

$$+ \left\{ \frac{ik_1 t_p}{2} (ST0+ST1) + AS0 + AS1 \right\} d_a = 0$$

em que AS0, AS1, AL0, AL1, ST0 e ST1 são coeficientes relacionando tensões normais ou de corte com deslocamentos nas faces, definidos por MOORE e que, por bastante extensos, não incluiremos neste texto. Os índices p referem-se aos parâmetros, t representa a espessura, D a rigidez de flexão, d a amplitude dos deslocamentos normais e fo a força por unidade de área.

As referidas equações são resolvidas de modo a serem finalmente obtidas as impedâncias:

$$Z_s = - f_o / (i.w.ds)$$

$$Z_a = - f_o / (i.w.da)$$

Por exemplo, simplificando para o caso de incidência normal e a baixas frequências, teríamos:

$$Z_s = \frac{2i(\lambda_c + 2\mu_c)}{\omega L} - i.w. \left(\rho_p + \frac{\rho_c}{6} L \right)$$

E20

$$Z_a = - i.w. \left(\rho_p + \frac{\rho_c}{2} L \right)$$

em que

- L - espessura do núcleo;
- ρ_c - massa por unidade de volume;
- ρ_p - massa por unidade de superfície do paramento;
- λ_c e μ_c - constantes de Lamé do núcleo.

Pelo que, nesse caso simplificado e admitindo $|Z_s| \gg Z_0$, teríamos a partir de (E18) a seguinte expressão:

$$\zeta(\theta) = \frac{1}{1 + \left[\frac{(\rho_P + \frac{1}{2} \rho_c L) \omega \cos \theta}{\rho_0 c_0} \right]^2} \quad \text{E21}$$

que não é mais do que uma outra forma da Lei da Massa.

MOORE desenvolve igualmente o estudo das frequências de coincidência em função do comportamento das impedâncias simétrica e anti-simétrica.

Todo o estudo para divisórias com núcleo isotrópico é também reanalisado e reformulado para painéis com núcleos ortotrópicos (como por exemplo tipo "favo de mel") nos quais em especial, o ângulo azimutal ϕ passa a ter grande importância.

Toda a modelação matemática apresentada torna-se de difícil aplicação devido, em particular, ao processo trabalhoso de determinação das impedâncias simétrica e anti-simétrica.

Em 1979, ORDUBADI (28) desenvolve este modelo para a situação dos paramentos serem constituídos por materiais ortotrópicos (contraplacado, por exemplo).

4.8.2 - Desenvolvimento Experimental

A avaliação experimental foi desenvolvida em dupla câmara reverberante e em painéis com uma dimensão total de 1,22 m x 2.44 m.

Foram testados três painéis sanduíche. Dois constituídos por paramentos de 6 mm de contraplacado e núcleo de 76 ou 38 mm de poliestireno extrudido e o terceiro, igualmente de para-

mentos de contraplacado, mas com núcleo tipo "favo de mel" com 38 mm de espessura.

Os dois primeiros enquadram-se no conjunto de painéis com núcleo isotrópico e o terceiro no de painéis com núcleo ortotrópico.

Os resultados obtidos comparados com as previsões teóricas, encontram-se patentes nas Figuras 29 a 31.

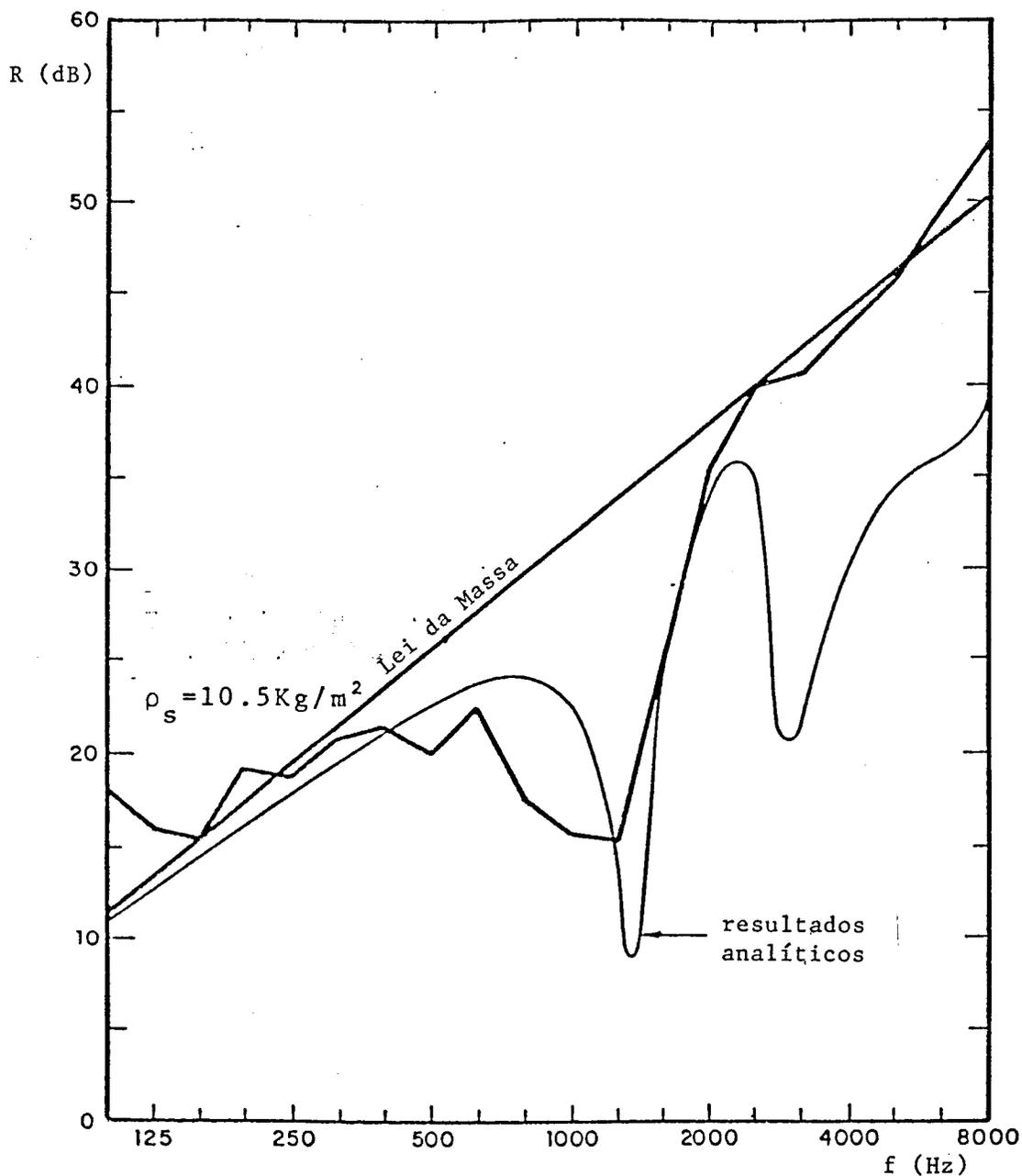


Fig. 29 - Resultados experimentais para o Índice de Redução Sonora e para painel sanduíche de 76 mm de espessura (núcleo de poliestireno).

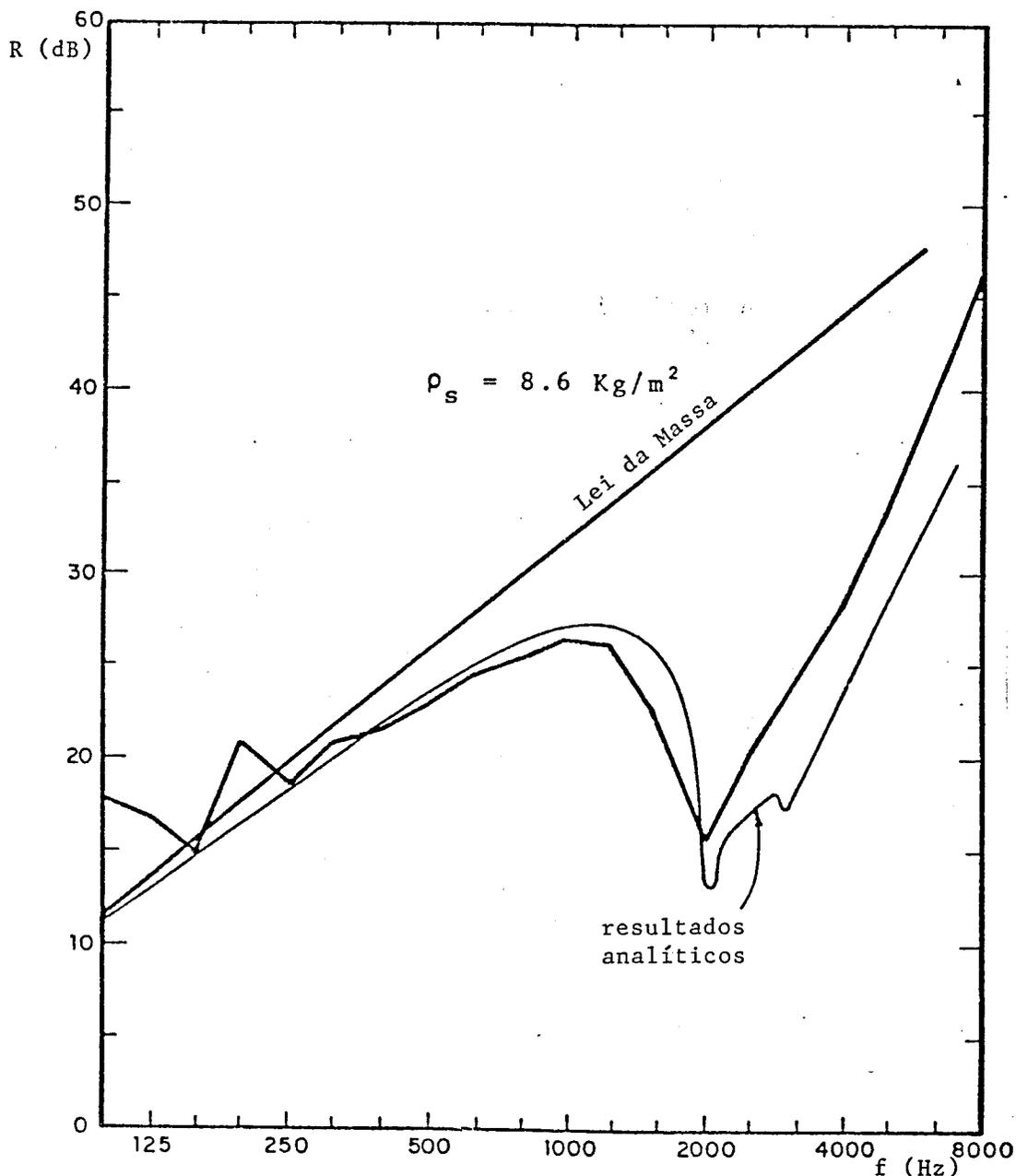


Fig. 30 - Resultados para o Índice de Redução Sonora para painel sanduíche de 38 mm de espessura (núcleo de poliestireno).

A validação teoria-prática é aceitável para os casos testados, embora para baixas frequências o desvio assinalado se possa justificar quer por influência da transmissão marginal quer por um insuficiente número de modos do painel e da câmara, para a zona de frequências considerada.

O autor igualmente dimensiona uma nova divisória sanduíche com elevado índice de redução sonora. Aí o objectivo é reduzir a rigidez do núcleo à compressão de modo que a ressonância

cia simétrica e efeitos de coincidência associados, sejam deslocados para frequências abaixo das bandas de frequência associadas à audição da palavra.

O dimensionamento sugerido refere-se a uma divisória com núcleo tipo "favo de mel" modificado e com paramentos de contraplacado com 10 mm de espessura. O "favo de mel" é reorientado de modo que a um dos dois eixos principais que seja "flexível" à compressão, é alinhado perpendicularmente ao plano do painel compósito. Isto reduz a frequência de ressonância do modo simétrico. Igualmente a densidade do material do núcleo é alterada.

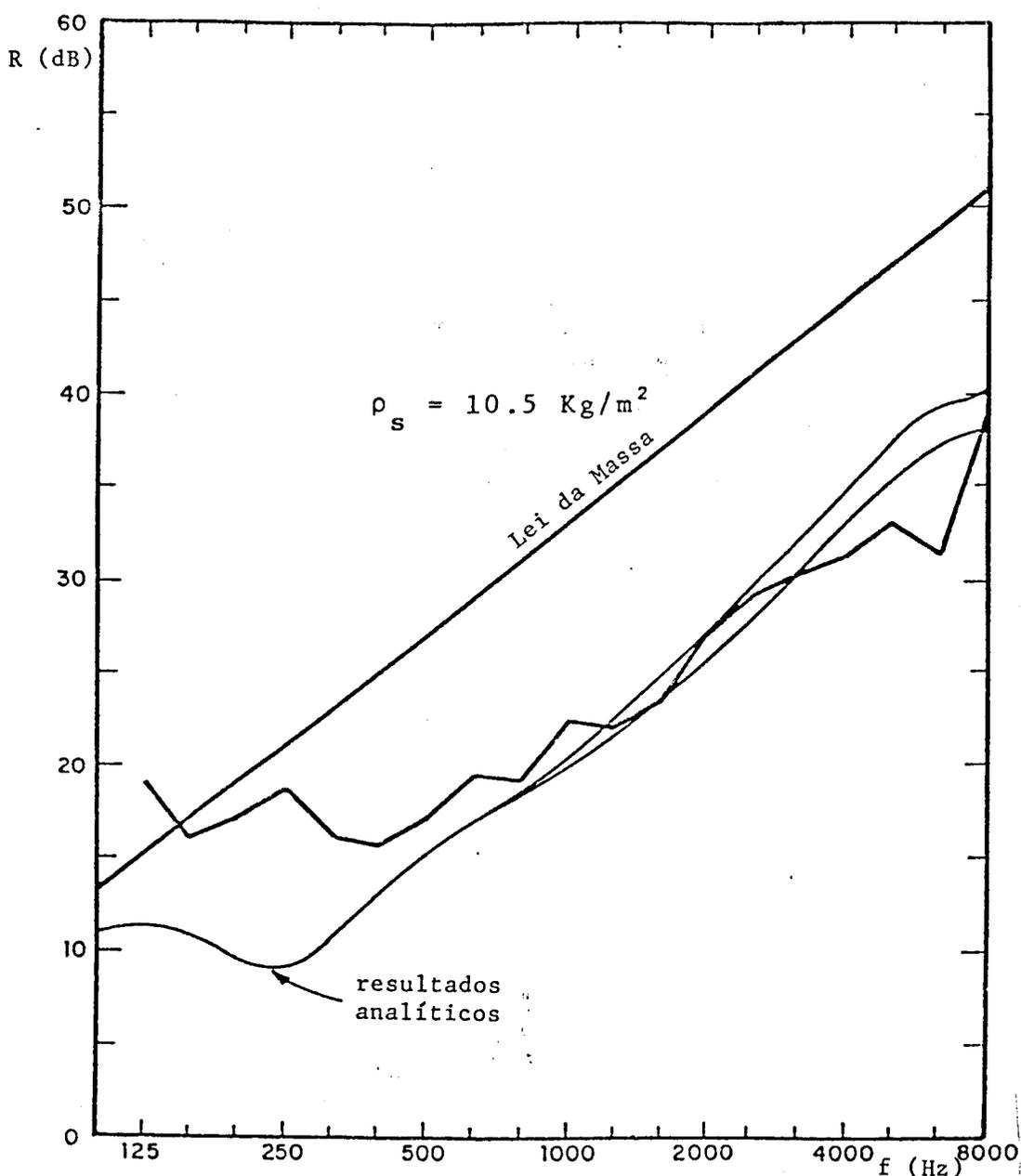


Fig. 31 - Resultados para o Índice de Redução Sonora para painel sanduíche de 76 mm de espessura (núcleo de "favo de mel").

Os resultados obtidos estão expressos na Figura 32 onde se verifica um comportamento em parte superior ao previsível por aplicação da Lei da Massa.

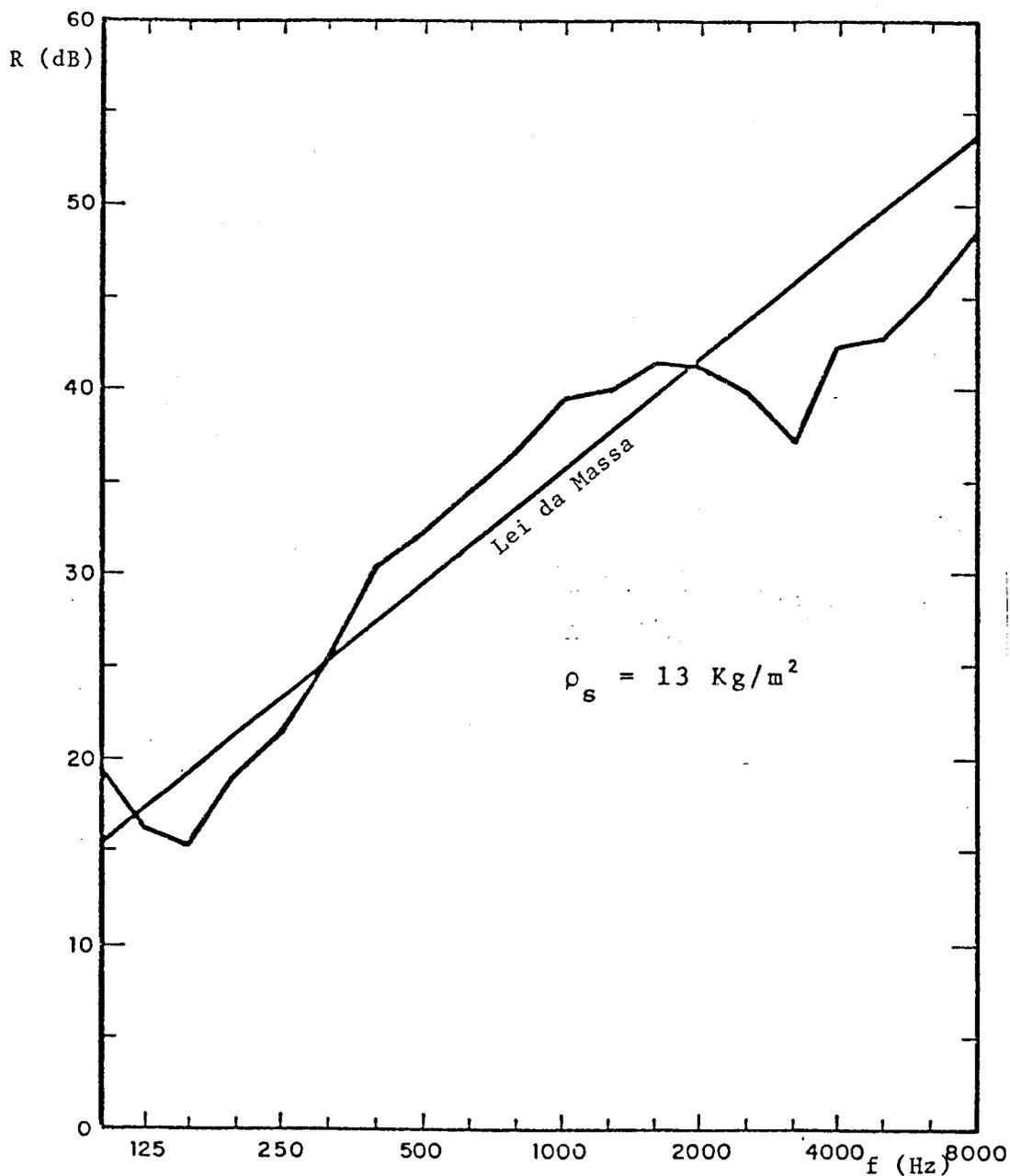


Fig. 32 - Resultados para o Índice de Redução Sonora para painel sanduíche (núcleo de "favo de mel" flexível).

4.9 - Modelo GUYADER

4.9.1 - Desenvolvimento Teórico

Em 1977 JEAN-LOUIS GUYADER apresenta, na Universidade de Lyon, a sua tese de doutoramento sobre transmissão do som em placas multicamadas finitas (25). Mas já em 1975 este autor e LESUEUR tornavam público (26) um pouco dos estudos que empreendiam nesse domínio.

A novidade desse estudo, comparado com os anteriores, advém da consideração de três pontos em simultâneo:

- Estudo referido a placas finitas;
- Modelação matemática para um qualquer número N de camadas constituintes da divisória não homogénea;
- Consideração de camadas de materiais ortotrópicos.

O método, proposto por GUYADER, parte do estabelecimento das equações de movimento e das condições de fronteira, verificando nas interfaces das camadas sucessivas quer a continuidade de deslocamentos quer a continuidade de tensões. São considerados simultaneamente os efeitos de flexão, tracção e cisalhamento em cada camada, e a viscoelasticidade foi introduzida através da utilização de módulos de elasticidade complexos. A placa é considerada submetida a ondas de incidência oblíqua.

A formulação utilizada é uma extensão para N camadas da teoria exposta por SUN e WHITNEY (35) para duas camadas.

No estudo dos mecanismos de transmissão do som o autor aborda uma nova noção, a das pseudocoincidências, situadas nas gamas de frequências baixas e essencialmente ligadas à geometria da placa. As pseudocoincidências ocasionam máximos de vibração desde que exista coincidência espacial numa só direcção, entre a onda e os modos da placa.

Na modelação da transmissão do som através das placas (homogéneas), dois novos métodos de cálculo são fornecidos. O primeiro é geral, não necessita da determinação do esquema representativo dos modos próprios associados à placa mas utiliza uma noção estatística (a densidade modal) e uma noção determinística (o coeficiente de transmissão modal). É pois de natureza mista.

No segundo método o autor utiliza a contribuição dos modos de forte transmissão (deduzida dos mecanismos de transmissão do som pelas paredes) e visa obter expressões simples.

No estudo teórico da transmissão do som através das placas multicamadas é introduzida a nova noção de "densidade de família de modos" e calculada a resposta transversal da placa somando a contribuição de todas as famílias de modos próprios.

$$\tau = \sum_n \sum_m \tilde{\tau}_{nm}$$

$\tilde{\tau}_{nm}$ - coeficiente de transmissão para cada família de modos (n,m), em que o \sim indica família de modos.

A expressão final para o coeficiente de transmissão da placa multicamadas e para ondas incidentes oblíquas é então a seguinte:

$$\tau(\theta, \phi) = \frac{\rho_0 c_0 \omega^2}{4 \cos \theta} \sum_n \sum_m |\overline{B}_1^{nm}|^2 R_{nm} \quad \text{E22}$$

em que

$$\overline{B}_1^{nm} = (R^{nm}) \cdot 2 P_x^{nm} / N_1^{nm}$$

$$P_{\perp}^{nm} = \int_0^a \int_0^b e^{-j(k_x x + k_y y)} S_1^{nm}(x, y) dx dy$$

$$N_1^{nm} = \int_0^a \int_0^b S_1^{nm}(x, y) S_1^{nm}(x, y) dx dy$$

sendo

(\bar{R}^{nm}) a matriz inversa da família modal (n,m) de impedâncias

$r_{nm} = \text{Re}(Z_{nm})$ a parte real da impedância de radiação da família modal (n,m)

$$r_{nm} = (\rho_0 c_0 / N_1^{nm}) \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{S}_1^{nm}(\lambda, \mu) \tilde{S}_1^{nm}(-\lambda, -\mu) (k / (k^2 - \lambda^2 - \mu^2)) dx dy \right\}$$

Em virtude da complexidade de cálculo de r_{nm} , este pode ser obtido pelas aproximações de MAIDANIK (36) ou, numa simplificação mais grosseira, considerando-o igual a $\rho_0 c_0 / \cos \theta$.

Onde

$$\lambda = k \sin \theta \cos \phi$$

$$\mu = k \sin \theta \sin \phi$$

a, b - dimensões da placa

S_1^{nm} - primeiro componente da família modal (n,m)
 $= \sin(n \pi x/a) \cdot \sin(m \pi y/b)$

P_{\perp} - potência acústica das ondas incidentes

Esta expressão (E22) pode ser aproximada utilizando as variáveis \tilde{k} e $\tilde{\phi}$:

$$\zeta(\theta, \phi) = (\rho_0 c_0 \omega^2 / (4 \cos \theta)) \iint_{\tilde{k}, \tilde{\phi}} n(\tilde{k}, \tilde{\phi}) \cdot \left| \frac{-\tilde{k} \tilde{\phi}}{B_1} \right|_{r_{\tilde{k} \tilde{\phi}}}^2 d\tilde{k} d\tilde{\phi} \quad \text{E23}$$

Todos os parâmetros aí necessários podem igualmente ser obtidos de expressões análogas às expostas acima, por mudanças de variável de (n,m) para $(\tilde{k},\tilde{\theta})$ conforme processo descrito no trabalho de GUYADER.

Em 1980 GUYADER e LESUEUR (10) estendem este estudo para o caso da excitação sonora se produzir em campo difuso.

Introduzindo a expressão E22 na equação E1A e após algumas passagens obtém:

$$\zeta_d = 16 \rho c^2 \sum_n \sum_m \left| R_{11}^{nm} \right|^2 r_{nm}^2 \quad \text{E24}$$

Como facilmente se depreende do tipo das expressões apresentadas, elas não são de fácil utilização e necessitam do auxílio de programas de computador para a sua efectiva utilidade prática. Mostram-se assim com pouco interesse para as actividades de aplicação da Acústica.

4.9.2 - Desenvolvimento Experimental

4.9.2.1 - Incidência oblíqua

A comparação entre previsões teóricas e resultados experimentais foram levadas a cabo numa dupla câmara anecóica (volume total de 80 m³) e em placas com dimensão de 1,0 m x 1,0 m.

Para campo de incidência oblíqua foram ensaiadas duas divisórias sanduíche com a seguinte composição:

Placa I - Núcleo e paramentos rígidos.

Paramentos constituídos por material plástico compósito de fibras de vidro bi-direccional com 1 mm de espessura; Núcleo de material idêntico

aos paramentos da placa com 7,8 mm de espessura.

Placa II - Núcleo leve e rígido e paramentos muito rígidos. Paramentos de aço de 1 mm de espessura; Núcleo de material idêntico aos paramentos da placa I com 7,8 mm de espessura.

Vejamos os resultados teoria-prática obtidos para as duas placas referidas:

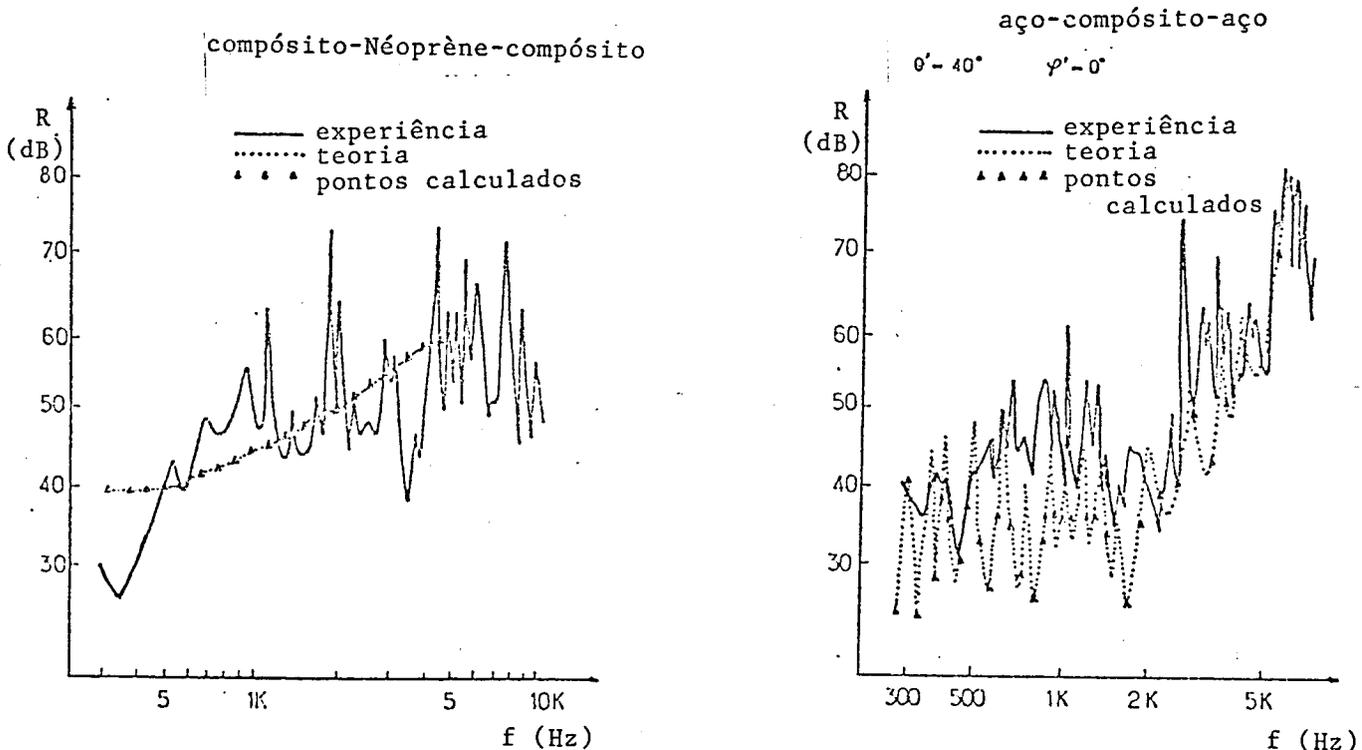


Fig. 33 -

Índice de Redução Sonora de painel sanduíche (material plástico com núcleo de Néoprène). Comparação teoria-experiência (tracejado para valores teóricos, traço contínuo para valores experimentais).

Fig. 34 -

Índice de Redução Sonora de painel sanduíche (paramentos de aço e núcleo de material plástico). Comparação teoria-experiência (tracejado para valores teóricos, traço contínuo para valores experimentais).

A comparação dá resultados aceitáveis em vista das incertezas envolvidas na determinação das características mecânicas.

Foram igualmente analisados (noutras placas) os efeitos provocados por algumas características das divisórias tais como o número de camadas, o amortecimento interno, o tipo de colagem, a existência dos paramentos, etc.

Algumas conclusões obtidas, referentes a esses factores, foram:

- A variação do número de camadas tem um efeito considerável nos resultados expressos nos gráficos de redução sonora devido à deslocação da frequência de coincidência. Em termos gerais o valor da frequência de coincidência aumenta com o número de camadas.

- O principal efeito do amortecimento interno é o de suavizar um pouco as curvas representativas da redução sonora, em especial limitando a transmissão do som nas frequências onde a redução sonora é extremamente reduzida (Fig. 35). O amortecimento interno tem geralmente uma influência mais marcada para frequências iguais ou superior à frequência crítica.

- A colagem tem uma grande importância tanto para as frequências próprias como para o amortecimento interno (Fig. 36). Este factor pode ser considerado responsável por alguma dispersão de resultados obtida em ensaios.

- A existência dos paramentos fazem geralmente atenuar a presença da frequência crítica, tornando mais rígido o conjunto da placa não homogénea (Fig. 37).

Em resumo, é preconizada, como mais favorável para uma divisória de alto poder isolante, a deslocação do valor da frequência de coincidência para frequências baixas, de modo a beneficiar assim do forte crescimento do índice de redução sonora na gama de frequências com interesse.

Este objectivo seria conseguido com divisórias tendo um elevado quociente rigidez/massa e que, além disso, possuam um núcleo leve, paramentos rígidos e uma relação rigidez do núcleo/rigidez dos paramentos não muito baixa.

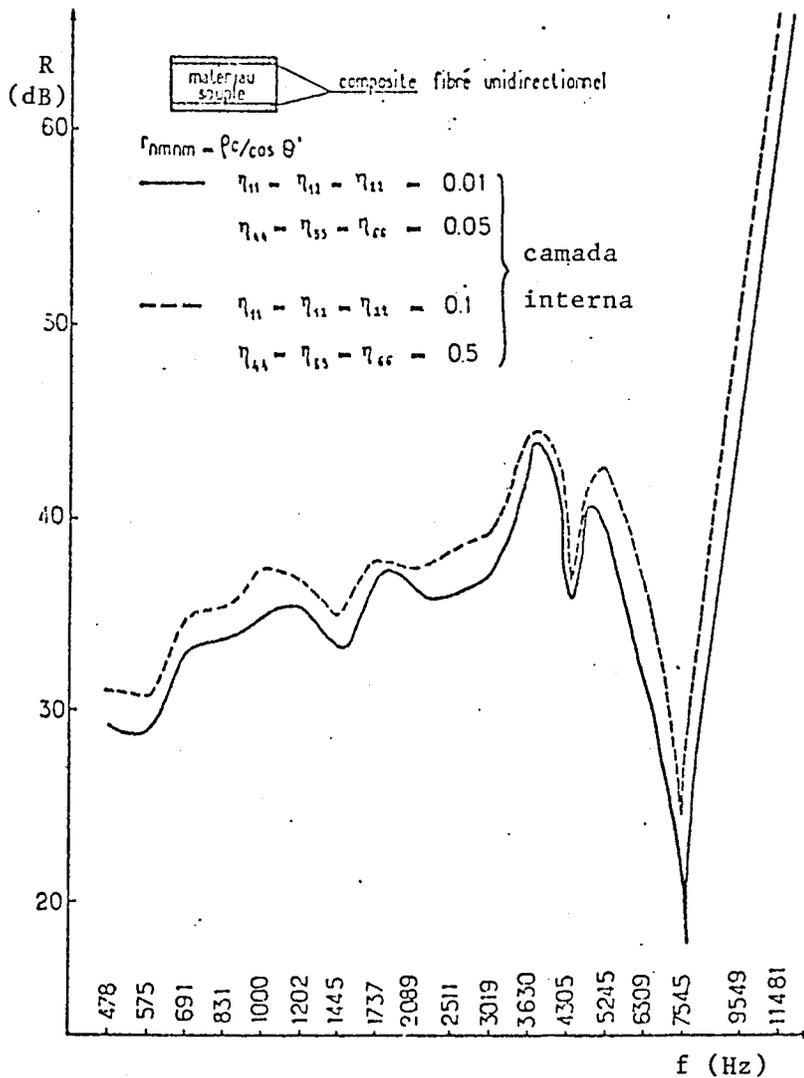


Fig. 35 - Influência do amortecimento da camada interna (núcleo).

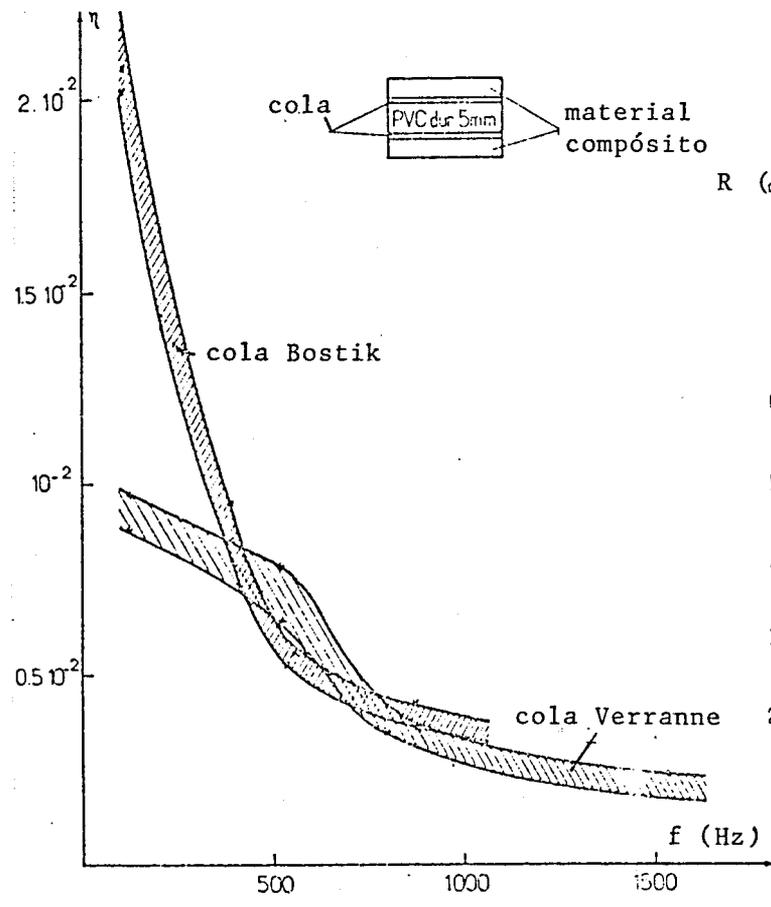


Fig. 36 -

Influência da colagem no amortecimento.

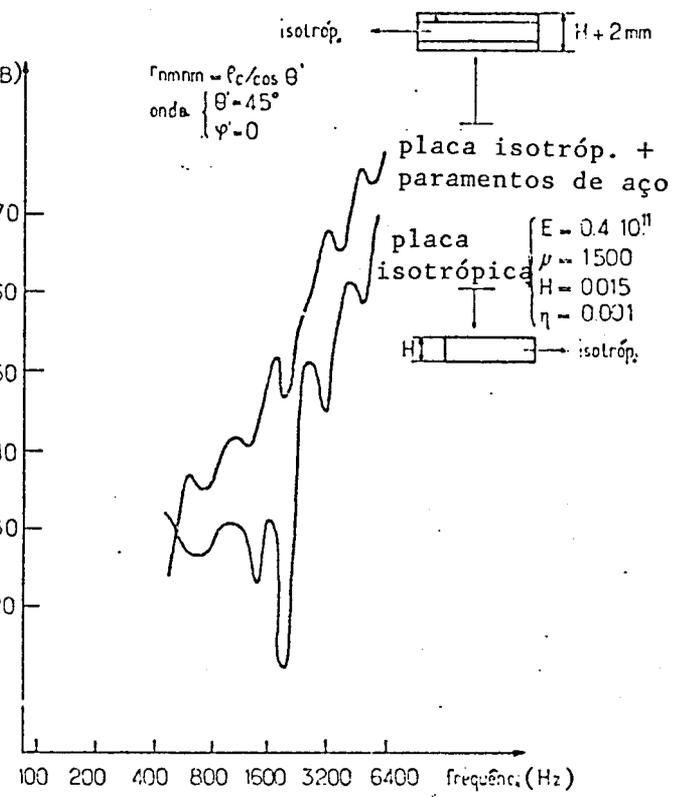


Fig. 37 -

Índice de Redução Sonora. Influência dos paramentos.

4.9.2.2 - Campo difuso

O desenvolvimento experimental para campo difuso utilizou as mesmas características de ensaio já referidas para a incidência oblíqua.

A comparação teoria-prática para a divisória tipo II é analisável na Figura 38.

Aqui, em campo difuso, os resultados previstos concordam melhor com os experimentais do que em incidência oblíqua. Igualmente os efeitos dos parâmetros intervenientes são, para

campo difuso, menos marcados do que para incidência oblíqua. Veja-se em particular o efeito do amortecimento interno (Fig. 39).

Igualmente as considerações feitas para a obtenção de um painel altamente isolante são grandemente diminuídas no seu alcance e validade para a situação de campo difuso.

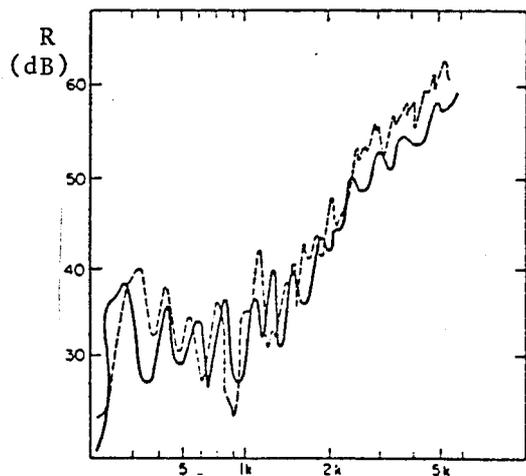


Fig. 38 -

Índice de Redução Sonora de painel sanduíche, aço-fibra de vidro compósita-aço (tracejado para valores experimentais, traço contínuo para valores teóricos).

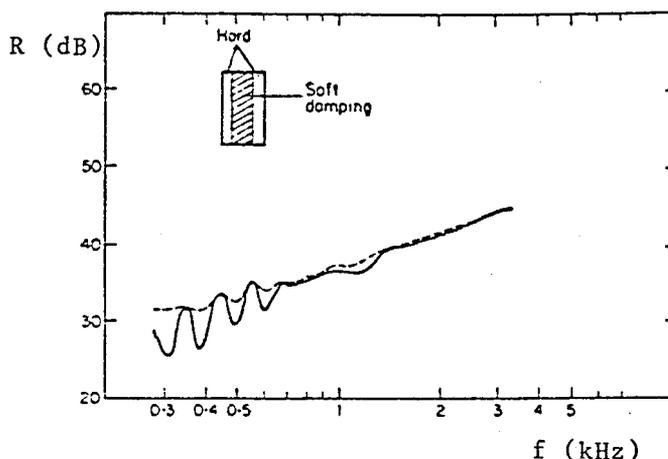


Fig. 39 -

Efeito teórico do amortecimento no núcleo (tracejado para $\eta = 0,1$; traço contínuo para $\eta = 0,005$).

4.10 - Modelo ORDUBADI

4.10.1 - Desenvolvimento Teórico

Em 1979 ORDUBADI e LYON apresentam (28) resultados dos seus trabalhos no estudo de divisórias sanduíche com paramentos de constituição ortotrópica. Surge esse texto numa evolução de um outro estudo inicial (29), referente exclusivamente ao comportamento acústico de painéis simples, ortotrópicos, de contraplacado.

Nesse estudo (28) a expressão para o índice de redução sonora para uma divisória não homogénea infinita, deduzida por MOORE (24), é modificada para ter em conta o efeito da ortotropia do material constituinte dos paramentos.

Para ter em consideração o efeito da ortotropia nos paramentos, o módulo de elasticidade E da placa é considerado a depender do ângulo ϕ , $E(\phi)$. O módulo de elasticidade da placa é então:

$$E(\phi) = E_s \cos^4 \phi + E_h \sin^4 \phi + 2E_{hs} \sin^2 \phi \cos^2 \phi$$

sendo

- E_s - módulo de elasticidade da placa na direcção macia;
- E_h - módulo de elasticidade da placa na direcção rígida;
- E_{hs} - parâmetro de rigidez para painéis ortotrópicos.

Foi já abordado em II.4.8.2. que seria possível, através de uma correcta orientação do núcleo ortotrópico de uma divisória (com paramentos isotrópicos), obter índices de redução sonora excedendo os valores previsíveis por aplicação da Lei da Massa. Isto só aconteceria porém para frequências fora da zona de coincidências dos paramentos (isotrópicos).

Tendo isto em atenção, uma divisória sanduíche, com núcleo e paramentos ortotrópicos poderia ser dimensionada de modo ao seu índice de redução sonora exceder a Lei da Massa em toda a gama de frequências com interesse.

Isso seria conseguido à custa da ortotropia dos paramentos. Por exemplo no caso de contraplacado, o seu comportamento elástico é diferente em duas direcções perpendiculares, cuidadosamente escolhidas como sendo a mais rígida e a mais macia (função da disposição dos filamentos).

A própria rigidez de flexão varia gradualmente da direcção mais macia para a direcção mais rígida, implicando que a velocidade de propagação das ondas de flexão e consequentemente o coeficiente de transmissão, variem igualmente. Como resultado, em vez de uma só frequência crítica teremos uma zona crítica de frequências, desde os dois extremos que serão as frequências críticas nas duas direcções extremas.

Dependente da direcção das ondas incidentes, o coeficiente de transmissão da divisória, para uma dada frequência na zona crítica, pode ou não ter um máximo.

Assim, um conjunto de ondas aleatoriamente incidentes em todas as direcções (campo difuso) implicam um coeficiente de transmissão "médio" de todas essas direcções. Essa "média" irá provocar uma forte atenuação na diminuição acentuada do índice de redução sonora para a frequência crítica.

Esse efeito da ortotropia é tanto mais notório para paramentos com espessuras muito pequenas, pois aí a disposição dos filamentos é preferencialmente em direcções determinadas. Aumentando essa espessura a disposição torna-se aleatória e a ortotropia perde-se.

Por esta ordem de razões, as divisórias sanduíche poderão apresentar duas crateras no gráfico do índice de redução sonora, nomeadamente para a frequência de coincidência dos paramentos e para a frequência crítica de todo o painel composto. Contudo, se os paramentos forem ortotrópicos uma das frequências críticas atenuar-se-ia - aquela referente aos paramentos.

4.10.2 - Desenvolvimento Experimental

O desenvolvimento experimental foi levado a cabo em dupla câmara reverberante e em quatro painéis de 1,20 m x 2,40 m e com espessuras totais compreendidas entre 38 mm e 95 mm.

Essas divisórias eram constituídas por núcleo de poliestireno extrudido (25 mm ou 76 mm) e paramentos de contraplacado (6 mm ou 10 mm).

Estes dois casos de distintos paramentos podem identificar-se bem com as situações de paramentos ortotrópicos (6 mm) e isotrópicos (10 mm), tendo em atenção o referido no número anterior.

Analisemos os resultados obtidos para as duas divisórias com núcleo de 76 mm de espessura. Uma com paramentos de 6 mm (ortotrópicos) e outra com os paramentos de 10 mm (sensivelmente isotrópicos) (Figuras 40 e 41).

Perante as duas figuras, verifica-se a validação, para estes casos específicos, das hipóteses anteriormente assinaladas.

Na Figura 41 estão patentes as duas frequências críticas respeitantes ao painel total (f_{cr}) e aos paramentos isotrópicos (f_{fs}). Na Figura 40 porém, a quebra existente no diagrama do índice de redução sonora para a frequência crítica dos paramentos, suaviza-se e quase desaparece por completo.

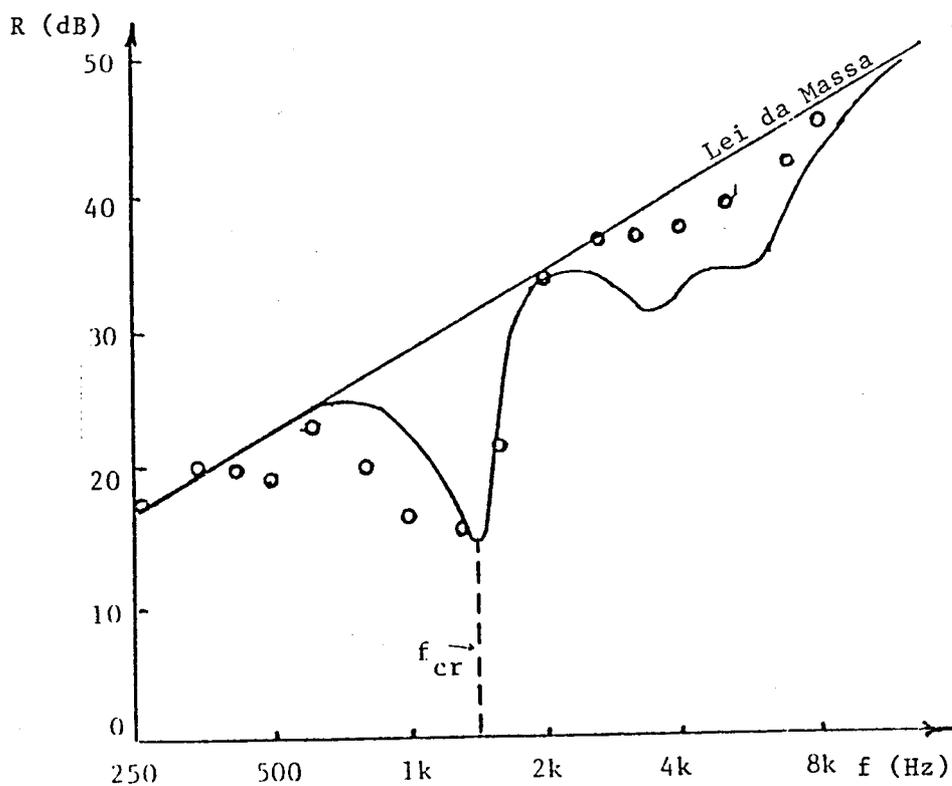


Fig. 40 - Índice de Redução Sonora de painel sanduíche de 76 mm de espessura do núcleo (poliestireno) e 6 mm de espessura dos paramentos em contraplacado (traço contínuo para valores previstos e círculos para valores medidos).

