

CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE UM SISTEMA DE DIVISÓRIAS LIGEIRAS A BASE DE ESPUMAS DE POLIURETANO

JOÃO DIRK BARON MARINHO DE SOUSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

FEVEREIRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



mipec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer a todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização desta Tese de Mestrado, especialmente ao meu orientador Professor Doutor Rui Calejo, por todo o apoio a nível de conhecimentos bem como a disponibilidade. Também os meus colegas e amigos Agostinho de Sousa Coutinho, Gonçalo Poças Martins e Adriano Gonçalves.

Quero destacar ainda o Eng.^o Tiago Ferreira da empresa Sopsec bem como a Eng.^a Eduarda Silva pela disponibilidade e apoio prestados, mostrando-se sempre dispostos a partilhar a sua experiência.

Desejo também agradecer à empresa Flex 2000 pelos apoios fornecidos, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

RESUMO

A crescente consciencialização da população para o problema do ruído levou a que se assista nos dias de hoje a uma maior preocupação com os requisitos acústicos dos edifícios, surgindo novas soluções para ir de encontro às necessidades dos utilizadores

Se por um lado os elementos duplos em gesso cartonado são uma forma muito eficaz de executar divisórias nos espaços interiores, já a aplicação de paramentos em gesso cartonado sobre paredes que não verificam os requisitos actuais é uma forma simples e com muito potencial para resolver o problema do reacondicionamento de edifícios.

Para melhorar o desempenho de elementos duplos relativamente ao isolamento sonoro a sons de transmissão aérea, é comum a utilização de material absorvente entre os panos dos elementos duplos. É neste âmbito que surgem as espumas de aglomerado de poliuretano reciclado. O facto de ser um produto resultante de resíduos de produção, de fácil utilização e, em comparação com materiais absorventes como a lã de rocha, bastante limpo, torna esta solução muito atraente para a aplicação em divisórias duplas.

O objectivo deste trabalho é o de caracterizar o comportamento acústico das soluções descritas, tendo como base a transmissão a sons aéreos.

Os resultados obtidos demonstram que, quer para divisórias leves, quer para elementos de alvenaria com um painel em gesso cartonado, o isolamento sonoro aumenta bastante com a utilização deste tipo de espumas no seu interior. Para as densidades ensaiadas (acima de 60 kg/m^3), constatou-se que a espessura de espuma se revela o factor preponderante na performance do elemento relativamente ao isolamento sonoro a sons de transmissão aérea, sendo que R aumenta com a espessura.

Concluiu-se, também, que não existe um modelo valido para todos os casos, mas que a adaptação dos modelos existentes através da aplicação de coeficientes de correcção baseados em análises estatísticas, representa uma abordagem muito útil no melhoramento da precisão dos métodos actualmente aplicados.

PALAVRAS-CHAVE: acústica, isolamento sonoro, espumas de poliuretano, partição leve

ABSTRACT

Increased demands regarding noise control in dwellings have led to the development of new solutions.

Lightweight materials such as gypsum cardboard are a very effective way of creating partitions inside of buildings. Using this lightweight material together with existing masonry walls that do not verify today's requirements is a good solution to apply in old buildings.

In order to improve sound insulation of double leaf partitions made of lightweight materials it is common to use absorbing materials placed in the cavity to reduce the effect of sound transmission between leafs. Polyurethane foam is one of those materials.

The focus of this study will be the study of acoustical characteristics of the mentioned partitions regarding airborne sound insulation.

Results show that for the mentioned partitions there will be an increase in sound insulation when using polyurethane foams. We can also conclude that for tested densities (above 60 kg/m^3) the density of the foam plays an important role in increasing sound insulation.

The used prediction methods revealed to be insufficient for all situations. From the results obtained we concluded that there isn't a method applicable to all cases. Instead, the correction of existing theory using experimental data revealed to be a good way of improving prediction method used today.

KEYWORDS: acoustics, sound insulation, polyurethane foam, lightweight partition

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 BREVE HISTÓRIA DA ACÚSTICA	5
2.3 A ACÚSTICA NOS NOSSOS DIAS	7
2.4 TECNOLOGIA CONSTRUTIVA	8
2.5 ENQUADRAMENTO LEGAL: REGULAMENTAÇÃO EM PORTUGAL.....	10
2.5.1 EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DA LEGISLAÇÃO RELATIVA À ACÚSTICA	10
2.5.2 REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDIFÍCIOS	12
3 TEORIA DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE TRANSMISSÃO AÉREA	14
3.1 INTRODUÇÃO.....	14
3.2 NOÇÕES GERAIS.....	14
3.2.1 ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA – R	14
3.2.2 REDUÇÃO SONORA – R_w	17
3.3 ISOLAMENTO SONORO	18
3.3.1 ELEMENTOS SIMPLES	19
3.3.2 ELEMENTOS DUPLOS.....	23
3.4 NORMALIZAÇÃO	26
4 METODOLOGIA ADOPTADA	30
4.1 INTRODUÇÃO	30
4.2 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS DE ENSAIO	30
4.2.1 TIPO 1: GESSO-ESPUMA-GESSO	30
4.2.2 TIPO 2: GESSO-ESPUMA-GESSO COM PLACA DUPLA.....	32
4.2.3 TIPO 3: ALVENARIA-ESPUMA-GESSO COM MONTANTES	33

4.2.4	TIPO 4: ALVENARIA-ESPUMA-GESSO COLADO	34
4.3	MODELOS DE PREVISÃO	36
4.3.1	MÉTODO DE SHARP	36
4.3.2	MÉTODO DE MEISSER	39
4.3.3	INSUL	41
4.4	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	41
4.4.1	CÂMARA REVERBERANTE R1	41
4.4.2	PROCEDIMENTO	42
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
5.1	INTRODUÇÃO	44
5.2	ELEMENTOS TIPO 1 E 2	44
5.2.1	PROPOSTA DE MODELO DE ESTIMAÇÃO	47
5.3	ELEMENTOS TIPO 3 E 4	52
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE O PRODUTO EM ESTUDO E OUTRAS SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO	55
5.4.1	DIVISÓRIAS EM GESSO CARTONADO	55
5.4.2	DIVISÓRIAS EM ALVENARIA E GESSO CARTONADO	58
6	CONCLUSÃO GERAL E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	60
7	BIBLIOGRAFIA	62

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - DIAGRAMA REPRESENTATIVO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
FIGURA 2.1 - APLICAÇÃO DE PLACAS DE GESSO CARTONADO	8
FIGURA 2.2 – MONTANTES DE SUPORTE DAS DIVISÓRIAS EM GESSO CARTONADO	9
FIGURA 2.3 – ESQUEMA DE LIGAÇÃO DA DIVISÓRIA AO TECTO	9
FIGURA 2.4 - ESPUMA DE POLIURETANO AGLOMEX ACOUSTIC.....	10
FIGURA 3.1 - MEDIÇÃO EM LABORATÓRIO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO R [11].....	15
FIGURA 3.2 - TRANSMISSÃO DE ENERGIA SONORA ATRAVÉS DE UM ELEMENTO	16
FIGURA 3.3 - CURVA DE REFERÊNCIA DA NORMA NP EN ISO 717-1	17
FIGURA 3.4 - EXEMPLO DE AJUSTE DE ACORDO COM A NORMA NP EN ISO 717-1	18
FIGURA 3.5 - EFEITO DE COINCIDÊNCIA [14].....	20
FIGURA 3.6 - COMPORTAMENTO TEÓRICO RELATIVO AO ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS DE UM ELEMENTO SIMPLES EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA [14]	23
FIGURA 3.7 - COMPORTAMENTO TEÓRICO RELATIVO AO ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS DE UM ELEMENTO DUPLO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.....	26
FIGURA 3.8 - ORGANOGRAMA DAS REFERÊNCIAS NORMATIVAS	27
FIGURA 4.1 – ESQUEMA CONSTRUTIVO DA CONSTRUÇÃO TIPO 1	31
FIGURA 4.2 – CONSTRUÇÕES TIPO 1 E 2 MONTADAS NA CÂMARA REVERBERANTE.....	32
FIGURA 4.3 – PORMENOR DOS MONTANTES DAS CONSTRUÇÕES TIPO 1 E 2	32
FIGURA 4.4 – ESQUEMA CONSTRUTIVO DA CONSTRUÇÃO TIPO 2	33
FIGURA 4.5 - ESQUEMA CONSTRUTIVO DA CONSTRUÇÃO TIPO 3	34
FIGURA 4.6 - PORMENOR DA MONTAGEM DA CONSTRUÇÃO TIPO 3.....	34
FIGURA 4.7 - ESQUEMA CONSTRUTIVO DA CONSTRUÇÃO TIPO 4	35
FIGURA 4.8 - PORMENOR DA COLAGEM DAS PLACAS DE GESSO PARA A CONSTRUÇÃO TIPO 4	35
FIGURA 4.9 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MÉTODO DE SHARP [5].....	37
FIGURA 4.10 - FOLHA DE CÁLCULO PARA O MÉTODO DE SHARP	37
FIGURA 4.11 - FOLHA DE CÁLCULO PARA O MÉTODO DE MEISSER.....	40
FIGURA 4.12 - DIMENSÕES EM PLANTA DA CÂMARA REVERBERANTE R1	42
FIGURA 5.1 - RESULTADOS DE R POR BANDAS DE FREQUÊNCIA DE 1/3 DE OITAVA PARA UM ELEMENTO TIPO 1 COM UMA ESPUMA 60.30	45
FIGURA 5.2 - RESULTADOS DE R POR BANDAS DE FREQUÊNCIA DE 1/3 DE OITAVA PARA UM ELEMENTO TIPO 2 COM UMA ESPUMA 60.30	46
FIGURA 5.3 - LIMITE MÍNIMO PARA OS VALORES OBTIDOS PELO MÉTODO DE SHARP.....	48
FIGURA 5.4 - LIMITE MÍNIMO DO MÉTODO DE SHARP APLICADO AOS VALORES MEDIDOS.....	48