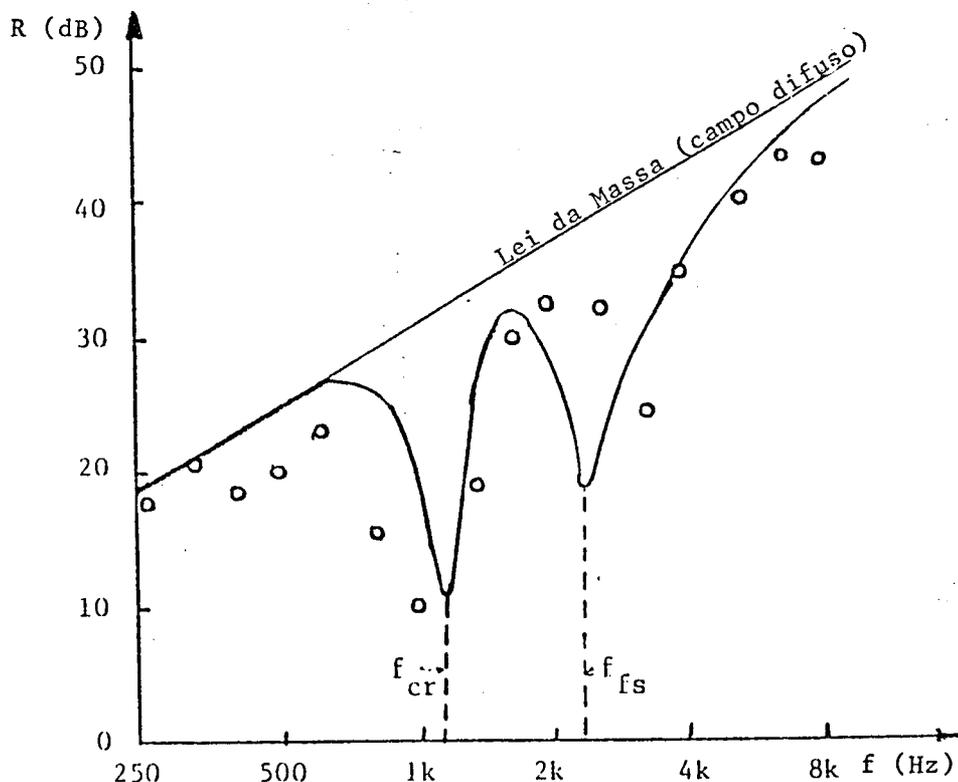


Fig. 41 - Índice de Redução Sonora de painel sanduíche de 76 mm de espessura do núcleo (poliestireno) e 10 mm de espessura dos paramentos em contraplacado (traço contínuo para valores previstos e círculos para valores medidos).

4.11 - Modelo proposto

4.11.1 - Justificação

Tudo o que foi dito nos parágrafos anteriores permite-nos dispor de uma visão alargada do estudo do comportamento acústico de divisórias amovíveis não homogéneas. Em particular deu-nos uma visão da variedade de expressões utilizáveis para a determinação dos parâmetros caracterizadores básicos desse comportamento acústico, nomeadamente o coeficiente de transmissão e o índice de redução sonora.

Esses métodos ou modelos apresentados são de um rigor de cálculo e de uma complexidade bem diversos. Contudo nenhum deles se mostra de uma facilidade de aplicação que o torne muito utilizável em situações correntes do projecto em Acústica. Em especial por alguns deles necessitarem inclusive de parâmetros ou características dos materiais não correntemente disponíveis na literatura técnica ou mesmo nos catálogos dos produtos em causa.

Assim, apresentaremos neste número um novo modelo para este problema. Embora simplificando um pouco o rigor e fiabilidade científica de uma parte dos anteriores modelos, permitir-nos-à ter disponível um método de fácil aplicação, sem a necessidade de dispôr de valores referentes a muitos parâmetros para os materiais constituintes da divisória sanduíche em estudo.

Toda a análise e desenvolvimento a seguir apresentados, parte dos ensinamentos facultados pelos diversos autores citados que, pelos seus estudos e conclusões, nos permitem ter já algumas ideias precisas da influência de muitos dos factores em causa nesta matéria.

4.11.2 - Hipóteses de Trabalho

Na procura de um modelo matemático que represente analiticamente o comportamento acústico de divisórias amovíveis, não homogêneas de tipo sanduíche para campo difuso, teremos, numa situação geral, que considerar toda a gama de frequências dividida em três regiões distintas (Fig. 13): frequências inferiores à frequência crítica; frequências próximas da frequência crítica e frequências superiores à frequência crítica.

Essa análise implica a consideração de três expressões distintas, uma para cada uma dessas zonas.

Em rigor tal consideração seria lógica e aconselhável. Porém, propomo-nos simplificar esta análise, obtendo uma só expressão com validade em grande parte (se não na totalidade) da gama de frequências com interesse.

Essa simplificação cremos ser aceitável tendo em atenção o domínio de validade da mesma, o das divisórias amovíveis, não homogêneas tipo sanduíche e para campo difuso. Nestas, o abaixamento da redução sonora para a frequência crítica atenua-se sensivelmente ou pode mesmo desaparecer por completo.

Por esse motivo, seria possível utilizar uma só expressão para toda a gama de frequências com interesse.

Esta atenuação do efeito da presença da frequência crítica, suavizando a evolução da curva representativa da variação do índice de redução sonora, seria devida quer à participação dos paramentos no conjunto de divisória quer ao possível aumento do respectivo factor de perdas equivalente.

Baseamo-nos, para estas considerações, em alguns dos trabalhos já descritos. Corroborando o que referimos, o efeito da existência dos paramentos pode ser analisado na Figura 37 segundo trabalho de GUYADER (25). O efeito do aumento do

factor de perdas equivalente pode ser visto no trabalho de VAL (20), Figura 42.

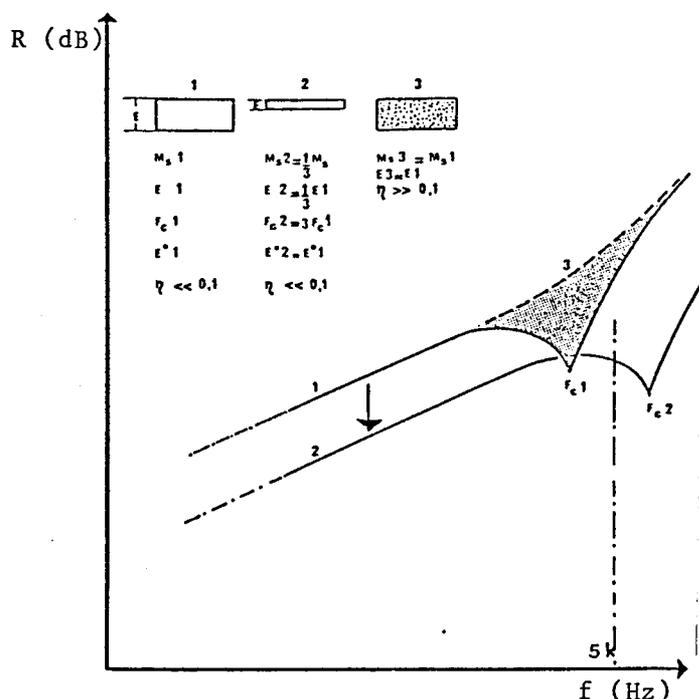


Fig. 42 - Índice de Redução Sonora versus frequência. Efeito por variação do amortecimento e outras características.

No caso da Figura 37, esta refere-se a incidência oblíqua, pelo que será de admitir para campo difuso um comportamento pelo menos similar, senão superior, quanto ao suavizar da curva de redução sonora.

Em campo difuso, se as ondas incidem aleatoriamente de todas as direcções, a frequência crítica poderá variar um pouco com a direcção, mesmo se não admitirmos ortotropia explícita no material. Assim a frequência crítica passará a "zona" de frequências críticas, podendo atenuar um pouco o seu efeito no abaixamento do índice de redução sonora.

Não obstante, consideramos que a frequência crítica, a manifestar-se significativamente no andamento do diagrama da redução sonora, deverá situar-se em frequências muito baixas (menores do que os 160 Hz). Isso devido a que estamos a centrar-nos exclusivamente a divisórias leves e com espessuras, normalmente, na região dos 6 - 10 cm.

Concluindo, repetimos que iremos considerar simplificadamente a existência de uma só expressão para caracterizar o comportamento acústico das divisórias tipo sanduíche em campo difuso, visto que o efeito da frequência crítica se deverá atenuar sensivelmente e que, mesmo a existir, ela situar-se-á em frequências muito baixas.

Conforme já analisamos anteriormente, os factores principais em jogo são os efeitos da massa, do amortecimento interno e da rigidez. Iremos conjugá-los para obter a expressão em causa.

A expressão desejada será da forma:

$$R = 10 \log(A.B.C) + D \quad E25$$

em que:

- A - termo representativo do efeito de massa;
- B - termo representativo do efeito do amortecimento interno;
- C - termo representativo do efeito da rigidez da divisória;
- D - constante.

CREMER (3) e FAHY (9) fornecem-nos expressões para o índice de redução sonora em que intervêm os três factores que nos interessam particularmente. São elas respectivamente:

$$R = R_{lm} + 10 \log(f/f_c - 1) + 10 \log \eta - 2 \quad E26$$

e

$$R = R_{lm} + 10 \log(2\eta / \eta') (w/w_c - 1) \quad E27$$

sendo:

R_{lm} - índice de redução sonora por aplicação da lei da massa (lm):

$$R_{lm} = 20 \log(m.f) - 42 \quad E28$$

Conjugando as duas expressões E26 e E27 numa única, obtemos:

$$R = 10 \log[(m.f)^2 (2\eta/\eta')(f/f_c - 1)] - 42 \quad E29$$

ou simplificando um pouco mais,

$$R = 10 \log[(m.f)^2 (\eta)(f/f_c - 1)] - 44 \quad E30$$

A frequência crítica f_c pode ser obtida (9) (30) por:

$$f_c = \frac{c^2}{2\eta} \sqrt{\frac{m}{B}}$$

A expressão E30 pode então ser escrita da seguinte forma:

$$R = 10 \log [(m.f)^2 (\eta) \left(\frac{2\eta}{c^2} \sqrt{\frac{B}{m}} - 1 \right)] - 44 \quad E31$$

Esta expressão E31 apresenta a forma prevista em E25 e nela intervêm as parcelas aí referidas. O efeito da massa é representado por m^2 , o do amortecimento interno por η e o da rigidez à flexão por \sqrt{B} .

Porém, a expressão E31 não é satisfatória para os fins a que

se destina, nem cumpre todas as premissas inicialmente estabelecidas.

A presença do factor de perdas na expressão E31 torna-a de difícil utilização devido a que os valores para este parâmetro não são de fácil obtenção. Não estão mesmo disponíveis e correntes, para a maior parte dos materiais de construção, os respectivos valores para os factores de perdas. É inclusive uma característica que não surge nas tabelas ou catálogos dos materiais utilizados na construção de edifícios.

Outra dificuldade surge na obtenção do valor do factor de perdas para todo um painel sanduíche. Não é do nosso conhecimento nenhuma expressão fiável para a determinação do factor de perdas para o conjunto de toda uma parede divisória leve não homogénea.

CREMER (30) fornece uma expressão para a quantificação do factor de perdas para o caso de um painel sanduíche, mas vocacionada para a determinação do amortecimento interno a ruídos de percussão. Realizámos algumas aplicações dessa expressão a situações de paredes divisórias leves para averiguar de uma possível validade da sua utilização neste estudo. Os resultados não foram, contudo, conclusivos pelo que rejeitámos o seu uso nesta análise.

Por tudo o que foi referido, optou-se por não incluir expressamente o parâmetro factor de perdas na expressão que procuramos para o índice de redução sonora. Porém, foi o seu efeito incluído criteriosamente nas restantes parcelas dessa expressão.

Outra consideração é ainda necessária. A expressão E31 não faz intervir o efeito das tensões de corte entre as camadas constituintes do painel sanduíche. Por análise feita a este problema, consideramos também importante a inclusão desse efeito na expressão que procuramos.

Foi o que realizámos, em especial por alteração do valor da

constante final da expressão E25 numa quantidade inferior a 1 dB, valor este encontrado do exame das modelações apresentadas por outros autores sob o tema.

Assim e após algumas manipulações matemáticas para introdução das considerações acima referidas, obtém-se a expressão final para o modelo que propomos para a obtenção do índice de redução sonora de paredes divisórias amovíveis tipo sanduíche:

$$R = 10 \log \left[(5 \cdot m^2 f^{1,5}) \left| \frac{2\pi}{c^2} \sqrt{\frac{B}{m}} - 1 \right| \right] - 44,7 \quad \text{E32}$$

A expressão E32 pode ainda ser simplificada, obtendo-se a expressão aproximada:

$$R = 10 \log \left| (m/700)^{1,5} f^{2,5} \sqrt{B} - m^2 f^{1,5} \right| - 37,7 \quad \text{E33}$$

4.11.3. - Divisória Equivalente

Para a efectiva utilização das expressões E32 ou E33 vamos transformar a divisória sanduíche em estudo, numa divisória homogénea equivalente. Com esse objectivo, os três factores intervenientes nessas expressões (m e B) não serão referenciados a nenhuma das camadas constituintes do painel composto mas sim "homogeneizados" para uma divisória (homogénea) equivalente. Utilizamos assim uma abordagem teórica que se enquadra no descrito no Capítulo II.3.2.b) por tipo M.

Analisaremos de seguida o modo de determinação de cada um desses dois factores considerando, nas expressões que se seguem, os índices 1 e 2 referentes respectivamente aos paramentos e ao núcleo da divisória sanduíche.

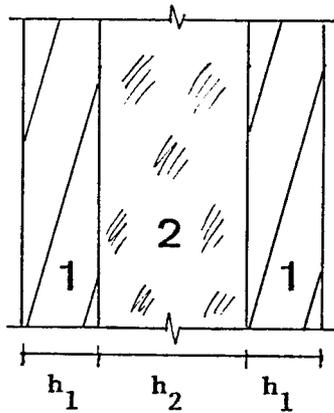


Fig. 43 - Esquema de divisória sanduíche.

a) massa equivalente

A massa (m) equivalente da divisória sanduíche será obtida utilizando as massas específicas dos materiais constituintes (núcleo e paramentos) e as respectivas espessuras.

Assim,

$$m = 2 \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2$$

E34

Sendo:

h - espessura conforme Figura 43;

ρ - massa específica conforme Figura 43.

b) rigidez equivalente

A rigidez (B) equivalente da divisória sanduíche será obtida, com o auxílio de CREMER (30), pela seguinte expressão:

$$B \approx 2 \cdot B_1 \left(1 + \frac{3g}{1+g} \right) \quad \text{E35}$$

em que

$$B_1 = E_1 h_1^3 / 12 \quad \text{E36}$$

$$g = 2G_2 / E_1 h_1 h_2 k^2 \quad \text{E37}$$

sendo

$$G_2 - \text{módulo de elasticidade transversal, do núcleo}$$

$$G_2 = E_2 / 2(1+\nu)$$

k - número de onda

$$k = w/c = 2\pi f/c$$

E - módulo de elasticidade (1-paramentos, 2-núcleo)

Admitindo o coeficiente de Poisson igual a 0,3 (valor aceitável para a generalidade dos materiais correntemente utilizados na Construção de Edifícios) e simplificando adequadamente a expressão E35, obtemos:

$$B \approx \frac{E_1 h_1^3}{6} + \frac{c^2 \cdot E_1 E_2 h_1^3}{10,4\pi^2 \cdot E_1 h_1 h_2 f^2 + 2c^2 E_2} \quad \text{E38}$$

A divisória sanduíche fica assim, com a utilização das expressões E34 e E38, transformada numa divisória homogênea equivalente, podendo então ser calculado o índice de redução sonora através da expressão E32 (ou E33).

Para possibilitar uma mais fácil utilização das expressões

atrás fornecidas inclui-se em Apêndice a este trabalho, uma listagem de valores para a massa específica e módulo de elasticidade de alguns materiais com interesse na Construção de Edifícios.

5 - CONCLUSÃO

Abordámos neste capítulo a caracterização acústica de divisórias amovíveis não homogêneas e em especial as de tipo sanduíche.

Foi feita uma análise bibliográfica aos trabalhos desenvolvidos nos últimos trinta anos sobre este tema, caracterizando-os muito sucintamente.

A situação em estudo foi definida e caracterizada brevemente a partir dos parâmetros intervenientes mais importantes, nomeadamente o número de camadas, as condições de fixação da divisória, as características físicas, etc.

A obtenção de expressões para os índices caracterizadores do comportamento acústico da divisória foi dividida em dois tipos diferentes de abordagem teórica. Uma, a tipo N, em que são explicitamente consideradas as N camadas componentes da divisória. Outra, que denominamos por tipo M, em que a parede não homogênea é assemelhada a uma estrutura homogênea equivalente.

Apresentaram-se diversas modelações matemáticas para a obtenção de expressões analíticas para a determinação do coeficiente de transmissão e/ou do índice de redução sonora. Nove modelos, de autores europeus, americanos e sul-africanos, divulgados de 1957 a 1979, foram sinteticamente descritos. Em alguns deles, simplificações foram por nós feitas

para os adaptarem ao caso com interesse neste estudo, 'o das divisórias sanduíche. Igualmente se apresentaram ensaios experimentais de que esses modelos matemáticos foram alvo por parte dos respectivos autores, com vista a verificar da sua concordância a algumas situações concretas.

Finalmente é apresentado um novo modelo matemático para o caso em análise. Nele a divisória sanduíche é transformada, para efeitos de cálculo, numa divisória homogénea equivalente por determinação da sua massa e rigidez à flexão equivalentes. É obtida uma expressão simples e de fácil utilização.

Na continuação desta exposição será descrito o desenvolvimento experimental empreendido e os resultados tidos nos ensaios a diversas paredes divisórias amovíveis não homogéneas.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

1 - INTRODUÇÃO

É abordado neste capítulo o desenvolvimento experimental empreendido com vista a testar algumas das hipóteses formuladas anteriormente.

É feita a descrição das instalações de ensaio utilizadas do Núcleo de Acústica e Iluminação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa. São analisadas as características quer físicas quer técnicas dessas instalações.

A técnica de ensaio utilizada seguiu o estipulado pela normalização portuguesa aplicável (1) (2) e foi conjugada com o tratamento dos resultados obtidos por meio de programação em micro-computador, desenvolvida pelo autor (37) para esse fim.

No desenvolvimento experimental foram exclusivamente utilizadas divisórias constituídas por gesso cartonado e aglomerados de cortiça. Uma breve análise socio-económica da situação habitacional e da Construção de Edifícios, inserida na realidade portuguesa, é exposta, justificando o estudo destes materiais utilizados pelo autor na execução das paredes divisórias testadas.

São caracterizadas as quatro divisórias amovíveis não homogé-

neas e tipo sanduíche ensaiadas. Análise particular será feita quer aos seus constituintes quer à execução e respectivas condições de montagem e fixação.

Os correspondentes resultados obtidos e necessárias conclusões serão fornecidos no capítulo seguinte.

2 - DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO DE ENSAIO

2.1 - Características físicas

Os ensaios das paredes divisórias foram realizados nas instalações do Núcleo de Acústica e Iluminação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (L.N.E.C.) em Lisboa.

Estas instalações consistem em duas câmaras reverberantes adjacentes, existentes na sub-cave do edifício principal do L.N.E.C., cuja planta e cortes são apresentados na Figura 44 (38).

Cada recinto, de forma paralelepipedica, apresenta um volume de 112 m³, uma área superficial de 140 m² e uma área de absorção sonora equivalente total compreendida entre 2,5 m² e 14 m² (dependente da banda de frequências e do material utilizado na zona de separação entre as câmaras). As respectivas dimensões interiores são de cerca de 5,47 m x 4,87 m x 4,20 m.

As duas câmaras, que não dispõem de qualquer ligação estrutural entre si e se encontram separadas a uma distância de 0,15 m, comunicam-se por uma abertura rectangular de aproximadamente 10 m², com as dimensões de 3,46 m x 2,79 m.

A parede remanescente entre as duas dependências é de betão armado e o espaço de ar compreendido entre as duas faces interiores encontra-se completamente preenchido com aglomerado negro de cortiça.

As câmaras estão, em toda a sua periferia, assentes sobre um murete de betão armado com 1,0 m de altura, existindo entre aquela e este, uma camada de aglomerado negro de cortiça com o objectivo de minimizar a transmissão de possíveis vibrações entre a estrutura do edifício e as câmaras reverberantes.

As paredes, pavimentos e tectos de ambas as câmaras são de betão armado com uma espessura de cerca de 0,30 m. No tecto de uma delas existe uma abertura de forma rectangular com as dimensões médias de cerca de 3,42 m x 2,42 m, sobre a qual assenta uma laje de betão armado com as mesmas dimensões, com a espessura aproximada de 0,10 m e com uma massa próxima dos 2400 kg.

O acesso ao interior de cada uma das câmaras é feito através de uma dupla porta metálica com espessura total de cerca de 0,30 m. Esta é constituída por duas chapas de ferro com a espessura nominal de 0,025 m, confinando caixa de ar com aproximadamente 0,25 m de espessura. Na face interior de cada chapa encontram-se coladas placas de lã mineral com 5 cm de espessura. As portas para ambas as câmaras abrem para uma área comum de acesso onde também se encontra o gabinete de controlo das operações que decorrem no interior da câmara reverberante.

Para se obter uma distribuição uniforme da energia sonora (campo sonoro difuso) no interior da câmara reverberante, encontram-se suspensos do tecto e das paredes, diversos painéis de material reflector acústico com um coeficiente de absorção bastante baixo.

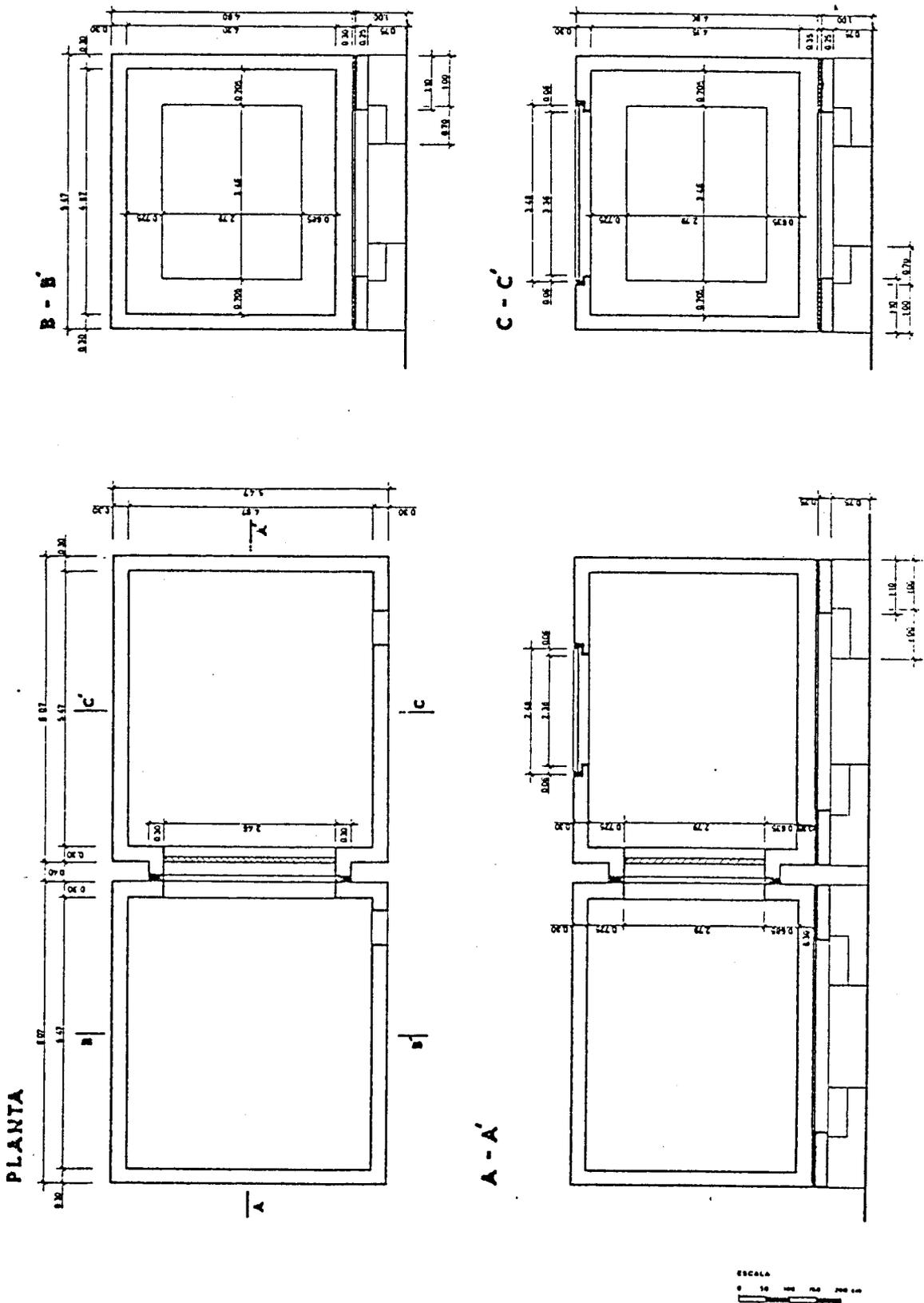


Fig. 44 - Instalação de ensaio (L.N.E.C.).

2.2 - Características técnicas

2.2.1 - Campo Difuso

O estudo experimental levado a cabo neste trabalho não se dirigia para situações com ondas de incidência oblíqua pelo que não foi considerada a hipótese da utilização de uma câmara anecóica. Para estudos em campo sonoro difuso, as câmaras reverberantes mostram-se mais adequadas e possibilitam uma distribuição espacial da energia sonora próxima da ideal.

A característica de campo difuso para um campo de ondas sonoras numa câmara reverberante está dependente do número de modos acústicos excitados em ressonância. Para as câmaras com um volume pouco superior aos 100 m³ e utilizando bandas de frequências de terço de oitava, existem aproximadamente 7 modos ressonantes na banda centrada nos 100 Hz. Aumentando a frequência, o número de modos cresce proporcionalmente ao cubo da frequência central, de modo que haverá alguns milhares de modos quando a frequência central for igual a 1000 Hz.

Na prática, o número de modos mínimo geralmente aceite para um campo sonoro ser considerado suficientemente difuso é de 20. As bandas de frequência de terço de oitava centradas nos 100 Hz e 125 Hz não satisfazem este critério.

Nas medições efectuadas no conjunto de ensaios empreendido, utilizámos bandas de frequências com intervalos de terço de oitava e com início na frequência central de 125 Hz. Assim, embora uma parte do problema acima referido fique solucionado, os resultados referentes a essa banda de frequências devem ser encarados com alguma reserva.

2.2.2 - Dimensões do Painel - Frequência Limite

O painel a testar, e colocado entre as duas câmaras reverberantes é, obviamente, um painel finito. Porém, na maioria dos casos, ele é admitido como infinito por facilidade de modelação.

Por tal motivo, os resultados obtidos numa instalação como a descrita, só serão devidamente válidos quando o comprimento de onda do som incidente for bastante menor que as dimensões do painel. O mesmo poderá ser dito de uma outra forma, isto é, que a frequência do som incidente deverá ser muito superior à razão entre a velocidade de propagação do som no ar e a menor dimensão do painel:

$$\lambda \ll a \Rightarrow f \gg c_0/a \quad \text{E39}$$

sendo "a" a menor dimensão do painel.

Atendendo a que o painel em causa tem umas dimensões aproximadas de 2,79 m x 3,96 m e aplicando a expressão E39, determinamos que os resultados só serão válidos para frequências razoavelmente superiores a 122 Hz.

Em toda a análise experimental utilizámos bandas de frequências com intervalos de terço de oitava desde a frequência central de 125 Hz a 4000 Hz. Por isso, mais uma vez, se justifica olhar com alguma reserva para os resultados obtidos para a banda de frequência central igual a 125 Hz.

2.2.3 - Transmissão Marginal

Na situação ideal, a energia sonora deve-se transmitir para o compartimento receptor exclusivamente através do painel a

testar.

Na prática, a energia é igualmente transmitida à câmara receptora através de outros caminhos marginais tais como o tecto, o pavimento, as paredes envolventes, as portas, etc.

Para avaliações precisas das perdas por transmissão, a energia no compartimento receptor, recebida através da divisória em ensaio, deve ser no mínimo dez vezes superior à energia transmitida por vias marginais.

No caso da dupla câmara reverberante do L.N.E.C., não dispomos de elementos concretos que nos possam quantificar numericamente o valor dessa transmissão marginal. Admitimos contudo, que tal valor será desprezável em toda a gama de frequências utilizada.

Acresce ainda que, tal como referimos no Capítulo II.2, em virtude do nosso estudo se centrar em divisórias leves, a possível contribuição da transmissão marginal será necessariamente insignificante face à envolvente pesada de toda a câmara reverberante.

3 - TÉCNICA DE ENSAIO

3.1 - Obtenção dos dados

3.1.1 - Procedimento

O processo de execução dos ensaios seguiu o estipulado na Norma Portuguesa NP 669/1974 (1). O objectivo básico desses ensaios de transmissão de sons aéreos foi a determinação do

índice de redução sonora das divisórias em estudo para as diversas gamas de frequências utilizadas. Pretendeu-se assim caracterizar o isolamento sonoro conferido pelo elemento de construção que separou as duas câmaras reverberantes.

O provete a ensaiar (com 9,65 m²) é inserido na abertura existente entre as duas câmaras reverberantes (Figura 44), fechando-a completamente. O método de fixação às paredes circundantes é descrito num ponto seguinte deste estudo.

Uma das câmaras reverberantes foi usada como câmara emissora e a outra como câmara receptora. Na primeira, o campo sonoro foi produzido por dois altifalantes colocados nos cantos, alimentados por um gerador de ruído branco, produzindo um nível sonoro médio aproximado de 114 dB(A). Foram utilizadas dezasseis bandas de frequências com a largura de um terço de oitava e frequências centrais compreendidas entre 125 Hz e 4000 Hz (125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, e 4000 Hz).

Com os altifalantes e microfones instalados no recinto receptor, determinou-se, para cada uma das bandas de frequências já referidas, o tempo de reverberação médio no recinto, a partir dos registos obtidos para três posições relativas diferentes dos altifalantes e microfone.

Com os altifalantes instalados no recinto emissor e os microfones nos dois recintos, determinaram-se, para cada uma das bandas de frequências indicadas, os níveis médios de pressão sonora nas duas câmaras, a partir de valores médios para três posições diferentes dos microfones.

De modo a assegurar a independência estatística das medições nas três posições do microfone, estas foram espacialmente separadas entre si e da parede mais próxima, de uma distância maior ou igual a metade do comprimento de onda do som na frequência mais baixa utilizada (para 125 Hz, um espaçamento mínimo de 1,40 m). Para evitar medições no campo directo dos altifalantes, as posições dos microfones foram igualmente

restringidas a estar a uma distância não inferior a 1,40 m destes.

O ruído de fundo no interior das câmaras reverberantes manteve-se em níveis sonoros considerados desprezáveis, em especial devido às características de toda a envolvente descrita já no número anterior.

3.1.2 - Equipamento Utilizado

3.1.2.1 - Equipamento de produção do campo sonoro

O campo sonoro foi produzido por dois altifalantes colocados no pavimento de uma das câmaras reverberantes (recinto emissor). Tratou-se de altifalantes da marca "Goodmans" e com uma potência de 100 W cada.

Os altifalantes foram alimentados por um gerador de ruído da marca norte-americana "General Radio Company" limitado a intervalos de frequência de um terço de oitava. Pretendeu-se que o ruído emitido apresentasse características próximas de ruído branco. Este gerador funcionou associado a um amplificador da marca "Quad", modelo nº 405.

3.1.2.2 - Equipamento de medição e registo

Para captação da variação de pressão sonora nos recintos, foram utilizados microfones não direccionais de uma polegada de diâmetro, da marca dinamarquesa "Brüel & Kjaer", modelo nº 4145 instalados sobre tripé a uma altura do solo aproximada de 1,30 m. Associado aos microfones foram utilizados preamplificadores marca "B & K", modelo nº 2615.

A medição dos níveis de pressão sonora nas duas câmaras foi

feita com um amplificador de medida marca "B & K", modelo nº 2607 e através de um conjunto de filtros de terço de oitava marca "B & K", modelo nº 1614.

Com vista à determinação dos tempos de reverberação foi igualmente utilizado um registador de níveis de pressão sonora em função do tempo, marca "B & K", modelo nº 2307.

3.1.2.3 - Instalação

Os equipamentos referidos foram instalados e utilizados de acordo com as representações esquemáticas apresentadas nos diagramas das Figuras 45 e 46.

A Figura 45 apresenta o sistema instalado para a determinação dos tempos de reverberação do compartimento receptor enquanto a Figura 46 representa a montagem feita para a captação e determinação dos níveis de pressão sonora instalados nas duas câmaras em uso.

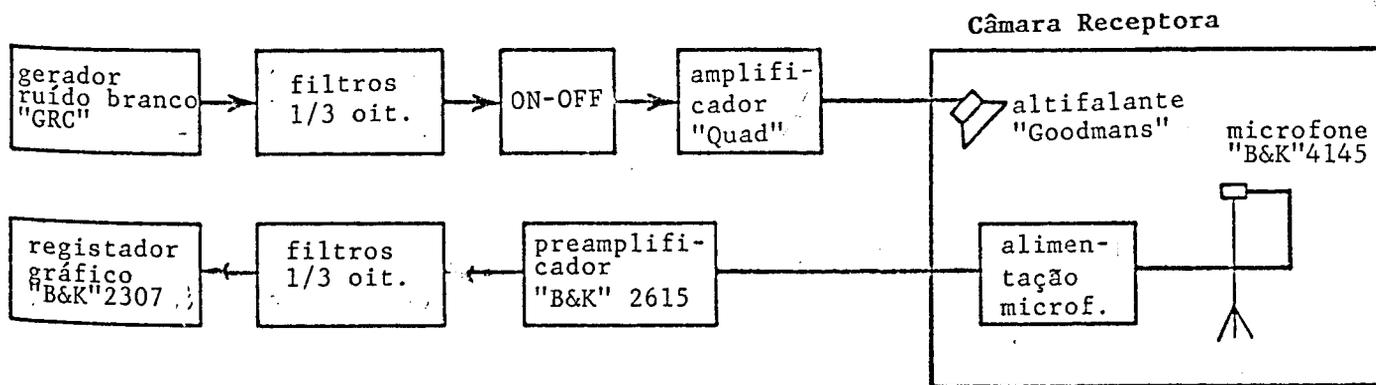


Fig. 45 - Esquema da instrumentação para a determinação do tempo de reverberação.

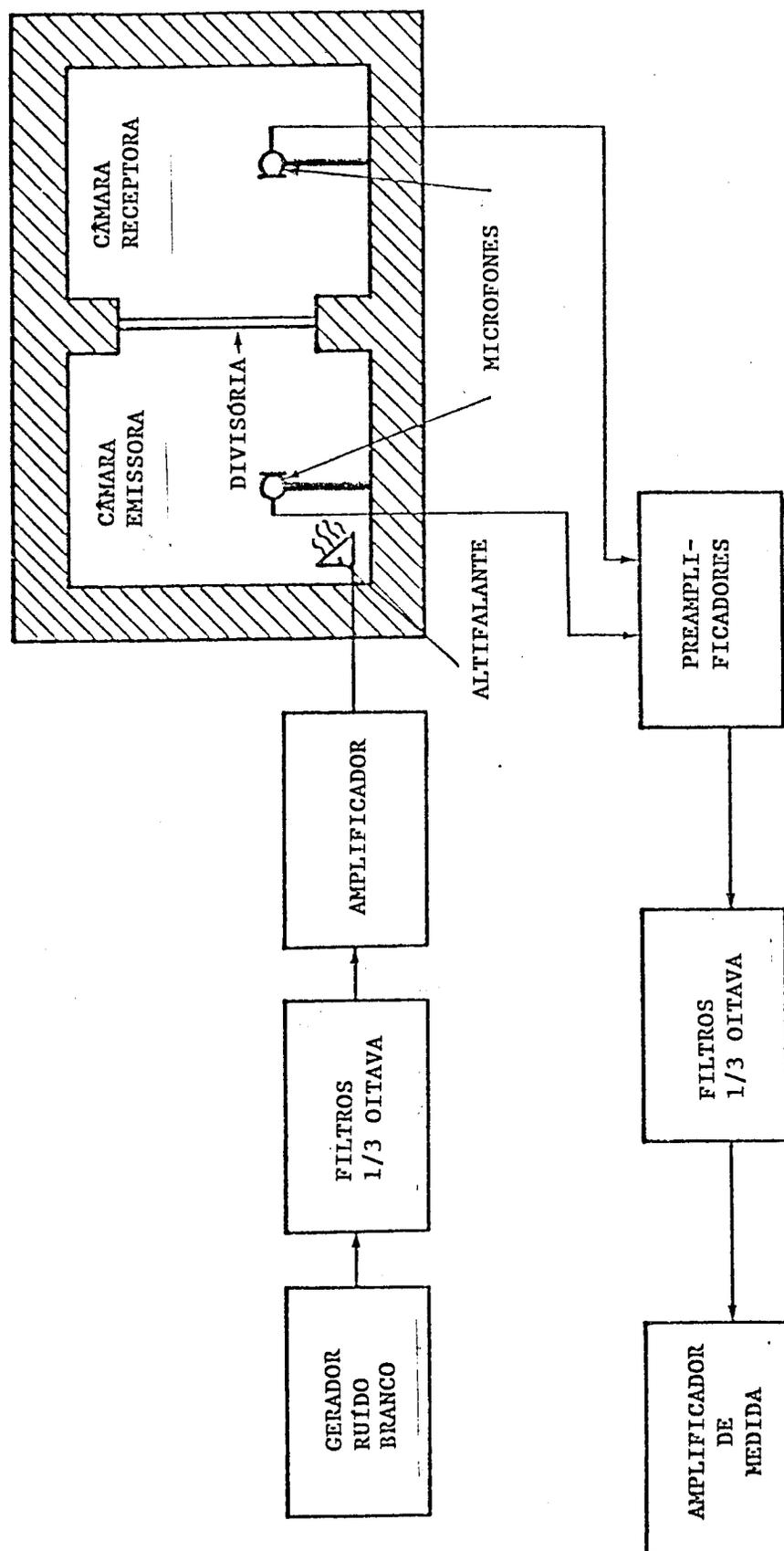


Fig. 46 - Esquema da instrumentação utilizada nos ensaios efectuados.

3.2 - Tratamento dos dados

3.2.1 - Cálculo

Os dados obtidos através do procedimento descrito, foram retidos com vista a posterior tratamento para determinação de resultados.

Para obter a descrição, no domínio da frequência, do parâmetro que caracteriza o isolamento sonoro da divisória em estudo, o índice de redução sonora, foi utilizada a seguinte expressão (conforme analisado no Capítulo I.3.1.5.):

$$R = L_{1m} - L_{2m} + 10 \log(ST/0,16V) \quad E40$$

Em que:

- L_{1m} - nível médio de pressão sonora no recinto emissor, expresso em decibel;
- L_{2m} - nível médio de pressão sonora no recinto receptor, expresso em decibel;
- T - tempo de reverberação médio no recinto receptor, expresso em segundo;
- S - área da superfície da divisória em estudo, expressa em metro quadrado;
- V - volume do recinto receptor, expresso em metro cúbico.

Nas condições já descritas no ponto III.2.1, S e V são aproximadamente iguais a 9,65 m² e 115 m³, pelo que a expressão E40 se pode apresentar da seguinte forma:

$$R = L_{1m} - L_{2m} + 10 \log(T) - 2,8 \quad E41$$

Com estas expressões foram determinados, para cada banda de frequências, os correspondentes valores do índice de redução sonora, R.

No cálculo de R não se considerou o coeficiente de dissipação da energia sonora no ar em virtude da sua muito reduzida influência nos resultados, para os arredondamentos utilizados.

A descrição, no domínio da frequência, do índice de redução sonora, não é uma forma cómoda de apresentação de resultados. Assim há necessidade de caracterizar o isolamento a sons aéreos à custa de um único valor. Por tal motivo, calculou-se igualmente o índice de isolamento sonoro a sons aéreos, I_a (ver Capítulo I.3.1.4.) de acordo com a Norma Portuguesa NP 2073/1983 (2).

Este índice está corrigido para uma área de absorção sonora equivalente do recinto receptor de 10 m². O valor para esta correcção pretende simular situações correntes, para a absorção sonora equivalente, em compartimentos medianamente mobiliados. Embora obtido em laboratório, este índice de isolamento sonoro de elementos construtivos é assim transponível para situações de colocação desses elementos in situ, com uma razoável confiança nos resultados.

Foi igualmente calculado o índice efectivo de isolamento sonoro a sons aéreos, I_{ae} , determinado com base na diferença do nível de pressão sonora entre compartimentos emissor e receptor e segundo a técnica descrita nessa mesma norma.

Este índice não está afectado de nenhuma correcção referente à área de absorção sonora equivalente do recinto receptor. O valor deste índice está inerente unicamente às características da envolvente da câmara reverberante receptora que, possuindo uma muito reduzida área de absorção sonora equivalente, não representa uma situação comum em compartimentos mobiliados de edifícios. O índice assim obtido não tem transposição para a realidade e, em rigor, poder-se-ia denominá-lo

ainda de "fictício" ou "imaginário".

Embora não sendo fundamentais para o estudo que estávamos a desenvolver, foram também obtidas três grandezas caracterizadoras do isolamento sonoro efectivo (ver Capítulo I.3.1.1.):

- Diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas câmaras emisoras e receptora expressa em dB(A), ($L_{1m} - L_{2m}$);
- Diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas câmaras emissoras e receptora expressa em dB(A), considerando o ruído emitido como Branco (de espectro contínuo no qual a potência média por unidade de largura de banda de frequência é constante em toda a gama de frequências);
- Diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas câmaras emissoras e receptora expressa em dB(A), considerando o ruído emitido como Rosa (de espectro contínuo no qual a potência média por banda de oitava é constante em toda a gama de frequências).

3.2.2 - Tratamento Informático

3.2.2.1 - Descrição breve

Para cada ensaio é utilizada, uma folha de dados (Apêndice II.3) onde são assinalados, pelo experimentador, todos os valores obtidos por leitura dos equipamentos.

Esses valores são então tratados informaticamente, através de "software" desenvolvido pelo autor com esse objectivo, para a obtenção dos índices e parâmetros caracterizadores do comportamento acústico da divisória em estudo.

O principal programa utilizado denomina-se FRIA e foi escrito em linguagem BASIC (ver listagem em Apêndice II.5).

Este programa fornece, para cada uma das dezasseis bandas de

frequência utilizadas:

- tempo de reverberação médio da câmara receptora;
- diferença de nível sonoro entre a câmara emissora e receptora;
- índice de redução sonora.

São também obtidas cinco grandezas caracterizadoras do isolamento sonoro da divisória testada:

- índice de isolamento sonoro a sons aéreos (corrigido para área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor de 10 m²) I_a;
- índice efectivo de isolamento sonoro a sons aéreos (índice fictício calculado sem qualquer correcção, cf. 3.2.1) I_{ae};
- diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas duas câmaras;
- diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas duas câmaras considerando o ruído emitido como branco;
- diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas duas câmaras considerando o ruído emitido como rosa;

O programa para micro-computador FRIA insere-se num conjunto de "software" especialmente desenvolvido pelo autor no decorrer dos trabalhos conducentes a esta Tese de Mestrado e encontra-se descrito em apêndice a este texto.

3.2.2.2- Apresentação de resultados

O resultado principal de cada ensaio apresenta-se sob a forma de um gráfico traçado num sistema de coordenadas rectangulares (frequência, índice de redução sonora) unindo por segmentos de recta os pontos representativos dos valores determinados (ver Apêndice II.4).

Além desta forma de apresentação, uma outra é fornecida na qual se transcreve, para cada uma das dezasseis bandas de frequência, todos os valores obtidos (T, D e R). Nessa folha

são também apresentados os valores determinados para os cinco índices caracterizadores do isolamento Ia, Iae, Delta L, Delta L (branco) e Delta L (rosa). São igualmente fornecidas as características da divisória (constituição, espessuras parciais, espessura total e referência) bem como também é apresentada legenda esclarecedora da simbologia utilizada (ver Apêndice II.4).

Em complemento a estas duas saídas de resultados, está também disponível uma "Listagem de Dados" (ver Apêndice II.4), onde são descritos todos os dados obtidos no ensaio e já presentes nas "Folhas de Dados", bem como os níveis sonoros nas câmaras emissora e receptora.

4 - CARACTERIZAÇÃO DAS DIVISÓRIAS ENSAIADAS

4.1 - Justificação

O tipo de divisórias ensaiadas destina-se a ser utilizado na Construção de Edifícios para separação de compartimentos interiores. Trata-se de divisórias amovíveis de constituição heterogénea, tipo sanduíche.

Utilizámos exclusivamente dois materiais para constituir essas paredes divisórias: aglomerados de cortiça (para os núcleos) e gesso cartonado (para os paramentos).

Um tipo de paredes divisórias conjugando estes dois materiais é inovador, não se encontrando ainda comercializado em Portugal nem, ao que sabemos, em qualquer outro país.

Afigura-se então interessante caracterizar essas divisórias em termos acústicos para avaliar das possibilidades da sua

utilização concreta na separação de compartimentos de habitação ou de escritórios.

A justificação para uma possível utilização futura deste género de paredes divisórias na Construção de Edifícios e até da sua generalização no mercado, pode ser formalizada sob diversos aspectos.

Um deles é o seu custo face à solução tradicional actualmente em uso em Portugal, a alvenaria de tijolo furado de 7 cm de espessura, rebocada em ambas as faces com argamassa de cimento. Esta solução corrente implica custos de materiais e especialmente de mão-de-obra, superiores aos que poderiam ser conseguidos com a utilização de divisórias amovíveis do tipo das testadas.

A utilização de paredes divisórias leves na Construção de Edifícios substitui já, em grande parte dos países industrializados, as paredes pesadas tradicionais. Isto deve-se ao aumento substancial que o custo da mão-de-obra vem assumindo na indústria da Construção Civil e no seu peso para o custo final do produto acabado. Entre nós tal custo de mão-de-obra ainda não justificou o início da gradual generalização de paredes leves, pois encontra-se ainda a níveis muito baixos conforme se pode analisar no quadro da Figura 47.

Dessa listagem (40) do custo de mão-de-obra especializada e não especializada na Construção Civil de 32 países referente a 1986, Portugal apresenta valores só superiores a alguns países da África, Médio Oriente e Sudoeste Asiático. Note-se por exemplo, o custo aproximadamente dez vezes superior ao de Portugal, existente na Suíça ou nos Estados Unidos.

Embora estes números não sejam estritamente comparáveis, pois não são ponderados para o nível de vida em cada país, dão-nos uma visão da provável evolução dos custos nesta área com a progressiva industrialização e desenvolvimento de Portugal.

PAÍS	CUSTOS DE MÃO-DE-OBRA					
	M.O. ESPECIALIZADA			M.O. NÃO ESPECIALIZADA		
	moeda nacional	libra (GB)	USD	moeda nacional	libra (GB)	USD
África do Sul	8.25	1.21	1.83	2.22	0.33	0.49
Arábia Saudita	8.	1.43	2.13	5.	0.89	1.33
Austrália	21.	9.33	14.	20.	8.89	13.33
Áustria	235.	11.97	18.08	195.	9.93	15.
Bahrain	0.62	1.09	1.63	0.45	0.79	1.18
Bélgica	795.	13.47	20.38	645.	10.93	16.54
Canadá	22.5	10.9	16.67	19.5	9.44	14.44
China	na	na	na	na	na	na
Dinamarca	130.	12.36	18.57	115.	10.95	16.43
Egipto	3.25	3.1	4.64	0.98	0.93	1.4
Espanha	896.	4.6	6.9	840.	4.31	6.46
E. U. A.	30.7	20.47	30.7	23.6	15.73	23.6
França	103.	11.	16.48	79.	8.50	12.64
Grécia	740.	3.63	5.48	613.	3.	4.54
Holanda	37.21	11.8	17.72	na	na	na
Hong Kong	29.5	2.54	3.78	19.	1.64	2.44
Irlanda	6.68	6.36	9.82	6.03	5.74	8.87
Itália	20925.	10.54	15.8	18970.	9.56	14.32
Japão	na	na	na	na	na	na
Malásia	5.	1.28	1.92	2.5	0.64	0.96
Nigéria	1.5	0.29	0.43	1.46	0.28	0.42
Noruega	156.	14.44	21.67	136.	12.59	18.9
Nova Zelândia	19.	6.76	10.22	17.	6.05	9.14
Portugal	445.	2.06	3.16	355.5.	1.64	2.52
Quênia	10.85	0.45	0.68	6.85	0.29	0.43
Singapura	8.67	2.67	4.03	6.	1.85	2.79
Suécia	99.5	9.95	14.85	96.	9.60	14.33
Suíça	51.5	21.82	33.23	34.7	14.7	22.39
Reino Unido	4.61	4.61	6.88	3.94	3.94	5.88
R. Fed. Alem.	49.9	17.82	27.72	33.65	12.02	18.69
Zâmbia	2.34	0.11	0.17	1.97	0.09	0.14
Zimbabwe	2.88	1.18	1.8	1.08	0.44	0.68

na - não acessível

Fig. 47 - Quadro comparativo de custos de mão-de-obra (especializada e não especializada), em diversos países.

Destes factos se depreende que as divisórias leves, por apresentarem um rendimento de construção muito superior ao das divisórias pesadas, reduzem visivelmente o custo da construção, desde que o custo de mão-de-obra se torne preponderante.

Um outro aspecto que nos leva a justificar a nossa previsão de uma futura mudança no tipo de construção de paredes divisórias em Portugal é o custo global por metro quadrado dos edifícios de habitação.

Embora o nível de vida e de salários em Portugal seja muito inferior ao existente na quase totalidade dos países ocidentais, o custo de construção por metro quadrado não apresenta valores tão afastados daqueles países quanto os apresentados pelo custo da mão-de-obra. No quadro da Figura 48 (40) verificamos que o custo por metro quadrado dos apartamentos ou edifícios unifamiliares é ainda o mais baixo de todos os apresentados, excepto cinco casos de países da África ou do Sudoeste Asiático. Porém os valores mais elevados (Bélgica, Suíça e Áustria) são já só 4 ou 5 vezes superiores aos de Portugal.

A Construção de Edifícios em Portugal não se encontra tão optimizada e racionalizada quanto a de alguns países da Europa ou da América do Norte e, embora tendo custos de mão-de-obra muito baixos, não apresenta custos finais igualmente baixos.

A utilização de aglomerados de cortiça e de gesso cartonado nas paredes divisórias, além do alto rendimento de construção, poderia apresentar custos de materiais mais baixos do que a alternativa de alvenaria pesada.

Essa diminuição do custo conduziria a um abaixamento relativo dos preços por metro quadrado de construção que são hoje bastante elevados em Portugal quando comparados com os congéneres da Europa Comunitária (Figura 49).

PAÍS	CUSTO POR METRO QUADRADO					
	EDIFÍCIOS UNIFAMILIARES			APARTAMENTOS		
	moeda nacional	libra (GB)	USD	moeda nacional	libra (GB)	USD
África do Sul	475	70	106	525	77	117
Arábia Saudita	na	na	na	na	na	na
Austrália	375	167	250	710	316	473
Áustria	na	na	na	11000	565	854
Bahrain	na	na	na	na	na	na
Bélgica	43500	737	1115	42000	712	1077
Canadá	420	203	311	410	198	304
China	na	na	na	na	na	na
Dinamarca	5120	487	731	4640	441	663
Egipto	na	na	na	275	262	393
Espanha	35000	179	269	78000	400	600
E. U. A.	590	393	590	455	303	455
França	na	na	na	4000	430	640
Grécia	38000	186	281	43000	211	319
Holanda	1200	381	571	1100	349	524
Hong Kong	na	na	na	2250	194	288
Irlanda	300	286	441	350	333	515
Itália	na	na	na	950000	479	717
Japão	na	na	na	na	na	na
Malásia	340	87	131	315	81	121
Nigéria	1500	288	429	2375	457	679
Noruega	na	na	na	na	na	na
Nova Zelândia	790	281	425	1075	383	578
Portugal	33000	153	234	31000	144	220
Quênia	3600	150	225	4000	167	250
Singapura	600	187	279	775	238	360
Suécia	na	na	na	na	na	na
Suíça	1400	593	903	1225	519	790
Reino Unido	320	320	478	380	380	567
R. Fed. Alem.	1350	482	750	1150	411	639
Zâmbia	1705	81	122	1550	73	111
Zimbabwe	240	98	150	670	273	419

Fig. 48 - Quadro comparativo de custos por metro quadrado de apartamentos e edifícios unifamiliares, em diversos países.

na - não acessível

Preços por m² em dólares U.S. (05.11.87)

PAÍSES / CIDADES		APARTAMENTOS			
		NOVOS		+ 10 ANOS	
		MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
BÉLGICA	BRUXELAS	707	1 839	424	1 132
		707	990	283	707
ESPAÑA	MADRID	1 756	1 756	1 493	1 493
	BARCELONA	1 317	1 756	1 097	1 317
FRANÇA	PARIS	2 091	5 226	1 394	4 007
		1 307	1 742	610	1 220
IRLANDA	DUBLIN	794	794	635	635
		714	714	571	571
ITÁLIA	MILÃO	2 047	3 209	1 605	2 407
		2 006	2 006	1 364	1 364
HOLANDA	AMSTERDÃO	1 316	1 316	1 053	1 053
		1 053	1 053	789	789
PORTUGAL	LISBOA	723	940	434	579
R. UNIDO	LONDRES	1 705	1 989	852	1 136
R.F.A.	HAMBURGO	1 775	1 775	1 124	1 124

Fig. 49 - Quadro comparativo de preços por metro quadrado de apartamentos (novos e usados) em diversos países da Comunidade Económica Europeia.

Como se verifica nesse quadro (41), os preços praticados na Bélgica e na Irlanda são já aproximadamente idênticos aos praticados em Portugal embora, como referimos antes, tenhamos custos de mão-de-obra muito baixos.

Tudo indica que as divisórias leves irão surgir no panorama da Construção de Edifícios em Portugal, acompanhando o desenvolvimento do sector na Europa e a evolução dos custos de produção.

O uso de divisórias leves de materiais de baixo custo pode induzir a diminuição do custo por metro quadrado das habitações, permitindo um maior acesso da população à habitação própria. Num país com grandes carências no parque habitacional e onde só se constroem 35 000 novos fogos em cada ano, qualquer tentativa de validar novas vias e processos de construção será legítima e salutar. O fomento da habitação social e da autoconstrução pode ser indirectamente promovido por esse provável abaixamento de custos.

Um terceiro aspecto que pode justificar a utilização em Portugal, deste tipo de divisórias com esses materiais constituintes, é a existência abundante, entre nós, de cortiça e dos seus derivados. A matéria-prima a preço acessível não seria pois obstáculo.

Quanto ao gesso cartonado, embora actualmente só se encontre no nosso mercado por importação de Espanha ("PLADUR") ou de França ("PLACOPLÂTRE"), poderia ser facilmente concretizável o seu fabrico entre nós.

Se algum país poderá ter, um dia, parte das suas habitações com paredes divisórias parcialmente constituídas por aglomerados de cortiça, esse país deverá ser necessariamente Portugal.

Importa pois estudar a viabilidade desse projecto e, do ponto de vista do isolamento sonoro, pretendemos aqui dar o nosso pequeno contributo nesse sentido.

4.2 - Constituição

As quatro divisórias ensaiadas (Figura 50) têm a seguinte constituição:

- Divisória D1

paramentos: gesso cartonado com 10 mm de espessura em cada face;

núcleo: aglomerado composto de cortiça com 6 mm de espessura;

- Divisória D2

paramentos: gesso cartonado com 10 mm de espessura em cada face;

núcleo: rubbercork com 6 mm de espessura;

- Divisória D3

paramentos: gesso cartonado com 10 mm de espessura em cada face;

núcleo: aglomerado composto de cortiça com 40 mm de espessura;

- Divisória D4

paramentos: gesso cartonado com 10 mm de espessura em cada face;

núcleo: conjunto denominado ISO 500 e constituído por duas lâminas de aglomerado composto de cortiça de 25 mm de espessura tendo entre elas uma lâmina de rubbercork de 3 mm de espessura.

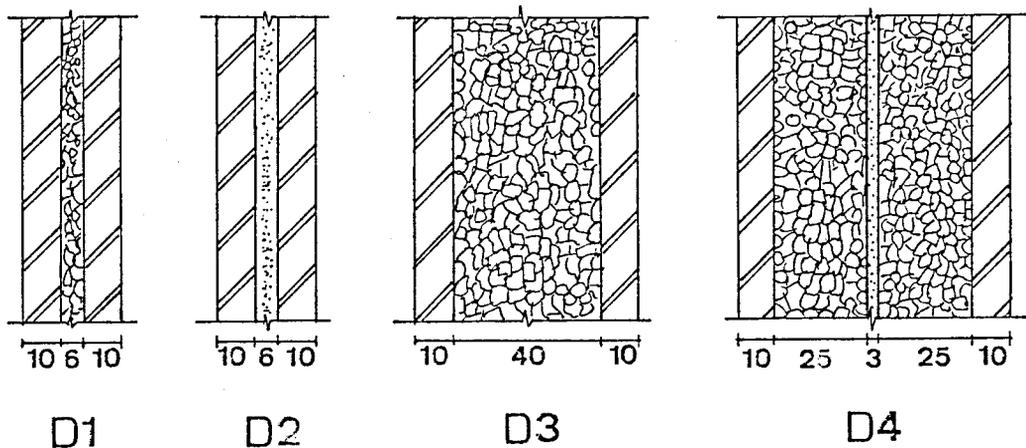


Fig. 50 - Esquema das paredes divisórias sanduíche testadas (D1 a D4).

Aproveitando a existência das divisórias D1 e D2, foram estas conjugadas para formar uma parede dupla com caixa de ar (Figura 51), tendo sido esta também testada, a título informativo pois não se enquadra no objectivo principal deste estudo. Foi essa divisória denominada DD1/2 (divisória dupla formada das divisórias 1 e 2).

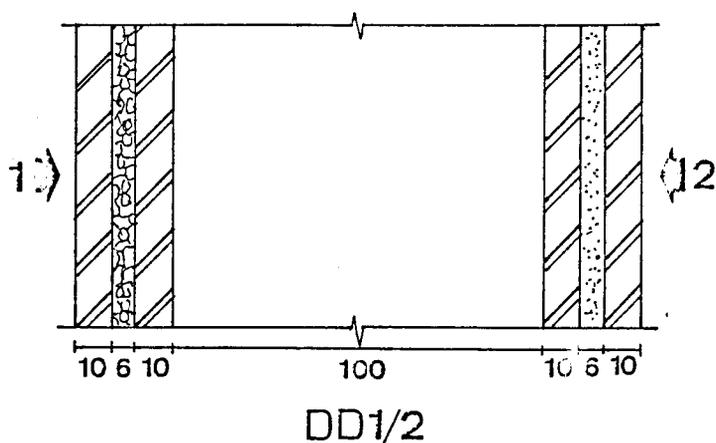


Fig. 51 - Esquema da parede divisória dupla (DD1/2) com os dois sentidos de emissão do som (1 e 2).

Devido a não existir simetria nessa parede divisória, foram realizados dois ensaios, emitindo o som num e noutro sentido, denominando cada um destes casos por DD1/2.1 e DD1/2.2, conforme Figura 51.

As diversas camadas dos materiais constituintes de cada divisória foram unidas entre si por colagem e cada painel apresentava as dimensões de 1,20 m x 2,80 m.

Caracterizemos seguidamente cada material utilizado.

a) gesso cartonado

Os painéis de gesso cartonado são formados por uma lâmina de gesso entre dois suportes de cartão especial (Figura 52), com os quais se obtém placas de grandes dimensões, fácil manejo e elevadas características de resistência mecânica. É um material não inflamável, classificado como M1 pela sua resistência ao fogo, apresenta uma condutibilidade térmica de 0,18 W/m.K tendo uma massa específica aproximada de 800 kg/m³ (42).

Embora de recente introdução no mercado português, este material não é um produto inovador. Começou a ser utilizado em 1890 nos Estados Unidos e chegou à Europa em 1917. Actualmente é extremamente popular em muitos países como por exemplo os E.U.A. ou a Suécia onde alcança níveis de fabrico entre 7 e 5 m² por habitante e por ano (dados referentes a 1982) (42).

Apresenta-se disponível no mercado em placas de quatro espessuras (10 mm, 13 mm, 15 mm e 20 mm), dois tipos de bordos e diversas dimensões, conforme se constata no quadro da Figura 53. Entre nós a venda das placas de gesso cartonado é feita por importação de Espanha (marca "PLADUR") ou de França (marca "PLACOPLÂTRE").

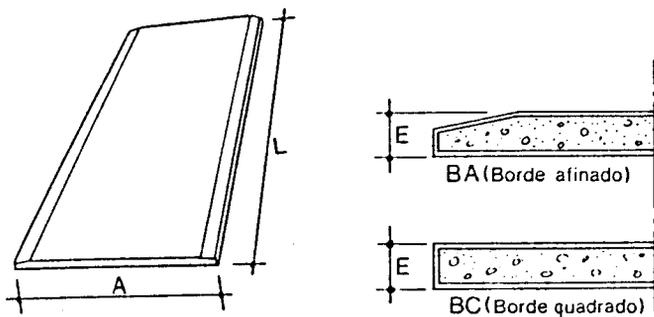


Fig. 52 -
Esquema de placas de gesso cartonado.

(E) mm	(A) mm	(L) mm	Tipo de borde	
10	1.200	2.500	BA-BC	
		2.600	BA	
		2.700	BA	
		2.800	BA-BC	
		3.000	BA-BC	
	900	2.700	BC	
		2.800	BC	
		3.000	BC	
	595	1.195	BC	
		2.395	BC	
13	1.200	2.500	BA-BC	
		2.600	BA	
		2.700	BA	
		2.800	BA-BC	
		3.000	BA-BC	
	900	2.700	BC	
		2.800	BC	
		3.000	BC	
	15	1.200	2.600	BA
			2.800	BA-BC
3.000			BA-BC	
3.300			BA	
20	900	2.500	BA	
		2.700	BA	
		3.000	BA	

Fig. 53 - Gama de produção de placas de gesso cartonado.

Neste estudo utilizámos exclusivamente placas de 10 mm de espessura e de bordo quadrado com as dimensões de 1,20 m x 2,80 m com uma massa superficial aproximada de 7,5 kg/m². Foram usadas indistintamente ambas as marcas existentes no mercado português.

Embora este material se apresente com uma constituição heterogénea de três camadas tipo sanduíche, não vimos inconveniente

niente de maior em considerá-lo, para efeitos de cálculo, como se de uma estrutura homogênea se tratasse. A espessura muito pequena das lâminas de cartão e a sua boa ligação ao conjunto feita no próprio processo de fabrico das placas e a sua fraca resistência mecânica justificaram esta nossa atitude.

b) aglomerado composto de cortiça

O material derivado da cortiça, utilizado nestes ensaios, foi o aglomerado composto de cortiça. Trata-se de um material constituído pela associação de granulado de cortiça (fragmentos de cortiça de granulometria diversa) com aglutinantes, tais como resinas sintéticas e gelatinas. Em determinados casos são também incorporados plastificantes na composição, para proporcionar maior flexibilidade aos aglomerados.

O aglomerado composto de cortiça utilizado, apresentava uma granulometria de 1 a 3 mm, uma massa específica aproximada de 125 kg/m³ e um módulo de elasticidade médio de cerca de 16 kg/cm².

c) rubbercork

Um outro material derivado da cortiça foi utilizado nos núcleos de algumas divisórias (D2 e D4). Tratou-se de um aglomerado composto de cortiça e borracha denominado "Rubbercork". É um material constituído por granulado de cortiça e borracha sintética nitrílica (NBR) ou cloroprénica (SBR). Além destes dois materiais base são ainda combinadas outras substâncias tais como Activadores, Cargas minerais e por vezes mesmo Desperdícios.

A presença dos granulados de cortiça destina-se a funcionar como uma carga para atribuir melhores características de

elasticidade e compressibilidade ao produto final.

O rubbercork utilizado apresentava um peso específico aproximado de 900 kg/m³ e um módulo de elasticidade médio de cerca de 110 kg/cm².

4.3 - Execução e montagem

4.3.1 - Utilização em Laboratório

A execução dos painéis testados foi feita nas instalações das empresas de cortiça envolvidas neste estudo e consistiu na colagem das placas, dos materiais constituintes, de modo a formar os painéis multicamadas representados na Figura 50.

Na união das diversas camadas entre si, foi utilizada uma cola de contacto neoprénica e feita a colagem em toda a superfície de contacto respectiva.

Para cada tipo de divisória leve ensaiado, foram realizados três painéis de 1,20 m x 2,80 m (dimensões das placas de gesso cartonado) que foram posteriormente montados na "janela" separadora das duas câmaras reverberantes do L.N.E.C.. Em virtude desta ter como dimensões 3,46 m x 2,79 m (Figura 44), todos os painéis necessitaram de ser ajustados nas suas dimensões de modo a poderem ser montados no local respectivo. Assim, por operações de corte no local, o comprimento de cada painel foi encurtado para 2,79 m e a largura de um dos painéis passou a ser somente de 1,06 m.

Os painéis foram mantidos na sua posição definitiva na câmara reverberante através de sarrafos de madeira, pregados em todo o contorno e colocados numa das faces da divisória (a divisória dupla utilizou este modo de fixação para cada um dos dois painéis constituintes).

As juntas horizontais e verticais foram fechadas com uma leitada de gesso.

4.3.2 - Utilização in situ

O método de fixação dos painéis utilizado em laboratório não é aquele que, em situações correntes, "in situ", se utilizaria. Nestes casos as paredes divisórias amovíveis seriam montadas de modo diverso e, por exemplo, conforme se poderá analisar nas Figuras 54 a 59.

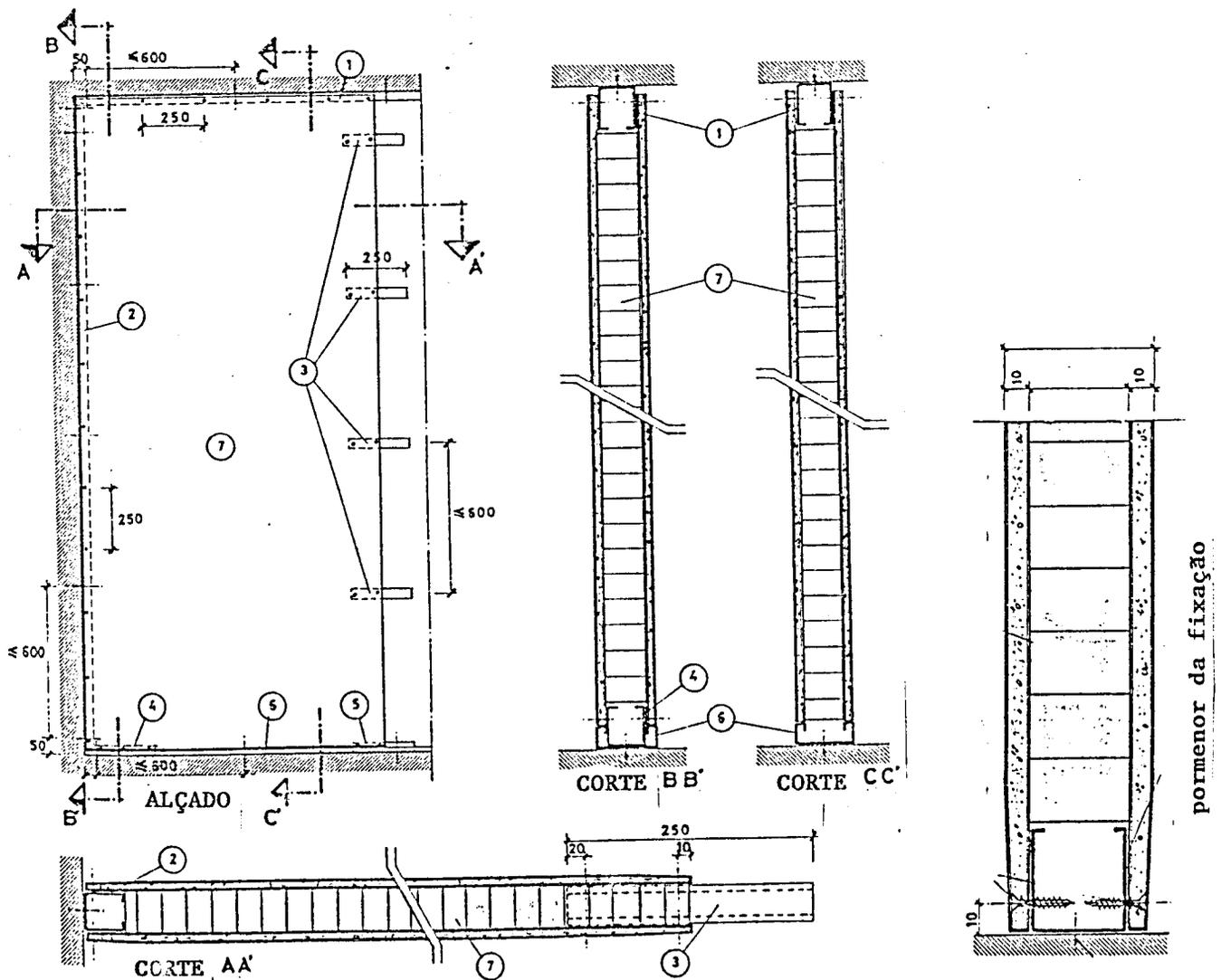


Fig. 54 - Esquema de montagem de paredes divisórias com painéis amovíveis.

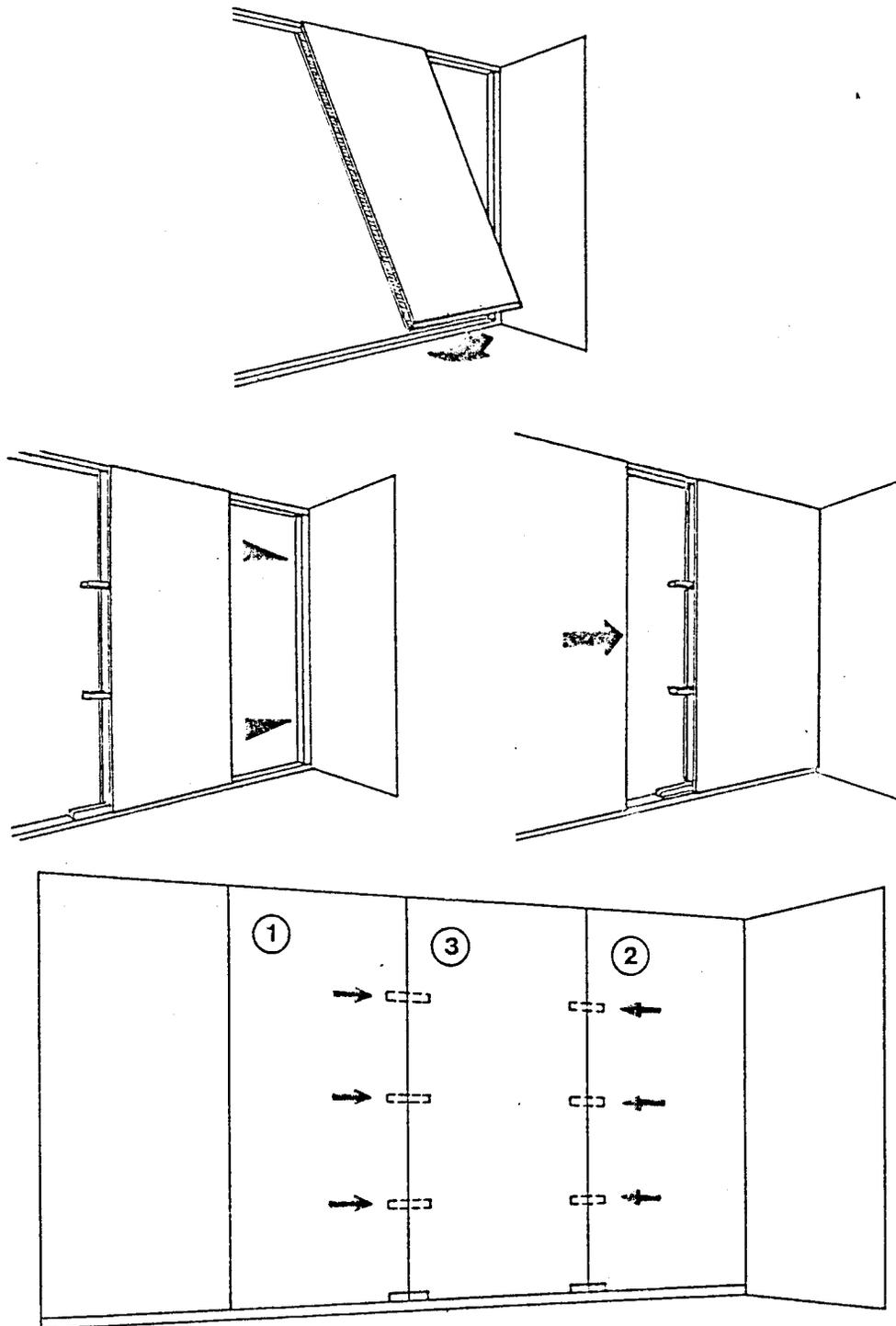


Fig. 55 - Esquema e cortes de painéis amovíveis. Pormenores de fixação.

Nas Figuras 54 e 55 podemos ver um tipo de solução para a montagem destas paredes divisórias. Nela são utilizados perfis metálicos (ou de PVC rígido) para ligação dos painéis ao pavimento, ao tecto e às paredes laterais. A fixação desses perfis será feita consoante o tipo de pavimento presente em cada caso. Os painéis unir-se-ão, entre si, mediante cavilhas metálicas (ou de PVC) ou por um perfil vertical.

Uma vez colocados o perfil de base e de perímetro (tecto e laterais), o painel é encaixado no perfil do tecto apoiando-o no perfil base. Em continuação deslizar-se-à o painel até à sua posição correcta. Nessa posição colocam-se as cavilhas de união. De igual forma se procederá com os restantes painéis até chegar à colocação daquele que fecha a um elemento fixo.

Em alternativa à utilização de perfis de fixação, um outro tipo de montagem seria possível através da colagem.

O contacto painéis-solo seria feito por colagem directa (Figura 56). Nas cozinhas e restantes zonas húmidas a protecção da base dos painéis poderia ser efectuada por perfis U plásticos ou por um ressalto de betão, argamassa ou alvenaria (Figura 57) (51). A ligação painéis-tecto realizar-se-ia por interposição de uma camada resiliente entre a divisória e a face inferior do tecto, sendo o espaço restante preenchido por cola (Figura 58). Em alternativa, poderia usar-se uma mousse de poliuretano expandida in situ. A ligação com as paredes laterais realizar-se-ia por colagem. Se a distância painel-parede for superior a 0,01 m, deverão tomar-se precauções suplementares.

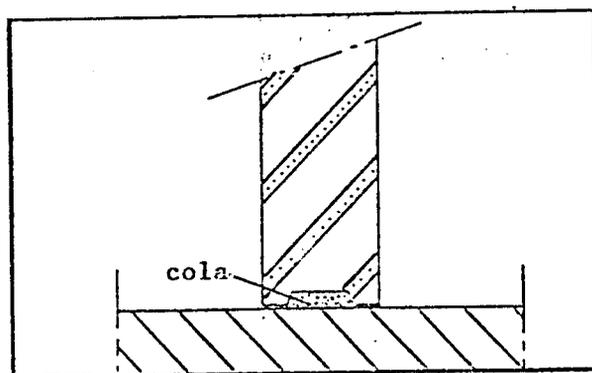


Fig. 56 - Pormenor de ligação da divisória amovível com o pavimento.

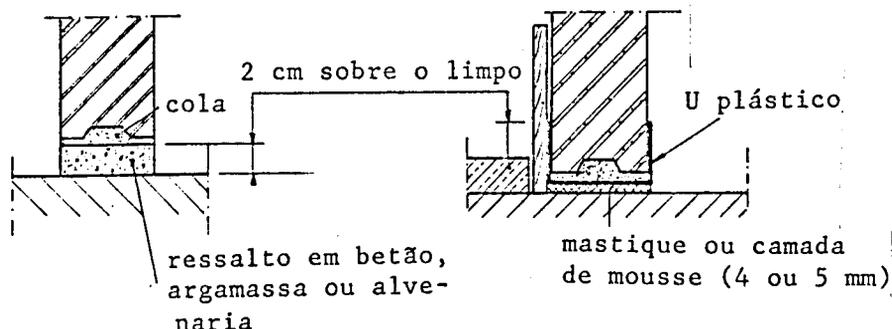


Fig. 57 - Pormenor de ligação da divisória amovível com o pavimento em zonas húmidas.

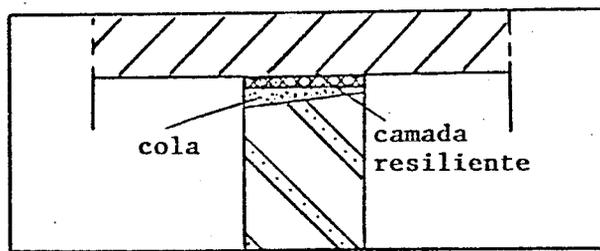
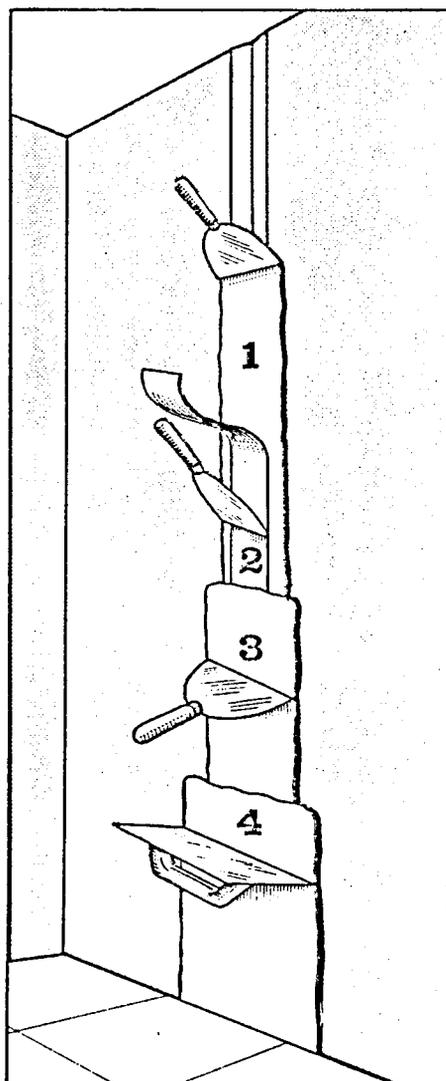


Fig. 58 - Pormenor de ligação da divisória amovível com o tecto.

Uma vez colocados os painéis, haverá que reconstruir as juntas de ligação, de modo a que não sejam visíveis e que dêem continuidade ao paramento, permitindo que sobre ele se possa aplicar o acabamento final (tinta, papel, etc.)

Uma vez reparados os defeitos (bordos quebrados, etc.), proceder-se-à ao tratamento das juntas de ligação (Figura 59).



- 1 - Pasta de juntas
- 2 - Cinta de juntas
- 3 - Pasta de juntas
- 4 - Camada de finalização

Fig. 59 - Fases de tratamento das juntas entre painéis.

Este tipo de paredes amovíveis não necessita de tantos cuidados para a fixação de elementos suspensos das suas faces, quanto alguns dos seus congêneres (com núcleos de tipo "favos de mel", de lã de vidro, etc.).

Para a suspensão nestes painéis de qualquer tipo de material deverá ser, contudo, utilizado o sistema de fixação adequado para o peso a suportar (Figura 60). Até um peso aproximado de 6 kg deverá ser usado um tipo de fixação como os da Figura 60A; para objectos com peso até 24 kg será aconselhável o uso de tacos auto-expansivos ("buchas") (Figura 60B) e para peças com peso superior e até cerca de 35 kg será conveniente o emprego de suportes como os representados na Figura 60C. Para situações de peso superior (radiadores, aparelhos sanitários, etc.) dever-se-ão dispôr, no interior dos painéis, de elementos de rigidez (metálicos, de madeira, etc.) sobre os quais se fixará o elemento desejado.

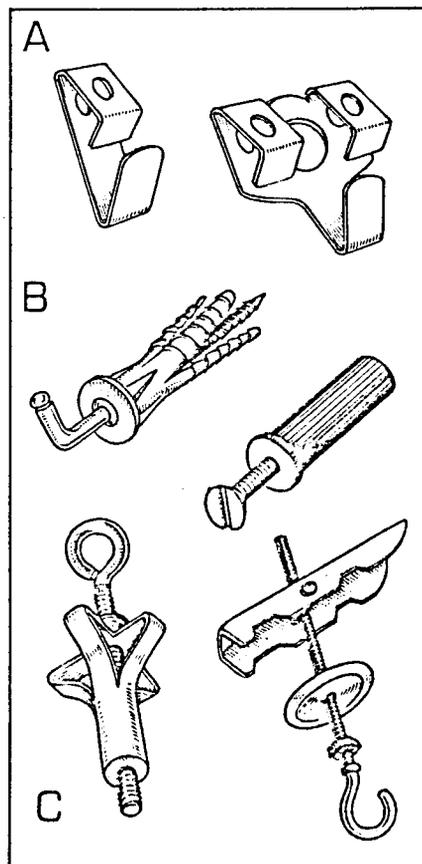


Fig. 60 - Tipos de elementos de fixação para painéis amovíveis.

5 - CONCLUSÃO

Abordaram-se neste capítulo as características mais importantes dos ensaios levados a cabo neste estudo. Foram descritas as técnicas utilizadas nos ensaios bem como as instalações do L.N.E.C. onde os mesmos decorreram.

No desenvolvimento experimental empreendido, foram testadas cinco divisórias sendo quatro do tipo sanduíche e uma dupla com caixa de ar. Os dados obtidos foram tratados informaticamente em ordem a obter resultados caracterizadores do seu isolamento sonoro. Foram descritas neste capítulo a constituição, execução e montagem dessas divisórias, sendo igualmente feita referência breve ao modo de possível utilização in situ de divisórias amovíveis do tipo das ensaiadas (gesso cartonado e aglomerados de cortiça).

Do relatado, verifica-se que os modos de fixação das paredes amovíveis e do fechamento das suas juntas in situ, poderão ser feitos de diversas formas. Assim, os resultados obtidos em laboratório, com tipos de fixação e de tratamento das juntas diversos, deverão ser entendidos só como uma boa aproximação ao comportamento in situ do elemento testado.

Por tudo isto, qualquer afastamento verificado entre os resultados do isolamento sonoro de paredes amovíveis do tipo das ensaiadas, obtidos em laboratório e in situ, poderá justificar-se quer pela influência do tipo de fixação usado nos painéis quer pelo modo de fechamento das juntas de ligação.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS OBTIDOS - CONCLUSÕES

1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos na caracterização do isolamento sonoro das paredes divisórias ensaiadas.

Foram testadas quatro divisórias amovíveis tipo sanduíche (D1, D2, D3 e D4) e uma divisória dupla (DD1/2) formada por conjugação de duas das primeiras. Nesta última e em virtude da não simetria da divisória, foram feitos dois ensaios, um em cada sentido de emissão do som incidente (DD1/2.1 e DD1/2.2).

Os resultados determinados para cada divisória testada são fornecidos em quatro formas:

- Folha de "Saída de Resultados".

São descritos, para cada banda de frequências, os valores obtidos para o isolamento global (D) e para o índice de redução sonora (R). São igualmente fornecidos cinco valores caracterizadores do isolamento sonoro: I_a , I_{ae} , Delta L, Delta L (branco) e Delta L (rosa).

- Gráfico frequências/índice de redução sonora.
É apresentada, em coordenadas rectangulares e semi-logarítmicas, a distribuição no domínio da frequência, dos valores dos índices de redução sonora obtidos.

- Gráfico comparativo.
Neste diagrama são representados comparativamente, os resultados obtidos para a distribuição no domínio da frequência dos valores do índice de redução sonora, pelas vias experimental e por utilização do modelo. Esta última é a determinada por aplicação analítica do modelo proposto pelo autor no Capítulo II.4.11.

- Folha de "Listagem dos Dados"
Descrição dos dados obtidos no ensaio bem como os níveis sonoros nas câmaras emissora e receptora.

São também apresentados quatro diagramas comparativos entre os valores obtidos experimentalmente para a descrição no domínio da frequência do índice de redução sonora para as diversas divisórias testadas.

Finalizando este capítulo são analisados os resultados dos ensaios bem como os valores obtidos na aplicação, a estas divisórias, do modelo proposto pelo autor.

2 - RESULTADOS OBTIDOS

2.1 - Divisória D1

A divisória D1 é constituída por dois paramentos de gesso cartonado de 10 mm de espessura cada e núcleo de aglomerado composto de cortiça de 6 mm de espessura (Figura 61).

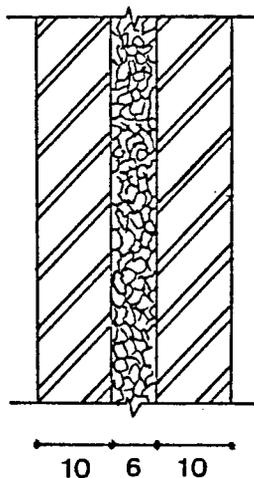


Fig. 61 - Esquema da parede divisória amovível D1.

Nas Figuras 62 a 65 são apresentados respectivamente:

- folha de "Saída de Resultados";
- gráfico $f(\text{Hz})/R(\text{dB})$;
- gráfico comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo proposto);
- folha de "Listagem dos Dados".

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS

REFERENCIA DA DIVISORIA : D1
 CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :
 gesso carton. / aglom. cortica / gesso carton.
 ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES):10/6/10 mm
 ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA : 26 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f(Hz)	T(s)	D(dB)	R(dB)
125	4.9	13	18
160	4.1	14	17
200	4.6	16	20
250	4.3	17	20
315	4.8	18	22
400	5.8	19	24
500	6.2	20	25
630	6.1	21	26
800	5.4	23	27
1000	5.4	23	28
1250	5.2	24	28
1600	4.7	26	30
2000	4.4	27	31
2500	3.9	28	31
3150	3.1	28	30
4000	2.7	29	30

Ia = 28 dB
 Iae = 24 dB
 DELTA L = 23 dB(A)
 DELTA L (BRANCO) = 26 dB(A)
 DELTA L (ROSA) = 23 dB(A)

 LEGENDA:

- f-frequencias (Hz)
- T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)
- D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e receptor)
- R=D-10*LOG(A/S) (NF-669)
- Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NF-2073)
- Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com base no D
- DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real
- DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como branco puro
- DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como rosa puro

(08-26-1988)

Fig. 62 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D1.

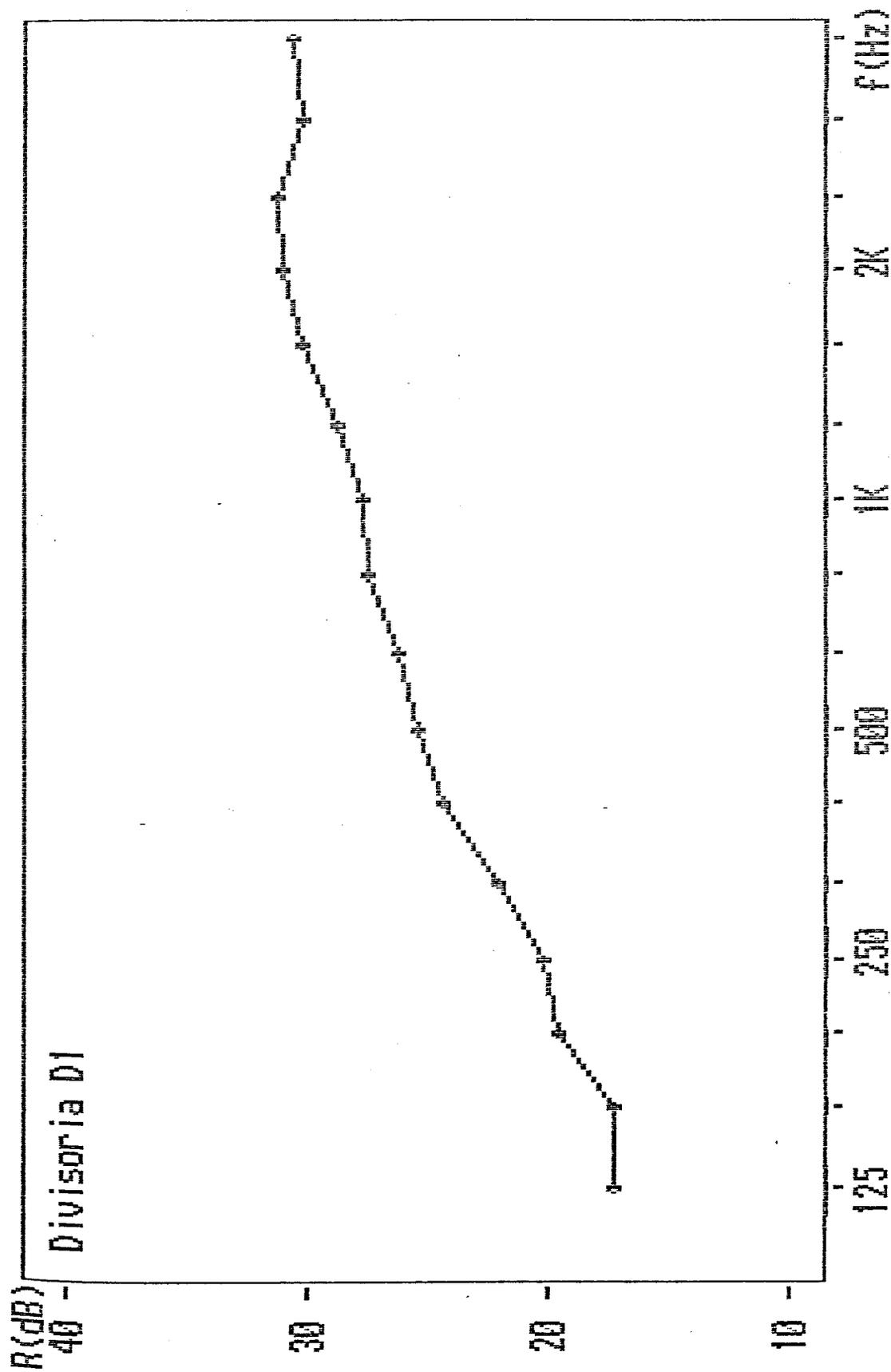


Fig. 63 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisoria D1 (resultados experimentais).

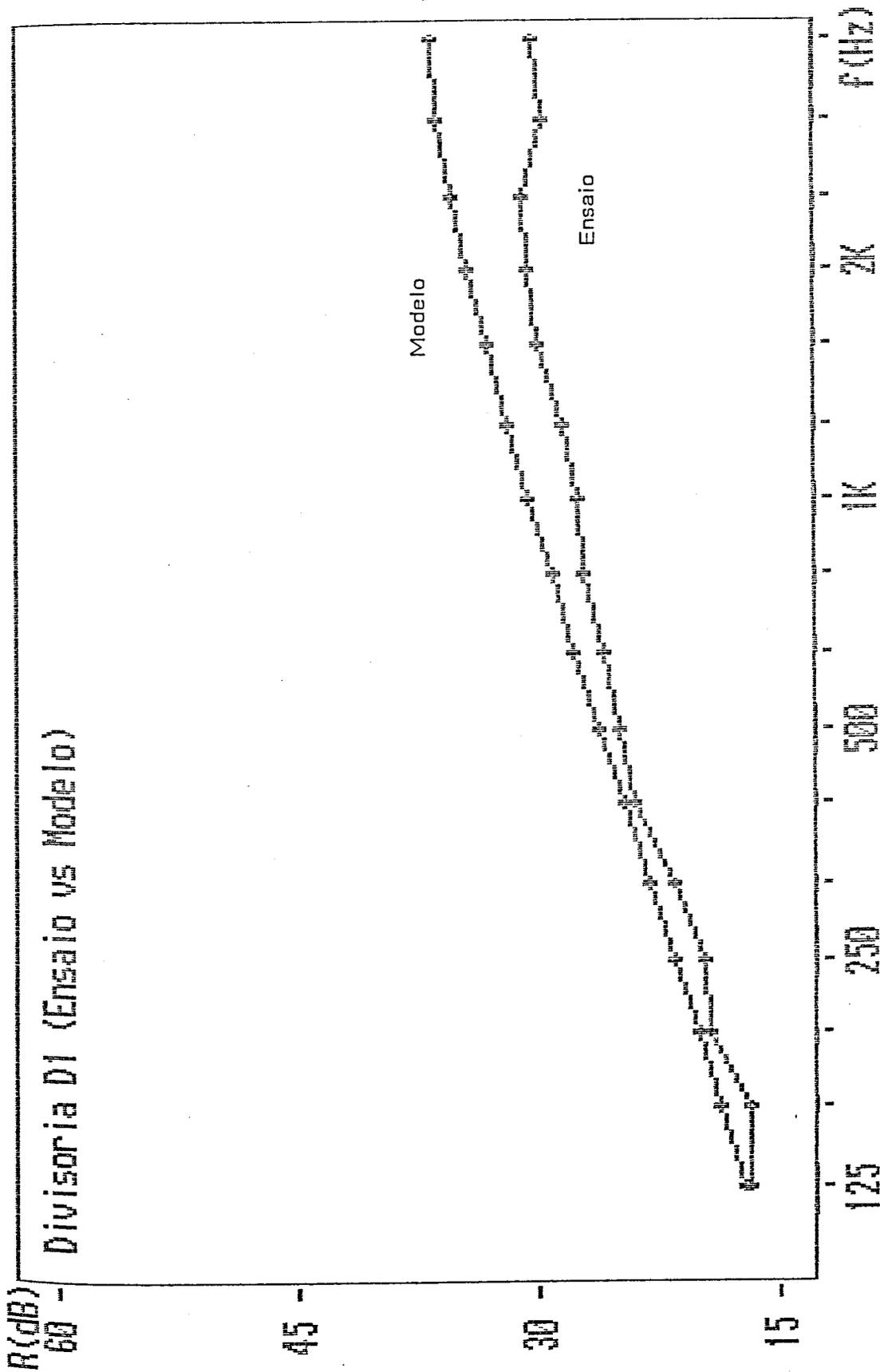


Fig. 64 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do índice de Redução Sonora para a divisória D1.

LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-D1)

f(Hz)	LE1	LE2	LE3	LEM
125	87	85	87	86
160	91	91	93	92
200	93	94	96	95
250	98	96	97	97
315	99	99	99	99
400	102	102	103	102
500	106	104	106	105
630	106	106	106	106
800	106	106	106	106
1000	105	104	105	105
1250	103	103	103	103
1600	104	104	104	104
2000	104	104	103	104
2500	100	99	100	100
3150	98	98	98	98
4000	100	100	100	100

f(Hz)	LR1M	LR2M	LR3M	LRM
125	73	73	73	73
160	77	78	78	78
200	79	79	78	79
250	80	80	81	80
315	81	81	81	81
400	83	83	83	83
500	86	85	85	85
630	85	85	85	85
800	83	83	84	83
1000	81	82	82	82
1250	79	79	79	79
1600	78	78	78	78
2000	77	76	77	77
2500	72	72	72	72
3150	70	70	71	70
4000	72	71	71	71

LEM= 114 dB(A)
LRM= 90 dB(A)

LEGENDA:
 LE-Niveis de pressao sonora na camara emissora nas posicoes do microfone
 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)
 LR-Niveis de pressao sonora na camara receptora nas posicoes do microfon
 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)
 f-frequencias (Hz)

Fig. 65 - Folha de "Listagem de Dados" da divisória D1.

2.2 - Divisória D2

A divisória D2 é constituída por dois paramentos de gesso cartonado de 10 mm de espessura cada e núcleo de rubbercork de 6 mm de espessura (Figura 66).