FIGURA 5.5 - SHARP MODIFICADO VERSUS SHARP ORIGINAL EM ELEMENTOS TIPO 1 COM ESPUMAS DE 30 MM	49
FIGURA 5.6 - GRÁFICO COMPARATIVO DE UM ELEMENTO DUPLO EM GESSO CARTONADO SEM ESPUMA.....	49
FIGURA 5.7 - MÉTODO DE SHARP ADAPTADO	51
FIGURA 5.8 - VALORES DOS ENSAIOS PARA ELEMENTOS DO TIPO 3 COM ESPUMAS DE 60 MM DE ESPESSURA.....	52
FIGURA 5.9 - VALORES DOS ENSAIOS PARA ELEMENTOS DO TIPO 4 COM ESPUMAS DE 60 MM DE ESPESSURA	53
FIGURA 5.10 - COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE SHARP E OS VALORES ENSAIADOS PARA ELEMENTOS TIPO 3	53
FIGURA 5.11 - COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE SHARP E OS VALORES ENSAIADOS PARA ELEMENTOS TIPO 4	54
FIGURA 5.12 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREVISTOS PELO MÉTODO DE MEISSER PARA UM ELEMENTO TIPO 3 COM ESPUMAS 60.30	55
FIGURA 5.13 – DETALHE EM PLANTA DAS DIVISÓRIAS “PLACOSTIL”	56
FIGURA 5.14 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS "PLACOSTIL" E ELEMENTOS TIPO 2	57
FIGURA 5.15 - DETALHE DA DIVISÓRIA PLADUR ACÚSTICO 122/600	57
FIGURA 5.16 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS "PLACOSTIL" E ELEMENTOS TIPO 2	59

ÍNDICE DOS QUADROS

QUADRO 2.1 - DISPOSIÇÕES LEGAIS RELATIVAMENTE AO ISOLAMENTO SONORO PARA EDIFÍCIOS HABITACIONAIS E MISTOS	13
QUADRO 2.2 - CRITÉRIOS ALTERADOS PELO D.L. 9/2007	13
QUADRO 4.1 - CONFIGURAÇÕES ENSAIADAS PARA A CONSTRUÇÃO TIPO 1	31
QUADRO 4.2 - CONFIGURAÇÕES ENSAIADAS PARA A CONSTRUÇÃO TIPO 2	32
QUADRO 4.3 - CONFIGURAÇÕES ENSAIADAS PARA A CONSTRUÇÃO TIPO 3	33
QUADRO 4.4 - CONFIGURAÇÕES ENSAIADAS PARA A CONSTRUÇÃO TIPO 4	35
QUADRO 4.5 - PROPRIEDADES DOS PANOS DAS AMOSTRAS TESTADAS	36
QUADRO 5.1 - VALORES DE R_w PARA UM ELEMENTO DO TIPO 1 E UMA ESPUMA 60.30	46
QUADRO 5.2 - VALORES DE R_w PARA UM ELEMENTO DO TIPO 2 E UMA ESPUMA 60.30	47
QUADRO 5.3 - VALORES DE R_w ENSAIADOS E OBTIDOS PELO MÉTODO DE SHARP COM AS ALTERAÇÕES PROPOSTAS	50
QUADRO 5.4 - COEFICIENTES DO MÉTODO DE SHARP ADAPTADO	52
QUADRO 5.5 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMA "PLADUR ACÚSTICO 122/600" E ELEMENTOS TIPO 2	58

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área de absorção sonora equivalente (m^2)
c_0	Celeridade (m/s)
τ	Coeficiente de transmissão
ρ	Densidade (kg/m^3)
h	Espessura (m)
d	Espessura da caixa-de-ar (m)
d	Espessura do elemento (m)
η	Factor de perdas do material
σ	Factor de radiação do elemento
f	Frequência (Hz)
ω	Frequência angular (rad/s)
f_c	Frequência crítica (Hz)
f_n	Frequência de ressonância de cavidade (Hz)
f_0	Frequência de ressonância do sistema para elementos duplos (Hz)
f_s	Frequência limite de vibração por ondas de corte (Hz)
$D_{n,w}$	Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado (dB)
R	Índice de redução sonora (dB)
I_i	Intensidade sonora incidente (W/m^2)
I_t	Intensidade sonora transmitida (W/m^2)
ρ_0	Massa específica do ar (kg/m^3)
m	Massa superficial (kg/m^2)
E	Modulo de Young (Pa)
k	Número de onda (m^{-1})
W_r	Potência sonora (W)
p_s	Pressão sonora (Pa)
m'	Produto da massa superficial dos dois panos do elemento construtivo
R_w	Redução sonora (dB)
<i>RGR</i>	Regime Geral Sobre o Ruído
<i>RLPS</i>	Regime Legal Sobre a Poluição Sonora
<i>RRAE</i>	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
S	Superfície (m^2)
T	Tempo de reverberação (s)
c_L	Velocidade de propagação das ondas longitudinais no meio (m/s)
V	Volume (m^3)

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

A crescente consciencialização da população para o problema do ruído levou a que, nos dias de hoje, se assista a uma maior preocupação com os requisitos acústicos dos edifícios. Isto implica a necessidade de caracterizar as soluções construtivas, tanto as já existentes, como as que vão surgindo com os avanços tecnológicos.