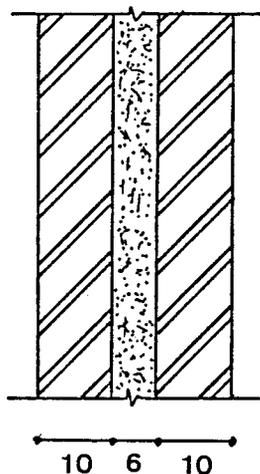


Fig. 66 - Esquema da parede divisória amovível D2.

Nas Figuras 67 a 70 são apresentados, respectivamente:

- folha de "Saída de Resultados";
- gráfico $f(\text{Hz})/R(\text{dB})$;
- gráfico comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo proposto);
- folha de "Listagem de Dados".

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREDS

REFERENCIA DA DIVISORIA : D2
 CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :
 gesso cartonado / rubbercork / gesso cartonado
 ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES): 10/6/10 mm
 ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA : 26 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f(Hz)	T(s)	D(dB)	R(dB)
125	4.9	20	24
160	4.1	18	21
200	4.6	22	26
250	4.3	24	27
315	4.8	22	26
400	5.8	25	29
500	6.2	24	29
630	6.1	25	30
800	5.4	27	31
1000	5.4	29	33
1250	5.2	30	34
1600	4.7	32	36
2000	4.4	32	36
2500	3.9	34	37
3150	3.1	37	39
4000	2.7	37	39

Ia = 34 dB
 Iae = 29 dB
 DELTA L = 28 dB(A)
 DELTA L (BRANCO) = 32 dB(A)
 DELTA L (ROSA) = 29 dB(A)

 LEGENDA:

- f-frequencias (Hz)
- T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)
- D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e receptor)
- R=D-10*LOG(A/S) (NP-669)
- Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)
- Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com base no D
- DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real
- DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como branco puro
- DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como rosa puro

(08-26-1988)

Fig. 67 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D2.

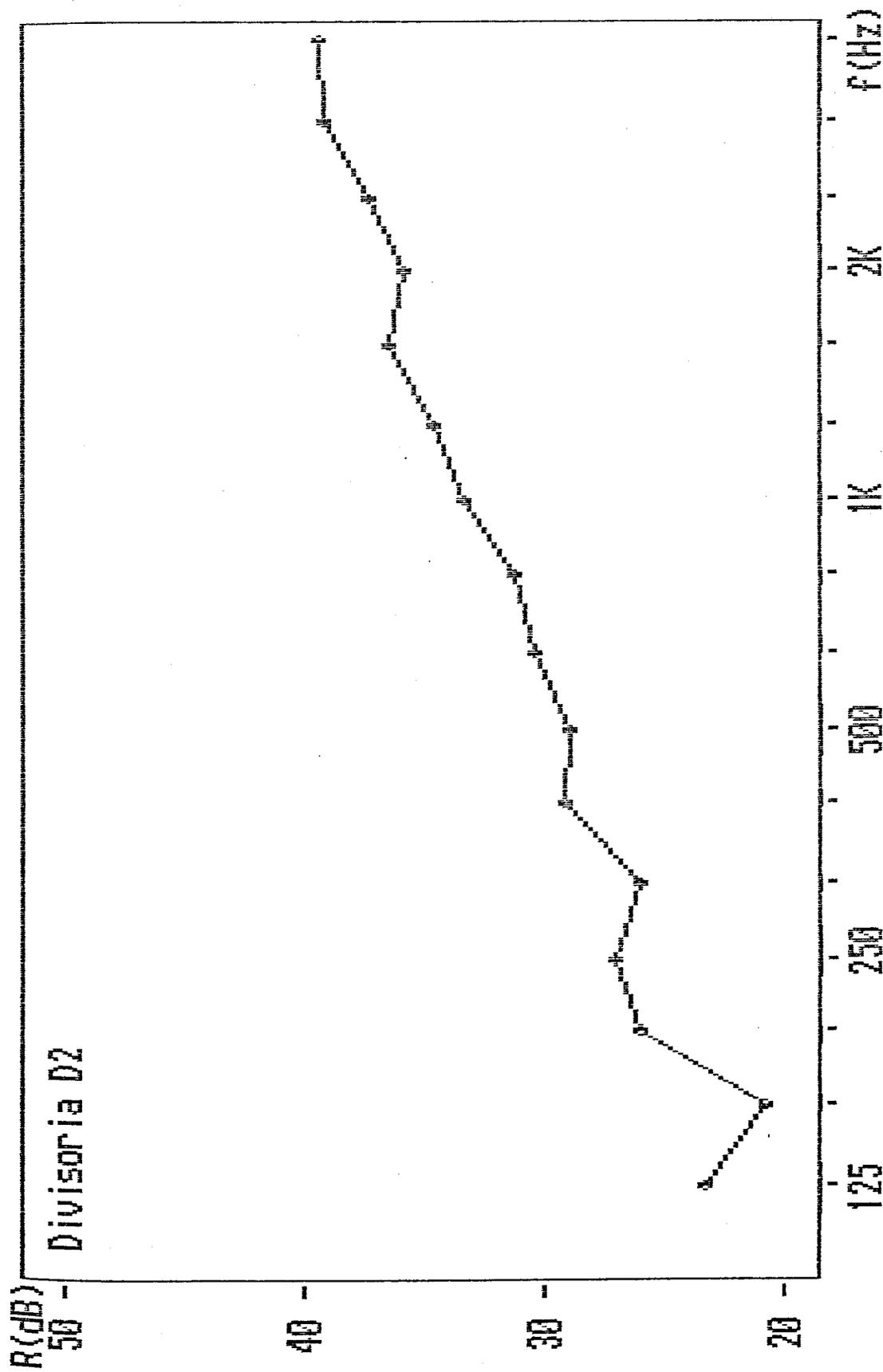


Fig. 68 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisoria D2 (resultados experimentais).

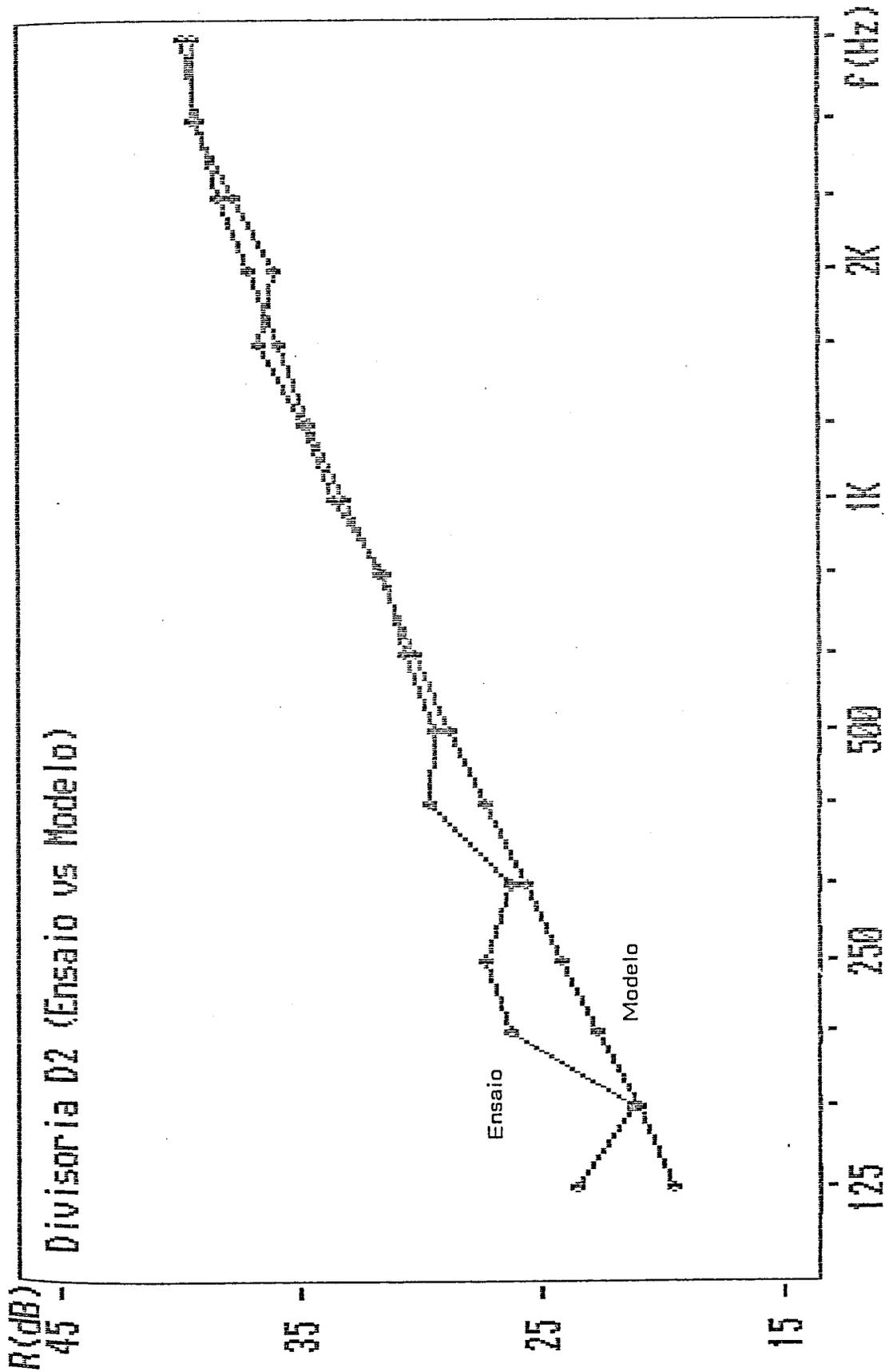


Fig. 69 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do índice de Redução Sonora para a divisória D2.

LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-D2)

f(Hz)	LE1	LE2	LE3	LEM
125	91	92	90	91
160	95	95	94	95
200	99	98	96	98
250	99	100	99	99
315	100	103	100	101
400	104	106	103	105
500	106	107	106	106
630	107	108	106	107
800	106	107	106	106
1000	106	106	105	106
1250	103	105	103	104
1600	104	104	104	104
2000	104	104	104	104
2500	100	100	100	100
3150	97	98	98	98
4000	99	100	99	99

f(Hz)	LR1M	LR2M	LR3M	LRM
125	73	71	70	72
160	76	77	77	77
200	74	76	76	75
250	75	76	76	76
315	79	79	79	79
400	80	80	80	80
500	82	83	82	82
630	81	82	82	82
800	79	80	80	80
1000	77	77	77	77
1250	74	74	73	74
1600	71	72	72	72
2000	72	72	72	72
2500	66	66	66	66
3150	61	61	61	61
4000	62	62	62	62

LEM= 114 dB(A)

LRM= 86 dB(A)

LEGENDA:

LE-Niveis de pressao sonora na camara emissora nas posicoes do microfone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)

LR-Niveis de pressao sonora na camara receptora nas posicoes do microfone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)

f-frequencias (Hz)

Fig. 70 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória D2.

2.3 - Divisória D3

A divisória D3 é constituída por dois paramentos de gesso cartonado de 10 mm de espessura cada e núcleo de aglomerado composto de cortiça de 40 mm de espessura (Figura 71).

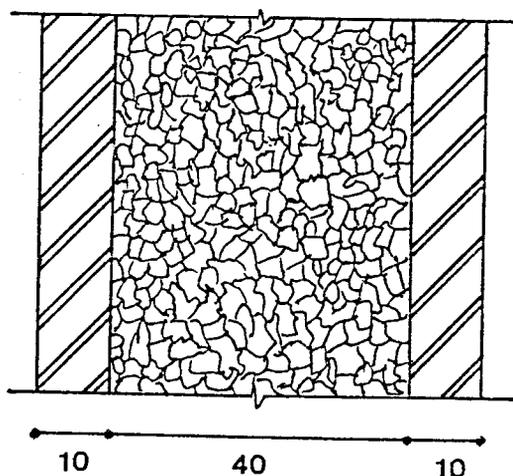


Fig. 71 - Esquema da parede divisória amovível D3.

Nas Figuras 72 a 75 são apresentados, respectivamente:

- folha de "Saída de Resultados";
- gráfico $f(\text{Hz})/R(\text{dB})$;
- gráfico comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo proposto);
- folha de "Listagem de Dados".

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS

REFERENCIA DA DIVISORIA : D3
 CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :
 gesso cartonado / aglomerado cortica / gesso cartonado
 ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES):10/40/10 mm
 ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA : 60 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f(Hz)	T(s)	D(dB)	R(dB)
125	5.1	19	23
160	4.2	17	21
200	4.5	22	25
250	5	24	28
315	4.9	24	28
400	5.2	23	28
500	5.9	24	29
630	5.3	24	28
800	5	23	27
1000	4	21	24
1250	4.6	27	31
1600	4.5	35	38
2000	3.9	38	41
2500	3.8	42	45
3150	3.1	43	45
4000	2.6	43	44

Ia = 32 dB
 Iae = 27 dB
 DELTA L = 25 dB(A)
 DELTA L (BRANCO) = 30 dB(A)
 DELTA L (ROSA) = 27 dB(A)

LEGENDA:

- f-frequencias (Hz)
- T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)
- D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e receptor)
- R=D-10*LOG(A/S) (NP-669)
- Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)
- Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com base no D
- DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real
- DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como branco puro
- DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como rosa puro

(08-26-1988)

Fig. 72 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D3.

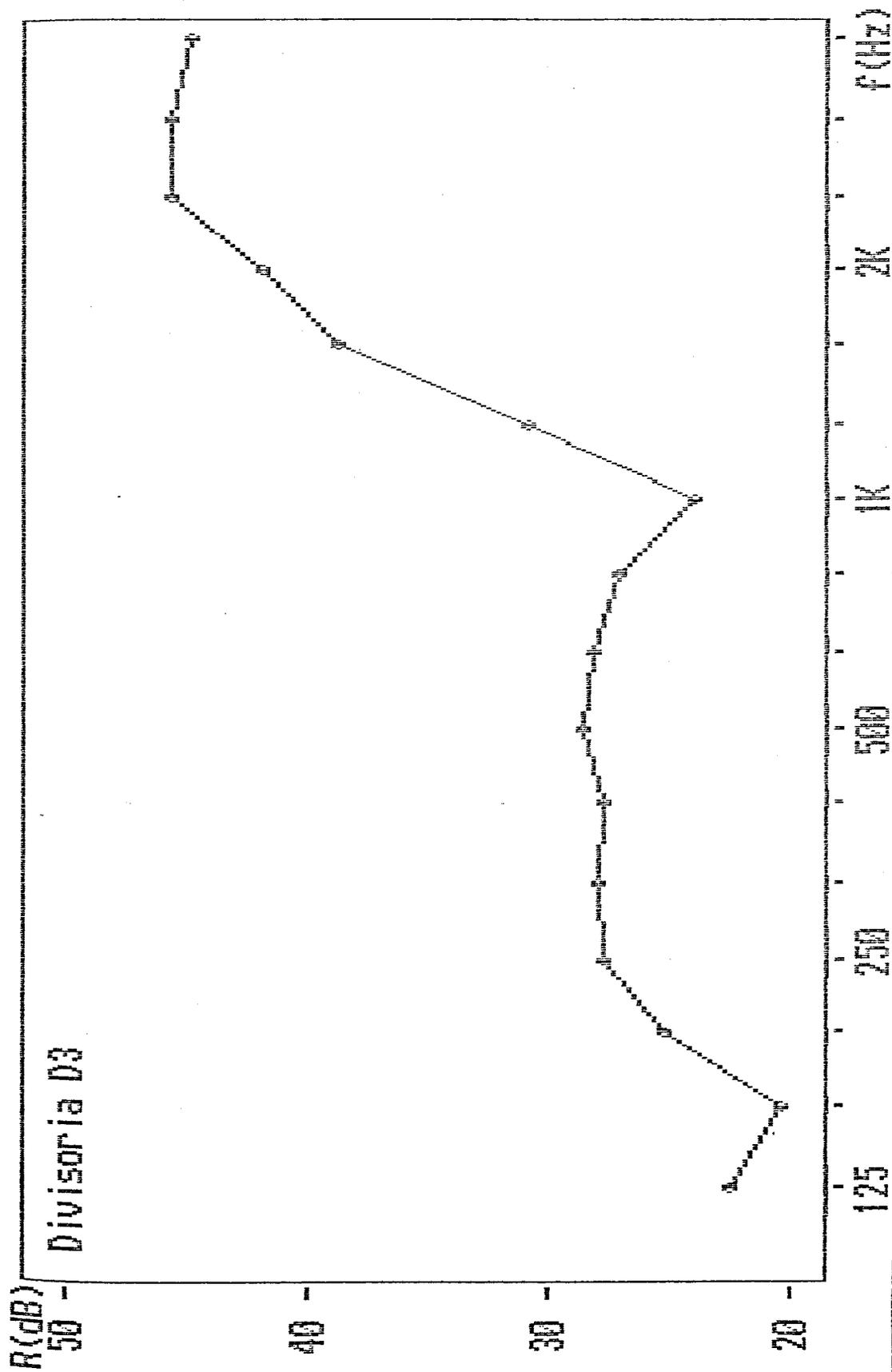


Fig. 73 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisória D3 (resultados experimentais).

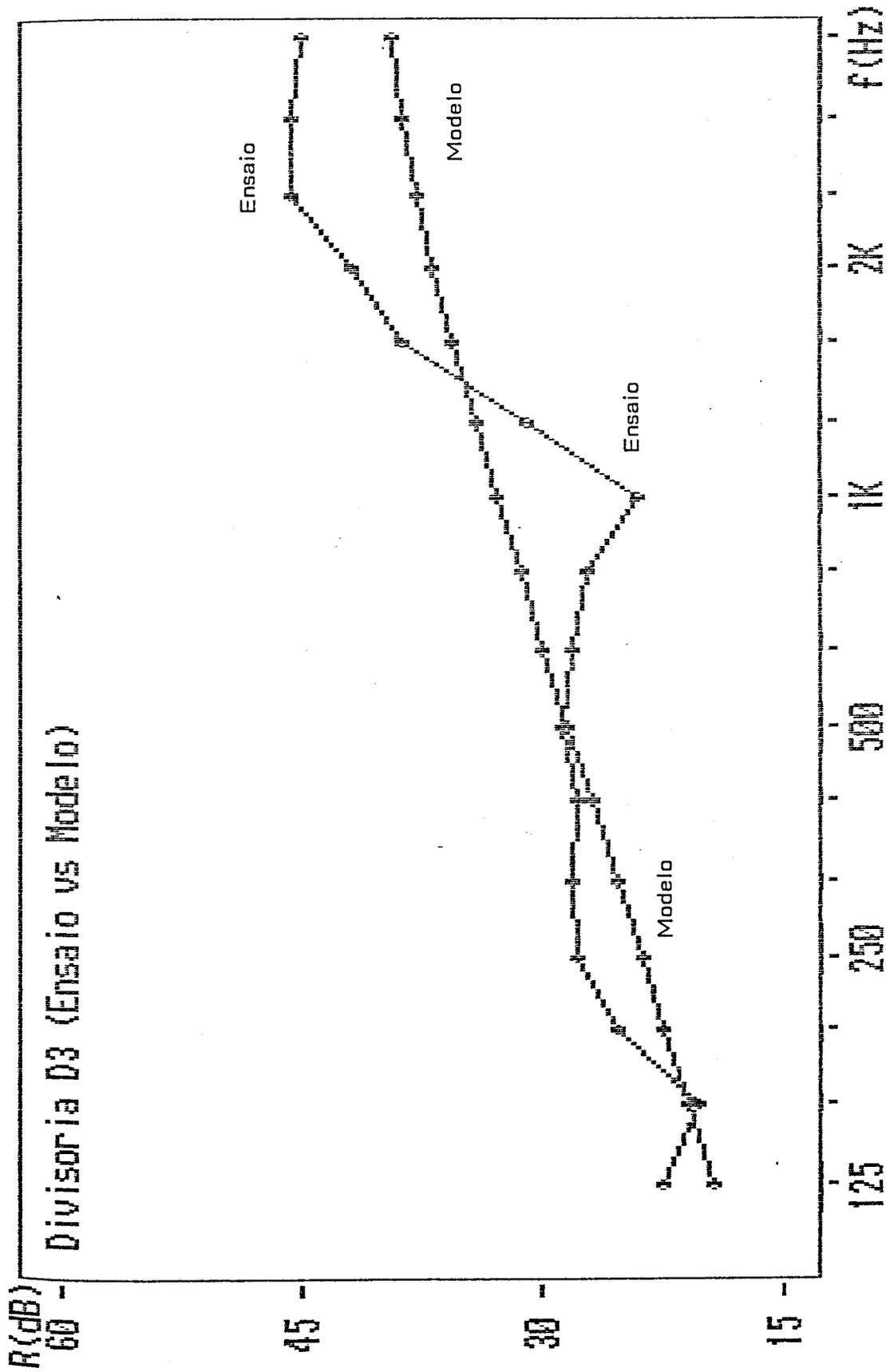


Fig. 74 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do índice de Redução Sonora para a divisória D3.

LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-D3)

f(Hz)	LE1	LE2	LE3	LEM
125	90	93	91	92
160	94	96	94	95
200	99	99	97	98
250	99	101	100	100
315	100	104	101	102
400	104	106	104	105
500	106	108	106	107
630	106	109	106	107
800	106	108	106	107
1000	105	106	104	105
1250	103	105	104	104
1600	104	105	105	105
2000	105	106	105	105
2500	100	100	100	100
3150	98	98	98	98
4000	99	100	99	99

f(Hz)	LR1M	LR2M	LR3M	LRM
125	75	72	71	73
160	77	78	77	77
200	76	77	77	77
250	76	76	77	76
315	78	78	78	78
400	81	81	82	81
500	83	83	83	83
630	83	83	84	83
800	84	84	83	84
1000	84	84	84	84
1250	77	77	77	77
1600	70	70	70	70
2000	67	67	67	67
2500	58	58	58	58
3150	55	55	55	55
4000	57	56	56	56

LEM= 115 dB(A)

LRM= 89 dB(A)

LEGENDA:

LE-Níveis de pressão sonora na câmara emissora nas posições do microfone 1,2,3 e valor médio (dB/1/3 oitava)

LR-Níveis de pressão sonora na câmara receptora nas posições do microfone 1,2,3 e valor médio (dB/1/3 oitava)

f-frequências (Hz)

Fig. 75 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória D3.

2.4 - Divisória D4

A divisória D4 é constituída por dois paramentos de gesso cartonado de 10 mm de espessura cada e núcleo de ISO 500 (sanduíche de faces de aglomerado composto de cortiça de 25 mm de espessura cada e núcleo de rubbercork de 3 mm de espessura) (Figura 76).

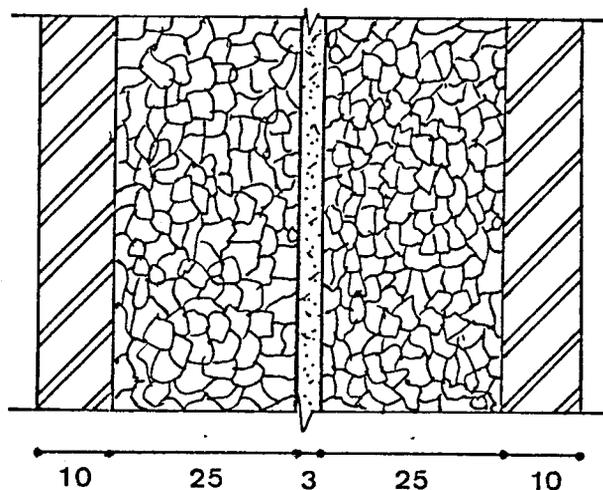


Fig. 76 - Esquema da parede divisória amovível D4.

Nas Figuras 77 a 80 são apresentados, respectivamente:

- folha de "Saída de Resultados";
- gráfico $f(\text{Hz})/R(\text{dB})$;
- gráfico comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo proposto);
- folha de "Listagem de Dados".

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS

REFERENCIA DA DIVISORIA : D4
 CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :
 gesso cartonado / aglom. cortica / rubbercork / aglom. cortica / gesso carl
 ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES): 10/25/3/25/10 mm
 ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA : 73 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f(Hz)	T(s)	D(dB)	R(dB)
125	5.1	14	18
160	4.2	13	16
200	4.6	17	21
250	3.9	18	21
315	4.6	23	27
400	5.4	25	30
500	6	25	30
630	5.6	28	33
800	5.2	31	36
1000	5	31	35
1250	4.7	34	38
1600	4.7	36	40
2000	4.4	37	41
2500	3.8	38	41
3150	3.2	39	41
4000	2.6	43	44

Ia = 34 dB
 Iae = 30 dB
 DELTA L = 31 dB(A)
 DELTA L (BRANCO) = 34 dB(A)
 DELTA L (ROSA) = 29 dB(A)

 LEGENDA:

- f-frequencias (Hz)
- T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)
- D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e receptor)
- R=D-10*LOG(A/S) (NP-669)
- Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)
- Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com base no D
- DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real
- DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como branco puro
- DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como rosa pur

(08-26-1988)

Fig. 77 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória D4.

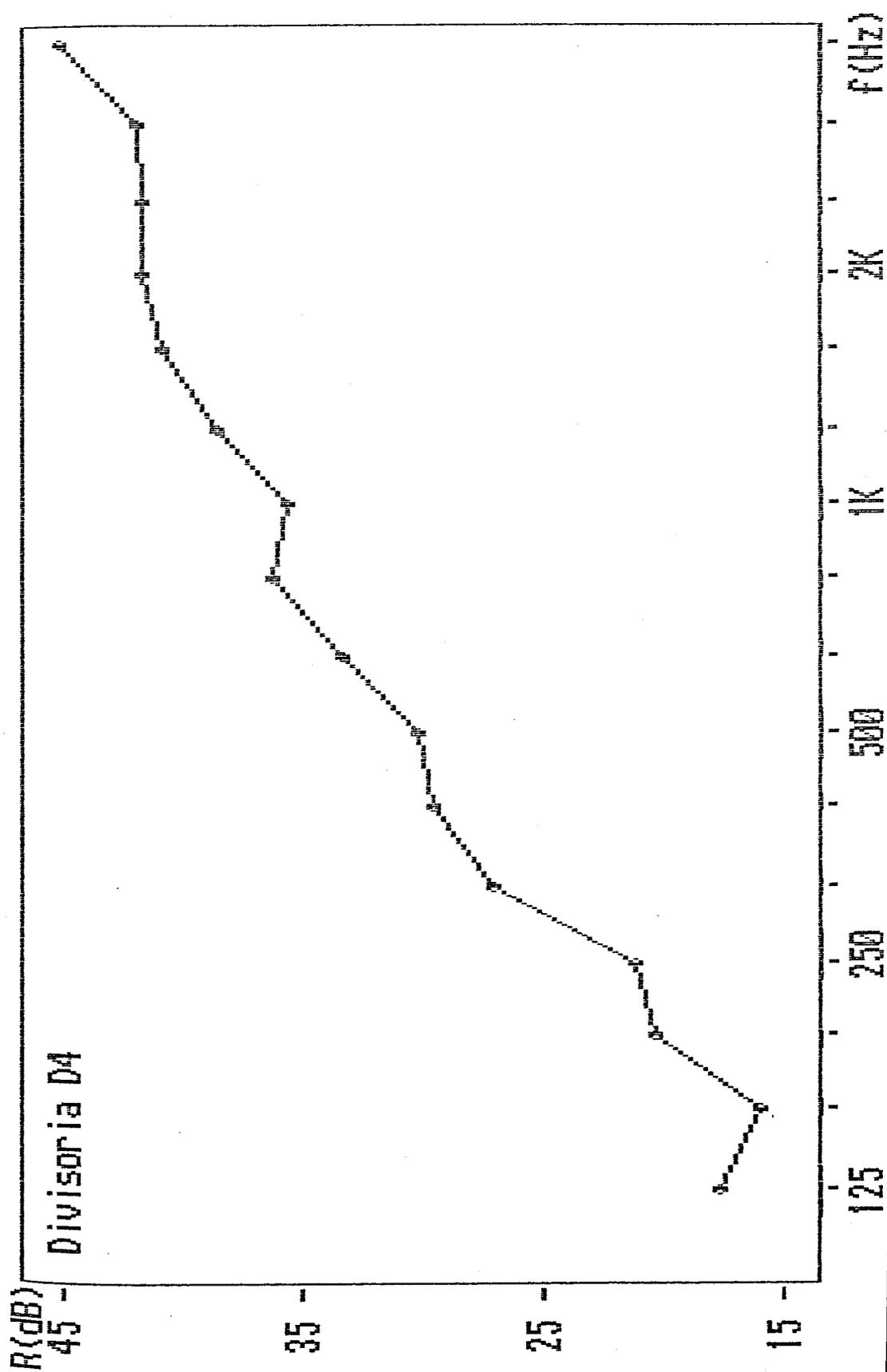


Fig. 78 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisoria D4 (resultados experimentais).

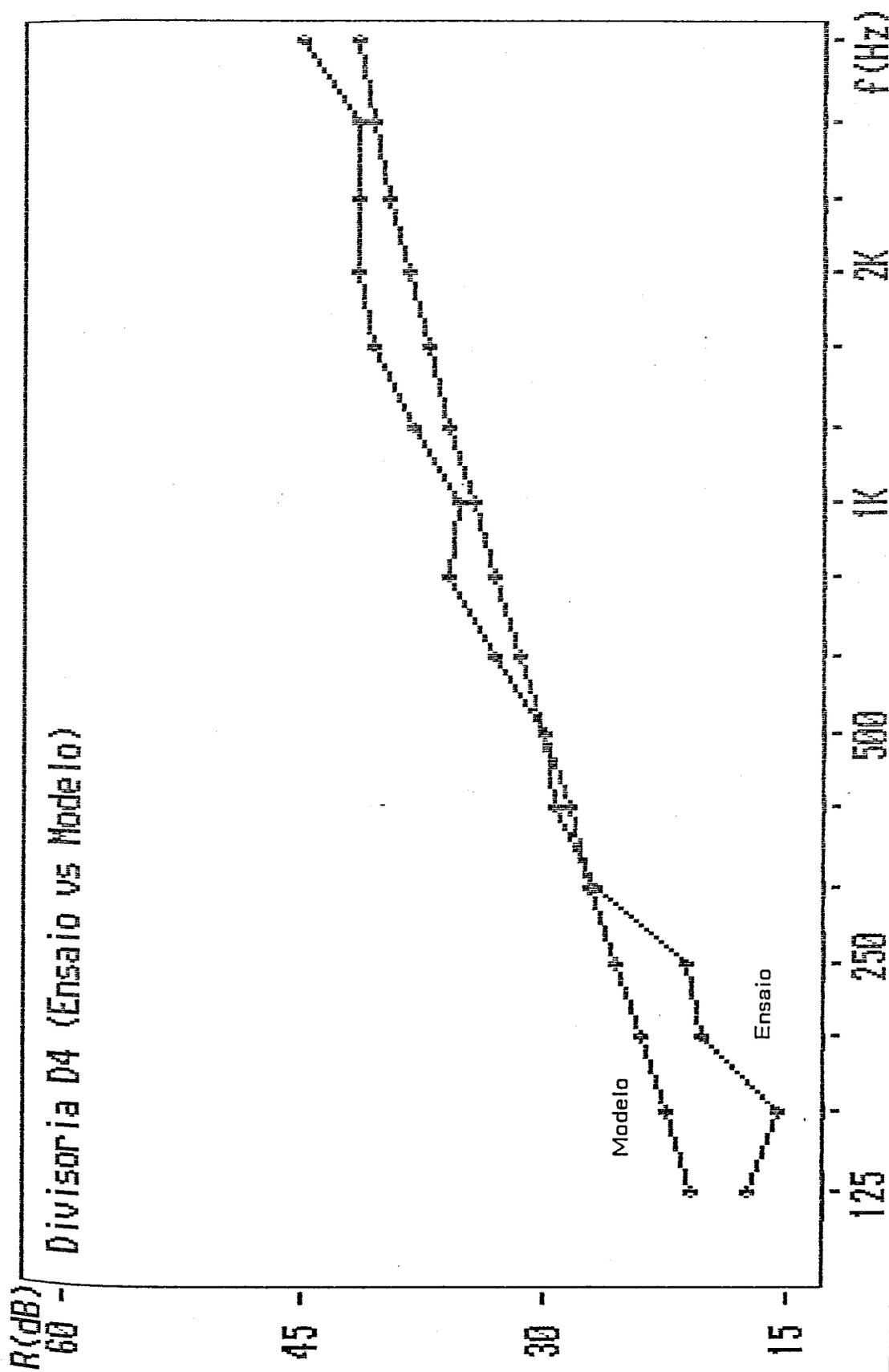


Fig. 79 - Diagrama comparativo dos resultados experimentais (ensaio) e teóricos (aplicação do modelo) do Índice de Redução Sonora para a divisória D4.

LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-D4)

f(Hz)	LE1	LE2	LE3	LEM
125	88	89	86	88
160	90	90	90	90
200	96	91	92	94
250	95	96	95	95
315	97	100	99	99
400	102	102	101	102
500	104	104	104	104
630	106	106	107	106
800	106	105	106	106
1000	105	105	105	105
1250	104	103	103	103
1600	103	103	104	103
2000	105	104	104	104
2500	100	100	100	100
3150	98	98	98	98
4000	100	100	100	100

f(Hz)	LR1M	LR2M	LR3M	LRM
125	73	74	75	74
160	76	77	78	77
200	76	77	77	77
250	77	77	77	77
315	75	76	76	76
400	76	77	77	77
500	79	79	79	79
630	78	78	78	78
800	74	74	75	74
1000	74	74	74	74
1250	70	69	69	69
1600	67	67	67	67
2000	67	67	67	67
2500	62	62	62	62
3150	59	59	59	59
4000	57	57	57	57

LEM= 114 dB(A)
LRM= 83 dB(A)

LEGENDA:

- LE-Níveis de pressão sonora na câmara emissora nas posições do microfone 1,2,3 e valor médio (dB/1/3 oitava)
- LR-Níveis de pressão sonora na câmara receptora nas posições do microfone 1,2,3 e valor médio (dB/1/3 oitava)
- f-frequências (Hz)

Fig. 80 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória D4.

2.5 - Divisória dupla DD1/2

A divisória DD1/2 é uma parede dupla constituída por conjugação das divisórias D1 e D2 separadas por caixa de ar com 100 mm de espessura (Figura 81).

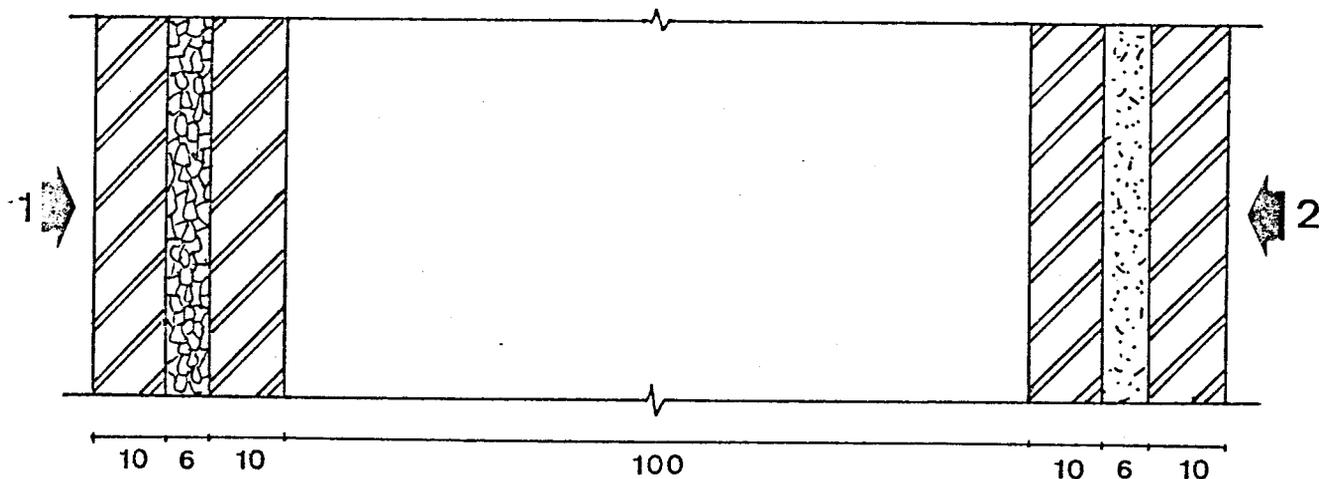


Fig. 81 - Esquema da parede divisória dupla DD1/2 (com os dois sentidos de emissão do som: 1 e 2).

Devido a não existir simetria na constituição desta divisória, foram realizados dois ensaios, emitindo o som em cada um dos sentidos conforme Figura 81, denominando cada desses casos por DD1/2.1 e DD1/2.2.

Nas Figuras 82, 83 e 85, 86 apresentam-se, respectivamente:

- folhas de "Saída de Resultados";
- folhas de "Listagem de Dados".

Na Figura 84 é representado o diagrama frequências/índice de redução sonora dos dois casos referidos.

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS

REFERENCIA DA DIVISORIA : DD1/2.1

CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :

gesso cartonado / aglom. cortica / gesso cartonado * caixa de ar * gesso car
do / rubbercork / gesso cartonado

Emissao do lado da cortica

ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES): 10/6/10 * 100 * 10/6/10 mm

ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA : 152 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f(Hz)	T(s)	D(dB)	R(dB)
125	4.5	23	27
160	3.8	22	25
200	4	25	29
250	3.5	29	32
315	4.4	32	35
400	4.9	34	38
500	5.8	37	42
630	5.5	40	44
800	5.2	43	48
1000	5	45	49
1250	4.6	47	51
1600	4.4	51	55
2000	4.1	53	56
2500	3.9	54	57
3150	3	56	58
4000	2.5	55	56

Ia = 44 dB

Iae = 40 dB

DELTA L = 42 dB(A)

DELTA L (BRANCO) = 46 dB(A)

DELTA L (ROSA) = 39 dB(A)

LEGENDA:

f-frequencias (Hz)

T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)

D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e receptor)

R=D-10*LOG(A/S) (NP-669)

Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)

Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com base no D

DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real

DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido

emitido como branco puro

DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como rosa puro

(08-27-1988)

Fig. 82 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS

REFERENCIA DA DIVISORIA : DD1/2.2

CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :

gesso cartonado / aglomerado de cortica / gesso cartonado * caixa de ar * gesso cartonado / rubbercork / gesso cartonado

Emissao do lado do rubbercork

ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES): 10/6/10 * 100 * 10/6/10 mm

ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA : 152 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f(Hz)	T(s)	D(dB)	R(dB)
125	4.9	22	26
160	4.1	21	24
200	4.6	24	28
250	4.3	29	33
315	4.8	29	33
400	5.8	32	37
500	6.2	33	38
630	6.1	37	42
800	5.4	40	45
1000	5.4	43	47
1250	5.2	44	48
1600	4.7	50	54
2000	4.4	50	54
2500	3.9	52	55
3150	3.1	55	57
4000	2.7	54	55

Ia = 43 dB

Iae = 39 dB

DELTA L = 40 dB(A)

DELTA L (BRANCO) = 44 dB(A)

DELTA L (ROSA) = 37 dB(A)

LEGENDA:

f-frequencias (Hz)

T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)

D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e receptor)

R=D-10*LOG(A/S) (NP-669)

Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)

Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com base no D

DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real

DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como branco puro

DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como rosa puro

(08-27-1988)

Fig. 83 - Folha de "Saída de Resultados" da divisória DD1/2.2.

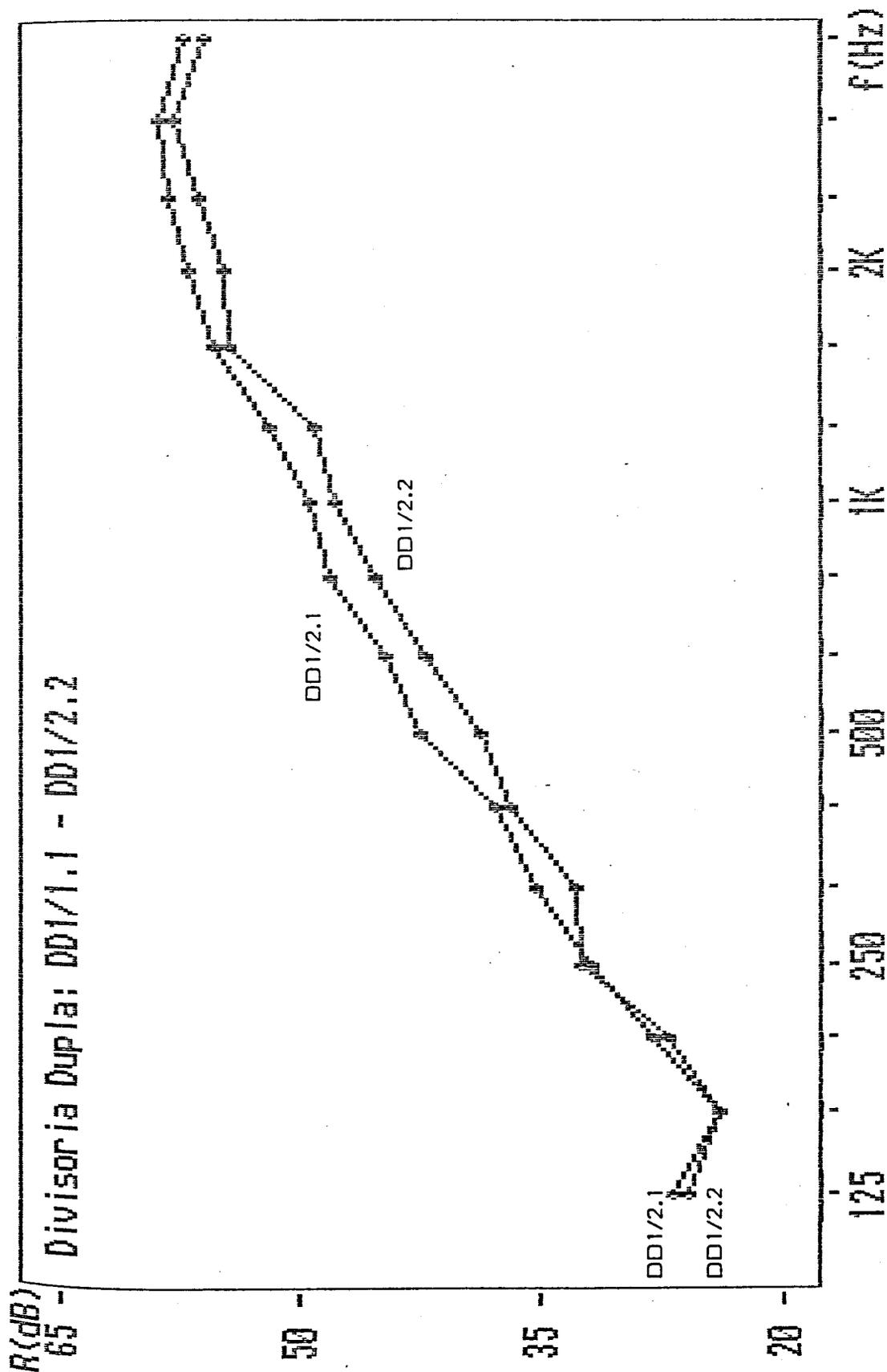


Fig. 84 - Diagrama Índice de Redução Sonora versus frequência da divisoria DD1/2 (resultados experimentais para os dois casos de sentidos de emissão do som: 1 e 2).

LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-DD1/2.1)

f(Hz)	LE1	LE2	LE3	LEM
125	89	87	87	88
160	94	92	96	94
200	95	94	94	94
250	97	96	98	97
315	100	98	100	99
400	102	102	102	102
500	106	106	107	106
630	106	107	107	107
800	107	107	107	107
1000	105	106	106	106
1250	103	104	103	103
1600	105	105	105	105
2000	104	104	105	104
2500	100	100	100	100
3150	99	99	98	99
4000	100	100	100	100

f(Hz)	LR1M	LR2M	LR3M	LRM
125	65	64	64	64
160	73	73	72	73
200	70	68	69	69
250	67	68	68	68
315	67	68	68	68
400	68	68	69	68
500	69	69	69	69
630	67	67	67	67
800	63	64	64	64
1000	61	61	61	61
1250	56	56	56	56
1600	54	54	54	54
2000	51	52	52	52
2500	46	46	46	46
3150	43	43	43	43
4000	45	45	45	45

LEM= 114 dB(A)
LRM= 72 dB(A)

LEGENDA:

- LE-Niveis de pressao sonora na camara emissora nas posicoes do microfone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)
- LR-Niveis de pressao sonora na camara receptora nas posicoes do microfone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)
- f-frequencias (Hz)

Fig. 85 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória DDI/2.1.

LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-DD1/2.2)

f(Hz)	LE1	LE2	LE3	LEM
125	88	85	87	87
160	89	90	92	91
200	92	92	94	93
250	98	96	97	97
315	98	98	98	98
400	102	101	102	102
500	105	105	104	105
630	106	106	106	106
800	106	105	106	106
1000	106	105	105	105
1250	103	102	103	103
1600	105	105	105	105
2000	104	103	104	104
2500	100	100	100	100
3150	98	99	99	99
4000	99	100	100	100

f(Hz)	LR1M	LR2M	LR3M	LRM
125	65	64	65	65
160	69	69	70	69
200	69	69	69	69
250	68	68	68	68
315	69	69	69	69
400	70	70	69	70
500	72	71	71	71
630	69	69	69	69
800	66	65	65	65
1000	63	62	63	63
1250	59	58	59	59
1600	56	55	55	55
2000	53	53	54	53
2500	48	48	47	48
3150	44	44	44	44
4000	46	46	46	46

LEM= 114 dB(A)
LRM= 74 dB(A)

LEGENDA:

- LE-Níveis de pressão sonora na câmara emissora nas posições do microfone 1,2,3 e valor médio (dB/1/3 oitava)
- LR-Níveis de pressão sonora na câmara receptora nas posições do microfone 1,2,3 e valor médio (dB/1/3 oitava)
- f-frequências (Hz)

Fig. 86 - Folha de "Listagem dos Dados" da divisória DD1/2.2.

2.6 - Análise comparativa

Nas páginas seguintes apresentamos uma apreciação comparativa entre os diagramas representativos da descrição, no domínio da frequência, do índice de redução sonora das divisórias em estudo.

Nas Figuras 87 a 90 estão apresentados, respectivamente, os diagramas de:

- Divisórias D1-D2

Apresentam unicamente variação no tipo de material constituinte do núcleo, de aglomerado composto de cortiça (D1) para rubbercork (D2);

- Divisórias D1-D3

Apresentam unicamente variação na espessura do material constituinte do núcleo (aglomerado composto de cortiça) de 6 mm (D1) para 40 mm (D3);

- Divisórias D3-D4

Apresentam variação na espessura do material constituinte do núcleo de 40 mm (D3) para 53 mm (D4) e também pela presença de uma lâmina fina de rubbercork (D4);

- Divisórias D1-D4-DD1/2.1

Apresentam os resultados obtidos para a divisória dupla comparados com os de duas divisórias sanduíche testadas (D1 e D4).

Na Figura 91 está patente um quadro comparativo das grandezas caracterizadoras do isolamento sonoro para todos os seis casos de divisórias ensaiadas. Incluem-se ainda, a título informativo, os valores por nós obtidos, para duas soluções

tradicionais de paredes de alvenaria (tijolo de 7 cm com 1 cm de reboco em cada face e tijolo de 22 cm com 2 cm de reboco em cada face).

No ponto 3.1 deste capítulo, será feita uma análise comentada mais detalhada aos valores obtidos nestes ensaios,

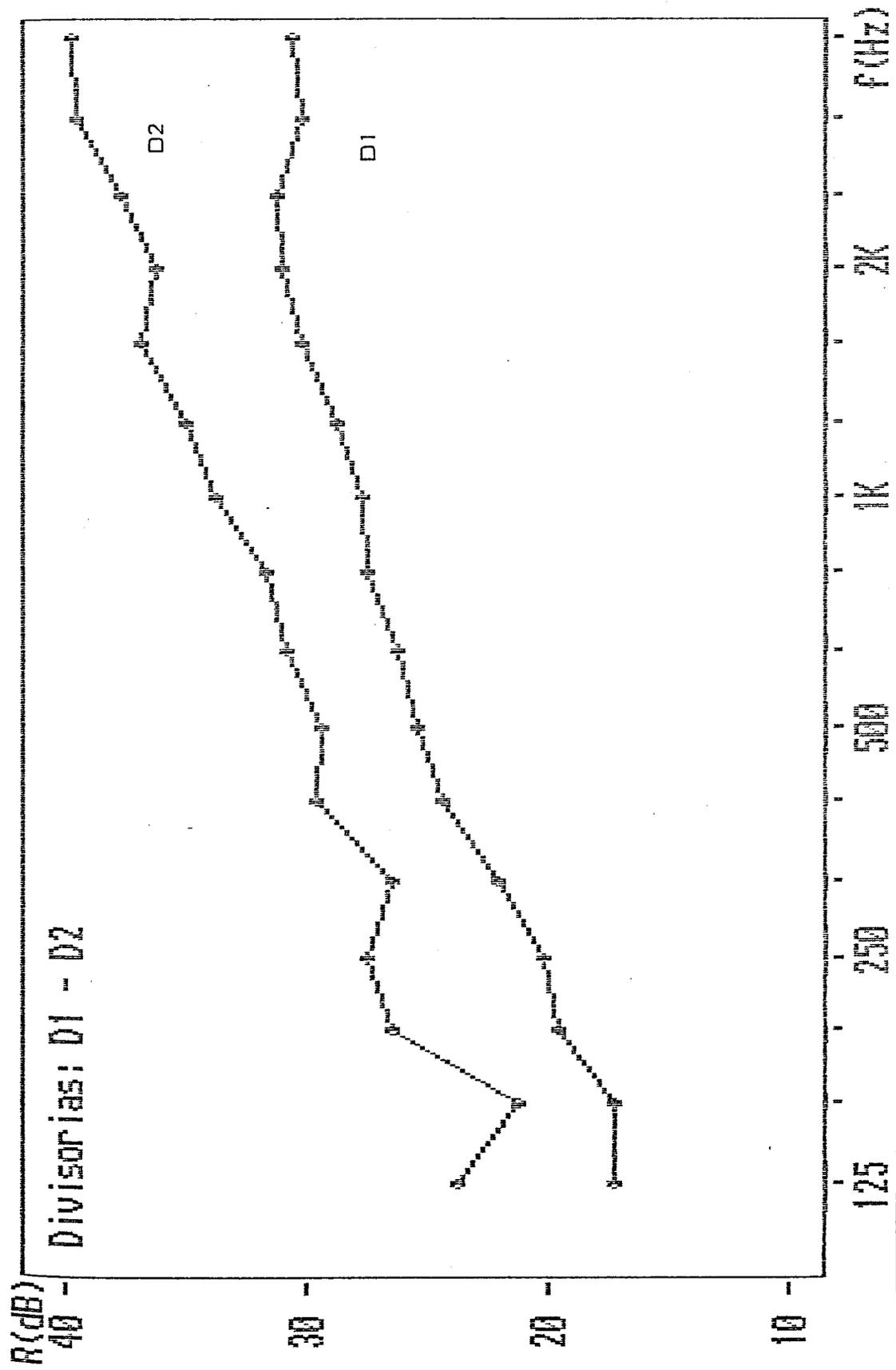


Fig. 87 - Diagrama comparativo dos Índices de Redução Sonora das divisorias D1 e D2.

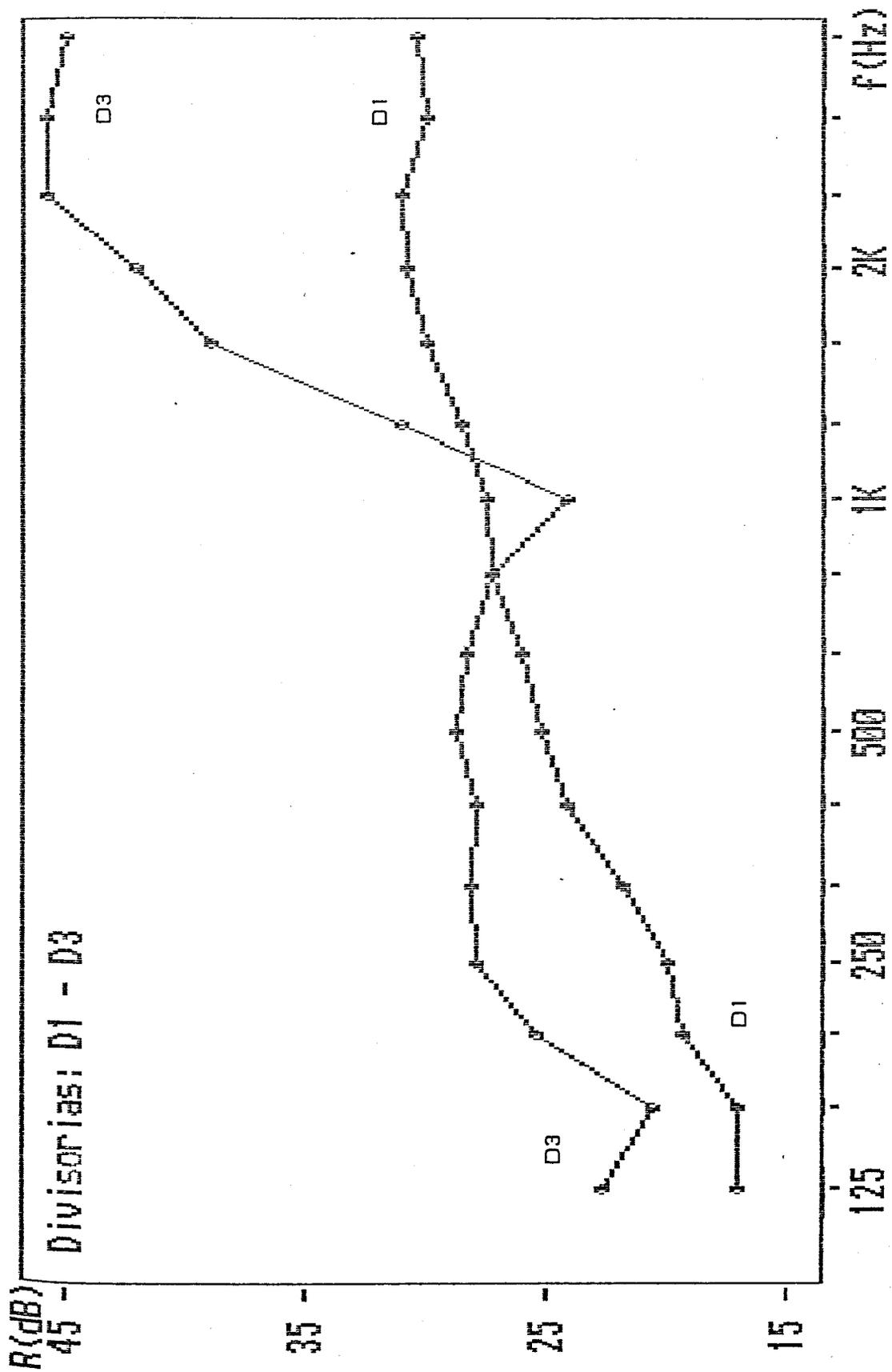


Fig. 88 - Diagrama comparativo dos Índices de Redução Sonora das divisórias D1 e D3.

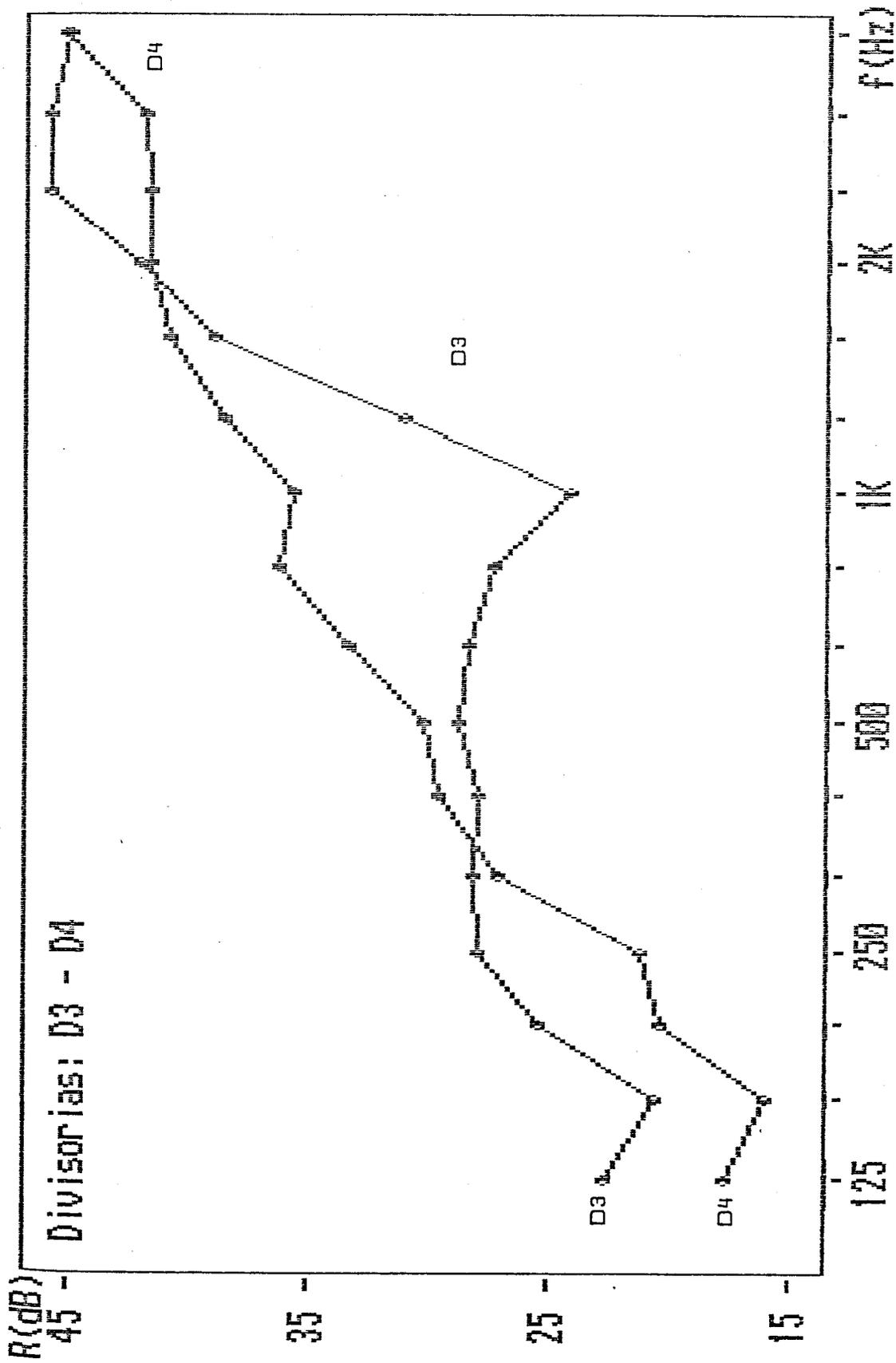


Fig. 89 - Diagrama comparativo dos índices de Redução Sonora das divisorias D3 e D4.

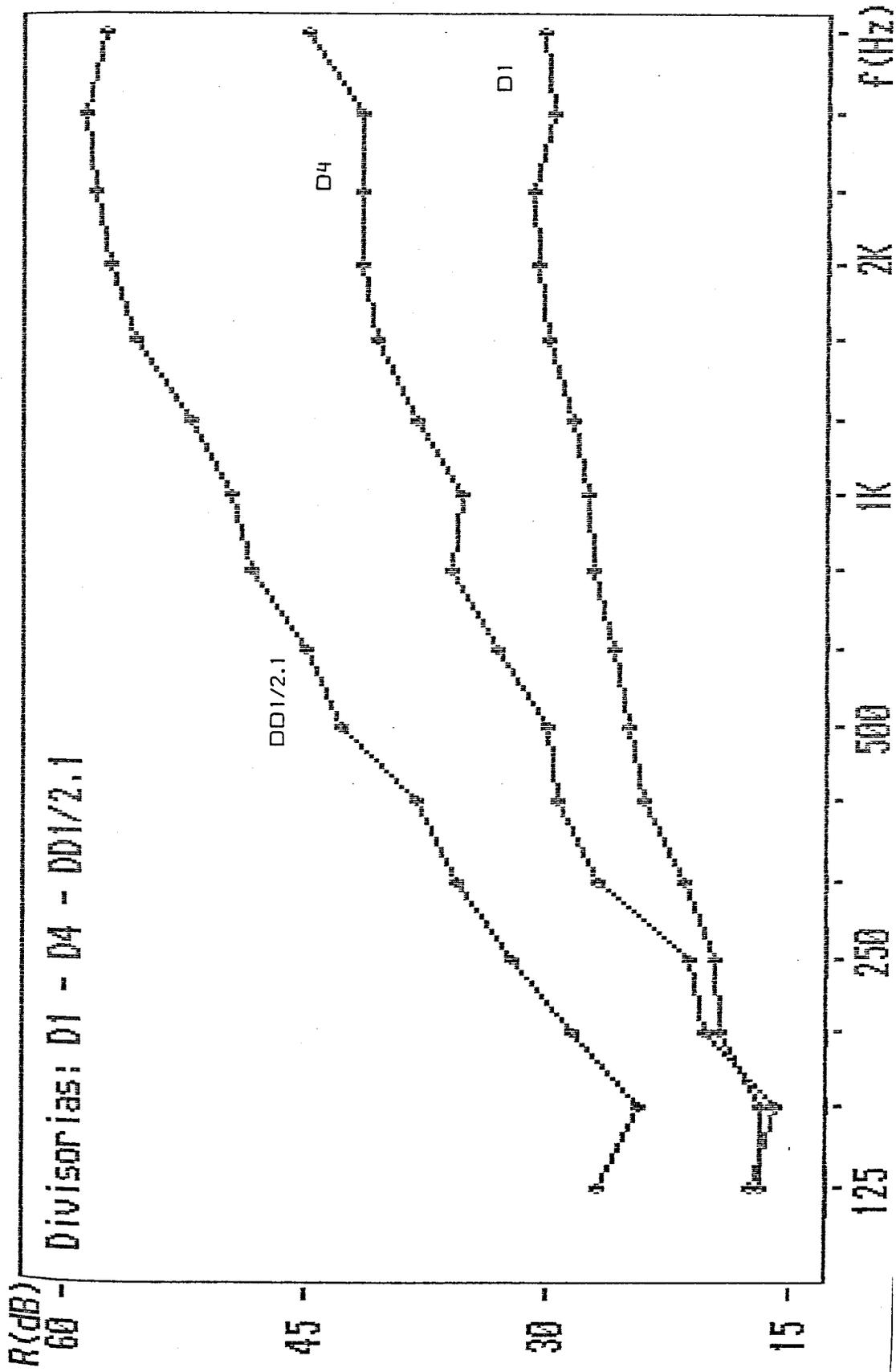


Fig. 90 - Diagrama comparativo dos Índices de Redução Sonora das divisorias D1, D4 e DD1/2.1.

DIVISORIA	I _a (dB)	I _{ae} (dB)	DELTA L dB(A)	DELTA L (BRANCO)	DELTA L (ROSA)	R min. (dB)	R max. (dB)
	1	2					
D1	28	24	23	26	23	17	31
D2	34	29	28	32	29	21	39
D3	32	27	25	30	27	21	45
D4	34	30	31	34	29	16	44
DD1/2.1	44	40	42	46	39	25	58
DD1/2.2	43	39	40	44	37	24	57
Tijolo 7	37	32	32	37	32	27	51
Tijolo 22	46	41	40	44	41	33	53

1 - calculado para área de absorção sonora equivalente de 10 m²

2 - calculado sem qualquer correção (valor fictício)

Fig. 91 - Quadro comparativo dos índices caracterizados - res do isolamento sonoro para as diversas paredes divisórias.

3 - CONCLUSÕES

3.1 - Comentários aos resultados dos ensaios

No número anterior e através de grande parte das Figuras 63 a 91, pudémos analisar os resultados obtidos nos ensaios às divisórias D1, D2, D3, D4 e DD1/2. Importa agora fazer alguns comentários aos valores então obtidos. Deter-nos-emos inicialmente numa breve análise individual a cada uma das divisórias referidas, para de seguida abordarmos comparativamente os resultados. No ponto 3.2 comentaremos a aplicação feita do modelo proposto no Capítulo II.4.11.

3.1.1 - Análise Individual

3.1.1.1 - Divisória D1

A divisória D1, com 26 mm de espessura total e núcleo de aglomerado de cortiça (Figura 61), apresenta uma variação do índice de redução sonora com a frequência, conforme mostrado na Figura 63. Com um declive aproximado de 3,5 dB/oitava, essa curva não apresenta sinuosidades profundas no domínio em estudo. Para nenhuma banda de frequências utilizada se verifica uma alteração significativa da evolução regular da curva com a frequência.

Com o índice de redução sonora a variar entre um valor mínimo de 17 dB e um máximo de 31 dB, a que corresponde um I_a de 28 dB, esta divisória amovível de pequena espessura, apresenta um comportamento francamente insatisfatório à transmissão sonora entre compartimentos para a generalidade dos casos.

Pela sua espessura muito pequena, este tipo de divisória só

poderá apresentar algum interesse para situações em que intervenha na duplicação de paredes com outros painéis.

3.1.1.2- Divisória D2

A divisória D2, com 26 mm de espessura total e núcleo de rubbercork (Figura 66), apresenta uma variação do índice de redução sonora com a frequência, conforme é visível na Figura 68. Com um declive aproximado de 3,5 dB/oitava, essa curva só apresenta ondulações significativas em baixas frequências.

Com o índice de redução sonora a variar entre um valor mínimo de 21 dB e um máximo de 39 dB, a que corresponde um I_a de 34 dB, esta divisória amovível de pequena espessura, apresenta um comportamento não satisfatório à transmissão sonora entre compartimentos para a generalidade dos casos.

Embora com um comportamento ao isolamento sonoro um pouco superior à divisória D1, esta divisória D2, também pela sua muito pequena espessura, só poderia apresentar algum interesse para a duplicação de paredes com outros painéis.

3.1.1.3 - Divisória D3

A divisória D3, com 60 mm de espessura total e núcleo de aglomerado de cortiça (Figura 71), apresenta uma variação do índice de redução sonora com a frequência conforme exposto na Figura 73.

A frequência crítica na banda dos 1000 Hz provoca um acentuado abaixamento do valor do índice de redução sonora para essa banda de frequências, dividindo todo o diagrama em duas zonas perfeitamente distintas. Entre os 250 Hz e os 630 Hz, uma zona de patamar nos 28 dB e após os 1000 Hz, um crescimento acentuado com um declive aproximado de 16 dB/oitava. O

diagrama termina igualmente com novo patamar, desta feita nos 45 dB.

A evolução deste diagrama afasta-se significativamente da apresentada pelos restantes, em especial pela frequência crítica situada numa zona intermédia do domínio de frequências estudado. Tal poderá ser devido à espessura do aglomerado de cortiça utilizada, implicar uma ressonância de todo o painel para frequências próximas dos 1000 Hz.

Com o índice de redução sonora a variar entre um valor mínimo de 21 dB e um máximo de 45 dB, a que corresponde um I_a de 32 dB, esta divisória apresenta um comportamento insatisfatório à transmissão sonora entre compartimentos na generalidade dos casos. É contudo de salientar um assinalável índice de redução sonora para bandas de frequências superiores a 1600 Hz. Nessa zona de altas frequências, foram obtidos índices de redução sonora superiores a 40 dB, representativos de um suficiente isolamento sonoro para algumas situações.

Por tudo o referido, este tipo de divisórias amovíveis só deverá ser utilizado para situações muito específicas em que o isolamento sonoro exigido não seja importante.

3.1.1.4 - Divisória D4

A divisória D4 (Figura 76), com 73 mm de espessura total e núcleo de aglomerado de cortiça e rubbercork (ISO 500), apresenta um comportamento do índice de redução sonora com a frequência, visível na Figura 78. Com um declive médio de aproximadamente 7 dB/oitava, esse diagrama não apresenta sinuosidades significativas no domínio em estudo. Verifica-se só uma pequena quebra para a banda de frequências centrada a 1250 Hz, como que um vestígio atenuado da cratera significativa existente a 1000 Hz na divisória D3.

Com o índice de redução sonora a variar entre um valor mínimo

de 16 dB e um máximo de 44 dB, a que corresponde um I_a de 34 dB, esta divisória amovível apresenta um comportamento global insuficiente no isolamento sonoro entre compartimentos. Salienta-se porém que, para bandas de frequências superiores a 1250 Hz, esta divisória regista índices de redução sonora superiores a 40 dB pelo que, para altas frequências, o isolamento sonoro é minimamente satisfatório.

Tal como a divisória D3, este tipo de divisória só poderá ter interesse para situações em que o isolamento sonoro requerido não seja fundamental no seu comportamento global.

3.1.1.5 - Divisória DD1/2

A divisória dupla DD1/2 (Figura 81), com 15,2 cm de espessura total e com caixa de ar de 10 cm de espessura, apresenta variações do índice de redução sonora com a frequência, representados na Figura 84. Com um declive aproximado de 8 dB/oitava, essas curvas (nos dois sentidos de emissão do som) não apresentam irregularidades notáveis no domínio de frequências em estudo. Excepto para a banda de frequências centrada a 160 Hz, onde uma ligeira quebra é visível, toda a restante zona dos diagramas se desenvolve linearmente.

Para o caso da divisória DD1/2.1, o índice de redução sonora variou entre valores extremos de 25 dB e 58 dB, a que correspondem um I_a de 44 dB.

Para o caso da divisória DD1/2.2, o índice de redução sonora apresentou valores entre um mínimo de 24 dB e um máximo de 57 dB, correspondentes a um I_a de 43 dB.

Tal como é mostrado na Figura 84, o comportamento apresentado pela divisória dupla, no primeiro caso de emissão do som (DD1/2.1-emissão do lado do painel D1), é superior aquele do apresentado pela emissão do som em sentido oposto (DD1/2.2). A diferença nos valores do índice de redução sonora para os

dois casos não é significativa e varia entre 0 dB e 4 dB, apresentando um valor médio de 1,5 dB.

Constata-se então que a divisória dupla DDL/2 apresenta um melhor comportamento no referente ao isolamento sonoro, quando colocada com a face constituída pelo painel D1 voltada para o compartimento emissor.

Perante o valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons aéreos (Ia), conclui-se que esta divisória dupla apresenta um bom isolamento sonoro na globalidade e, muito em especial, nas altas frequências, onde apresenta valores superiores a 55 dB para o índice de redução sonora.

A título informativo, compare-se o comportamento desta divisória DDL/2.1 com o apresentado pelas soluções tradicionais de alvenaria, tijolo de 7 cm com 1 cm de reboco em cada face e tijolo de 22 cm com 2 cm de reboco em cada face, também por nós testadas no desenrolar deste estudo e cujos resultados estão expressos no quadro da Figura 91.

A divisória DDL/2.1 denota um isolamento sonoro muito superior ao da parede divisória de tijolo de 7 cm, não se afastando muito do da parede de alvenaria de tijolo de 22 cm. Perante estes factos, afiguram-se-nos boas potencialidades no desenvolvimento futuro de uma parede divisória amovível com base numa constituição similar à ensaiada.

3.1.2 - Análise Comparativa

Na Figura 87 são apresentados conjuntamente os diagramas referentes às divisórias D1 e D2. Estas duas divisórias diferenciam-se unicamente quanto ao material constituinte do núcleo; na primeira, aglomerado de cortiça e na segunda, rubbercork (Figura 50). Assim, a Figura 87 dá-nos a possibilidade de verificar o efeito dessa alteração do material do núcleo, no comportamento face ao isolamento sonoro.

A divisória D2 apresenta valores para o índice de redução sonora entre 4 dB e 9 dB superiores aos apresentados pela divisória D1, com uma diferença média de 6 dB. Os valores para os índices de isolamento sonoro a sons aéreos (I_a e I_{ae}), são, da mesma forma, superiores para a divisória D2, respectivamente em 6 dB e 5 dB.

A divisória D2, além de apresentar uma massa total 30 % mais elevada (5 kg/m²) do que a da sua congénere D1, possui ainda um módulo de elasticidade do material do seu núcleo sete vezes superior ao da D1. Estes dois factores conjugados, produzem o efeito expresso na Figura 87, fazendo aumentar em média 6 dB o índice de redução sonora para a divisória D2.

Na Figura 88 estão representados conjuntamente os diagramas referentes às divisórias D1 e D3. Estas duas divisórias diferenciam-se unicamente pela espessura da camada constituinte do seu núcleo; de 6 mm para a primeira e de 40 mm para a segunda (Figura 50). Por este motivo, a Figura 88 permite apreciar o efeito dessa alteração da espessura do núcleo no comportamento face ao isolamento sonoro.

A divisória D3 apresenta valores para o índice de redução sonora de 0 dB a 15 dB superiores aos apresentados pela divisória D1, exceptuando o referente à banda de frequências centrada nos 1000 Hz onde D3 apresenta um valor para R de 3 dB inferior ao da divisória D1. Os valores para os índices de isolamento sonoro a sons aéreos (I_a e I_{ae}), são igualmente superiores para a divisória D3 respectivamente em 4 dB e 3 dB.

A divisória D3, além de apresentar uma espessura total (60 mm) 2,3 vezes superior à da divisória D1 (23 mm), possui ainda, por via deste facto, uma massa total 27 % (4 kg/m²) mais elevada. Estas duas características conjugadas, produzem o efeito expresso na Figura 88, fazendo aumentar 6 dB em média o índice de redução sonora para a divisória D3.

Na Figura 89 estão expressos conjuntamente os diagramas refe-

rentes às divisórias D3 e D4. Estas duas divisórias diferenciam-se (Figura 50) especialmente pela espessura do seu núcleo (de 40 mm para 53 mm) mas também pela existência na divisória D4, de uma muito fina lâmina de 3 mm de rubbercork (4 % da espessura total). Assim, a Figura 89 dá-nos a possibilidade de verificar o efeito dessa alteração de espessura e de constituição do núcleo no seu comportamento face à transmissão sonora.

A divisória D4 apresenta valores para o índice de redução sonora que, excepto para frequências médias, são de 0 dB a 5 dB inferiores às obtidas para a divisória D3. Nas frequências médias (400 Hz a 1600 Hz) a situação altera-se e é já a divisória D3 que mostra valores de 2 dB a 11 dB superiores aos do índice de redução sonora da divisória D4. Na globalidade, os índices de isolamento sonoro a sons aéreos, I_a e I_{ae} , apresentam valores respectivamente 2 dB e 3 dB mais elevados para a divisória D4.

A divisória D4, além de apresentar uma espessura total 13 mm mais elevada do que a divisória D3, possui igualmente uma massa total 20 % (4 kg/m²) superior. Estes factores, conjugados com a presença da lâmina de rubbercork no núcleo, produzem o efeito visível na Figura 89, fazendo aumentar cerca de 3 dB os índices de isolamento sonoro a sons aéreos.

Na Figura 90 são apresentados simultaneamente os diagramas referentes às divisórias D1, D4 e DD1/2.1 (Figuras 50 e 51). Pretende-se avaliar com este diagrama, o efeito do melhoramento sucessivo, conseguido no isolamento sonoro, por aumento da espessura e material do núcleo, de D1 para D4 e depois, pela constituição da divisória dupla (DD1/2.1).

Enquanto que pela passagem da divisória D1 para a divisória D4 os índices de isolamento sonoro a sons aéreos, I_a e I_{ae} , aumentam 6 dB, a mudança de D4 para DD1/2.1 faz subir de 10 dB os mesmos índices (Figura 91). Assim, entre os casos extremos da divisória simples D1 e o da divisória dupla DD1/2.1, os valores de I_a e I_{ae} aumentam significativamente

de 16 dB.

A existência de caixa de ar entre os dois painéis D1 e D2 justifica, quase totalmente, a melhoria significativa no isolamento sonoro apresentada. Conforme já referimos no número anterior, esta divisória DD1/2.1 comporta-se, face à transmissão sonora, de modo quase idêntico à parede de alvenaria de tijolo de 22 cm que, porém, apresenta uma massa superficial de 260 kg/m², face aos 36 kg/m² da divisória DD1/2.

Admitindo que esta divisória dupla poderá ainda ser otimizada na sua constituição, teria talvez algum interesse analisar a possível aplicação comercial de divisórias deste tipo. Essa análise não poderia descurar outros factores, igualmente significativos, como as características autoportantes, a resistência aos choques, o comportamento ao fogo, o aspecto, o isolamento térmico, etc.

No quadro da Figura 91 estão resumidos todos os valores significativos encontrados para os seis casos de divisórias tratados. Incluímos igualmente, a título meramente comparativo, os resultados obtidos dos ensaios a duas paredes de alvenaria (tijolo de 7 cm com 1 cm de reboco em cada face e tijolo de 22 cm com 2 cm de reboco em cada face) que empreendemos no L.N.E.C. no desenrolar do nosso estudo.

Nesse quadro, o valor mais significativo é o referente ao índice de isolamento sonoro aos sons aéreos (Ia), pois é a esse que se refere o "Regulamento Geral sobre o Ruído" (43) nos limites mínimos que impõe, conforme analisaremos no Capítulo V.1.

Esses valores variam desde um mínimo de 28 dB para a divisória D1 até a um valor máximo de 44 dB para a divisória DD1/2.1 (ou 46 dB se considerarmos a parede de tijolo de 22 cm). O intervalo de 16 dB entre os valores extremos denota uma significativa diferença no comportamento ao isolamento sonoro destas divisórias simples e dupla. Mesmo o diferencial

de 6 dB, entre as situações limite das divisórias simples (D1 e D4), nos indica que não é necessário alterar significativamente o tipo de divisória para se obterem melhorias assinaláveis no seu comportamento à transmissão do som. Uma correcta adequação das espessuras e do tipo de aglomerado de cortiça utilizados, poderá representar aumentos interessantes no valor do I_a respectivo.

A título meramente informativo e embora dependente do local, é de notar a quase igualdade entre o índice DELTA L (Rosa) e o índice de isolamento sonoro efectivo a sons aéreos, I_{ae} (fictício cf. III.3.2.1). Do mesmo modo, entre os valores obtidos dos índices I_a e I_{ae} (fictício) se verifica alguma correspondência. Os valores do índice I_a são 4 dB a 5 dB inferiores aos dos respectivos valores do I_{ae} .

A análise aos valores mínimos e máximos obtidos para o índice de redução sonora em cada divisória ensaiada e expressos igualmente no quadro da Figura 91, deve também ser feita. A diferença entre esses dois valores para cada divisória, varia entre os 14 dB (D1) e os 33 dB (DD1/2), significativo de comportamentos bastante diferentes e nomeadamente de declives diversos nos diagramas f/R.

Para as divisórias D1 e D2 a variação do valor do índice de redução sonora é pouco acentuada (14 dB ou 18 dB) e o respectivo declive do diagrama f/R é aproximadamente de 3,5 dB/oitava. No outro extremo, a divisória dupla (DD1/2) apresenta variações de R de 33 dB e um declive médio do seu diagrama de 8 dB/oitava.

A divisória dupla denota assim um comportamento à transmissão do som mais diversificado para as frequências baixas e altas: fraco isolamento sonoro nas baixas frequências e um bom isolamento sonoro nas altas frequências.

De forma contrária, as divisórias de pequena espessura D1 e D2 apresentam um fraco isolamento sonoro em todo o domínio de frequências em estudo.

As paredes de alvenaria de tijolo furado comportam-se de modo intermédio, tendo porém a parede de tijolo de 22 cm o valor mais elevado entre todos os R mínimos apresentados. É esta a única das paredes ensaiadas que se poderá considerar com um isolamento sonoro perfeitamente aceitável para o seu uso no interior dos edifícios, inclusive nas baixas frequências.

Das quatro divisórias amovíveis simples testadas (D1 a D4), retira-se a consideração que alguns factores intervêm favoravelmente no aumento do índice de redução sonora. São eles o módulo de elasticidade do material constituinte do núcleo e a massa total do painel. Igualmente o aumento do módulo de rigidez à flexão intervem positivamente na melhoria do isolamento sonoro nestas divisórias.

A espessura do núcleo deve contudo ser cautelosamente escolhida para evitar efeitos de ressonância, na gama de frequências com interesse, como o sucedido no caso da divisória D3 (Figura 73).

Concluindo refira-se que, excepto no caso da divisória D3, nenhuma das divisórias ensaiadas apresentou um efeito gravemente perturbador na redução do isolamento sonoro, pela presença de uma frequência crítica no domínio de frequências em estudo. Não fica pois invalidada a hipótese por nós sugerida, no Capítulo II.4.11, de ser possível representar por uma só expressão, o comportamento à transmissão do som em toda a gama de frequências de 125 Hz a 4000 Hz.

3.2 - Comentários à aplicação do modelo proposto

O modelo analítico sugerido e apresentado no Capítulo II.4.11 foi aplicado às quatro divisórias simples ensaiadas, conforme se apresenta graficamente nas Figuras 64, 69, 74 e 79.

Esse modelo partiu da possibilidade de ser utilizada, em

divisórias amovíveis do tipo das testadas neste estudo, uma só expressão para todo o domínio de frequências (125 Hz a 4000 Hz). Mediante o que referimos no número anterior, essa premissa não se afigura incoerente com os resultados obtidos, nem invalida a aplicação da modelação proposta.

Das quatro aplicações do nosso modelo às divisórias ensaiadas, só uma se poderá considerar um pouco desajustada aos resultados obtidos. Trata-se da divisória D3 onde, pelo diagrama da Figura 74, se poderá verificar que o ponto anguloso mínimo existente para a frequência crítica na banda centrada nos 1000 Hz, não torna muito aceitável o uso do modelo neste caso.

Para as divisórias D1, D2 e D3 os diagramas das Figuras 64, 69 e 79 mostram claramente a boa concordância entre os conjuntos de valores obtidos nos ensaios e por aplicação do modelo analítico proposto. De salientar mesmo a situação da divisória D2 onde o ajuste das duas curvas é excelente.

O elemento mais importante para a quantificação do ajuste do modelo proposto às situações testadas é o índice de isolamento sonoro a sons aéreos I_a , pois é ele que tem uma utilização mais generalizada para a caracterização do isolamento sonoro de paredes divisórias.

A obtenção do índice de isolamento sonoro a sons aéreos (I_a) através dos valores de R obtidos por aplicação do modelo, conduz a resultados muito próximos dos reais (obtidos pelos ensaios) conforme visível no quadro da Figura 92.

A diferença média entre os valores de I_a obtidos por ensaio e no modelo é de +1 dB, facto que consideramos positivo. Não fora o caso da divisória D1, onde essa diferença é de +3 dB, o ajuste seria francamente satisfatório.

Perante a análise ao quadro da Fig. 92 preconizamos a aplicação de uma faixa de valores (-1 dB, +1 dB) para a estimativa do valor de I_a através do modelo proposto.

DIVISÓRIA	Ia (dB)		Diferença (dB)
	ENSAIO	MODELO	
D1	28	31	+ 3
D2	34	33	- 1
D3	32	33	+ 1
D4	34	35	+ 1

Fig. 92 - Quadro comparativo dos índices de isolamento sonoro a sons aéreos, I_a , obtidos por ensaio e por aplicação do modelo.

Prefere-se a indicação de uma faixa de valores à de um único valor, para dar conta da dispersão normal de comportamentos, possível em divisórias do mesmo tipo, em consequência de factores diversos (condições de fixação, tipo de juntas, tipo de colagem, etc.).

Os valores limite para essa faixa pretendem incluir nela a quase totalidade das divisórias deste tipo, não tendo a pretensão de representar um domínio de validade de 100 %.

Outra análise, embora com menor interesse, é a referente aos valores dos índices de redução sonora obtidos. O desvio médio (em módulo) encontrado para as quatro divisórias, entre os resultados de R obtidos dos ensaios e do modelo, foi apenas de 2 dB.

Individualmente, os desvios médios entre os valores dos índices de redução sonora, obtidos por ensaio e pelo modelo, considerados em módulo, foram de:

Divisória D1 -	2,5 dB
Divisória D2 -	1,1 dB
Divisória D3 -	3,6 dB
Divisória D4 -	2,3 dB

O pequeno desvio médio encontrado entre os valores de R, obtidos pelas duas vias, (2 dB) é francamente aceitável face ao tipo de expressão utilizada nessa modelação (E32).

Na utilização do modelo proposto é somente necessário o conhecimento dos módulos de elasticidade e massas específicas dos materiais constituintes além de, naturalmente, as respectivas espessuras.

A diferença média de +1 dB encontrada para os valores dos índices de isolamento sonoro por aplicação do modelo poderá ser justificada através do efeito conjugado de diversos factores que passamos a enumerar muito brevemente, sem nos determos na análise de cada um deles em particular.

A expressão de que partimos para a modelação proposta não fazia intervir o efeito de tensões de corte entre as camadas constituintes dos painéis sanduíche. Fizémos, empiricamente, intervir esse efeito unicamente por uma pequena correcção da constante final da expressão E25. Aqui, com certeza, surgirá explicação parcial aos pequenos desvios encontrados.

Um factor muito importante a intervir igualmente é a imprecisão nos valores dos módulos de elasticidade dos materiais utilizados e dos aglomerados de cortiça em particular. Nestes, a determinação do módulo de Young do rubbercork apresenta alguns problemas devido à plastificação do material no processo da sua determinação.

Outros factores podem desajustar a aplicação do modelo sugerido, embora com menor importância que os anteriores. Dentre esses, podemos referir os dois seguintes:

Na aplicação da modelação proposta não foi considerada a

existência das duas finas lâminas de cartão que envolvem cada placa de gesso (cf. III 4.2.a). A reduzida espessura dessas lâminas e a sua boa ligação ao conjunto feita no próprio processo de fabrico das placas, justificaram esta nossa decisão.

De referir finalmente que as condições de fixação dos painéis às paredes da câmara reverberante podem igualmente interferir nos valores calculados.

Porém e apesar das inevitáveis pequenas imprecisões que o modelo proposto apresenta, reconhecemos nele bastantes potencialidades, nomeadamente a sua simplicidade e os seus resultados muito próximos da realidade para este tipo de divisórias amovíveis.

Um conjunto mais vasto de determinações e ensaios será contudo necessário para avaliar do ajuste deste modelo a outras situações de divisórias leves.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

1- ANÁLISE À LEGISLAÇÃO PORTUGUESA APLICÁVEL

A legislação portuguesa em vigor no campo da Acústica está, desde 1 de Janeiro de 1988, reunida num único texto: o "Regulamento Geral sobre o Ruído" (43). Este regulamento expressa, completa e actualiza de forma integrada, matéria até essa data, repartida em legislação diversa. É aí estabelecido um conjunto de normas em que se apoia um quadro legal a uma política de prevenção e combate ao ruído.

O referido diploma aplica-se a quase todas as áreas de intervenção da Acústica, tais como:

- Edifícios (sua implantação e compartimentação);
- Indústria, comércio e serviços;
- Equipamentos (e sua instalação);
- Espectáculos e diversões;
- Tráfego;
- Sinalização sonora;
- Actividades geradoras de ruído em geral (que possam causar incomodidade).

No domínio específico dos Edifícios, este Regulamento impõe condicionantes técnicas sob diversos aspectos, tais como

caracterizando os respectivos locais de implantação ou limitando os tempos de reverberação e os valores dos índices de isolamento sonoro I_a , I_p e R_{45} .

O estudo apresentado neste texto centra-se exclusivamente nas paredes divisórias interiores de edifícios, pelo que se abordará unicamente o articulado desta legislação aplicável a esse caso específico.

As disposições regulamentares no respeitante às paredes divisórias existentes no interior de edifícios, referem-se exclusivamente à limitação dos valores mínimos para o índice de isolamento sonoro para os sons de condução aérea (I_a).

O Regulamento estabelece valores limites diversos para o índice I_a , consoante as situações consideradas. Os valores fixados em regulamento são valores efectivos (44), portanto sem a afectação de qualquer correcção que vise normalizar a área de absorção sonora equivalente dos locais de recepção, no processo de transmissão estabelecido para efeito de ensaio.

Os valores determinados, *in situ*, estarão pois referidos à área de absorção sonora equivalente existente no local em questão e reflectem as características da envolvente encontrada (móvel, cortinados, alcatifa, etc.).

Em regra, os compartimentos mobilados de edifícios apresentam um tempo de reverberação de cerca de 0,5-0,6 s, a que corresponde uma área de absorção sonora equivalente que não se afasta significativamente dos 10 m². Assim, o índice de isolamento sonoro a sons aéreos (I_a) corrigido para $A = 10$ m², obtido nos ensaios desenvolvidos neste estudo, é o valor mais adequado para ser comparado com os limites impostos no articulado do Regulamento.

Em termos de exigências, são consideradas especificamente neste Regulamento diversas classes de Edifícios:

- Edifícios para Habitação;
- Edifícios Escolares
 - . destinados ao ensino de deficientes auditivos
 - . restantes casos;
- Edifícios Hospitalares ou similares;
- Edifícios para Indústria, Comércio e Serviços.

No quadro da Figura 93 estão expressos os valores mínimos do índice de isolamento sonoro para cada situação específica no domínio das paredes divisórias no interior dos edifícios.

ELEMENTOS INTERIORES	HABITAÇÃO			ESCOLAS		HOSPITAIS ou similares
	mesmo fogo (2)	entre fogos ou circul. comuns (3)	entre fogos e loc. públ. (4)	em geral (5)	defici- entes auditiv. (6)	
(1)				40		45 (7)
Ia \geq (dB)	40	48	55	45	40 50	50 (8) 55 (9)

Fig. 93 - Quadro comparativo dos valores mínimos do índice de Isolamento Sonoro a sons aéreos estipulados no Regulamento Geral sobre o Ruído e para os diversos tipos de edifícios.

Notas:

- (1) Embora no articulado do Regulamento apareça Ia deve-se entendê-lo como Iae (44);
- (2) Entre quartos e/ou zonas de estar do mesmo fogo;

- (3) Entre quartos e/ou zonas de estar de fogos diferentes do mesmo edifício ou entre aqueles e zonas comuns de circulação de um edifício ou onde estejam instalados equipamentos colectivos;
- (4) Entre fogos e locais onde se pretenda desenvolver actividades industriais, de comércio ou serviços ou ainda em relação a locais de espectáculos e divertimentos públicos;
- (5) Ver quadro da Figura 94;
- (6) Ver quadro da Figura 95;
- (7) Entre dependências destinadas a observação ou permanência de doentes;
- (8) Entre zonas comuns de circulação e compartimentos destinados a observação ou permanência de doentes;
- (9) Entre zonas de circulação e blocos operatórios, unidades de cuidados intensivos e blocos de partos ou seus anexos.

Tipo de compartimento	A	B	C
A	$I_a \geq 50$ dB	$I_a \geq 50$ dB	$I_a \geq 50$ dB
B	$I_a \geq 50$ dB	$I_a \geq 45$ dB	$I_a \geq 45$ dB
C	$I_a \geq 50$ dB	$I_a \geq 45$ dB	$I_a \geq 40$ dB

Notas

Compartimento tipo A — compartimentos pouco ruidosos, tais como gabinetes médicos, gabinetes de direcção e administração, bibliotecas, estúdios ou similares.

Compartimento tipo B — compartimentos ruidosos, tais como salas de aulas teóricas, salas de aulas práticas, laboratórios ou similares.

Compartimento tipo C — compartimentos muito ruidosos, tais como cozinhas, refeitórios, piscinas cobertas, salas de caldeiras, auditórios, salas de expediente, circulações.

Tipo de compartimento	I	II
I	$I_a \geq 50$ dB	$I_a \geq 50$ dB
II	$I_a \geq 50$ dB	$I_a \geq 40$ dB

Notas

Compartimento tipo I — compartimentos onde têm lugar actividades directamente ligadas ao ensino, tais como salas de aula, salas de musicoterapia, gabinete de terapia da fala.

Compartimento tipo II — compartimentos onde têm lugar actividades de apoio ao ensino, tais como salas de reuniões, escritórios, refeitórios, secretarias.

Fig. 94 -

Índice de isolamento sonoro para os sons por condução aérea (I_a) em edifícios escolares.

Fig. 95 -

Índice de isolamento sonoro para sons por condução aérea (I_a) em edifícios destinados ao ensino de deficientes auditivos.

A título informativo refira-se que, conforme o estipulado no art. 36º deste Regulamento, as infracções ao preceituado neste aspecto particular do I_a , constituem contra-ordenação punível com coima de 1500 a 3000 contos. Se o agente da infracção for uma pessoa colectiva, os limites mínimo e

máximo das coimas elevar-se-ão para o dobro. Em casos devidamente justificados, poderão as entidades responsáveis aplicar sanções acessórias.

Analisemos de seguida os resultados obtidos nos ensaios efectuados e expressos no quadro da Figura 91, com base no articulado do Regulamento Geral sobre o Ruído, resumido no quadro da Figura 93.

O menor dos limites mínimos para o valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos (Ia) é de 40 dB para divisórias entre compartimentos contíguos do mesmo fogo ou em algumas situações em edifícios escolares ou hospitalares.

De entre todas as divisórias amovíveis testadas, só a divisória dupla (DD1/2.1) cumpre o estipulado no Regulamento, apresentando as restantes afastamentos de 6 dB a 12 dB do valor mínimo requerido. Assim, só a parede divisória constituída de acordo com DD1/2.1 poderia ser utilizada satisfazendo os padrões mínimos legais de conforto acústico.

Saliente-se que, pelos valores por obtidos nos trabalhos inerentes a este estudo, nem mesmo a solução tradicionalmente usada em Portugal na compartimentação interior das habitações (tijolo de 7 cm com 2 cm de reboco), cumpre o valor mínimo de 40 dB para o índice de isolamento sonoro. Este valor só é ultrapassado com a parede de alvenaria de tijolo de 22 cm com 4 cm de reboco, solução extremamente pesada e absolutamente nada corrente entre nós na compartimentação interior.

Ressalve-se contudo que o valor obtido para o Ia das paredes de alvenaria de tijolo de 7 cm refere-se exclusivamente ao ensaio de uma parede, pelo que não pode ser considerado um valor "standard" para este tipo de divisórias. Se um número significativo de outras paredes, de idêntica constituição, fossem testadas, os valores a obter para o índice de isolamento sonoro a sons aéreos iriam ser necessariamente diversos.

Para este facto contribuiriam algumas características tais como a espessura dos septos dos tijolos constituintes, a espessura de reboco utilizada nas duas faces da parede, a espessura média de argamassa nas juntas entre tijolos, etc.

Com os poucos elementos de que dispomos, somos porém levados a comentar que o articulado do Regulamento, no referente a este ponto específico da sua utilização, necessitaria de ser reanalisado sob o prisma das suas implicações económicas no mercado habitacional português.

Pelos valores obtidos, a solução de parede divisória dupla DD1/2.1 supera largamente o isolamento sonoro da sua "concorrente" de tijolo de 7 cm (com uma pequena excepção para frequências inferiores ou iguais a 200 Hz cf. Figura 96). A isto acresce ainda a supremacia de possuir uma massa superficial cerca de quatro vezes inferior.

Os caminhos estão pois abertos para a gradual substituição da parede divisória pesada, de alvenaria, por outras mais leves, mais versáteis, em suma, economicamente mais vantajosas.