A utilização de divisórias duplas leves em gesso cartonado na construção tornou-se uma solução muito atraente, sendo uma tecnologia já aplicada em grande escala nos edifícios comerciais e de escritórios, apresentando também um enorme potencial de aplicação na habitação. Outra utilização interessante é a da correcção de divisórias já existentes, que não se adequam às necessidades actuais (adicionando um pano em gesso a uma parede de alvenaria para melhorar o isolamento sonoro, por exemplo).

Este tipo de soluções são fáceis de aplicar, de transportar e limpas, poupando em tempo e mão-de-obra. Para além disso apresentam uma espessura final reduzida permitindo um maior aproveitamento do espaço interior para além da flexibilidade que proporcionam, sendo fácil a alteração das divisórias se necessário. No entanto estes elementos, devido à sua baixa massa superficial, terão à partida dificuldades em garantir um bom isolamento sonoro entre diferentes divisões. Como tal, recorre-se normalmente a elemento duplos, com uma caixa-de-ar, sendo esta configuração claramente superior relativamente a elementos simples.

Os elementos duplos apresentam normalmente caixas-de-ar bastante reduzidas devido a limitações arquitectónicas. Isto irá facilitar a transmissão das ondas sonoras através do meio elástico existente entre os panos (o ar) da divisória prejudicando a redução sonora. Como tal é comum a utilização de material absorvente entre os panos dos elementos duplos. É neste âmbito que surgem as espumas de poliuretano reciclado, que para além de ser um produto ecológico de fácil fabrico permite ainda obter várias densidades e espessuras, sendo limpo (não deixando resíduos) e de fácil utilização.

O desafio proposto na presente dissertação é o de estudar a eficiência relativamente ao isolamento sonoro a sons aéreos de divisórias, mais especificamente em soluções de paredes duplas executadas utilizando placas de gesso cartonado – tanto exclusivamente como em conjunção com alvenaria – com espumas de poliuretano aplicadas na caixa-de-ar, caracterizando o comportamento em função das características das espumas utilizadas: a densidade e a espessura. Será também analisada a precisão dos modelos de cálculo actualmente existentes, relativamente às amostras ensaiadas.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho divide-se em seis capítulos e anexos, sendo constituído por quatro partes fundamentais. Em primeiro lugar será feita uma introdução ao tema, começando pelo estado do conhecimento da acústica, descrevendo a tecnologia construtiva relativa ao objecto de estudo e finalmente realizando o enquadramento legal – em Portugal – relativamente ao isolamento sonoro a sons aéreos. A segunda parte refere-se à teoria do isolamento sonoro a sons aéreos, a terceira explica como foi abordado o problema da caracterização do objecto de estudo e a quarta consiste na análise e discussão dos resultados obtidos. Resta referir que este trabalho se baseia no método experimental, sendo analisadas um grande número de soluções construtivas.

O capítulo 1 é uma introdução geral ao tema, onde são descritos os objectivos do trabalho e a sua estrutura.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte da acústica, descrita a tecnologia construtiva relativa às divisórias leves à base de espumas de poliuretano e finalmente é abordada a legislação, focando o isolamento sonoro a sons aéreos.

O capítulo 3 apresenta a teoria utilizada na obtenção dos descritores relativos ao isolamento sonoro a sons de transmissão aérea necessários para caracterização do objecto de estudo do presente trabalho, bem como as normas aplicáveis nos ensaios em laboratório.

O capítulo 4 diz respeito à metodologia adoptada, descrevendo os métodos utilizados na caracterização das espumas aplicadas a partições leves. São descritos os modelos teóricos de previsão bem como os procedimentos relativos aos ensaios em laboratório.

O capítulo 5 apresenta a análise dos resultados obtidos, bem como a validação dos métodos de cálculo utilizados. É também proposta uma alteração a um dos métodos, baseada em dados experimentais, de modo os valores calculados aos valores ensaiados.

O capítulo 6 apresenta as conclusões gerais, propondo também temas de desenvolvimento para futuros trabalhos.

Para além dos capítulos, este trabalho apresenta ainda dois anexos (A e B).

O anexo A apresenta os espectros da redução sonora dos diversos elementos construtivos ensaiados (ordenados consoante o tipo de elemento ensaiado), ordenados por densidade e espessura das espumas utilizadas, bem como a comparação entre as curvas obtidas através dos ensaios e as calculadas pelos modelos descritos no capítulo 4. Este anexo serve de base para o capítulo 5, referente à análise dos resultados.

O anexo B, apresentado em formato digital, apresenta os boletins de ensaio referentes aos elementos testados, bem como uma cópia deste documento.

Seguidamente apresenta-se um diagrama resumo da estrutura da dissertação

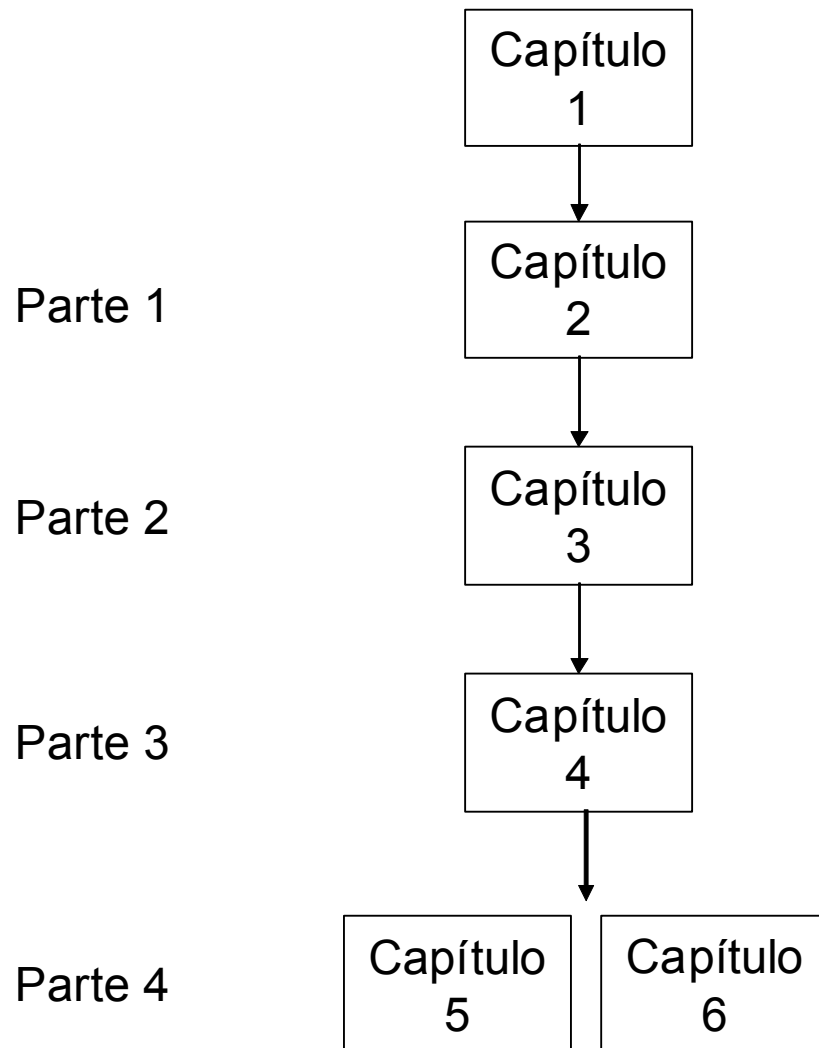


Figura 1.1 - Diagrama representativo da estrutura da dissertação

2

ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se resumir a evolução conhecimento na área da acústica até à actualidade, focando com mais atenção o isolamento sonoro a sons de transmissão aérea de elementos construtivos. Para atingir este objectivo é importante, por um lado, enquadrar historicamente a acústica – como ciência – e por outro descrever a tecnologia construtiva em análise – as espumas de polietileno aplicadas em divisórias leves – em termos económicos e, tratando se de um produto reciclado, em termos ambientais.

Será também realizado um enquadramento legal, descrevendo a evolução das exigências relativas ao isolamento sonoro a sons de transmissão aérea, de modo a demonstrar a crescente necessidade de conhecer o comportamento dos diferentes elementos construtivos.

2.2 BREVE HISTÓRIA DA ACÚSTICA

Desde cedo a acústica teve uma ligação com a construção e a arquitectura, no entanto com noções muito simples e empíricas.

Foi no período grego que surgiram os primeiros anfiteatros exteriores. Devido à direccionalidade da voz humana houve a percepção de que a distribuição da audiência por círculos concêntricos seria a forma mais eficiente de aproximar o maior número de pessoas à área central [14].

Os gregos antigos possuíam, também, alguns conhecimentos científicos sobre acústica, ainda que estes fossem muito rudimentares. Pitágoras iniciou a matematização do som (570-497), estudando a relação entre o comprimento de cordas em vibração e o som por elas produzido, concluindo que quando suas cordas diferentes fossem tocadas simultaneamente, o som produzido seria agradável ao ouvido se a relação entre os seus comprimentos fosse 2:1 [2].

Foi também na Grécia antiga que pela primeira vez se admitiu que o som seria produzido pelo movimento de corpos, transmitido pelo ar (sendo Aristóteles (384-322 a.C.) um dos primeiros a tentar explicar este fenómeno) através da vibração, ainda indefinida naquela altura, do mesmo, atingindo o ouvido, causando assim a percepção do som [2]. No entanto as suas noções eram vagas e foram facilmente refutadas [21].