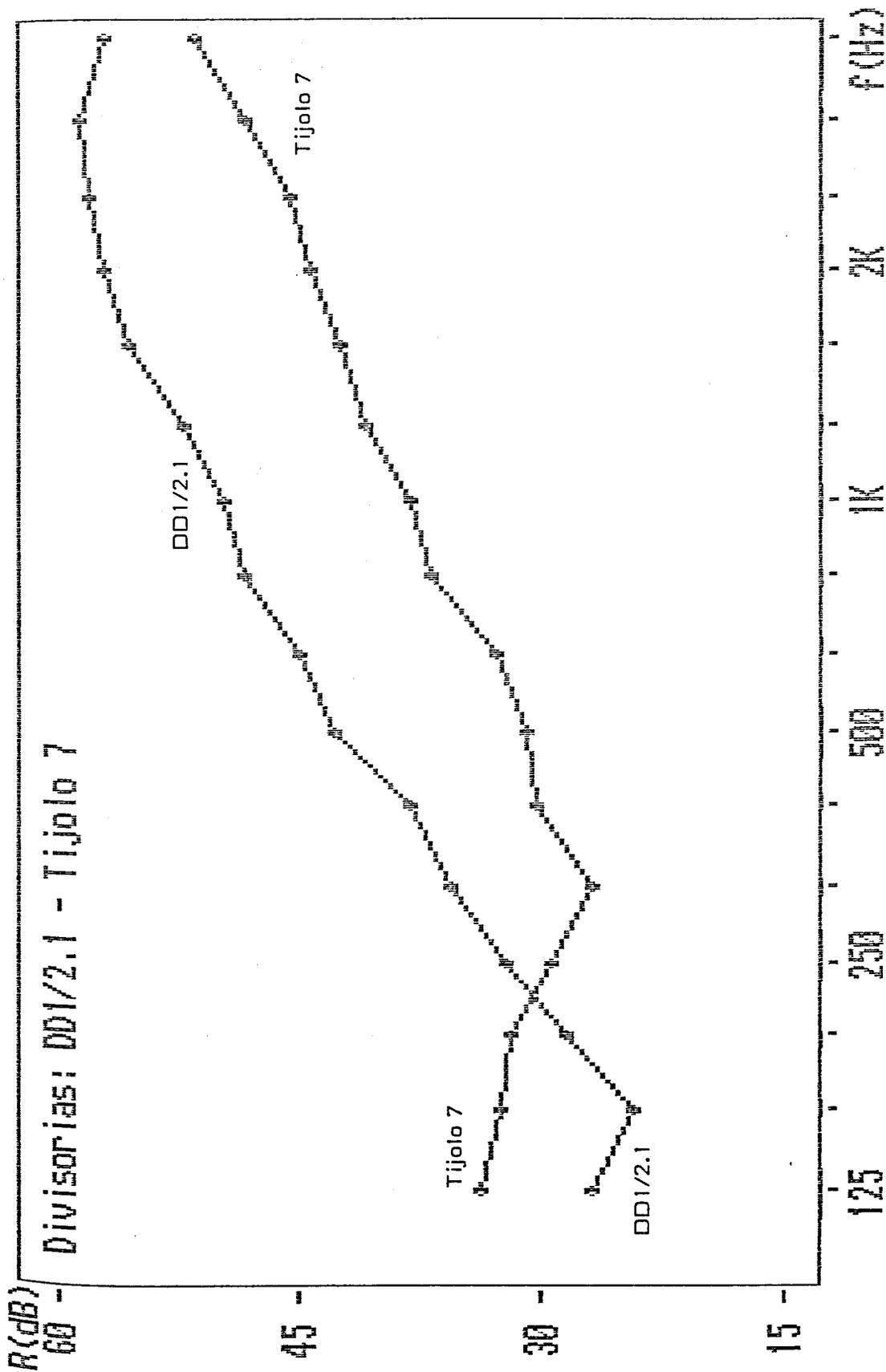


Fig. 96 - Diagrama comparativo entre os Índices de Redução Sonora obtidos para a divisória DD1/2.1 e para a divisória de alvenaria de tijolo de 7 cm com 1 cm de reboco em cada face.

2 - PISTAS PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO

2.1 - Desenvolvimento deste estudo

Sem ter a pretensão de efectuar uma enumeração exaustiva dos estudos possíveis neste domínio, abordam-se contudo algumas pistas para o desenvolvimento futuro deste trabalho.

Uma das vias será o da optimização deste tipo de paredes divisórias sanduíche constituídas por aglomerado de cortiça e gesso cartonado.

Em qualquer optimização, o primeiro passo é fixar o factor, parâmetro ou função a extremar. O objectivo desse estudo será o aumentar o isolamento sonoro dos painéis sanduíche. A principal medida do comportamento do painel à transmissão do som é o índice de redução sonora que, contudo, varia fortemente com a frequência. Este índice pode ser eficazmente transformado num parâmetro único facilmente utilizável: o índice de isolamento sonoro a sons aéreos. Assim, deverá ser de considerar como função a maximizar, o valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos, I_a .

Em geral, as técnicas de optimização podem ser divididas em dois grupos: Métodos Directos e Métodos Indirectos (45). Os métodos indirectos fazem uso de algumas propriedades da função objectivo para obter um óptimo, enquanto os métodos directos começam num ponto do domínio de dimensionamento e progridem passo a passo para o valor óptimo por sucessivos melhoramentos.

A aplicação desta técnicas de optimização às divisórias amovíveis tipo sanduíche será uma via interessante de desenvolvimento.

Atendendo aos resultados obtidos ao longo deste trabalho

podem-se já sugerir algumas pistas concretas de evolução deste estudo:

- As divisórias D1 e D3 apresentam diagramas f/R com declives de cerca de 3,5 dB/oitava enquanto a divisória D4 apresenta um diagrama com declive aproximado de 7 dB/oitava. Interessa compreender e dominar este aumento significativo de declive para o tentar generalizar a um maior número de divisórias deste tipo;
- A divisória D3 apresenta um diagrama f/R com uma acentuada inflexão para uma frequência crítica a 1000 Hz (Figura 73) e, a partir daí, a curva cresce com um declive de cerca de 16 dB/oitava. Interessa deslocar o valor dessa frequência crítica para frequências mais baixas para assim permitir que o diagrama apresente esse elevado declive em grande parte do domínio de frequências em estudo;
- A divisória dupla DD1/2.1, embora com uma massa superficial quatro vezes inferior à solução de parede de alvenaria de tijolo de 7 cm, apresenta um isolamento sonoro superior (Figura 96). Assim, deverá ser encarada a possibilidade de otimizar esta divisória tornando-a economicamente viável para a compartimentação interior de edifícios;
- As características com maior incidência na optimização do isolamento sonoro deste tipo de divisórias amovíveis simples são o módulo de elasticidade e a espessura do material constituinte do núcleo. A primeira pela flexibilidade que concede a todo o painel e a segunda pelo efeito de aumento da massa total (menos significativa para estas paredes leves). Interessa fixar regras seguras para a sua influência no comportamento global do painel sanduíche;
- Será de promover a realização de maior número de ensaios e a outras paredes divisórias com vista a avaliar do ajuste do modelo proposto a outros tipos de divisórias amovíveis tipo sanduíche. Igualmente será de analisar e concretizar o efeito no isolamento sonoro, das variantes de fixação dos painéis e

do fechamento das juntas de ligação;

2.2 - Desenvolvimento do tema

A finalizar sugerem-se três linhas de acção para investigação futura, que de imediato se consideram com maior interesse nesta área:

- Um levantamento exaustivo dos casos de paredes divisórias na prática construtiva portuguesa. Afigura-se com interesse a realização de uma amostragem representativa envolvendo edifícios para habitação, hospitalares, escolares e de serviços, característicos dos diversos sistemas construtivos mais utilizados. O objectivo será o de efectuar um diagnóstico da situação actual, no que respeita ao isolamento sonoro à transmissão de sons aéreos entre compartimentos contíguos. As conclusões extraídas desta amostragem permitiriam, em certa medida, ajuizar do interesse prático de que se reveste, entre nós a concretização das propostas de estudo aqui apresentadas;

- A criação de um método, expedito e facilmente acessível, de caracterização das situações de uso das paredes divisórias, quanto ao isolamento sonoro e onde sejam intervenientes os factores mais significativos, como inclusive o tipo de ligações utilizadas e o efeito das transmissões marginais;

- A elaboração de um Manual ou Guia de soluções construtivas a adoptar, adaptadas à realidade portuguesa e à legislação em vigor e para os diversos tipos de edifícios (habitacionais, hospitalares, escolares, comerciais e de serviços, etc.). Esse guia deverá dar particular destaque à análise económica de cada uma das hipóteses consideradas, não descurando, nessa análise, as necessidades de conservação ou reabilitação periódica inerentes a algumas dessas soluções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - NORMA PORTUGUESA NP-669/1974
Acústica - Ensaio de transmissão dos ruídos aéreos e de percussão
Portaria nº 367/74 de 1974.06.19
Lisboa
- (2) - NORMA PORTUGUESA NP-2073/1983
Acústica - Critério de quantificação do isolamento sonoro em edifícios
Portaria nº 456/83 de 1983.04.19
Lisboa
- (3) - CREMER, LOTHAR
Theorie der Schalldämmung Dunner Wände bei Schrägen Einfall
Akustische Zeitschrift, nº 7 (81)
1942
- (4) - LONDON, ALBERT
Transmission of reverberant sound through single walls
Journal of Research of the National Bureau of Standards
Vol. 42 (605-615)
1949
- (5) - LONDON, ALBERT
Transmission of reverberant sound through double walls
Journal of The Acoustical Society of America
Vol. 22, nº2 (270-279)
1950
- (6) - VOGEL M.
Sur les vibrations de certains systèmes élastiques dans un champ sonore
Thèse, Marseille
1947

- (7) - SPRONCK F.
Transparence au son des parois minces viscoélastiques finies
et infinies, simples ou multiples
Thèse, Marseille
1971
- (8) - MARTINS DA SILVA, PEDRO
Estudo Acústico de Divisórias Amovíveis. Modelação Matemática
(divisórias homogêneas)
Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Procª 87/11/8455)
1985
- (9) - FAHY, FRANK
Sound and Structural Vibration, Radiation, Transmission and
Response
Academic Press
1985
- (10) - GUYADER, J. L. e LESUEUR, C.
Transmission of Reverberant sound Through Orthotropic, Vis-
coelastic Multilayered Plates
Journal of Sound and Vibration, Vol 70, nº 3 (319-332)
1980
- (11) - HICKMANN, J. S.; RISTY, D. E. e STEWART, E. S.
Properties of sandwich-type structures as acoustic windows
Journal of Acoustical Society of America
Vol. 29, nº7 (858-864)
1957
- (12) - KURTZE, G. e WATTERS, B. G.
New wall design for High Transmission Loss or High Damping
Journal of Acoustical Society of America
Vol. 31 nº6 (739-748)
1959

(13) - ROSS, D. ; UNGARD, E. E. e KERWIW, E. M.
Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic
Laminae
Structural Damping, Sec.III - ASME (New York)
1959

(14) - FORD, R. D. ; LORD, P. e WALKER, A. W.
Sound Transmission Through Sandwich Constructions
Journal of Sound and Vibration, Vol.5 nº1 (9-21)
1966

(15) - SMOLENSKI, C. P. e KROKOSKY, E. M.
Dilatational-Mode Sound Transmission in Sandwich Panels
76 th Meeting of Acoustical Society of America
1968

(16) - SHARP B. H. S. e BEAUCHAMP J. W.
The Transmission Loss of Multilayer Structures
Journal of Sound and Vibration, Vol. 9, nº 3 (383-392)
1969

(17) - HOLMER, C. I.
The coincidence wall, a new design for High Transmission Loss
or High Structural Damping
77 th Meeting of the Acoustical Society of America, sec. K4
1969

(18) - MEIER, A. VON
Transmission Loss of Homogeneous and sandwich plates in the
coincidence range
Acustica, Vol. 22, nº3 (125-136)
1969/1970

(19) - MANING, J.
Development of the Coincidence wall as a high TL Panel
Cambridge Collaborative Report nº1
1971

(20) - VAL, MARCEL

Cloisons légères à haut pouvoir isolant

Revue d'Acoustique n° 24 (77-84)

1973

(21) - DYM, C. L. e LANG M. A.

Transmission of Sound through sandwich panels

Journal of the Acoustical Society of America

Vol. 56, n°5 (1523-1532)

1974

(22) - LANG M. A. e DYM, C. L.

Optimal acoustic design of sandwich panels

Journal of the Acoustical Society of America

Vol. 57 n°6 (1481-1487)

1975

(23) - DYM, C. L. ; VENTRES C. S. e LANG, M. A.

Transmission of sound through sandwich panels: A reconsideration

Journal of the Acoustical Society of America

Vol.59 n°2 (364-367)

1976

(24) - MOORE, JAMES

Sound Transmission Loss Characteristics of three layer Composite Wall Construction

M.I.T. Thesis

1975

(25) - GUYADER, JEAN-LOUIS

Transparence acoustique de plaques multicouches, orthotropes, viscoelastiques, finies

Université Claude Bernard -Lyon I - thèse

1977

(26) - GUYADER, J. L. e LESUEUR C.

Mecanismes et calcul de l'attenuation acoustique des plaques anisotropes finies

ler Congrès Européen d'Acoustique - F.A.S.E. 75 (249-256)

PARIS - 1975

(27) - ORDUBADI A. , LYON R. H.

Effect of orthotropic face sheets on sound transmission through multilayer wall panels

M.I.T. rapport

1977

(28) - ORDUBADI A. , LYON R. H.

The Design of multi-layered sandwich walls with orthotropic face sheets

International Symposium on Acoustic Insulation of Light Weight Partitions used in Transport Means (14.1-14.9)

Heverlee (BELGIUM)

1979

(29) - ORDUBADI A. , LYON R. H.

Effect of orthotropy on the sound transmission through plywood panels

Journal of the Acoustical Society of America

Vol. 65 n°1 (133-139)

1979

(30) - CREMER, L. ; HECKL, M. e UNGAR, E. E.

Structure-Borne Sound

Springer-Verlag

1973

(31) - RUDDER, FRED F.

Airborne Sound Transmission Loss Characteristics of Wood-Frame Construction

United States Department of Agriculture - Forest Service

General Technical Report FPL-43

1985

(32) - MEIER, A. VON

Effect of Damping Layers on the Airborne Sound Insulation of Plates

International Symposium on Acoustic Insulation of Light Weight Partitions used in Transport Means (4.1-4.10)

Heverlee (BELGIUM)

1979

(33) - SMOLENSKI, C. P. e KROKOSKY E. M.

Dilational-mode sound transmission in sandwich panels

The Journal of the Acoustical Society of America

Vol.54, nº 6 (1449 - 1457)

1973

(34) - NORMAS PORTUGUESAS NP-3225/1, 3225/2, 3225/3 e 3225/4

Acústica. Vocabulário

Parte 1: Definições Gerais; Parte 2: Propagação do som; Parte 3: Audição; Parte 4: Vibrações

Diário da República III série, nº72 de 1986-03-27

LISBOA

(35) - SUN, C. T. e WHITNEY, J. M.

On theories for the dynamic response of laminated plates

American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal

Vol.11, nº2 (178 - 183)

1973

(36) - MAIDANIK, GIDEON

Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields

Journal of the Acoustic Society of America

Vol. 34, nº6 (809-826)

1962

(37) - CARVALHO, ANTÓNIO PEDRO O.

Acústica - Programas de análise em micro-computador

Relatório nº 267/87 - Laboratório Nacional de Engenharia

Civil (Lisboa)

1987

- (38) - SALTA, A. LEMOS
Contribuição para o estudo dos processos de transmissão sonora em edifícios
Tese - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Lisboa)
1986
- (39) - MARTINS DA SILVA, PEDRO
Acústica de Edifícios
Informação Técnica, Edifícios nº8 - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Lisboa)
1978
- (40) - DAVIS, BELFIELD e EVEREST
Spon's International Constructions Costs Handbook
E. & F. N. Spon
1988
- (41) - ASSOC. INDUST. CONSTR. CIVIL E OBRAS PÚBLICAS DO NORTE
CEE: A Construção do grande mercado
Revista CONCRETO, nº99 Março/Abril 1988 (5-9)
1988
- (42) - EPYSA, ESPAÑOLA DE PLACAS DE YESO, S.A.
Pladur - Manual básico
1986
- (43) - REGULAMENTO GERAL SOBRE O RUÍDO
Decreto-Lei nº 251/87 de 24 de Junho
Ministério do Plano e da Administração do Território - Lisboa
1987
- (44) - MARTINS DA SILVA, PEDRO
Guião para aplicação do Regulamento sobre Ruído
Direcção-Geral da Qualidade do Ambiente - Lisboa
1987

- (45) - FOX, R. L.
Optimization Methods for Engineering Design
Addison-Wesley, Reading, Massachusetts - U.S.A.
1971
- (46) - MEISSER, MATHIAS
Acustica de los Edifícios
Editores Técnicos Asociados, s.a. - Barcelona
1973
- (47) - BOHINEUST, XAVIER
Traitement des bruits d'impact. Principes et solutions pratiques
Mémento C.A.T.E.D. n° 35 - Paris
1985
- (48) - BEHAR, ALBERTO
El ruido y su control
Arbó S.A.C.I. - Buenos Aires
1977
- (49) - PUJOLLE, JEAN
La pratique de l'isolation acoustique des bâtiments
Editions du Moniteur - Paris
1978
- (50) - SANTOS, RIBEIRO DOS
Introdução à Acústica das Construções
Gabinete de Construções Civis da F.E.U.P.
1983
- (51) - DOCUMENT TECHNIQUE UNIFIÉ - D.T.U. n° 25.31
Ouvrages verticaux de plâterie
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Livraison 260,
Cahier 2004 - Paris
1985

(52) - FERREIRA, V. e FARINHA, B.

Tabelas Técnicas para Engenharia Civil

Técnica - Associação dos Estudantes do Instituto Superior
Técnico Lisboa

1977

APÊNDICE I

QUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS

QUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS MATERIAIS UTILIZADOS NA
CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS (*)

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA kg/m ³	MÓDULO DE ELASTICIDADE x 10 ⁸ kg/m ²
ASFALTO	1800-2300	8-21
ARGAMASSA DE CIMENTO	2000-2200	15-20
BETÃO:		
.leve	600-1300	2-3,9
.pesado	2000-2400	27-29
BORRACHA	1000-1500	0,006-0,34
CORTIÇA		
.aglomer. expandidos	100-250	0,0016-0,26
.aglomer. c/ borracha	800-900	0,011
FIBROCIMENTO	1400-2200	14-29
GESSO CARTONADO	800	7,14
MADEIRAS:		
.abeto	400-700	1-5
.carvalho	700-1000	2-10
.castanho	550-700	11
.choupo	400-580	7,5
.contraplacadado	350-550	5,5
.faia	660-800	16
.freixo	650-880	15
.nogueira	600-750	14
.pinho	500-700	1-10
METAIS:		
.aço	7780	210
.alumínio	2700	71-73
.chumbo	11300	17-20
.cobre	8900	130
.zinco	7130	13
PEDRAS:		
.ardósia	2500-2800	120
.basalto	2700-3300	110
.calcário	1800-2700	70
.granito	2400-2800	50
.mármore	2600-2800	55
PLÁSTICOS:		
.em geral	30-1500	1,2-10
.poliestireno		
-expandido	15-30	0,0027
-extrudido	25-35	0,1-0,3
TIJOLO (Maciço)	1800-2100	3,1-16,3
VIDRO	2500-2700	61-70

(*) Valores retirados fundamentalmente de (30), (49), (52) e tabelas de fabricantes.

APÊNDICE II

PROGRAMAS DE ANÁLISE ACÚSTICA PARA MICRO-COMPUTADOR

1 - INTRODUÇÃO

No Núcleo de Acústica e Iluminação (N.A.I.) do L.N.E.C., é frequente o tratamento de um grande número de dados por via analítica e manual.

Perante a morosidade de todos esses processos e no decorrer dos trabalhos conducentes a esta dissertação, desenvolveu o autor um conjunto de ferramentas informáticas para apoio aos ensaios de acústica desse Laboratório.

Assim e ao abrigo do Convénio existente entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e o L.N.E.C. e integrado nos trabalhos desta Tese de Mestrado, foram idealizados dois programas de tratamento integrado de dados de ensaios e quatro outros programas de temas específicos.

Todos estes programas foram concebidos para utilização em micro-computador (com ou sem impressora) e neles foi utilizada a linguagem BASIC.

Neste apêndice descrevem-se esses programas e incluem-se exemplos das respectivas Folhas de Dados e saídas gráficas bem como são fornecidas as listagens correspondentes.

2 - DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS

2.1 - Análise geral

Os seis programas realizados e abordados neste texto, pretendem ser a base inicial de um "software" de acústica a engran-

decer brevemente.

São eles: FRIA, PERCUTE, IA, IP, LDBA e MULTIGRA.

Os dois primeiros constituem o núcleo fundamental de todo o referido "software". Neles são tratados e analisados todos os dados obtidos em dois tipos de ensaios diferentes efectuados nas câmaras reverberantes do L.N.E.C. com vista a obter uma folha de saída de resultados com todos os elementos caracterizadores do ensaio referido.

Os quatro últimos programas pretendem ser uma ferramenta informática de utilização frequente para a resolução de pequenos cálculos quotidianamente necessários em diversas situações na Acústica de Edifícios.

2.2 - Análise individual

2.2.1 - Programa FRIA

Este programa trata os resultados de cada ensaio acústico de Paredes Divisórias realizado na dupla câmara reverberante do L.N.E.C..

O próprio título teve origem nos elementos base desse programa:

- f - frequência
- R - índice de Redução sonora
- Ia - índice de isolamento sonoro a sons aéreos

Para cada ensaio é utilizada uma folha de dados (Figura 97) onde são assinalados pelo experimentador, todos os valores obtidos por leitura directa dos equipamentos.

O ensaio que decorre de acordo com o exposto na Norma Portuguesa NP-669 (1), dá origem a grande número de valores de níveis de pressão sonora e de tempos de reverberação que serão posteriormente fornecidos ao computador para tratamento pelo programa FRIA.

Este programa fornece os seguintes elementos (Figura 99):

- Características definidoras da divisória em estudo
 - . Referência
 - . Características físicas (materiais e constituintes)
 - . Espessuras parciais das camadas componentes
 - . Espessura total

- Para cada uma das 16 bandas de frequências
 - . A diferença de nível sonoro entre compartimentos emissor e receptor (D)
 - . O índice de redução sonora (R)
 - . O tempo de reverberação da câmara receptora (T)

- 5 grandezas
 - . I_a , índice de isolamento sonoro a sons aéreos, obtido de acordo com a técnica descrita na Norma Portuguesa NP-2073 (2)
 - . I_{ae} , índice efectivo de isolamento sonoro a sons aéreos, determinado com base na diferença de nível de pressão sonora entre compartimentos emissor e receptor e segundo a técnica descrita na Norma Portuguesa NP-2073 (2)
 - . DELTA L, Diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas câmaras emissora e receptora expressa em dB(A)
 - . DELTA L (BRANCO), Diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas câmaras emissora e receptora expressa em dB(A), considerando o ruído emitido como branco
 - . DELTA L (ROSA), Diferença dos níveis sonoros dos ruídos nas câmaras emissora e receptora expressa em dB(A), considerando o ruído emitido como rosa
 - . Legenda
 - . Data de impressão dos resultados

São ainda disponíveis outras saídas gráficas, nomeadamente:

- Listagem dos dados (Figura 100)
Descrição dos resultados obtidos no ensaio e níveis sonoros, em dB(A), nas câmaras emissora e receptora;
- Gráfico (Figuras 101 e 102)
A visualização, num sistema de eixos $f(\text{Hz})/R(\text{dB})$, da distribuição no domínio de frequências dos valores dos índices de redução sonora obtidos. Esta representação gráfica dispõe de alternativas de escolha quer no referente ao tamanho do ponto no gráfico quer pela escala dinâmica para as ordenadas, conforme se poderá analisar nos exemplos nos números seguintes.

Em virtude da recente entrada em funcionamento no N.A.I.-L.N.E.C. de um novo Sonómetro "Brüel & Kjaer" modelo 2231 que permite uma assinalável simplificação da intervenção humana, está já concluído o programa FRIANOVO que adapta a essas novas condições de trabalho o programa anteriormente analisado.

2.2.2 - Programa PERCUTE

Este programa refere-se a ensaios efectuados para caracterização da eficiência de revestimentos de piso no que respeita à atenuação da transmissão de ruídos de percussão.

Os ensaios são conduzidos de acordo com a técnica referida na Norma Portuguesa NP-669 (1) e os resultados obtidos, por leitura directa nos equipamentos de medição acústica, são anotados pelo experimentador na folha de dados respectiva (Figura 98).

Aí são assinalados para as três posições do microfone e da máquina de impactos, os níveis de pressão sonora e os tempos de reverberação obtidos.

O programa está concebido para poder ser utilizado caso o ensaio tenha sido levado a cabo com uma só câmara reverberante em uso (volume igual a 115 m³) ou com as duas câmaras reverberantes (volume igual a 230 m³) isto é, sem a existência física da separação entre elas.

Os resultados são expressos numa folha de saída de resultados (Figura 103) onde estão expressas as grandezas calculadas além da necessária caracterização da laje, com e sem revestimento.

São assim fornecidos:

- Características definidoras dos elementos em estudo;
- Níveis de pressão sonora corrigidos, para a laje não revestida e revestida, para as 16 bandas de frequência de terços de oitava utilizadas (de valores centrais compreendidos entre 125 Hz e 4000 Hz), bem como as suas diferenças para cada caso;
- Valores médios para sons graves (125 Hz a 315 Hz), sons médios (400 Hz a 1250 Hz) e sons agudos (1600 Hz a 4000 Hz), dos níveis de pressão sonora corrigidos para a laje não revestida e revestida, bem como a sua diferença para cada caso;
- I_p , Índice de isolamento sonoro a sons de percussão, obtido segundo a técnica descrita na Norma Portuguesa NP-2073 (2), para a laje não revestida e revestida;
- INDICE DELTA P, Diferença entre os índices de isolamento sonoro a sons de percussão (I_p) das lajes não revestida e revestida;
- INDICE ALFA, Índice de utilização preconizada pelo Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) e definido como o menor dos três seguintes valores: $19 + \text{DELTA G}$, $12 + \text{DELTA M}$ e DELTA A (DELTA G , M e A são as diferenças das médias obtidas para os sons graves, médios e agudos entre a laje não revestida e revestida);
- DELTA LA, Valor em dB(A) da diferença de níveis sonoros corrigidos entre a laje não revestida e revestida;

- Legenda.

São ainda disponíveis outras saídas gráficas, nomeadamente:

- Listagem dos dados (Figura 104)

Descrição dos resultados obtidos no ensaio com a legenda respectiva;

- Gráfico (Figura 105)

Visualização, num sistema de eixos $f(\text{Hz})/\text{DL}(\text{dB})$, da distribuição no domínio de frequências dos valores das diferenças de nível sonoro corrigido entre a laje não revestida e revestida.

Esta representação gráfica dispõe de alternativas de escolha quer no referente ao tamanho do ponto no gráfico, quer nos limites da escala das ordenadas.

Notar que o gráfico com o espectro dos dois ruídos provocados com a laje não revestida e revestida, pode ser obtido com a utilização do Programa MULTIGRA, igualmente descrito neste texto.

2.2.3 - Programa IA

Este programa permite obter o índice de Isolamento sonoro a sons aéreos (Ia) de acordo com a técnica descrita na Norma Portuguesa NP-2073 (2).

A partir da introdução (Figura 106) dos valores dos índices de redução sonora em dB, para cada uma das 16 bandas de frequências de terços de oitava (de 125 Hz a 4000 Hz), o programa fornece o valor do Ia (Figura 107).

É disponível igualmente a representação gráfica, no domínio de frequências, dos índices de redução sonora fornecidos.

2.2.4 - Programa IP

Este programa permite obter o Índice de isolamento sonoro a sons de percussão (I_p) de acordo com a técnica descrita na Norma Portuguesa NP-2073 (2).

A partir da introdução (Figura 108) dos valores dos níveis de pressão sonora corrigidos, em dB/terços oitava, para cada uma das 16 bandas de frequências com intervalos de terços de oitava (de 125 Hz a 4000 Hz), o programa fornece o valor do I_p (Figura 109).

O programa põe igualmente à disposição a representação gráfica respectiva (Figura 110).

2.2.5 - Programa LDBA

Este programa permite obter o valor do nível sonoro L , em dB(A), de um qualquer ruído de que seja disponível a descrição por bandas de frequência.

O programa dispõe de 3 alternativas de utilização (Figura 111):

- Cálculo por bandas de oitava (125 a 4000 Hz, 6 bandas);
- Cálculo por bandas de 1/3 de oitava (125 a 4000 Hz, 16 bandas);
- Cálculo por bandas de 1/3 de oitava (100 a 5000 Hz, 18 bandas).

O resultado é fornecido, igualmente, no visor ou na impressora (Figura 112).

2.2.6 - Programa MULTIGRA

Este programa, cujo título completo seria MULTIGRÁFICO, permite obter a representação gráfica de uma ou várias distribuições no domínio de frequências (até ao limite de 4) num mesmo desenho base. Podem assim ser sobrepostos gráficos para análise conjunta de diversas situações.

O programa permite ainda introduzir a Legenda preferida, alterar os valores da escala das ordenadas, alterar a sua divisão ou denominação e modificar o tamanho dos pontos no gráfico (Figuras 113 a 116).

3 - FOLHAS DE DADOS

ENSAIOS ACÚSTICOS DE DIVISÓRIAS
(FICHA PARA O PROGRAMA DE COMPUTADOR "FRIA")

$$C = 10 \log \frac{S \times T}{0.16 \times V} \quad D = L1m - L2m \quad R = D + C$$

(S = 9.65 m²; V = 115 m³)

f(Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------

	LE1															
C.E.	LE1															
	LE1															
*	LE1															
	LR1															
C.R.	LR2															
	LR3															
*	LR1M															

	LE2															
C.E.	LE2															
	LE2															
*	LE2															
	LR1															
C.R.	LR2															
	LR3															
*	LR2M															

	LE3															
C.E.	LE3															
	LE3															
*	LE3															
	LR1															
C.R.	LR2															
	LR3															
*	LR3M															

	TR1															
C.R.	TR2															
	TR3															
*	T															

(DE ACORDO COM NP-669)

LEGENDA:

C.E. - CÂMARA EMISSORA

C.R. - CÂMARA RECEPTORA

* - VALORES A FORNECER AO COMPUTADOR

Fig. 97 -

Folha de Dados para ensaios acústicos de divisórias (programa FRIA).

ENSAIOS ACÚSTICOS DE REVESTIMENTOS DE PISO

(Ficha para o programa de computador "PERCUTE")

$$L_c = L_m - 10 \log \frac{10 T_m}{0,16V} + 5$$

DESCRIÇÃO DO PROVETE: _____

f(Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
POSIÇÃO A																
LA1																
LA2																
LA3																
POSIÇÃO B																
LB1																
LB2																
LB3																
POSIÇÃO C																
LC1																
LC2																
LC3																
* L _m																
T ₁																
T ₂																
T ₃																
* T _m																

* - Valores a fornecer ao computador (de acordo com NP-669(1974))

Fig. 98 - Folha de Dados para ensaios acústicos de revestimentos de pisos (programa PERCUTE).

4 - SAIDAS GRÁFICAS. EXEMPLOS

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS

REFERENCIA DA DIVISORIA : DX
 CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :
 REBOCO(gesso+areia) / ESTAFE / MADEIRA (engradado) / ESTAFE / REBOCO
 ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES):10/8/70/8/10 mm
 ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA : 106 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f(Hz)	T(s)	D(dB)	R(dB)
125	5.6	22	27
160	6	22	27
200	5	28	33
250	5.3	32	37
315	5.3	36	41
400	6.2	36	42
500	6.6	40	45
630	6.1	43	48
800	5.6	47	51
1000	5.4	48	53
1250	5.2	49	54
1600	4.9	48	52
2000	4.5	47	51
2500	3.9	47	50
3150	3.3	52	54
4000	2.7	58	60

Ia = 47 dB

Iae = 43 dB

DELTA L= 44 dB(A)

DELTA L (BRANCO)= 47 dB(A)

DELTA L (ROSA)= 41 dB(A)

LEGENDA:

f-frequencias (Hz)

T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)

D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e receptor)

R=D-10*LDG(A/S) (NP-669)

Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)

Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com base no D

DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real

DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido

emitido como branco puro

DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido como rosa pur

(08-27-1988)

Fig. 99 - Exemplo de folha de "Saída de Resultados" do programa FRIA.

LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-DX)

f(Hz)	LE1	LE2	LE3	LEM
125	90	87	87	88
160	92	92	92	92
200	93	94	95	94
250	99	94	96	97
315	100	99	100	100
400	102	100	103	102
500	106	106	105	106
630	106	106	106	106
800	106	106	106	106
1000	105	106	105	105
1250	104	104	103	104
1600	104	104	104	104
2000	105	104	105	105
2500	101	101	100	101
3150	99	99	99	99
4000	101	101	101	101

f(Hz)	LR1M	LR2M	LR3M	LRM
125	67	66	65	66
160	70	70	69	70
200	66	66	65	66
250	65	65	64	65
315	63	64	63	63
400	65	66	65	65
500	67	66	65	66
630	63	63	63	63
800	59	60	59	59
1000	57	57	57	57
1250	55	54	54	54
1600	56	56	56	56
2000	58	58	57	58
2500	54	54	54	54
3150	47	47	47	47
4000	43	43	43	43

LEM= 114 dB(A)
LRM= 70 dB(A)

LEGENDA:

- LE-Niveis de pressao sonora na camara emissora nas posicoes do microfone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)
- LR-Niveis de pressao sonora na camara receptora nas posicoes do microfon 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)
- f-frequencias (Hz)

Fig. 100 - Exemplo de folha de "Listagem dos Dados" do programa FRIA.

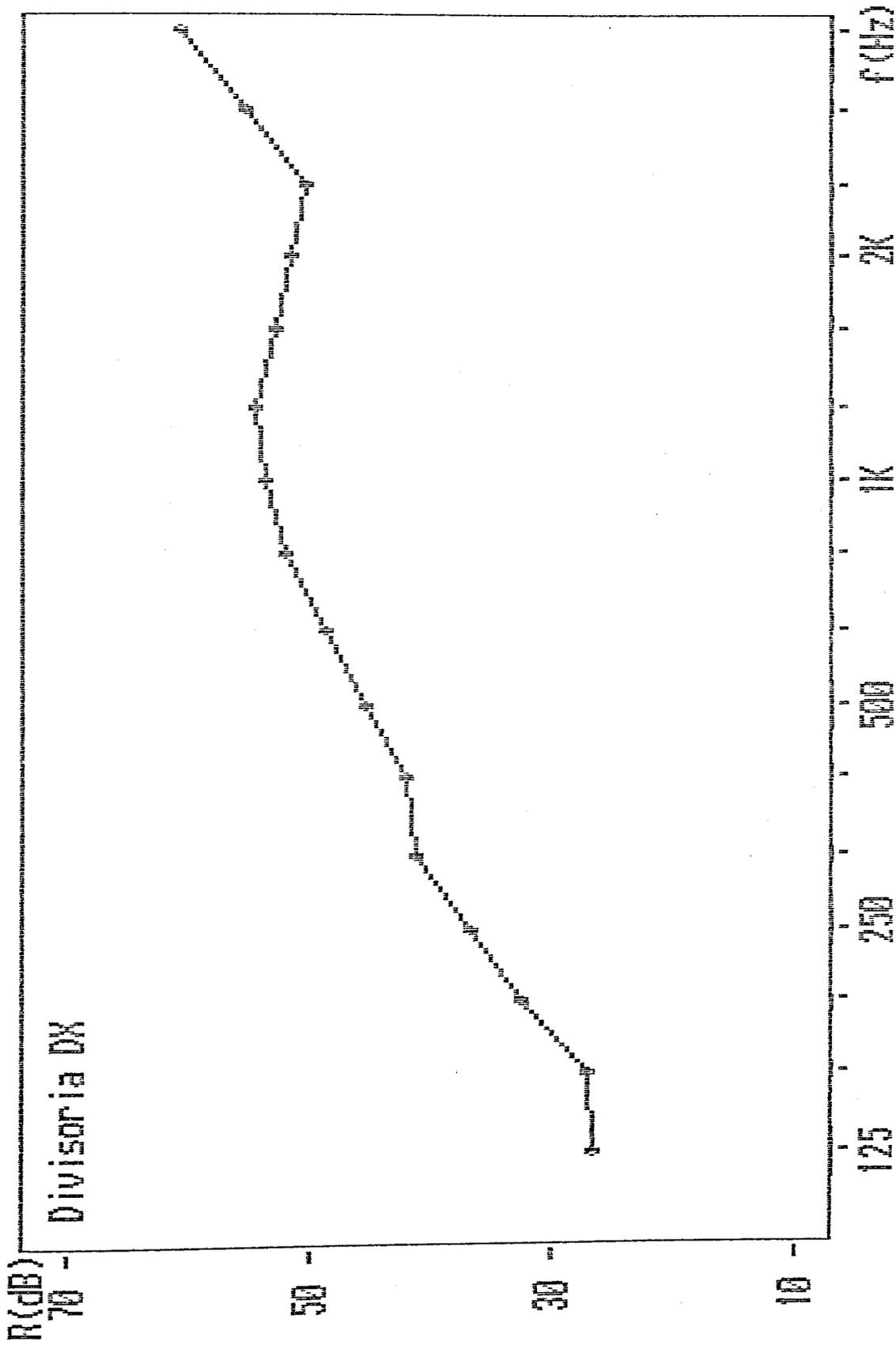


Fig. 101 - Exemplo de saída gráfica do programa FRIA.

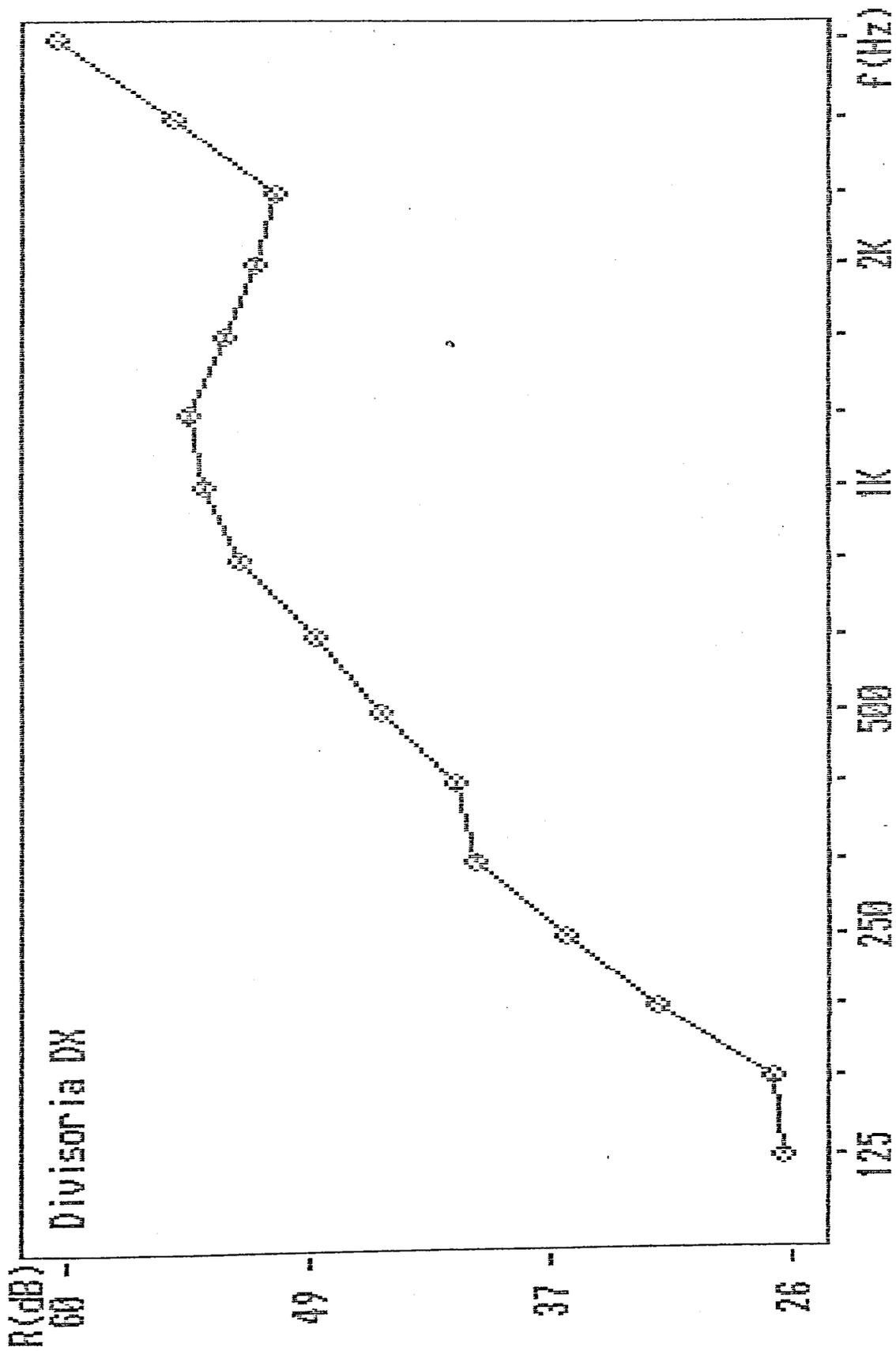


Fig. 102 - Exemplo de saída gráfica do programa FRIA.
 (variação no tamanho dos pontos e na escala das ordenadas).

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSAO

REFERENCIA DA LAJE NUA : P1EN
 CARACTERISTICAS DA LAJE NUA : LAJE BETAO
 ESPESURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES): 14 mm
 ESPESURA TOTAL DA LAJE NUA : 14 mm

REFERENCIA DA LAJE REVESTIDA : P1ER
 CARACTERISTICAS DA LAJE REVESTIDA : LAJE BETAO REVESTIDA COM CCRTICA
 ESPESURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES) : 14 + 2 mm
 ESPESURA TOTAL DA LAJE REVESTIDA : 16 mm

QUADRO DE RESULTADOS

f (Hz)	LCN (dB)	LCR (dB)	DL (dB)
125	75	72	3
160	75	69	6
200	74	65	9
250	74	62	12
315	74	59	15
400	74	56	18
500	74	53	21
630	74	50	24
800	74	47	27
1000	74	44	30
1250	74	41	33
1600	73	37	36
2000	73	34	39
2500	73	31	42
3150	73	28	45
4000	73	25	48

LC (dB)	GRAVES	MEDIOS	AGUDOS	Ip
LAJE NUA	74	74	73	82
LAJE REVEST.	65	48	31	57
DIFERENCAS	9	26	42	25

INDICE DELTA P = 25 dB
 INDICE ALFA = 28 dB
 DELTA LA = 22 dB(A)

 LEGENDA:

- f - frequencias (Hz)
- LCN - Nivel corrigido do ruido de percussao normalizado (LAJE NUA)
- LCR - Nivel corrigido do ruido de percussao normalizado (LAJE REVESTIDA)
- LC = $LM - 10 \log(10T/0.16V) + 5$, NP-669(1974)
- DL - DELTA L = LCN - LCR (dB/1/3 oitava)
- DELTA LA = LCN(dBA) - LCR(dBA)
- Ip - Indice de isolamento sonoro a sons de percussao, NP-2073(1983)
- INDICE DELTA P = Ip (Laje Nua) - Ip (Laje Revestida) (dB/1/3 oitava)
- INDICE ALFA - (CSTB) O menor valor de: (19+DELTA G), (12+DELTA M) E (DELTA) em dB/1/3 oitava

(10-17-1987)

Fig. 103 - Exemplo de folha de "Saída de Resultados" do programa PERCUTE.

Listagem dos Dados: (elementos-P2EN/P2ER) .

f(Hz)	TMN(s)	TMR(s)	LMN(dB)	LMR(dB)
125	5.1	5.1	63	63
160	4.2	4.2	63	62
200	4.5	4.5	68	61
250	5	5	72	64
315	4.9	4.9	71	59
400	5.2	5.2	71	60
500	5.9	5.9	72	54
630	5.3	5.3	71	52
800	5	5	73	48
1000	4	4	72	42
1250	4.6	4.6	71	40
1600	4.5	4.5	71	34
2000	3.9	3.9	72	31
2500	3.8	3.8	68	24
3150	3.1	3.1	67	16
4000	2.6	2.6	63	8

LEGENDA:

- LM - Niveis efectivos medios no recinto (dB/1/3 oitava)
(N - Laje Nua ; R - Laje Revestida)
- f - frequencias (Hz)
- TM - Tempos de reverberacao medios da camara receptora (s)
(N - Laje Nua ; R - Laje Revestida)

Fig. 104 - Exemplo de folha de "Listagem dos Dados" do Programa PERCUTE.

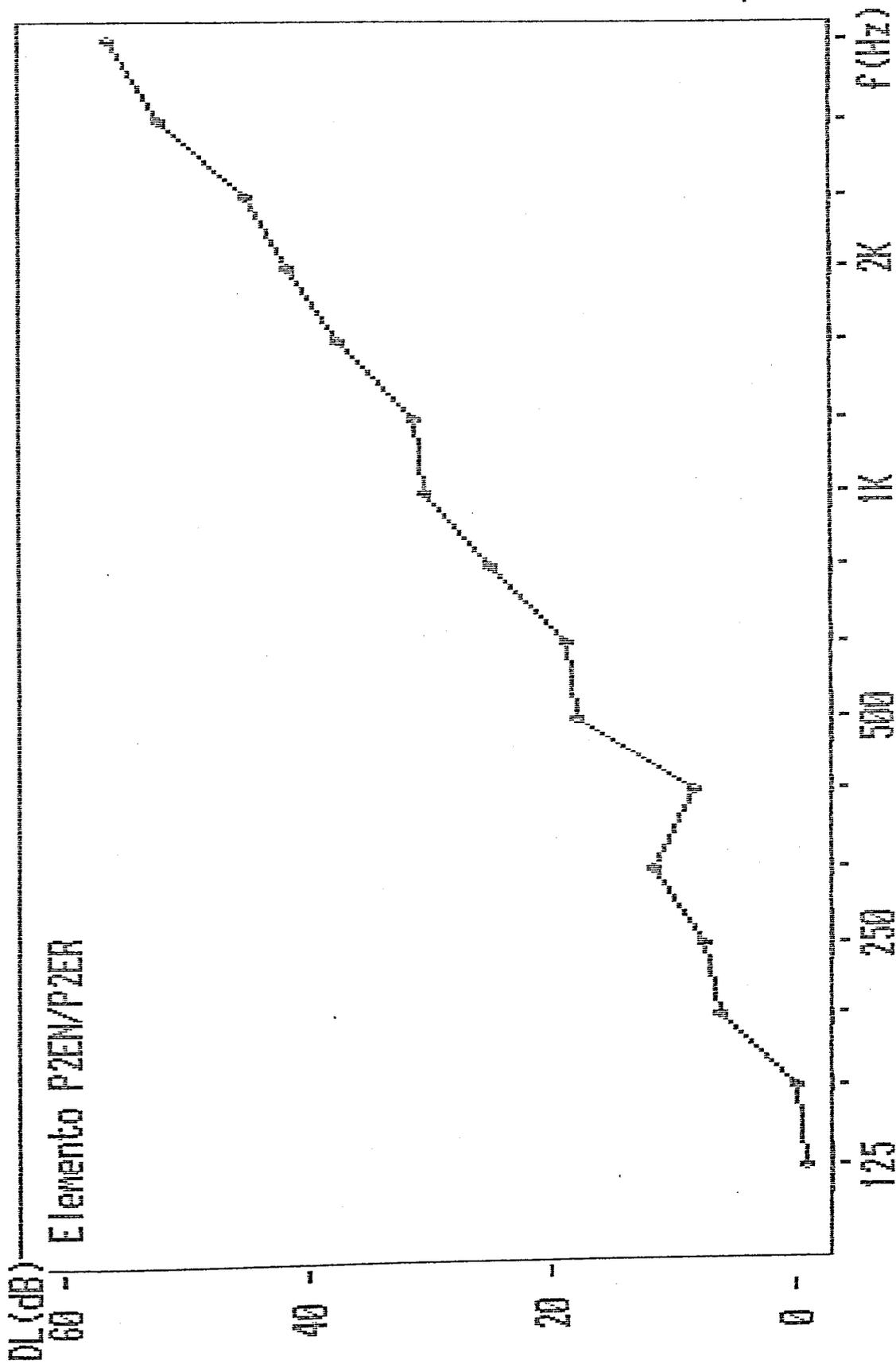


Fig. 105 - Exemplo de saída gráfica do programa PERCUTE.

PROGRAMA Ia

DETERMINACAO DO Ia (NF-2073) - por bandas de 1/3 oitava de 125 a 4000 Hz

programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.U.P.) em Abril 1987

< carregue em qualquer tecla para continuar >

introduza os valores de R:

- R(125)=? 33
- R(160)=? 31
- R(200)=? 39
- R(250)=? 35
- R(315)=? 38
- R(400)=? 39
- R(500)=? 39
- R(630)=? 43
- R(800)=? 49
- R(1000)=? 53
- R(1250)=? 57
- R(1600)=? 60
- R(2000)=? 59
- R(2500)=? 59
- R(3150)=? 66
- R(4000)=? 67

Pretende corrigir estes dados (S/N)?