Uma contribuição relevante para a acústica foi a de Marcus Vitruvius Pollio (27 a.C.), um arquitecto romano, que sugere em “De Architectura” várias soluções com vista ao melhoramento do som em teatros, sendo que aparecem na sua obra referências a dispositivos semelhantes a ressoadores.

No século XVII, Galileu Galilei (1564-1642), dedicou parte da sua vida a estudar o movimento oscilatório. Nesta época, várias pessoas se reuniam para discutir novos assuntos, dando origem às

chamadas academias científicas. Destas, importa realçar a Academia del Cimento, que se dedicou a diversos problemas formulados por Galileu, tal como a determinação da velocidade do som, já realizada por Mersenne[2].

Durante o período renascentista esta teoria foi de novo discutida através do cientista e filósofo francês Gassendi (1592-1655), atribuindo a propagação do som como uma emissão de pequenas partículas invisíveis [21].

Surgiram então as primeiras experiências para verificar a validade deste princípio: o jesuíta Athanasius Kircher (1602-1680) e Otto von Guericke (1602-1686) realizaram experiências distintas para avaliar a propagação do som no vácuo. Ambos chegaram a conclusão que o ar não seria necessário para a propagação do som [21]. No entanto o rigor científico das experiências executadas não foi, com certeza, o adequado, não existindo provavelmente o cuidado necessário para evitar a transmissão através das envolventes do dispositivo onde foram realizadas as experiências. Em 1660, o cientista inglês Robert Boyle (1627-1691) repetiu a experiência concluindo finalmente que o ar é um meio necessário para a propagação do som, mas não o único [21].

Sabendo-se que o som é de facto uma onda e que necessita de um meio para se propagar, surgiu a questão da velocidade com que se transmite. Marin Mersenne (1588-1648), um monge francês determinou a velocidade do som através do tempo de retorno de um eco

Já em 1635, Gassendi haveria executado medições utilizando canhões para o efeito, obtendo um valor de 478,4 m/s [21]. Apesar do valor a que chegou ser incorrecto (elevado de mais) chegou, nos seus ensaios concluiu que a velocidade de propagação do som é independente da frequência [21]. No entanto errou na sua suposição de o vento não exercer qualquer influência na velocidade do som. Mais tarde, em 1738 na Academia de Ciências de Paris, chegou-se a um valor muito próximo do aceite hoje em dia – 332 m/s. Em 1986 chegou-se ao valor hoje utilizado para condições ambientais padrão. Este estudo da velocidade do som representa os primeiros ensaios realizados na área da acústica.

Para além das experiências que se realizaram nesta área há também que referir as importantes contribuições que o desenvolvimento da física e da matemática trouxeram nos séculos XVIII e XIX. Foi nos inícios do século XVIII que o matemático inglês Brook Taylor desenvolveu um modelo de cálculo que descrevia a vibração em cordas. No entanto, devido à falta de bases matemáticas, este modelo era limitado e não se adaptava a outros sistemas. Mais tarde os estudos de Isaac Newton - que interpretou o som como “pulsos de pressão” transmitidos pelos fluidos circundantes [16] - e Gottfried Leibniz, embora não ligados directamente à acústica, resultaram na teoria de cálculo que permitiu ao francês Jean Le Rond d'Alembert, na década de 1740 a derivação da equação geral da onda. Com este avanço, vários matemáticos e cientistas surgiram com adaptações desta equação a diversos sistemas. A título de exemplo teremos o trabalho de Bernoulli, Euler e Lagrange, que aplicaram as novas equações da onda ao ar e a cordas, e de Poisson que estudou a propagação de ondas em membranas traccionadas, estudo mais tarde completado pelo alemão Alfred Clebsch.

A partir deste ponto, começou o estudo da propagação das ondas sonoras nos mais diversos meios. No século XIX, Chladni estudou a propagação de sons em metais, chegando a introduzir uma técnica de observação de ondas estacionárias em painéis através de areia. Em 1816 a matemática francesa Sophie Germain chegou a uma explicação teórica para estas vibrações bastante avançada para a época, e que apenas foi revista 35 anos depois pelo alemão Gustav Kirchhoff.

A análise das ondas sonoras e sua representação tornou-se possível através do teorema de Fourier, que surgiu no início de século XIX dos estudos de Jean-Baptiste-Joseph Fourier. Torna-se assim possível dividir uma onda complexa nas suas diversas componentes espectrais. Georg Simon Ohm foi o

primeiro a sugerir que o ouvido é sensível a estas diferentes componentes espectrais, admitindo que a percepção do tom é função da amplitude dos harmónicos que constituem uma onda sonora.

Hermann von Helmholtz (1821-1894), escreveu “*On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*” (1863), onde publicou muitos avanços relativamente aos mecanismos de audição e da psicofísica do som e da música [2]. Para além disso desenvolveu um tipo de ressoadores, aos quais dá o nome, que são hoje em dia largamente utilizados na acústica arquitectónica.

Um marco importante, considerado por muitos como sendo o início da acústica moderna foi a obra *The Theory of Sound* (1877-8), de Lord Rayleigh (John William Strutt), que abrangia uma vasta área de pesquisa, sendo abordados pela primeira vez questões relacionadas com a vibração, a ressonância em meios elásticos e gases e a propagação das ondas sonoras em materiais [21].

No século XX aparece a acústica arquitectónica através do físico americano Wallace Sabine (1868-1919), que estudou o comportamento de salas e que projectou o Boston Symphony Hall, ainda hoje aclamada como uma das melhores salas de concertos do mundo. Foi neste projecto que desenvolveu uma fórmula para calcular o tempo de reverberação através das características geométricas da sala, conhecida como fórmula de Sabine e ainda hoje utilizada embora existam modelos mais complexos e exactos.

Dado o enorme interesse desta ciência e dado o diversidade de conhecimentos que abrange, vários investigadores deram o seu importante contributo para o seu desenvolvimento, destacando-se nomes como Cyrill M. Harris, que participou na construção de mais de cem auditórios e Leo Beranek, que para além da obra de referência na área da acústica arquitectónica “*Music, Acoustics, and Architecture*” e desde diversos trabalhos em diferentes áreas da acústica, foi consultor em obras de diversos auditórios.

2.3 A ACÚSTICA NOS NOSSOS DIAS

A acústica de edifícios pode-se subdividir em duas partes: por um lado teremos a correcção acústica que trata o som emitido no local em estudo e por outro o isolamento sonoro, que visa controlar o ruído transmitido entre zonas contíguas.

Focando o problema do isolamento sonoro, surgem então novas abordagens que se tornam possíveis devido ao avanço dos meios tecnológicos. Com a grande capacidade de processamento dos sistemas informáticos actuais assistimos ao aparecimento de métodos numéricos – baseados no método dos elementos finitos ou no método dos elementos de fronteira – bem como analíticos [3] para a resolução de problemas ligados ao isolamento sonoro. No entanto estes métodos ainda têm pouca correlação com a realidade, existindo ainda muito espaço para evolução. Uma outra abordagem, mais simples, consiste na alteração dos modelos existentes através de coeficientes empíricos – obtidos a partir de dados experimentais –, adaptando assim a teoria já existente à realidade dos novos sistemas construtivos, conseguindo dessa forma perceber as falhas dos métodos actualmente utilizados.

Conclui-se então que a aplicação da acústica aos edifícios se encontra em constante evolução, sendo os modelos de cálculo e teoria aplicada em projecto cada vez mais complexos e precisos. Sendo que as soluções adoptadas resultam, muitas vezes, na aplicação de materiais dispendiosos, o mercado exige que se projecte bem, evitando grandes gastos de temporais e económicos em reparações.

2.4 TECNOLOGIA CONSTRUTIVA

Os elementos de separação em gesso cartonado consistem, basicamente, numa estrutura interna sobre a qual são colocados painéis de gesso, formando paredes mais ou menos espessas, sendo também possível sobrepor várias placas, podendo este tipo de divisórias ser aplicado em ambientes diversos. Este tipo de construção apresenta inúmeras vantagens sobre a construção tradicional em alvenaria, que vão desde a elevada resistência ao choque, ao fogo e a humidade, à grande capacidade de isolamento, tanto acústico como térmico, permitindo a utilização de materiais isolantes no vão criado pelos montantes. A existência destes vãos vai também permitir uma fácil integração das condutas técnica (saneamento, instalação eléctrica e dados). Uma vantagem muito importante, talvez a principal, é a segurança e qualidade de construção, aliadas a rápida montagem que levam a uma grande versatilidade.

Apesar de ser maioritariamente utilizado em edifícios públicos, começa a fazer sentido aplicar este tipo de construções à habitação, tanto em construção nova como em operações de reabilitação.



Figura 2.1 - Aplicação de placas de gesso cartonado

Este tipo de divisórias requer uma estrutura de suporte à qual se ligarão as placas de gesso da qual se apresenta um exemplo na Figura 2.2. A boa realização deste tipo de elementos de separação implica algumas considerações. Assim, os montantes aos quais se ligam as placas de gesso devem estar conectados a elementos de recepção com capacidade para suportar os esforços requeridos pelas divisórias. No caso das ligações ao tecto, devem-se fixar os montantes em elementos estruturais ou na estrutura de suporte dos tectos falsos (no caso de estes existirem). Na ligação ao solo deve-se garantir que os pavimentos sejam capazes de suportar a carga introduzida pelas divisórias. A ligação as fachadas depende das características das mesmas.



Figura 2.2 – Montantes de suporte das divisórias em gesso cartonado

Para garantir um isolamento sonoro adequado, é necessário algum cuidado na instalação destes elementos, especialmente na ligação ao tecto e ao pavimento, onde é necessário ter em conta as transmissões marginais. Como se pode verificar na Figura 2.3, em situações em que se utilizam tectos falsos, é necessário que exista uma barreira até à laje estrutural de modo a impedir que o som se propague entre divisórias por caminhos marginais. Na ligação ao solo deve-se garantir que não haja transmissões de ruído pelo revestimento da laje do pavimento.