Pretende :

- 1-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (no VISOR)
- 2-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (na IMPRESSORA)
- 3-GRAFICO (no VISOR)
- 4-GRAFICO (na IMPRESSORA)
- 5-INICIAR NOVO CALCULO
- 6-ABANDONAR

Qual a opcao desejada=?

Fig. 106 - Exemplo do diálogo utilizador-terminal do programa IA.

DADOS E RESULTADO :

f(Hz)	R(dB)
125	33
160	31
200	39
250	35
315	38
400	39
500	39
630	43
800	49
1000	53
1250	57
1600	60
2000	59
2500	59
3150	66
4000	67

Ia = 47 dB

Fig. 107 - Exemplo de saída de resultados do programa IA.

PROGRAMA Ip

DETERMINACAD DO Ip (NP-2073) - por bandas de 1/3 oitava de 125 a 4000 Hz

programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.U.P.) em Abril 1987

< carregue em qualquer tecla para continuar >

REFERENCIA DO ELEMENTO? Laje Liexp

introduza os valores de LC:

LC(125)=? 73

LC(160)=? 72

LC(200)=? 71

LC(250)=? 74

LC(315)=? 69

LC(400)=? 70

LC(500)=? 64

LC(630)=? 62

LC(800)=? 58

LC(1000)=? 52

LC(1250)=? 50

LC(1600)=? 44

LC(2000)=? 41

LC(2500)=? 34

LC(3150)=? 26

LC(4000)=? 18

Pretende corrigir estes dados (S/N)?

Pretende :

1-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (no VISOR)

2-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (na IMPRESSORA)

3-GRAFICO (no VISOR)

4-GRAFICO (na IMPRESSORA)

5-INICIAR NOVO CALCULO

6-ABANDONAR

Qual a opcao desejada=?

Fig. 108 - Exemplo do diálogo utilizador-terminal programa IP.

DADOS E RESULTADO (Elemento-Laje L1exp)

f (Hz)	LC (dB)
125	73
160	72
200	71
250	74
315	69
400	70
500	64
630	62
800	58
1000	52
1250	50
1600	44
2000	41
2500	34
3150	26
4000	18

Ip = 64 dB

LEGENDA :

LC-nível corrigido do ruído de percussão normalizado

LC=LM-10LOG(10T/0.16V)+5 NP-669(1974)

Ip-índice de isolamento sonoro a sons de percussão, NP-2073(1983)

Fig. 109 - Exemplo de saída de resultados do programa IP.

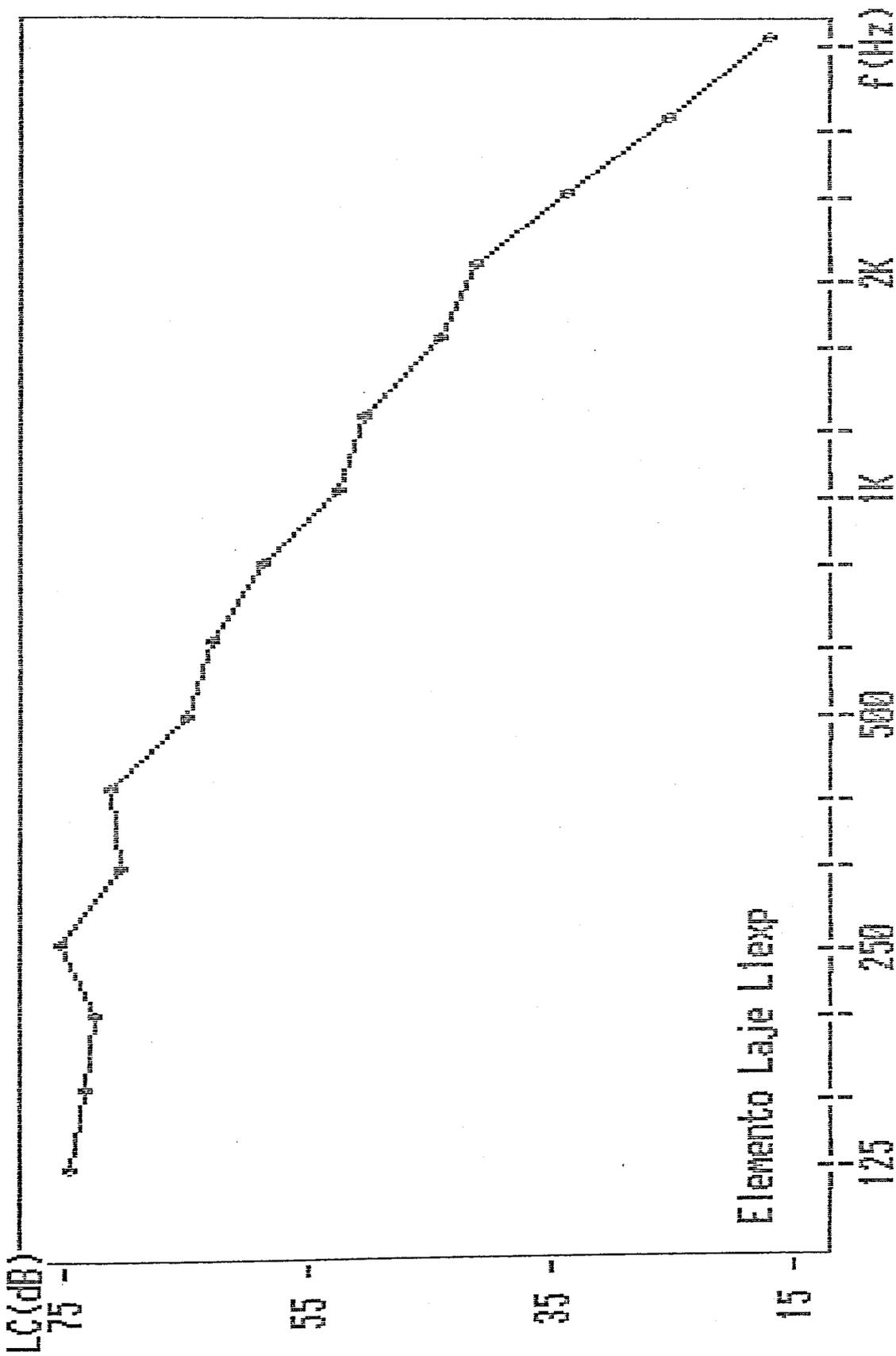


Fig. 110 - Exemplo de saída gráfica do programa IP.

PROGRAMA LDBA

CALCULO DO NIVEL SONORO L em dB(A)

programa idealizado por Antonio Pedro (FEUP)

< carregue em qualquer tecla para continuar >

Pretende utilizar :

- 1-Calculo por bandas de oitava (125 a 4000 Hz;6 bandas)
- 2-Calculo por bandas de 1/3 de oitava (125 a 4000 Hz;16 bandas)
- 3-Calculo por bandas de 1/3 de oitava (100 a 5000 Hz;18 bandas)

Qual a opcao desejada=?

Indique os valores de L em dB/tercos oitava :

- L(125)=?
- L(160)=?
- L(200)=?
- L(250)=?
- L(315)=?
- L(400)=?
- L(500)=?
- L(630)=?
- L(800)=?
- L(1000)=?
- L(1250)=?
- L(1600)=?
- L(2000)=?
- L(2500)=?
- L(3150)=?
- L(4000)=?

pretende corrigir estes dados (S/N)?

Pretende :

- 1-LISTAGEM DOS DADOS (no VISOR)
- 2-LISTAGEM DOS DADOS (na IMPRESSORA)
- 3-INICIAR NOVO CALCULO
- 4-ABANDONAR

Qual a opcao desejada=?

Fig. 111 - Exemplo do diálogo utilizador-terminal do programa LDBA.

LISTAGEM DE DADOS E RESULTADO :

f (Hz)	L (dB)
100	23
125	25
150	28
200	29
250	29
315	30
400	35
500	39
630	39
800	39
1000	36
1250	36
1600	35
2000	35
2500	36
3150	38
4000	30
5000	29

L= 46.951 dB(A)

Fig. 112 - Exemplo de saída de resultados do programa LDBA.

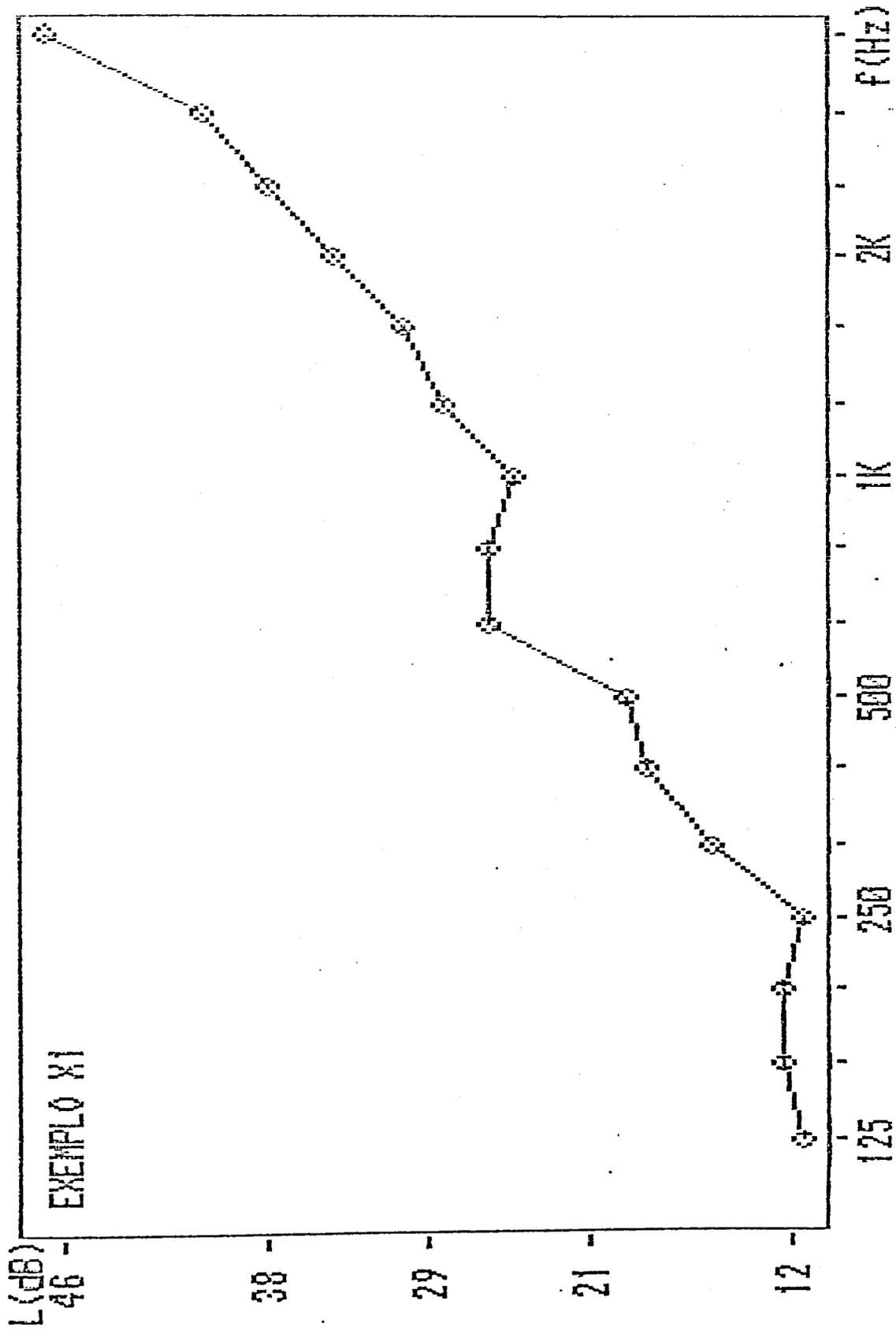


Fig. 113 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA
(um só gráfico, pontos de tamanho médio).

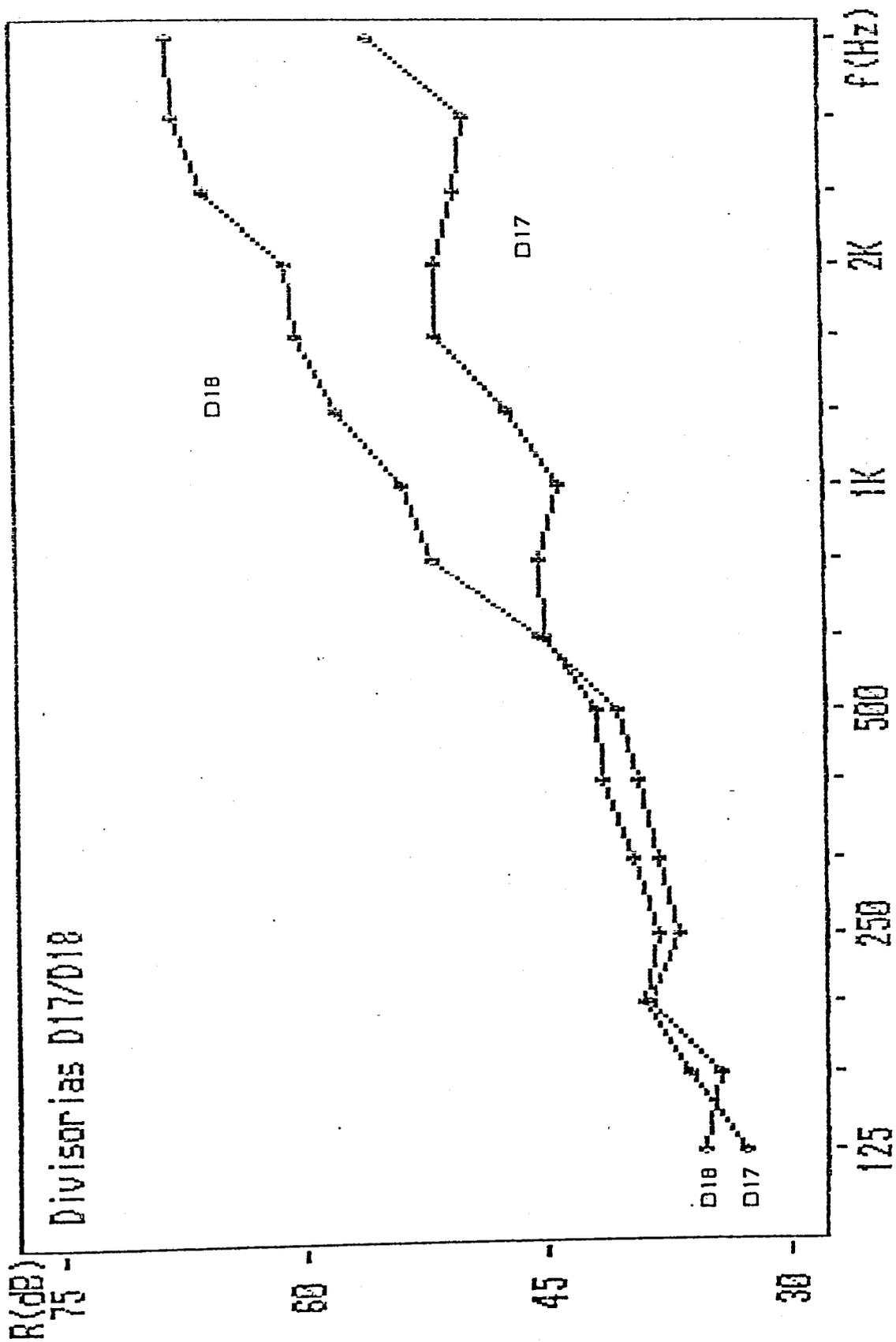


Fig. 114 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA
(dois gráficos, pontos de tamanho reduzido).

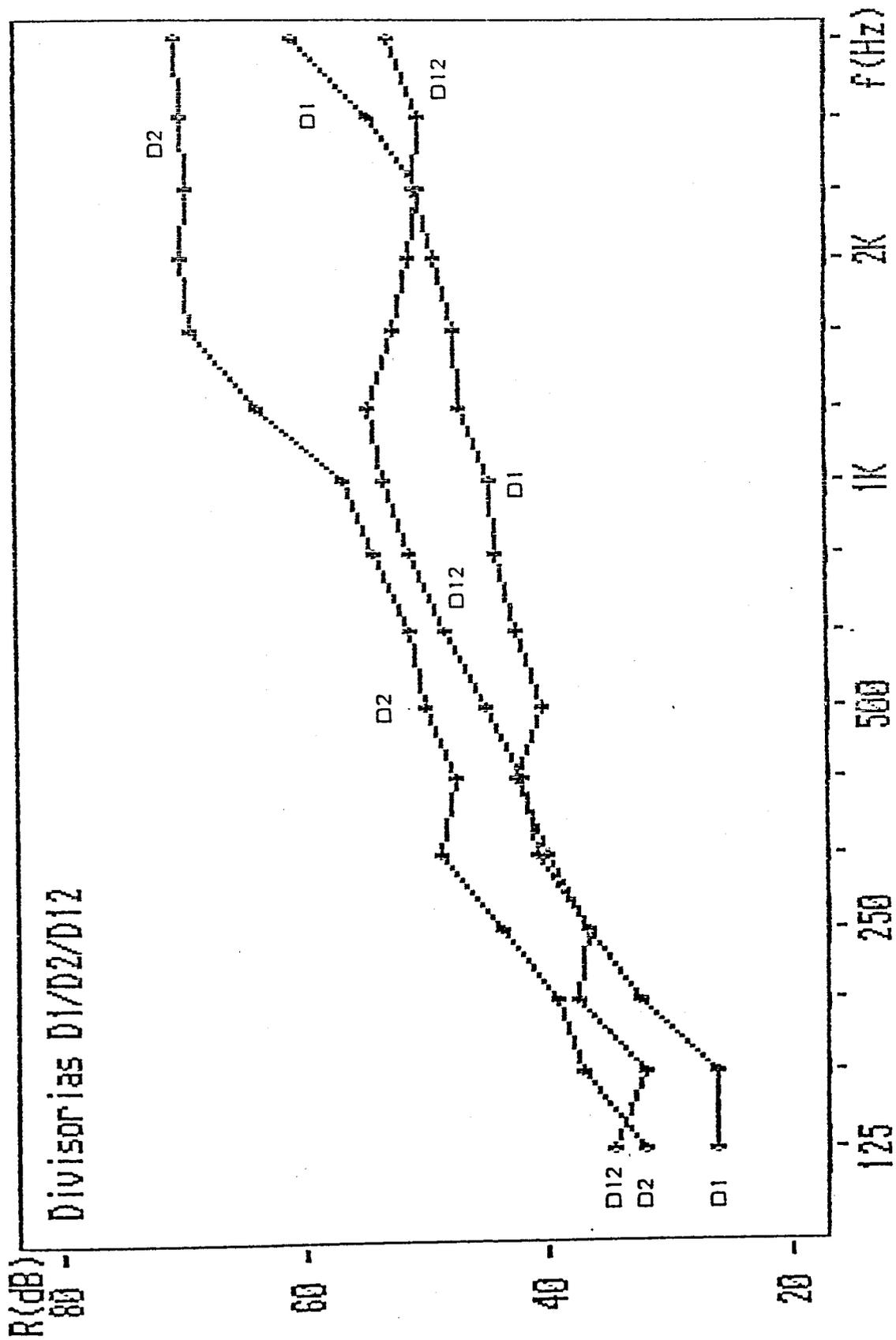


Fig. 115 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA (três gráficos, pontos de tamanho reduzido, escala dinâmica nas ordenadas).

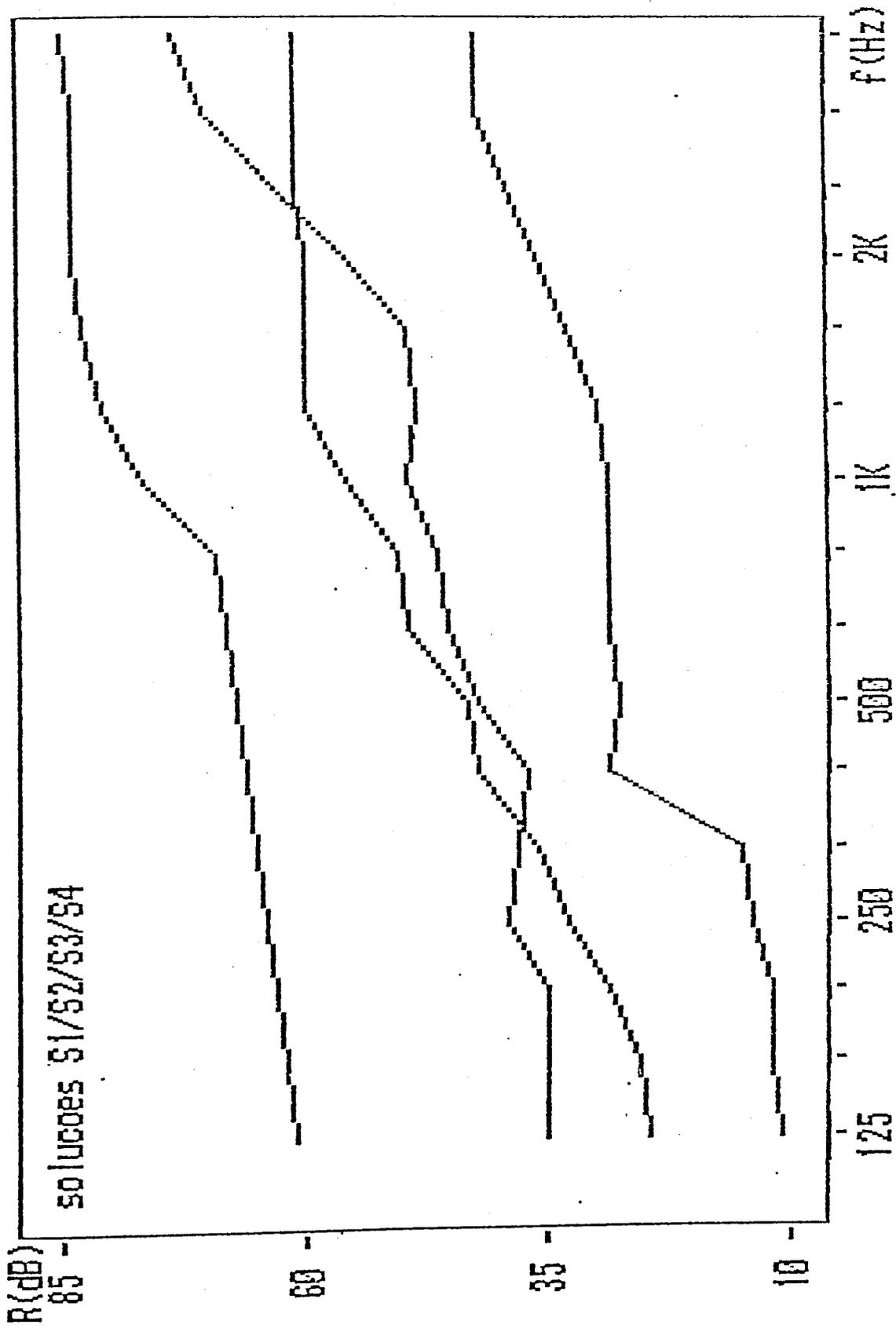


Fig. 116 - Exemplo de saída gráfica do programa MULTIGRA
(quatro gráficos, pontos omitidos, título di-
verso).

5 - LISTAGEM DOS PROGRAMAS

5.1 - PROGRAMA FRIA

```

10 REM ##### programa idealizado por Antonio Pedro (f.e.u.p.) #####
20 REM ##### marco 1987 #####
30 CLS : PRINT "*****"
*****"
40 PRINT: PRINT TAB(29);"PROGRAMA fRiA"
50 PRINT : PRINT " DETERMINACAO DO ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS COM BASE EM EN
SAIOS EM CAMARA REVERBERANTE"
60 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT " programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.
U.P.) em Marco 1987" : PRINT : PRINT :
70 DIM LE1(16): DIM LE2(16): DIM LE3(16): DIM LR1M(16): DIM LR2M(16)
80 DIM T(16): DIM F(16) : DIM LEM(16) : DIM LRM(16) : DIM D(16): DIM C(16)
90 DIM R(16): DIM CR(16): DIM K(16): DIM LR3M(16): DIM X(16): DIM Y(16)
100 FOR I=1 TO 16
110 READ F(I)
120 NEXT I
130 DATA 125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4000
140 REM # K(I)-CORRECCAO PARA CONVERTER PARA dB(A),segundo BERANEK #####
150 FOR I=1 TO 16
160 READ K(I)
170 NEXT I
180 DATA -16.1,-13.4,-10.9,-8.6,-6.6,-4.8,-3.2,-1.9,-0.8,0,0.6,1,1.2,1.3,1.2,1.0
190 REM # CR(I)-DEFINICAO DA CURVA DE REFERENCIA (NF-2073) #####
200 FOR I=1 TO 16
210 READ CR(I)
220 NEXT I
230 DATA 3,6,9,12,15,18,19,20,21,22,23,23,23,23,23
240 X9=0
250 INPUT " pretende iniciar o Calculo ou visualizar um Exemplo (C/E)";P3$
260 IF P3$="C" THEN GOTO 430
270 IF P3$<>"E" GOTO 250
280 CLS : PRINT : PRINT "EXEMPLO DEMONSTRATIVO DO TIPO DE SAIDA DE RESULTADOS"
290 IF X9<>0 GOTO 1020
300 FOR I=1 TO 16
310 LE1(I)=89+I
320 LE2(I)=88+I
330 LE3(I)=90+I
340 LR1M(I)=50+I
350 LR2M(I)=48+I
360 LR3M(I)=60
370 T(I)=3!+.1*I
380 NEXT I
390 READ CD$,EP$,ET$,RD$
400 DATA GESSD + CORTICA + GESSD,10 mm + 40 mm + 10 mm,60 mm,D1E
410 X9=1
420 GOTO 1020
430 PRINT : PRINT "REFERENCIA DA DIVISORIA ?"
440 INPUT RD$
450 PRINT"CARACTERISTICAS DA DIVISORIA ?"
460 INPUT CD$
470 PRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES) ?"
480 INPUT EP$
490 PRINT "ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA ?"
500 INPUT ET$
510 REM ##### introducao dos dados #####
520 PRINT "INTRODUZA OS 16 VALORES LE1 (1 de cada vez)"
530 FOR I=1 TO 16
540 PRINT " LE1(";F(I);")=";
550 INPUT LE1(I)
560 NEXT I
570 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q1$
580 IF Q1$="S" OR Q1$="s" THEN GOTO 520
590 PRINT "INTRODUZA OS 16 VALORES LR1M (1 de cada vez)"
600 FOR I=1 TO 16
610 PRINT " LR1M(";F(I);")=";
620 INPUT LR1M(I)
630 NEXT I
640 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q2$
650 IF Q2$="S" OR Q2$="s" THEN GOTO 590

```

```

660 PRINT"INTRODUZA OS 16 VALORES LE2 (1 de cada vez)"
670 FOR I=1 TO 16
680 PRINT " LE2(";F(I);")=";
690 INPUT LE2(I)
700 NEXT I
710 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q3#
720 IF Q3#="S" OR Q3#="s" THEN GOTO 660
730 PRINT"INTRODUZA OS 16 VALORES LR2M (1 de cada vez)"
740 FOR I=1 TO 16
750 PRINT " LR2M(";F(I);")=";
760 INPUT LR2M(I)
770 NEXT I
780 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q4#
790 IF Q4#="S" OR Q4#="s" THEN GOTO 730
800 PRINT"INTRODUZA OS 16 VALORES LE3 (1 de cada vez)"
810 FOR I=1 TO 16
820 PRINT " LE3(";F(I);")=";
830 INPUT LE3(I)
840 NEXT I
850 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q5#
860 IF Q5#="S" OR Q5#="s" THEN GOTO 800
870 PRINT"INTRODUZA OS 16 VALORES LR3M (1 de cada vez)"
880 FOR I=1 TO 16
890 PRINT " LR3M(";F(I);")=";
900 INPUT LR3M(I)
910 NEXT I
920 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q6#
930 IF Q6#="S" OR Q6#="s" THEN GOTO 870
940 PRINT"INTRODUZA OS 16 VALORES DE T (1 de cada vez)"
950 FOR I=1 TO 16
960 PRINT " T(";F(I);")=";
970 INPUT T(I)
980 NEXT I
990 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q7#
1000 IF Q7#="S" OR Q7#="s" THEN GOTO 940
1010 REM ##### CALCULOS #####
1020 PRINT: PRINT" VOU INICIAR OS CALCULOS:": PRINT:
1030 PRINT" ESTOU A CALCULAR OS R(I)"
1040 FOR J=1 TO 16
1050 LEM(J)=10*LOG((1/3)*(10^(LE1(J)/10)+10^(LE2(J)/10)+10^(LE3(J)/10)))/LOG(10)
1060 LRM(J)=10*LOG((1/3)*(10^(LR1M(J)/10)+10^(LR2M(J)/10)+10^(LR3M(J)/10)))/LOG(
10)
1070 D(J)=LEM(J)-LRM(J)
1080 C(J)=10*LOG((9.649999*T(J))/(.16*115))/LOG(10)
1090 R(J)=D(J)+C(J)
1100 NEXT J
1110 PRINT" ESTOU A CALCULAR D Ia. AGUARDE POR FAVOR..."
1120 P=0
1130 FOR RO=-22 TO 90 STEP 2
1140 N=0
1150 FOR I=1 TO 16
1160 M=RO+CR(I)-R(I)
1170 IF M<=0 THEN 1190
1180 N=N+M
1190 NEXT I
1200 IF N>32 THEN 1230
1210 IF N<P THEN 1230
1220 P=N : Q=RO
1230 NEXT RO
1240 FOR ROD=(Q-1.9) TO (Q+1.9) STEP .1
1250 N=0
1260 FOR I=1 TO 16
1270 M=ROD+CR(I)-R(I)
1280 IF M<=0 THEN 1300
1290 N=N+M
1300 NEXT I
1310 IF N>32 THEN 1340
1320 IF N<P THEN 1340

```

```

1330 P=N : Q=ROD
1340 NEXT ROD
1350 IA1=Q+19
1360 IA=CINT(IA1)
1370 PRINT " ESTOU A CALCULAR O Iae.AGUARDE POR FAVOR..."
1380 PE=0
1390 FOR ROE=-20 TO 90 STEP 2
1400 NE=0
1410 FOR J=1 TO 16
1420 ME=ROE+CR(J)-D(J)
1430 IF ME<=0 THEN 1450
1440 NE=NE+ME
1450 NEXT J
1460 IF NE>32 THEN 1490
1470 IF NE<PE THEN 1490
1480 PE=NE : QE=ROE
1490 NEXT ROE
1500 FOR RQEE=(QE-1.9) TO (QE+1.9) STEP .1
1510 NE=0
1520 FOR J=1 TO 16
1530 ME=RQEE+CR(J)-D(J)
1540 IF ME<=0 THEN 1560
1550 NE=NE+ME
1560 NEXT J
1570 IF NE>32 THEN 1600
1580 IF NE<PE THEN 1600
1590 PE=NE : QE=RQEE
1600 NEXT RQEE
1610 IAE1=QE+19
1620 IAE=CINT(IAE1)
1630 PRINT " ESTOU A CALCULAR DELTA L (dBA)"
1640 SE=0 : SR=0 : SE1=0 : SR1=0
1650 FOR I=1 TO 16
1660 SE=10^((LEM(I)+K(I))/10)
1670 SR=10^((LRM(I)+K(I))/10)
1680 SE1=SE1+SE : SR1=SR1+SR
1690 NEXT I
1700 SE1A=10*LOG(SE1)/LOG(10) : SR1A=10*LOG(SR1)/LOG(10)
1710 DLA=CINT(SE1A-SR1A)
1720 PRINT" ESTOU A CALCULAR DELTA L (dBA) PARA RUIDO BRANCO"
1730 A=0 : B=0 : B1=0 : B2=0
1740 FOR I=1 TO 16
1750 B=10^((80+I+K(I))/10)
1760 A=10^((80+I-D(I)+K(I))/10)
1770 B1=B1+B
1780 B2=B2+A
1790 NEXT I
1800 DLAB1=10*LOG(B1/B2)/LOG(10)
1810 DLAB=CINT(DLAB1)
1820 PRINT" ESTOU A CALCULAR O DELTA L (dBA) PARA RUIDO ROSA"
1830 E=0 : G=0 : R1=0 : R2=0
1840 FOR J=1 TO 16
1850 E=10^((80+K(J))/10)
1860 G=10^((80-D(J)+K(J))/10)
1870 R1=R1+E
1880 R2=R2+G
1890 NEXT J
1900 DLAR1=10*LOG(R1/R2)/LOG(10)
1910 DLAR=CINT(DLAR1)
1920 PRINT :
1930 INPUT " saida de resultados no VISOR ou na IMPRESSORA (V/I)";SR$
1940 IF SR$="I" OR SR$="i" THEN GOTO 2530
1950 REM ##### saida de resultados no visor #####
1960 CLS : PRINT : PRINT"***** SAIDA DE RESULTADOS *****"
*****
1970 PRINT : PRINT TAB(18) ;"LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL"
1980 PRINT : PRINT TAB(23) ;"ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS"
1990 PRINT : PRINT"REFERENCIA DA DIVISORIA : ",RD$

```

```

2000 PRINT"CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :","CD#
2010 PRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES):";EP#
2020 PRINT"ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA :","ET#
2030 GOSUB 3340
2040 CLS : PRINT" QUADRO DE RESULTADOS"
2050 PRINT "f(Hz)"," T(s)","D(dB)","R(dB)"
2060 FOR I=1 TO 16
2070 DA=CINT(D(I))
2080 RA=CINT(R(I))
2090 PRINT F(I),T(I),DA,RA
2100 NEXT I
2110 GOSUB 3340
2120 CLS : PRINT : PRINT " Ia =";IA;" dB"
2130 PRINT " Iae =";IAE;" dB"
2140 PRINT " DELTA L=";DLA;" dB(A)"
2150 PRINT " DELTA L (BRANCO)=";DLAB;" dB(A)"
2160 PRINT " DELTA L (ROSA)=";DLAR;" dB(A)"
2170 PRINT"-----"
-----" :PRINT "LEGENDA:"
2180 PRINT TAB(3);"f-frequencias (Hz)"
2190 PRINT TAB(3);"T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)"
2200 PRINT TAB(3);"D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e re
ceptor)"
2210 PRINT TAB(3);"R=D-10*LOG(A/S) (NP-669)"
2220 PRINT TAB(3);"Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)"
2230 PRINT TAB(3);"Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado com
base no D"
2240 PRINT TAB(3);"Delta L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real"
2250 PRINT TAB(3);"Delta L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido
2260 PRINT TAB(7);"emitido como branco puro"
2270 PRINT TAB(3);"Delta L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido c
omo rosa puro"
2280 GOSUB 3340
2290 CLS : PRINT "-----"
-----"
2300 PRINT " PRETENDE:"
2310 PRINT TAB(6);"1-REPETIR SAIDA DE RESULTADOS (no VISOR)"
2320 PRINT TAB(6);"2-REPETIR SAIDA DE RESULTADOS (na IMPRESSORA)"
2330 PRINT TAB(6);"3-LISTAGEM DOS DADOS (no VISOR)"
2340 PRINT TAB(6);"4-LISTAGEM DOS DADOS (na IMPRESSORA)"
2350 PRINT TAB(6);"5-GRAFICO (no VISOR)"
2360 PRINT TAB(6);"6-GRAFICO (na IMPRESSORA)"
2370 PRINT TAB(6);"7-INICIAR NOVO CALCULO"
2380 PRINT TAB(6);"8-ABANDONAR" : PRINT
2390 INPUT " Escolha a opcao=";L
2400 IF L=1 GOTO 1960
2410 IF L=2 GOTO 2530
2420 IF L=3 GOTO 2890
2430 IF L=4 GOTO 3170
2440 IF L=5 GOTO 3390
2450 IF L=6 GOTO 3390
2460 IF L=7 GOTO 250
2470 IF L=8 GOTO 2500
2480 PRINT " opcao fora dos parametros !"
2490 GOTO 2390
2500 CLS : PRINT : PRINT TAB(10);"FIM !!!!!":PRINT :PRINT :
2510 END
2520 REM ##### saida de resultados na impressora #####
2530 LPRINT"***** SAIDA DE RESULTADOS *****"
2540 LPRINT : LPRINT TAB(6) ;"LABDRATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL"
2550 LPRINT : LPRINT TAB(10) ;"ISOLAMENTO SONORO A SONS AEREOS"
2560 LPRINT : LPRINT : LPRINT"REFERENCIA DA DIVISORIA :","RD#
2570 LPRINT"CARACTERISTICAS DA DIVISORIA :","CD#
2580 LPRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES):";EP#
2590 LPRINT"ESPESSURA TOTAL DA DIVISORIA :","ET#
2600 LPRINT :LPRINT : LPRINT"QUADRO DE RESULTADOS"
2610 LPRINT : LPRINT "f(Hz)"," T(s)","D(dB)","R(dB)"
2620 FOR I=1 TO 16

```

```

2630 DA=CINT(D(I))
2640 RA=CINT(R(I))
2650 LPRINT F(I),T(I),DA,RA
2660 NEXT I
2670 LPRINT : LPRINT :
2680 LPRINT " Ia =";IA;" dB"
2690 LPRINT " Iae =";IAE;" dB"
2700 LPRINT " DELTA L=";DLA;" dB(A)"
2710 LPRINT " DELTA L (BRANCO)=";DLAB;" dB(A)"
2720 LPRINT " DELTA L (ROSA)=";DLAR;" dB(A)"
2730 LPRINT :LPRINT : LPRINT :LPRINT :LPRINT :
2740 LPRINT"-----"
-----"
2750 LPRINT "LEGENDA:"
2760 LPRINT TAB(3);"f-frequencias (Hz)"
2770 LPRINT TAB(3);"T-Tempo de reverberacao da camara receptora (s)"
2780 LPRINT TAB(3);"D=L1-L2 (diferenca de nivel entre compartimentos emissor e r
eceptor)"
2790 LPRINT TAB(3);"R=D-10*LOG(A/S) (NF-669)"
2800 LPRINT TAB(3);"Ia-Indice de isolamento sonoro a sons aereos (NP-2073)"
2810 LPRINT TAB(3);"Iae-Indice de isolamento sonoro a sons aereos determinado co
m base no D"
2820 LPRINT TAB(3);"DELTA L=L1(dBA)-L2(dBA) com o ruido real"
2830 LPRINT TAB(3);"DELTA L (BRANCO)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido
2840 LPRINT TAB(7);"emitido como branco puro"
2850 LPRINT TAB(3);"DELTA L (ROSA)=L1(dBA)-L2(dBA) considerando o ruido emitido
como rosa puro"
2860 LPRINT :LPRINT "("; DATE$ ; ")" :CLS
2870 GOTO 2290
2880 REM #### LISTAGEM DOS DADOS #####
2890 CLS : PRINT " LISTAGEM DOS DADOS:"
2900 PRINT "f(Hz)", "LE1", "LE2", "LE3" : PRINT
2910 FOR I=1 TO 16
2920 PRINT F(I),LE1(I),LE2(I),LE3(I)
2930 NEXT I
2940 GOSUB 3340
2950 CLS : PRINT " LISTAGEM DOS DADOS (continuacao)"
2960 PRINT "f(Hz)", "LR1M", "LR2M", "LR3M" : PRINT
2970 FOR I=1 TO 16
2980 PRINT F(I),LR1M(I),LR2M(I),LR3M(I)
2990 NEXT I
3000 GOSUB 3340
3010 CLS : PRINT " LISTAGEM DO DADOS (continuacao)"
3020 PRINT "f(Hz)", "LEM", "LRM", "T(s)"
3030 FOR I=1 TO 16
3040 PRINT F(I),CINT(LEM(I)),CINT(LRM(I)),T(I)
3050 NEXT I
3060 GOSUB 3340
3070 CLS : PRINT : PRINT " LEM =";CINT(SE1A);" dB(A)"
3080 PRINT " LRM =";CINT(SR1A);" dB(A)"
3090 PRINT : PRINT "-----"
-----"
3100 PRINT "LEGENDA:"
3110 PRINT " LE-Niveis de pressao sonora na camara emissora nas posicoes do mi
crofone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)"
3120 PRINT " LR-Niveis de pressao sonora na camara receptora nas posicoes do m
icrofone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)"
3130 PRINT " f-frequencias (Hz)"
3140 PRINT " T-Tempos de reverberacao da camara receptora (s)"
3150 GOSUB 3340
3160 GOTO 2290
3170 LPRINT "LISTAGEM DOS DADOS:(divisoria-" ;RD$;)" : LPRINT : LPRINT
3180 LPRINT "f(Hz)", "LE1", "LE2", "LE3", "LEM"
3190 FOR I=1 TO 16
3200 LPRINT F(I),LE1(I),LE2(I),LE3(I),CINT(LEM(I))
3210 NEXT I
3220 LPRINT : LPRINT "f(Hz)", "LR1M", "LR2M", "LR3M", "LRM"
3230 FOR I=1 TO 16

```

```

3240 LPRINT F(I),LR1M(I),LR2M(I),LR3M(I),CINT(LRM(I))
3250 NEXT I
3260 LPRINT : LPRINT : LPRINT " LEM=";CINT(SE1A);" dB(A)"
3270 LPRINT " LRM=";CINT(SR1A);" dB(A)"
3280 LPRINT : LPRINT : LPRINT "-----"
-----": LPRINT "LEGENDA:"
3290 LPRINT " LE-Niveis de pressao sonora na camara emissora nas posicoes do
microfone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)"
3300 LPRINT " LR-Niveis de pressao sonora na camara receptora nas posicoes d
o microfone 1,2,3 e valor medio (dB/1/3 oitava)"
3310 LPRINT " f-frequencias (Hz)"
3320 GOTO 2290
3330 REM ##### SUBROTINA PARA ESPERA #####
3340 PRINT : PRINT " < carregue em qualquer tecla para continuar >"
3350 IF INKEY# <>" GOTO 3370
3360 GOTO 3350
3370 RETURN
3380 REM ##### GRAFICO #####
3390 CLS
3400 GM=-10 : PM=120
3410 FOR I=1 TO 16
3420 G1=R(I) : P1=R(I)
3430 IF G1<GM GOTO 3450
3440 GM=G1
3450 IF P1>PM GOTO 3470
3460 PM=P1
3470 NEXT I
3480 PRINT : PRINT " OS VALORES EXTREMOS PARA R, obtidos no calculo, sao :";PM;"
";GM
3490 PRINT : PRINT " INDIQUE OS LIMITES MINIMO E MAXIMO PARA AS ORDENADAS DO GRA
FICO"
3500 INPUT " R (minimo)=";X3
3510 INPUT " R (MAXIMO)=";X4
3520 PRINT : PRINT : INPUT " Qual o tamanho para os pontos do grafico (1 a 8)
";DF
3530 X1=((11*X4)-X3)/10
3540 X2=150/(X4-X3)
3550 X5=CINT((2*X4+X3)/3)
3560 X6=CINT((X4+2*X3)/3)
3570 CLS
3580 SCREEN 2
3590 LINE (41,10)-(633,170),,B
3600 FOR I=1 TO 16
3610 X(I)=50+(358*(LOG(F(I)/100))/LOG(10))
3620 Y(I)=((0-R(I))+X1)*X2
3630 NEXT I
3640 FOR I=1 TO 15
3650 LINE (X(I),Y(I))-(X(I+1),Y(I+1))
3660 CIRCLE (X(I),Y(I)),DF
3670 LOCATE 22,(X(I)*8/64) : PRINT "!"
3680 NEXT I
3690 CIRCLE (X(16),Y(16)),DF
3700 LOCATE 22,(X(16)*8/64) : PRINT "!"
3710 LOCATE 2,1 : PRINT "R(dB)"
3720 LOCATE 3,1 : PRINT X4;"-"
3730 LOCATE 3,8 : PRINT"Divisoria ";RD#
3740 LOCATE 9,1 : PRINT X5;"-"
3750 LOCATE 15,1 : PRINT X6;"-"
3760 LOCATE 21,1 : PRINT X3;"-"
3770 LOCATE 23,(X(1)*8/64-1) : PRINT "125 250 500 1
K 2K"
3780 LOCATE 23,76 : PRINT "f(Hz)"
3790 KEY OFF
3800 IF L=5 GOTO 3820
3810 LCOPY
3820 LOCATE 25,5
3830 GOSUB 3340
3840 KEY ON
3850 GOTO 2290

```

5.2 - PROGRAMA PERCUTE

```

10 REM ##### programa idealizado por Antonio Pedro (f.e.u.p.) #####
20 REM ##### marco 1987 #####
30 CLS : PRINT"*****"
*****"
40 PRINT: PRINT TAB(27);"PROGRAMA PERCUTE"
50 PRINT : PRINT" DETERMINACAO DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSAO COM BASE
EM ENSAIOS EM CAMARA REVERBERANTE"
60 PRINT : PRINT : PRINT " programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.
U.P.) em Marco 1987" : PRINT : PRINT :
70 DIM LCR(16) : DIM LCN(16) : DIM DL(16) : DIM LMN(16) : DIM LMR(16)
80 DIM K(16) : DIM C1R(16) : DIM CR(16) : DIM Y(16) : DIM X(16) : DIM C1N(16)
90 DIM F(16) : DIM TMR(16) : DIM TMN(16)
100 FOR I=1 TO 16
110 READ F(I)
120 NEXT I
130 DATA 125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4000
140 REM # K(I)-CORRECCAO PARA CONVERTER PARA dB(A),segundo BERANEK #####
150 FOR I=1 TO 16
160 READ K(I)
170 NEXT I
180 DATA -16.1,-13.4,-10.9,-8.6,-6.6,-4.8,-3.2,-1.9,-0.8,0,0.6,1,1.2,1.3,1.2,1.0
190 REM # CR(I)-DEFINICAO DA CURVA DE REFERENCIA (NF-2073) #####
200 FOR I=1 TO 16
210 READ CR(I)
220 NEXT I
230 DATA 0,0,0,0,0,1,2,3,4,5,8,11,14,17,20,23
240 X9=0
250 INPUT " pretende iniciar o Calculo ou visualizar um Exemplo (C/E)";P3#
260 IF P3#="C" THEN GOTO 400
270 IF P3#<>"E" GOTO 250
280 CLS : PRINT : PRINT "EXEMPLO DEMONSTRATIVO DO TIPO DE SAIDA DE RESULTADOS"
290 IF X9<>0 GOTO 860
300 V=1
310 FOR I=1 TO 16
320 LMN(I)=72
330 LMR(I)=72-3*I
340 TMN(I)=3!+.1*I : TMR(I)=TMN(I)
350 NEXT I
360 READ CLN$,EPN$,ETN$,RLN$,CLR$,EPR$,ETR$,RLR$
370 DATA LAJE BETA0,14 mm,14 mm,P1EN,LAJE BETA0 REVESTIDA COM CORTICA,14 + 2 mm,
16 mm,P1ER
380 X9=1
390 GOTO 860
400 PRINT : INPUT "REFERENCIA DA LAJE NUA ";RLN#
410 PRINT"CARACTERISTICAS DA LAJE NUA ?"
420 INPUT CLN$
430 PRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES) DA LAJE NUA ?"
440 INPUT EPN$
450 INPUT"ESPESSURA TOTAL DA LAJE NUA ";ETN#
460 CLS : INPUT"REFERENCIA DA LAJE REVESTIDA";RLR$
470 PRINT"CARACTERISTICAS DA LAJE REVESTIDA ?"
480 INPUT CLR$
490 PRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES) DA LAJE REVESTIDA ?"
500 INPUT EPR$
510 INPUT"ESPESSURA TOTAL DA LAJE REVESTIDA";ETR#
520 CLS : PRINT
530 PRINT" 1 - FOI USADA 1 CAMARA REVERBERANTE (V=115 m3)"
540 PRINT" 2 - FOI USADA 2 CAMARAS REVERBERANTES (V=230 m3)"
550 PRINT : INPUT" Indique a situacao correcta (1/2)";V : IF V<>1 AND V<>2 THEN
550
560 REM ##### introducao dos dados #####
570 PRINT "INTRODUZA OS 16 VALORES LMN (LAJE NUA) "
580 FOR I=1 TO 16
590 PRINT " LMN(";F(I);")=";

```

```

600 INPUT LMN(I)
610 NEXT I
620 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q1$
630 IF Q1$="S" OR Q1$="s" THEN GOTO 570
640 PRINT "INTRODUZA OS 16 VALORES TMN (LAJE NUA)"
650 FOR I=1 TO 16
660 PRINT " TMN(";F(I);")=";
670 INPUT TMN(I)
680 NEXT I
690 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q2$
700 IF Q2$="S" OR Q2$="s" THEN GOTO 640
710 PRINT"INTRODUZA OS 16 VALORES LMR (LAJE REVESTIDA)"
720 FOR I=1 TO 16
730 PRINT " LMR(";F(I);")=";
740 INPUT LMR(I)
750 NEXT I
760 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q3$
770 IF Q3$="S" OR Q3$="s" THEN GOTO 710
780 PRINT"INTRODUZA OS 16 VALORES TMR (LAJE REVESTIDA)"
790 FOR I=1 TO 16
800 PRINT " TMR(";F(I);")=";
810 INPUT TMR(I)
820 NEXT I
830 INPUT "PRETENDE CORRIGIR ESTES DADOS (S/N)";Q4$
840 IF Q4$="S" OR Q4$="s" THEN GOTO 780
850 REM ##### CALCULOS #####
860 PRINT: PRINT" VDU INICIAR OS CALCULOS:": PRINT:
870 PRINT" ESTOU A CALCULAR OS LCN(I) E LCR(I)"
880 FOR J=1 TO 16
890 C1N(J)=(0-10*LOG((10*TMN(J))/(.16*115*V))/LOG(10))+5
900 C1R(J)=(0-10*LOG((10*TMR(J))/(.16*115*V))/LOG(10))+5
910 LCN(J)=LMN(J)+C1N(J)
920 LCR(J)=LMR(J)+C1R(J)
930 NEXT J
940 PRINT" ESTOU A CALCULAR O Ip (LAJE NUA). AGUARDE POR FAVOR..."
950 P=0
960 FOR RD=-22 TO 99 STEP 2
970 N=0
980 FOR I=1 TO 16
990 M=LCN(I)-RD+CR(I)
1000 IF M<=0 THEN 1020
1010 N=N+M
1020 NEXT I
1030 IF N>32 THEN 1060
1040 IF N<P THEN 1060
1050 P=N : Q=RD
1060 NEXT RD
1070 FOR RDD=(Q-1.9) TO (Q+1.9) STEP .1
1080 N=0
1090 FOR I=1 TO 16
1100 M=LCN(I)-RDD+CR(I)
1110 IF M<=0 THEN 1130
1120 N=N+M
1130 NEXT I
1140 IF N>32 THEN 1170
1150 IF N<P THEN 1170
1160 P=N : Q=RDD
1170 NEXT RDD
1180 IPN1=Q-2
1190 IPN=CINT(IPN1)
1200 PRINT " ESTOU A CALCULAR O Ip (LAJE REVESTIDA). AGUARDE POR FAVOR..."
1210 PE=0
1220 FOR ROE=-20 TO 99 STEP 2
1230 NE=0
1240 FOR J=1 TO 16

```

```

1250 ME=LCR(J)-ROE+CR(J)
1260 IF ME<=0 THEN 1280
1270 NE=NE+ME
1280 NEXT J
1290 IF NE>32 THEN 1320
1300 IF NE<PE THEN 1320
1310 PE=NE : QE=ROE
1320 NEXT ROE
1330 FOR ROEE=(QE-1.9) TO (QE+1.9) STEP .1
1340 NE=0
1350 FOR J=1 TO 16
1360 ME=LCR(J)-ROEE+CR(J)
1370 IF ME<=0 THEN 1390
1380 NE=NE+ME
1390 NEXT J
1400 IF NE>32 THEN 1430
1410 IF NE<PE THEN 1430
1420 PE=NE : QE=ROEE
1430 NEXT ROEE
1440 IPR1=QE-2
1450 IPR=CINT(IPR1)
1460 PRINT" ESTOU A TERMINAR OS CALCULOS..."
1470 REM ##### indice DELTA P #####
1480 DP=IPN-IPR
1490 REM ##### DELTA L = LC(NUA) - LC(REVESTIDA) #####
1491 FOR I=1 TO 16 : DL(I)=LCN(I)-LCR(I) : NEXT I
1500 SE=0 : SR=0 : SE1=0 : SR1=0
1510 FOR I=1 TO 16
1520 SE=10^((LCN(I)+K(I))/10)
1530 SR=10^((LCR(I)+K(I))/10)
1540 SE1=SE1+SE : SR1=SR1+SR
1550 NEXT I
1560 LCNA=10*LOG(SE1)/LOG(10) : LCRA=10*LOG(SR1)/LOG(10)
1570 DLA=CINT(LCNA-LCRA)
1580 GN=(LCN(1)+LCN(2)+LCN(3)+LCN(4)+LCN(5))/5
1590 GR=(LCR(1)+LCR(2)+LCR(3)+LCR(4)+LCR(5))/5
1600 DG=GN-GR
1610 MN=(LCN(6)+LCN(7)+LCN(8)+LCN(9)+LCN(10)+LCN(11))/6
1620 MR=(LCR(6)+LCR(7)+LCR(8)+LCR(9)+LCR(10)+LCR(11))/6
1630 DM=MN-MR
1640 AN=(LCN(12)+LCN(13)+LCN(14)+LCN(15)+LCN(16))/5
1650 AR=(LCR(12)+LCR(13)+LCR(14)+LCR(15)+LCR(16))/5
1660 DA=AN-AR
1670 REM ##### Calculo do indice ALFA #####
1680 A1=19+GN-GR : A2=12+MN-MR
1690 IF A1<=A2 GOTO 1730
1700 IF A2<=DA THEN 1770
1710 ALFA=DA
1720 GOTO 1780
1730 IF A1<=DA THEN 1750
1740 GOTO 1710
1750 ALFA=A1
1760 GOTO 1780
1770 ALFA=A2
1780 PRINT :
1790 INPUT " saida de resultados no VISOR ou na IMPRESSORA (V/I)";SR$
1800 IF SR$="I" OR SR$="i" THEN GOTO 2420
1810 REM ##### saida de resultados no visor #####
1820 CLS : PRINT : PRINT"***** SAIDA DE RESULTADOS *****"
*****"
1830 PRINT : PRINT TAB(20) ;"ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSAO"
1840 PRINT : PRINT"REFERENCIA DA LAJE NUA : ",RLN$
1850 PRINT"CARACTERISTICAS DA LAJE NUA : ",CLN$
1860 PRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES): ",EPN$

```

```

1870 PRINT"ESPESSURA TOTAL DA LAJE NUA :","ETN$
1880 PRINT: PRINT"REFERENCIA DA LAJE REVESTIDA :","RLR$
1890 PRINT"CARACTERISTICAS DA LAJE REVESTIDA :","CLR$
1900 PRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES) :","EPR$
1910 PRINT"ESPESSURA TOTAL DA LAJE REVESTIDA :","ETR$
1920 GOSUB 3110
1930 CLS : PRINT" QUADRO DE RESULTADOS"
1940 PRINT "f(Hz)","LCN(dB)","LCR(dB)","DL(dB)"
1950 FOR I=1 TO 16
1960 DN=CINT(LCN(I))
1970 DR=CINT(LCR(I)) : DL=CINT(DL(I))
1980 PRINT F(I),DN,DR,DL
1990 NEXT I
2000 GOSUB 3110
2010 CLS : PRINT : PRINT " LC(dB)","GRAVES","MEDIOS","AGUDOS"," IP"
2020 PRINT "LAJE NUA",CINT(GN),CINT(MN),CINT(AN),IPN
2030 PRINT "LAJE REVEST.",CINT(GR),CINT(MR),CINT(AR),IPR
2040 PRINT "DIFERENCAS",CINT(DG),CINT(DM),CINT(DA),CINT(DP): PRINT
2050 PRINT " INDICE DELTA P =";DP;" dB"
2060 PRINT " INDICE ALFA =";CINT(ALFA);" dB"
2070 PRINT " DELTA LA =";DLA;" dB(A)"
2080 PRINT"-----"
" :PRINT "LEGENDA:"
2090 PRINT" f-frequencias (Hz)"
2100 PRINT" LCN-Nivel corrigido do ruido de percussao normalizado (LAJE NUA)"
2110 PRINT" LCR-Nivel corrigido do ruido de percussao normalizado (LAJE REVEST
IDA)"
2120 PRINT" LC = LM-10LDG(10T/0.16V)+5 , NP-669(1974)"
2130 PRINT" DL- DELTA L = LCN - LC (dB/1/3 OITAVA)"
2140 PRINT" DELTA LA= LCN(dBA) - LCR(dBA)"
2150 PRINT" Ip - Indice de isolamento sonoro a sons de percussao ,NP-2073(1983
)
(dB/1/3 oitava)"
2160 PRINT" INDICE DELTA P = Ip (Laje Nua) - Ip (Laje Revestida) (dB)
2170 PRINT" INDICE ALFA - (CSTB) D menor de: (19+DELTA G), (12+DELTA M) e (DEL
TA A)"
2180 GOSUB 3110
2190 CLS : PRINT "-----"
"
2200 PRINT " PRETENDE:"
2210 PRINT TAB(6);"1-REPETIR SAIDA DE RESULTADOS (no VISOR)"
2220 PRINT TAB(6);"2-REPETIR SAIDA DE RESULTADOS (na IMPRESSORA)"
2230 PRINT TAB(6);"3-LISTAGEM DOS DADOS (no VISOR)"
2240 PRINT TAB(6);"4-LISTAGEM DOS DADOS (na IMPRESSORA)"
2250 PRINT TAB(6);"5-GRAFICO (no VISOR)"
2260 PRINT TAB(6);"6-GRAFICO (na IMPRESSORA)"
2270 PRINT TAB(6);"7-INICIAR NOVO CALCULO"
2280 PRINT TAB(6);"8-ABANDONAR" : PRINT
2290 INPUT " Escolha a opcao=";L
2300 IF L=1 GOTO 1820
2310 IF L=2 GOTO 2420
2320 IF L=3 GOTO 2830
2330 IF L=4 GOTO 2980
2340 IF L=5 GOTO 3160
2350 IF L=6 GOTO 3160
2360 IF L=7 GOTO 250
2370 IF L=8 GOTO 2390
2380 PRINT " opcao fora dos parametros !" : GOTO 2290
2390 CLS : PRINT : PRINT TAB(10);"FIM !!!!!":PRINT :PRINT :
2400 END
2410 REM ##### saida de resultados na impressora #####
2420 LPRINT"***** SAIDA DE RESULTADOS *****"
2430 LPRINT : LPRINT : LPRINT TAB(6) ;"LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL"
2440 LPRINT : LPRINT TAB(7) ;"ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSAO"
2450 LPRINT : LPRINT : LPRINT"REFERENCIA DA LAJE NUA :","RLN$
2460 LPRINT"CARACTERISTICAS DA LAJE NUA :","CLN$
2470 LPRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES):";EPN$
2480 LPRINT"ESPESSURA TOTAL DA LAJE NUA :","ETN$

```

```

2490 LPRINT : LPRINT"REFERENCIA DA LAJE REVESTIDA :",RLR#
2500 LPRINT"CARACTERISTICAS DA LAJE REVESTIDA :",CLR#
2510 LPRINT"ESPESSURAS PARCIAIS (DAS CAMADAS COMPONENTES) :",EPR#
2520 LPRINT"ESPESSURA TOTAL DA LAJE REVESTIDA :",ETR#
2530 LPRINT :LPRINT : LPRINT"QUADRO DE RESULTADOS"
2540 LPRINT : LPRINT "f(Hz)","LCN(dB)","LCR(dB)","DL(dB)"
2550 FOR I=1 TO 16
2560 DN=CINT(LCN(I))
2570 DR=CINT(LCR(I)) : DL=CINT(DL(I))
2580 LPRINT F(I),DN,DR,DL
2590 NEXT I
2600 LPRINT : LPRINT :
2610 LPRINT " LC(dB)","GRAVES","MEDIOS","AGUDDOS"," Ip"
2620 LPRINT "LAJE NUA",CINT(GN),CINT(MN),CINT(AN),CINT(IPN)
2630 LPRINT "LAJE REVEST.",CINT(GR),CINT(MR),CINT(AR),CINT(IPR)
2640 LPRINT "DIFERENCAS",CINT(DG),CINT(DM),CINT(DA),CINT(DP)
2650 LPRINT : LPRINT " INDICE DELTA P=";DP;" dB"
2660 LPRINT" INDICE ALFA =" ;CINT(ALFA);" dB"
2670 LPRINT" DELTA LA =" ;DLA;" dB(A)"
2680 LPRINT :LPRINT :
2690 LPRINT"-----"
-----"
2700 LPRINT "LEGENDA:"
2710 LPRINT" f - frequencias (Hz)"
2720 LPRINT" LCN - Nivel corrigido do ruido de percussao normalizado (LAJE NUA
)"
2730 LPRINT" LCR - Nivel corrigido do ruido de percussao normalizado (LAJE REV
ESTIDA)""
2740 LPRINT" LC = LM-10LOG(10T/0.16V)+5 , NP-669(1974)"
2750 LPRINT" DL - DELTA L = LCN - LCR (dB/1/3 oitava)"
2760 LPRINT" DELTA LA = LCN(dBA) - LCR(dBA) "
2770 LPRINT" Ip - Indice de isolamento sonoro a sons de percussao ,NP-2073(198
3)"
2780 LPRINT" INDICE DELTA P = Ip (Laje Nua) - Ip (Laje Revestida) (dB/1/3
oitava)"
2790 LPRINT" INDICE ALFA - (CSTB) O menor valor de: (19+DELTA G),(12+DELTA M)
E (DELTA A) em dB/1/3 oitava"
2800 LPRINT :LPRINT "(" ; DATE# ; ")" :CLS
2810 GOTO 2190
2820 REM #### LISTAGEM DOS DADOS #####
2830 CLS : PRINT " LISTAGEM DOS DADOS:"
2840 PRINT "f(Hz)","TMN(s)","TMR(s)","LMN(dB)","LMR(dB)": PRINT
2850 FOR I=1 TO 16
2860 PRINT F(I),TMN(I),TMR(I),LMN(I),LMR(I)
2870 NEXT I
2880 GOSUB 3110
2890 PRINT : PRINT "-----"
-----"
2900 PRINT "LEGENDA:"
2910 PRINT " LM - Niveis efectivos medios no recinto (dB/1/3 oitava)"
2920 PRINT " (N-Laje Nua ; R-Laje Revestida)"
2930 PRINT " f - frequencias (Hz)"
2940 PRINT " TM - Tempos de reverberacao medios da camara receptora (s)"
2950 PRINT " (N-Laje Nua ; R-Laje Revestida)"
2960 GOSUB 3110
2970 GOTO 2190
2980 LPRINT "LISTAGEM DOS DADOS:(elementos-";RLN#;"/";RLR#;)" : LPRINT : LPRINT
2990 LPRINT "f(Hz)","TMN(s)","TMR(s)","LMN(dB)","LMR(dB)"
3000 FOR I=1 TO 16
3010 LPRINT F(I),TMN(I),TMR(I),LMN(I),LMR(I)
3020 NEXT I
3030 LPRINT : LPRINT "-----"
-----": LPRINT "LEGENDA:"
3040 LPRINT " LM - Niveis efectivos medios no recinto (dB/1/3 oitava)"

```

```

3050 LPRINT " (N - Laje Nua ; R - Laje Revestida)"
3060 LPRINT " f - frequencias (Hz)"
3070 LPRINT " TM - Tempos de reverberacao medios da camara receptora (s)"
3080 LPRINT " (N - Laje Nua ; R - Laje Revestida)"
3090 GOTO 2190
3100 REM ##### SUBROTINA PARA ESPERA #####
3110 PRINT : PRINT " < carregue em qualquer tecla para continuar >"
3120 IF INKEY# <>"" GOTO 3140
3130 GOTO 3120
3140 RETURN
3150 REM ##### GRAFICO #####
3160 CLS
3170 GM=-10 : PM=120
3180 FOR I=1 TO 16
3190 G1=DL(I) : P1=DL(I)
3200 IF G1<GM GOTO 3220
3210 GM=G1
3220 IF P1>PM GOTO 3240
3230 PM=P1
3240 NEXT I
3250 PRINT : PRINT " OS VALORES EXTREMOS PARA DL, obtidos no calculo, sao :";PM;
";";GM
3260 PRINT : PRINT " INDIQUE OS LIMITES MINIMO E MAXIMO PARA AS ORDENADAS DO GRA
FICO"
3270 INPUT " DL (minimo)=";X3
3280 INPUT " DL (MAXIMO)=";X4
3290 PRINT : PRINT : INPUT " Qual o tamanho para os pontos do grafico (1 a 8)
";DP
3300 X1=((11*X4)-X3)/10
3310 X2=150/(X4-X3)
3320 X5=CINT((2*X4+X3)/3)
3330 X6=CINT((X4+2*X3)/3)
3340 CLS
3350 SCREEN 2
3360 LINE (41,10)-(633,170),,B
3370 FOR I=1 TO 16
3380 X(I)=50+(358*(LOG(F(I)/100))/LOG(10))
3390 Y(I)=((0-DL(I))+X1)*X2
3400 NEXT I
3410 FOR I=1 TO 15
3420 LINE (X(I),Y(I))-(X(I+1),Y(I+1))
3430 CIRCLE (X(I),Y(I)),DP
3440 PSET(X(I),172):PSET(X(I)+1,172):PSET(X(I),173):PSET(X(I)+1,173)
3450 NEXT I
3460 CIRCLE (X(16),Y(16)),DP
3470 PSET(X(16),172):PSET(X(16)+1,172):PSET(X(16),173):PSET(X(16)+1,173)
3480 LOCATE 2,1 : PRINT "DL(dB)"
3490 LOCATE 3,1 : PRINT X4;"-"
3500 LOCATE 3,8 : PRINT"Elemento ";RLN$;"/";RLR$
3510 LOCATE 9,1 : PRINT X5;"-"
3520 LOCATE 15,1 : PRINT X6;"-"
3530 LOCATE 21,1 : PRINT X3;"-"
3540 LOCATE 23,(X(1)*8/64-1) : PRINT "125 250 500 1
K 2K"
3550 LOCATE 23,76 : PRINT "f(Hz)"
3560 KEY OFF
3570 IF L=5 GOTO 3590
3580 LCOPY
3590 LOCATE 25,5
3600 GOSUB 3110
3610 KEY ON
3620 GOTO 2190

```

5.3 - PROGRAMA IA

```

5 REM #####          PROGRAMA IA          #####
10 REM ##### programa idealizado por Antonio Pedro (f.e.u.p.) #####
20 REM #####          marco 1987          #####
30 CLS : PRINT"*****"
*****"
40 PRINT: PRINT TAB(29);"PROGRAMA Ia"
50 PRINT : PRINT" DETERMINACAO DO Ia (NP-2073) - por bandas de 1/3 oitava de 125
a 4000 Hz"
60 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT" programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.U.
P.) em Abril 1987" : PRINT : GOSUB 740
70 DIM T(16): DIM F(16)
80 DIM R(16): DIM CR(16): DIM K(16) :DIM X(16) : DIM Y(16)
90 FOR I=1 TO 16
100 READ F(I)
110 NEXT I
120 DATA 125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4000
130 REM # K(I)-CORRECCAO PARA CONVERTER PARA dB(A),segundo BERANEK #####
140 FOR I=1 TO 16
150 READ K(I)
160 NEXT I
170 DATA -16.1,-13.4,-10.9,-8.6,-6.6,-4.8,-3.2,-1.9,-0.8,0,0.6,1,1.2,1.3,1.2,1.0
180 REM # CR(I)-DEFINICAO DA CURVA DE REFERENCIA (NP-2073) #####
190 FOR I=1 TO 16
200 READ CR(I)
210 NEXT I
220 DATA 3,6,9,12,15,18,19,20,21,22,23,23,23,23,23
230 CLS
240 PRINT " introduza os valores de R:"
250 FOR I=1 TO 16
260 PRINT " R(;"F(I);")=";
270 INPUT R(I)
280 NEXT I
290 INPUT " Pretende corrigir estes dados (S/N)";W1$
300 IF W1$="S" OR W1$="s" THEN 250
310 CLS
320 PRINT" ESTOU A CALCULAR O Ia.AGUARDE POR FAVOR..."
330 P=0
340 FOR RO=-22 TO 90 STEP 2
350 N=0
360 FOR I=1 TO 16
370 M=RO+CR(I)-R(I)
380 IF M<=0 THEN 400
390 N=N+M
400 NEXT I
410 IF N>32 THEN 440
420 IF N<P THEN 440
430 P=N : Q=RO
440 NEXT RO
450 FOR ROO=(Q-1.9) TO (Q+1.9) STEP .1
460 N=0

```

```

470 FOR I=1 TO 16
480 M=ROD+CR(I)-R(I)
490 IF M<=0 THEN 510
500 N=N+M
510 NEXT I
520 IF N>32 THEN 550
530 IF N<P THEN 550
540 P=N : Q=ROD
550 NEXT ROD
560 IA1=Q+19
570 IA=CINT(IA1)
580 CLS : PRINT"DADOS E RESULTADO :" :PRINT" f(Hz)","R(dB)"
590 FOR I=1 TO 16
600 PRINT F(I),R(I)
610 NEXT I
620 PRINT : PRINT" Ia =";IA;" dB","(arredondado de";IA1;)"
630 GOSUB 740
640 GOTO 1260
650 LPRINT" DADOS E RESULTADO :"
660 LPRINT" f(Hz)","R(dB)"
670 FOR I=1 TO 16
680 LPRINT F(I),R(I)
690 NEXT I
700 LPRINT : LPRINT" Ia =";IA;" dB"
710 GOTO 1260
720 GOSUB 740
730 GOTO 1260
740 REM ##### SUBROTINA PARA ESPERA #####
750 PRINT:PRINT" < carregue em qualquer tecla para continuar >"
760 IF INKEY$ <>" " GOTO 780
770 GOTO 760
780 RETURN
790 REM ##### GRAFICO #####
800 CLS
810 GM=-10 : PM=120
820 FOR I=1 TO 16
830 G1=R(I) : P1=R(I)
840 IF G1<GM GOTO 860
850 GM=G1
860 IF P1>PM GOTO 880
870 PM=P1
880 NEXT I
890 PRINT : PRINT " OS VALORES EXTREMOS PARA R, obtidos no calculo, sao :";PM;",";GM
900 PRINT : PRINT " INDIQUE OS LIMITES MINIMO E MAXIMO PARA AS ORDENADAS DO GRAFICO"
910 INPUT " R (minimo)=";X3
920 INPUT " R (MAXIMO)=";X4
930 PRINT : PRINT : INPUT." Qual o tamanho para os pontos do grafico (1 a 8)"
;DP

```

```

940 X1=((11*X4)-X3)/10
950 X2=150/(X4-X3)
960 X5=CINT((2*X4+X3)/3)
970 X6=CINT((X4+2*X3)/3)
980 CLS
990 SCREEN 2
1000 LINE (41,10)-(633,170),,B
1010 FOR I=1 TO 16
1020 X(I)=50+(358*(LOG(F(I)/100))/LOG(10))
1030 Y(I)=((0-R(I))+X1)*X2
1040 NEXT I
1050 FOR I=1 TO 15
1060 LINE (X(I),Y(I))-(X(I+1),Y(I+1))
1070 CIRCLE (X(I),Y(I)),DP
1080 PSET(X(I),172):PSET(X(I)+1,172):PSET(X(I),173):PSET(X(I)+1,173)
1090 NEXT I
1100 CIRCLE (X(16),Y(16)),DP
1110 PSET(X(16),172):PSET(X(16)+1,172):PSET(X(16),173):PSET(X(16)+1,173)
1120 LOCATE 2,1 : PRINT "R(dB)"
1130 LOCATE 3,1 : PRINT X4;"-"
1140 LOCATE 3,8 : PRINT"Divisoria ";RD#
1150 LOCATE 9,1 : PRINT X5; "-"
1160 LOCATE 15,1 : PRINT X6;"-"
1170 LOCATE 21,1 : PRINT X3;"-"
1180 LOCATE 23,(X(1)*8/64-1) : PRINT "125           250           500           1
K           2K"
1190 LOCATE 23,76 : PRINT "f(Hz)"
1200 KEY OFF
1210 IF N=3 GOTO 1230
1220 LCOPY
1230 LOCATE 25,5
1240 GOSUB 750
1250 KEY ON
1260 CLS : PRINT : PRINT" Pretende : "
1270 PRINT" 1-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (no VISOR)"
1280 PRINT" 2-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (na IMPRESSORA)"
1290 PRINT" 3-GRAFICO (no VISOR)"
1300 PRINT" 4-GRAFICO (na IMPRESSORA)"
1310 PRINT" 5-INICIAR NOVO CALCULO"
1320 PRINT" 6-ABANDONAR"
1330 PRINT: INPUT " Qual a opcao desejada=";N
1340 IF N=1 THEN 580
1350 IF N=2 THEN 650
1360 IF N=3 THEN 800
1370 IF N=4 THEN 800
1380 IF N=5 THEN 230
1390 IF N=6 THEN 1420
1400 PRINT"ERRADO. TENDE DE NOVO."
1410 GOTO 1330
1420 PRINT" FIM !!!!"
1430 END

```

5.4 - PROGRAMA IP

```

5 REM #####          PROGRAMA IP          #####
10 REM ##### programa idealizado por Antonio Pedro (f.e.u.p.) #####
20 REM #####          marco 1987          #####
30 CLS : PRINT"*****"
*****"
40 PRINT: PRINT TAB(29);"PROGRAMA Ip"
50 PRINT : PRINT" DETERMINACAO DO Ip (NP-2073) - por bandas de 1/3 oitava de 125
a 4000 Hz"
60 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT" programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.U.
P.) em Abril 1987" : PRINT : GOSUB 780
70 DIM T(16): DIM F(16)
80 DIM LC(16): DIM CR(16): DIM K(16) :DIM X(16) : DIM Y(16)
90 FOR I=1 TO 16
100 READ F(I)
110 NEXT I
120 DATA 125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4000
130 REM # K(I)-CDRECCAO PARA CONVERTER PARA dB(A),segundo BERANEK #####
140 FOR I=1 TO 16
150 READ K(I)
160 NEXT I
170 DATA -16.1,-13.4,-10.9,-8.6,-6.6,-4.8,-3.2,-1.9,-0.8,0,0.6,1,1.2,1.3,1.2,1.0
180 REM # CR(I)-DEFINICAO DA CURVA DE REFERENCIA (NP-2073) #####
190 FOR I=1 TO 16
200 READ CR(I)
210 NEXT I
220 DATA 0,0,0,0,0,1,2,3,4,5,8,11,14,17,20,23
230 CLS : INPUT" REFERENCIA DO ELEMENTO";RE$: PRINT
240 PRINT " introduza os valores de LC:"
250 FOR I=1 TO 16
260 PRINT " LC(;"F(I);")=";
270 INPUT LC(I)
280 NEXT I
290 INPUT " Pretende corrigir estes dados (S/N)";W1$
300 IF W1$="S" OR W1$="s" THEN 250
310 CLS
320 PRINT" ESTOU A CALCULAR O Ip.AGUARDE POR FAVOR..."
330 P=0
340 FOR RO=-22 TO 99 STEP 2
350 N=0
360 FOR I=1 TO 16
370 M=LC(I)-RO+CR(I)
380 IF M<=0 THEN 400
390 N=N+M
400 NEXT I
410 IF N>32 THEN 440
420 IF N<P THEN 440
430 P=N : Q=RO
440 NEXT RO
450 FOR ROO=(Q-1.9) TO (Q+1.9) STEP .1
460 N=0
470 FOR I=1 TO 16
480 M=LC(I)-ROO+CR(I)

```

```

490 IF M<=0 THEN 510
500 N=N+M
510 NEXT I
520 IF N>32 THEN 550
530 IF N<P THEN 550
540 P=N : Q=RDD
550 NEXT RDD
560 IP1=Q-2
570 IP=CINT(IP1)
580 CLS : PRINT"DADOS E RESULTADO :" :PRINT" f(Hz)","LC(dB)"
590 FOR I=1 TO 16
600 PRINT F(I),LC(I)
610 NEXT I
620 PRINT : PRINT" Ip =";IP;" dB","(arredondado de";IP1;)"
630 GDSUB 780
640 GOTO 1300
650 LPRINT" DADOS E RESULTADO (Elemento-";RE#;)" : LPRINT : LPRINT
660 LPRINT" f(Hz)","LC(dB)"
670 FOR I=1 TO 16
680 LPRINT F(I),LC(I)
690 NEXT I
700 LPRINT : LPRINT" Ip =";IP;" dB" : LPRINT : LPRINT
710 LPRINT"-----"
720 LPRINT" LEGENDA :" : LPRINT" LC-nivel corrigido do ruido de percussao norm
alizado"
730 LPRINT" LC=LM-10LOG(10T/0.16V)+5 NP-669(1974)"
740 LPRINT" Ip-indice de isolamento sonoro a sons de percussao,NP-2073(1983)"
750 GOTO 1300
760 GDSUB 780
770 GOTO 1300
780 REM ##### SUBROTINA PARA ESPERA #####
790 PRINT : PRINT " < carregue em qualquer tecla para continuar >"
800 IF INKEY# <>" " GOTO 820
810 GOTO 800
820 RETURN
830 REM ##### GRAFICO #####
840 CLS
850 GM=-10 : PM=120
860 FOR I=1 TO 16
870 G1=LC(I) : P1=LC(I)
880 IF G1<GM GOTO 900
890 GM=G1
900 IF P1>PM GOTO 920
910 PM=P1
920 NEXT I
930 PRINT : PRINT " OS VALORES EXTREMOS PARA LC, obtidos no calculo, sao :";PM;"
,";GM
940 PRINT : PRINT " INDIQUE OS LIMITES MINIMO E MAXIMO PARA AS ORDENADAS DO GRAF
ICO"
950 INPUT " LC (minimo)=";X3
960 INPUT " LC (MAXIMO)=";X4

```

```

970 PRINT : PRINT : INPUT " Qual o tamanho para os pontos do grafico (1 a 8)"
;DF
980 X1=((11*X4)-X3)/10
990 X2=150/(X4-X3)
1000 X5=CINT((2*X4+X3)/3)
1010 X6=CINT((X4+2*X3)/3)
1020 CLS
1030 SCREEN 2
1040 LINE (41,10)-(633,170),,B
1050 FOR I=1 TO 16
1060 X(I)=50+(358*(LOG(F(I)/100))/LOG(10))
1070 Y(I)=((0-LC(I))+X1)*X2
1080 NEXT I
1090 FOR I=1 TO 15
1100 LINE (X(I),Y(I))-(X(I+1),Y(I+1))
1110 CIRCLE (X(I),Y(I)),DF
1120 LOCATE 22,(X(I)*8/64) : PRINT "!"
1130 NEXT I
1140 CIRCLE (X(16),Y(16)),DF
1150 LOCATE 22,(X(16)*8/64) : PRINT "!"
1160 LOCATE 2,1 : PRINT "LC(dB)"
1170 LOCATE 3,1 : PRINT X4;"-"
1180 LOCATE 9,1 : PRINT X5;"-"
1190 LOCATE 15,1 : PRINT X6;"-"
1200 LOCATE 21,1 : PRINT X3;"-"
1210 LOCATE 20,8 : PRINT"Elemento ";RE#
1220 LOCATE 23,(X(1)*8/64-1) : PRINT "125          250          500          1
K          2K"
1230 LOCATE 23,76 : PRINT "f(Hz)"
1240 KEY OFF
1250 IF N=3 GOTO 1270
1260 LCOPY
1270 LOCATE 25,5
1280 GOSUB 790
1290 KEY ON
1300 CLS : PRINT : PRINT" Pretende : "
1310 PRINT" 1-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (no VISOR)"
1320 PRINT" 2-LISTAGEM DOS DADOS E RESULTADO (na IMPRESSORA)"
1330 PRINT" 3-GRAFICO (no VISOR)"
1340 PRINT" 4-GRAFICO (na IMPRESSORA)"
1350 PRINT" 5-INICIAR NOVO CALCULO"
1360 PRINT" 6-ABANDONAR"
1370 PRINT: INPUT " Qual a opcao desejada=";N
1380 IF N=1 THEN 580
1390 IF N=2 THEN 650
1400 IF N=3 THEN 840
1410 IF N=4 THEN 840
1420 IF N=5 THEN 230
1430 IF N=6 THEN 1450
1440 PRINT"ERRADO. TENDE DE NOVO." : GOTO 1370
1450 PRINT" FIM !!!!"
1460 END

```

5.5 - PROGRAMA LDBA

```

10 REM ##### Programa idealizado por Antonio Pedro (FEUP) #####
20 REM ##### Marco 1987 #####
30 CLS
40 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT TAB(26);"PROGRAMA LDBA"
50 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT" CALCULO DO NIVEL SONORO L em dB(A)"
60 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT" programa idealizado por Antonio Pedro (
FEUP)"
70 GOSUB 880
80 DIM K(18) : DIM L(18) : DIM F(18)
90 CLS
100 PRINT : PRINT" Pretende utilizar : "
110 PRINT " 1-Calculo por bandas de oitava (125 a 4000 Hz;6 bandas)"
120 PRINT " 2-Calculo por bandas de 1/3 de oitava (125 a 4000 Hz;16 bandas)"
130 PRINT " 3-Calculo por bandas de 1/3 de oitava (100 a 5000 Hz;18 bandas)"
140 PRINT : INPUT" Qual a opcao desejada=";M
150 IF M=1 THEN 200
160 IF M=2 THEN 390
170 IF M=3 THEN 580
180 PRINT" Opcao fora dos parametros.Tente de novo:"
190 GOTO 140
200 N=6 :RESTORE 240
210 FOR I=1 TO N
220 READ F(I)
230 NEXT I
240 DATA 125,250,500,1000,2000,4000
250 REM ##### k(I)-correccao para converter para dB(A) #####
255 RESTORE 290
260 FOR I=1 TO N
270 READ K(I)
280 NEXT I
290 DATA -15.5,-8.5,-3,0,1,1
300 CLS
310 PRINT : PRINT" Indique os valores de L em dB/oitava : "
320 FOR I=1 TO N
330 PRINT"L(";F(I);")=";
340 INPUT L(I)
350 NEXT I
360 INPUT" pretende corrigir estes dados (S/N)";Q1$
370 IF Q1$="S" OR Q1$="s" THEN 320
380 GOTO 770
390 N=16 : RESTORE 430
400 FOR I=1 TO N
410 READ F(I)
420 NEXT I
430 DATA 125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4000
440 REM ##### k(I)-correccao para converter para dB(A) #####
445 RESTORE 480
450 FOR I=1 TO N
460 READ K(I)
470 NEXT I
480 DATA -16.1,-13.4,-10.9,-8.6,-6.6,-4.8,-3.2,-1.9,-0.8,0,0.6,1,1.2,1.3,1.2,1.0
490 CLS
500 PRINT : PRINT" Indique os valores de L em dB/tercos oitava : "
510 FOR I=1 TO N
520 PRINT"L(";F(I);")=";
530 INPUT L(I)
540 NEXT I
550 INPUT" pretende corrigir estes dados (S/N)";Q1$
560 IF Q1$="S" OR Q1$="s" THEN 510
570 GOTO 770
580 N=18 : RESTORE 620
590 FOR I=1 TO N
600 READ F(I)

```

```

610 NEXT I
620 DATA 100,125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4
000,5000
630 REM #### k(I)-correcao para converter para dB(A) #####
635 RESTORE 670
640 FOR I=1 TO N
650 READ K(I)
660 NEXT I
670 DATA -19.1,-16.1,-13.4,-10.9,-8.6,-6.6,-4.8,-3.2,-1.9,-0.8,0,0.6,1,1.2,1.3,1
.2,1.0,0.5
680 CLS
690 PRINT : PRINT " Indique os valores de L em dB/tercos oitava : "
700 FOR I=1 TO N
710 PRINT "L(";F(I);")=";
720 INPUT L(I)
730 NEXT I
740 INPUT "pretende corrigir estes dados (S/N)";Q1$
750 IF Q1$="S" OR Q1$="s" THEN 700
760 GOTO 770
770 B=0 :B1=0
780 FOR I=1 TO N
790 B=10^((L(I)+K(I))/10)
800 B1=B1+B
810 NEXT I
820 LDBA=10*LOG(B1)/LOG(10)
830 CLS
840 PRINT : PRINT " RESULTADO : "
850 PRINT " L=";LDBA;" dB(A)"
860 GOSUB 880
870 GOTO 930
880 REM #### SUBROTINA PARA ESPERA #####
890 PRINT : PRINT " < carregue em qualquer tecla para continuar >"
900 IF INKEY$ <>"" GOTO 920
910 GOTO 900
920 RETURN
930 CLS :PRINT : PRINT " Pretende : "
940 PRINT " 1-LISTAGEM DOS DADOS (no VISOR)"
950 PRINT " 2-LISTAGEM DOS DADOS (na IMPRESSORA)"
960 PRINT " 3-INICIAR NOVO CALCULO"
970 PRINT " 4-ABANDONAR"
980 PRINT : PRINT : INPUT " Qual a opcao desejada=";S
990 IF S=1 GOTO 1070
1000 IF S=2 GOTO 1200
1010 IF S=3 GOTO 90
1020 IF S=4 GOTO 1050
1030 PRINT : PRINT "errado ! TENTE DE NOVO."
1040 GOTO 980
1050 CLS : PRINT : PRINT " FIM !!!!!"
1060 END
1070 CLS : PRINT " LISTAGEM DE DADOS : "
1080 PRINT " f(Hz)", "L(dB)"
1090 FOR I=1 TO N
1100 PRINT F(I),L(I)
1110 NEXT I
1120 PRINT : PRINT :PRINT TAB(5);" L=";LDBA;" dB(A)"
1160 GOSUB 880
1170 GOTO 930
1200 LPRINT " LISTAGEM DE DADOS E RESULTADO : "
1205 LPRINT : LPRINT " f(Hz)", "L(dB)"
1210 FOR I=1 TO N
1215 LPRINT F(I),L(I)
1220 NEXT I
1230 LPRINT : LPRINT : LPRINT " L=";LDBA;" dB(A)"
1240 GOTO 930

```

5.6 - PROGRAMA MULTIGRA

```

10 REM #####          MULTIGRAFICO          #####
20 REM ### programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.U.P.) em Abril 1987 ###
30 DIM F(16) : DIM R(16) : DIM X(16) : DIM Y(16) : DIM R2(16) : DIM R1(16)
40 DIM R3(16) : DIM R4(16)
50 CLS : PRINT " ***** MULTIGRAFICO f/R (bandas de 1/3 oitava-125 a 4000 Hz)
*****"
60 FOR I=1 TO 16
70 READ F(I)
80 NEXT I
90 DATA 125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,1250,1600,2000,2500,3150,4000
100 PRINT : PRINT : PRINT " programa idealizado por Antonio Pedro (F.E.U.P.) e
m Abril 1987"
110 PRINT : PRINT : INPUT " Quantos GRAFICOS pretende desenhar (1/2/3/4)";NG
120 IF NG>4 OR NG<1 GOTO 110
130 PRINT : PRINT : INPUT " TITULO DO GRAFICO";RD$
140 INPUT " NOME DOS VALORES DAS ORDENADAS (5 simbolos),p.ex.:R(dB) ";R$
150 REM ###          introducao das ordenadas          #####
160 FOR I=1 TO 16
170 PRINT " R1(";F(I);")=";
180 INPUT R1(I)
190 NEXT I
200 INPUT " pretende corrigir os dados (S/N)";Q1$
210 IF Q1$="S" OR Q1$="s" GOTO 160
220 IF NG=1 GOTO 370
230 FOR I=1 TO 16
240 PRINT " R2(";F(I);")=";
250 INPUT R2(I)
260 NEXT I
270 INPUT " pretende corrigir os dados (S/N)";Q2$
280 IF Q2$="S" OR Q2$="s" GOTO 230
290 IF NG=2 GOTO 370
300 FOR I=1 TO 16 : PRINT " R3(";F(I);")="; : INPUT R3(I) : NEXT I
310 INPUT " pretende corrigir os dados (S/N)";Q3$
320 IF Q3$="S" OR Q3$="s" GOTO 300
330 IF NG=3 GOTO 370
340 FOR I=1 TO 16 : PRINT " R4(";F(I);")="; : INPUT R4(I) : NEXT I
350 INPUT " pretende corrigir os dados (S/N)";Q4$
360 IF Q4$="S" OR Q4$="s" GOTO 340
370 GM=-10 : PM=120
380 FOR I=1 TO 16
390 G1=R1(I) : P1=R1(I)
400 IF G1<GM GOTO 420
410 GM=G1
420 IF P1>PM GOTO 440
430 PM=P1
440 NEXT I
450 IF NG=1 GOTO 670
460 FOR I=1 TO 16
470 G1=R2(I) : P1=R2(I)
480 IF G1<GM GOTO 500
490 GM=G1
500 IF P1>PM GOTO 520
510 PM=P1
520 NEXT I
530 IF NG=2 GOTO 670
540 FOR I=1 TO 16 : G1=R3(I) : P1=R3(I)
550 IF G1<GM GOTO 570
560 GM=G1
570 IF P1>PM GOTO 590
580 PM=P1
590 NEXT I
600 IF NG=3 GOTO 670
610 FOR I=1 TO 16 : G1=R4(I) : P1=R4(I)
620 IF G1<GM GOTO 640
630 GM=G1

```

```

640 IF P1>PM GOTO 660
650 FM=P1
660 NEXT I
670 CLS: PRINT : PRINT" PRETENDE:" : PRINT"      1- GRAFICO (no VISOR)"
680 PRINT"      2- GRAFICO (na IMPRESSORA)"
690 PRINT"      3- INICIAR NOVO GRAFICO"
700 PRINT"      4- ABANDONAR"
710 INPUT" Escolha a opcao";L
720 IF L=1 GOTO 770
730 IF L=2 GOTO 770
740 IF L=3 GOTO 110
750 IF L=4 GOTO 1330
760 PRINT" opcao fora dos parametros.TENTE DE NOVO !" : GOTO 710
770 CLS : PRINT : PRINT " OS VALORES EXTREMOS PARA R, obtidos no calculo, sao : "
;FM;" ,";GM
780 PRINT : PRINT " INDIQUE OS LIMITES MINIMO E MAXIMO PARA AS ORDENADAS DO GRAF
ICO"
790 INPUT " R (minimo)=";X3
800 INPUT " R (MAXIMO)=";X4
810 PRINT : PRINT : INPUT " Qual o tamanho para os pontos do grafico (1 a 8)";DP
820 INPUT " NUMERO DE DIVISOES DAS ORDENADAS (3 ou 4)=";N
830 IF N=3 THEN 860
840 IF N=4 THEN 1350
850 PRINT" opcao fora dos parametros.TENTE DE NOVO !" : GOTO 820
860 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R1(I) : NEXT I
870 CLS : SCREEN 2
880 GOSUB 910
890 GOTO 1170
900 REM ##### SUBROTINA PARA GRAFICO #####
910 X1=((11*X4)-X3)/10
920 X2=150/(X4-X3)
930 X5=CINT((2*X4+X3)/3)
940 X6=CINT((X4+2*X3)/3)
950 LINE (41,10)-(633,170),,B
960 FOR I=1 TO 16
970 X(I)=50+(358*(LOG(F(I)/100))/LOG(10))
980 Y(I)=((0-R(I))+X1)*X2
990 NEXT I
1000 FOR I=1 TO 15
1010 LINE (X(I),Y(I))-(X(I+1),Y(I+1))
1020 CIRCLE (X(I),Y(I)),DP
1030 PSET (X(I),172):PSET(X(I)+1,172):PSET(X(I),173):PSET(X(I)+1,173)
1040 NEXT I
1050 CIRCLE (X(16),Y(16)),DP
1060 PSET(X(16),172):PSET(X(16)+1,172):PSET(X(16),173):PSET(X(16)+1,173)
1070 LOCATE 2,1 : PRINT R#
1080 LOCATE 3,1 : PRINT X4;"-"
1090 LOCATE 3,8 : PRINT RD#
1100 LOCATE 9,1 : PRINT X5;"-"
1110 LOCATE 15,1 : PRINT X6;"-"
1120 LOCATE 21,1 : PRINT X3;"-"
1130 LOCATE 23,(X(1)*8/64-1) : PRINT "125      250      500      1
K      2K"
1140 LOCATE 23,76 : PRINT "f(Hz)"
1150 RETURN
1160 REM ##### FIM SUBROTINA #####
#
1170 IF NG=1 GOTO 1260
1180 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R2(I) : NEXT I
1190 GOSUB 910
1200 IF NG=2 GOTO 1260
1210 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R3(I) : NEXT I
1220 GOSUB 910
1230 IF NG=3 GOTO 1260
1240 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R4(I) : NEXT I

```

```

1250 GOSUB 910
1260 KEY OFF
1270 IF L=1 GOTO 1290
1280 LCOPY
1290 LOCATE 25,5
1300 GOSUB 1850
1310 KEY DN
1320 GOTO 670
1330 PRINT" fim !!!!": END
1340 REM ### GRAFICO com 4 divisoes na escala das ordenadas #####
1350 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R1(I) : NEXT I
1360 CLS : SCREEN 2
1370 GOSUB 1390
1380 GOTO 1680
1390 REM #### SUBROTINA PARA GRAFICO (4 div. nas ordenadas) #####
1400 X1=((11*X4)-X3)/10
1410 X2=150/(X4-X3)
1420 X5=CINT((3*X4+X3)/4)
1430 X6=CINT((X4+X3)/2)
1440 X7=CINT((X4+3*X3)/4)
1450 LINE (41,10)-(633,170),,B
1460 FOR I=1 TO 16
1470 X(I)=50+(358*(LOG(F(I)/100))/LOG(10))
1480 Y(I)=((0-R(I))+X1)*X2
1490 NEXT I
1500 FOR I=1 TO 15
1510 LINE (X(I),Y(I))-(X(I+1),Y(I+1))
1520 CIRCLE (X(I),Y(I)),DP
1530 PSET(X(I),172):PSET(X(I)+1,172):PSET(X(I),173):PSET(X(I)+1,173)
1540 NEXT I
1550 CIRCLE (X(16),Y(16)),DP
1560 PSET(X(16),172):PSET(X(16)+1,172):PSET(X(16),173):PSET(X(16)+1,173)
1570 LOCATE 2,1 : PRINT R#
1580 LOCATE 3,1 : PRINT X4;"-"
1590 LOCATE 3,8 : PRINT RD#
1600 LOCATE 8,1 : PRINT X5;"-"
1610 LOCATE 12,1 : PRINT X6;"-"
1620 LOCATE 16,1 : PRINT X7;"-"
1630 LOCATE 21,1 : PRINT X3;"-"
1640 LOCATE 23,(X(1)*8/64-1) : PRINT "125          250          500          1
K          2K"
1650 LOCATE 23,76 : PRINT "f(Hz)"
1660 RETURN
1670 REM ##### FIM SUBROTINA #####
1680 IF NG=1 GOTO 1770
1690 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R2(I) : NEXT I
1700 GOSUB 1400
1710 IF NG=2 GOTO 1770
1720 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R3(I) : NEXT I
1730 GOSUB 1400
1740 IF NG=3 GOTO 1770
1750 FOR I=1 TO 16 : R(I)=R4(I) : NEXT I
1760 GOSUB 1400
1770 KEY OFF
1780 IF L=1 GOTO 1800
1790 LCOPY
1800 LOCATE 25,5
1810 GOSUB 1850
1820 KEY DN
1830 GOTO 670
1840 REM ##### SUBROTINA PARA ESPERA #####
1850 PRINT : PRINT" <carregue em qualquer tecla para continuar>"
1860 IF INKEY$ <>" " GOTO 1880
1870 GOTO 1860
1880 RETURN

```

ERRATA

página	linha	onde se lê	leia-se
46	2	Fig. 10	Fig. 9
58	8	maio	maior
65	16	asimétrica	assimétrica
68	22	desenvolver e	desenvolver e obter
69	5-6	considerados	consideradas
95	19	anti-Simétrica	anti-simétrica
122	20-21	permitir-nos-à	permitir-nos-á
122	22	dispôr	dispor
128	16	três	dois
137	25	ínicio	início
138	16	3.96 m	3.46 m
162	3	deslizar-se-à	deslizar-se-á
163	7-8	proceder-se-à	proceder-se-á
164	14	dispôr	dispor
201	4	pudémos	pudemos
203	29	1250 Hz	1000 Hz
219	18	por obtidos	por nós obtidos
240	26	repectiva	respectiva



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000084032