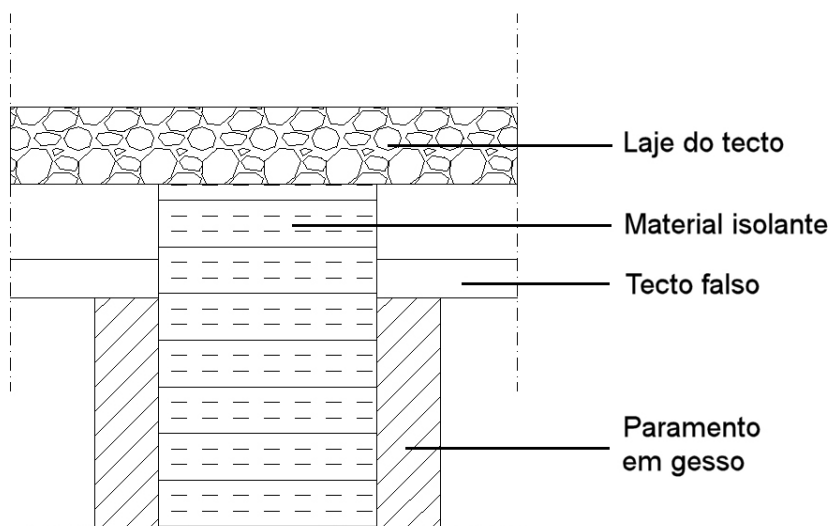


Figura 2.3 – Esquema de ligação da divisória ao tecto

A FLEX2000 fabrica um produto à base de um agregado de espumas de multidensidade com a denominação comercial aglomex acoustic. A produção das espumas de poliuretano, devido ao método de fabrico e às exigências a nível da qualidade, levam a que haja uma quantidade considerável de

desperdícios. No entanto, existem metodologias para reaproveitar estes desperdícios. Utilizando os resíduos da produção das espumas, moídos, e posteriormente colados, sendo possível obter aglomerados de várias densidades e espessuras. Sendo um produto reciclado, de fácil produção e com grande flexibilidade em termos de características do produto final, torna-se num produto bastante interessante para a indústria da construção. Para além disso, sendo um material poroso apresenta maiores potencialidades em termos de melhoramento do isolamento sonoro de partições relativamente a soluções rígidas como o poliestireno expandido, por exemplo [12]. Existe, no entanto, uma limitação a ter em conta na utilização de espumas de poliuretano. Sendo que o poliuretano é material orgânico (tal como a madeira ou o papel), pode entrar em combustão em caso de exposição a uma fonte com suficiente calor e como tal deve ser considerado um material combustível, ao contrário da lã mineral, que possui uma grande resistência ao fogo.



Figura 2.4 - Espuma de poliuretano aglomex acoustic

2.5 ENQUADRAMENTO LEGAL: REGULAMENTAÇÃO EM PORTUGAL

O ruído – o som perturbador, nocivo para quem o recebe – é considerado uma das principais causas da degradação da qualidade do ambiente urbano e é, cada vez mais, um problema de saúde pública.

Nos dias de hoje, com a crescente concentração da população nos centros urbanos, a exposição ao ruído gerado pelas diversas actividades humanas leva à necessidade de garantir um patamar mínimo na qualidade da construção, de modo a ir de encontro com as expectativas dos utilizadores, quer em termos de conforto quer de salubridade.

2.5.1 EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DA LEGISLAÇÃO RELATIVA À ACÚSTICA

E nesse âmbito que aparece a regulamentação. O conforto acústico aparece como um direito básico em Portugal, estando referido no art.º 66º da Constituição:

“1. Todos têm direito a um ambiente de vida humano, sadio e ecologicamente equilibrado e o dever de o defender.

2. Para assegurar o direito ao ambiente, no quadro de um desenvolvimento sustentável, incumbe ao Estado, por meio de organismos próprios e com o envolvimento e a participação dos cidadãos:

(...)

b) Ordenar e promover o ordenamento do território, tendo em vista uma correcta localização das actividades, um equilibrado desenvolvimento socio-económico e a valorização da paisagem;

(...)

e) Promover, em colaboração com as autarquias locais, a qualidade ambiental das povoações e da vida urbana, designadamente no plano arquitectónico e da protecção das zonas históricas;”

Desde a década de 80 que a preocupação com a qualidade dos edifícios relativamente ao conforto acústico. Com base nos princípios anteriormente descritos, surge em 1987 a Lei de Bases do Ambiente – n.º 11/87, de 7 de Abril –, que no art.º 22 apresenta as directivas relacionadas com o ruído [13]:

“1-A luta contra o ruído visa a salvaguarda da saúde e bem-estar das populações e faz-se através, designadamente:

a) Da normalização dos métodos de medida do ruído;

b) Do estabelecimento de níveis sonoros máximos, tendo em conta os avanços científicos e tecnológicos nesta matéria;

c) Da redução do nível sonoro na origem, através da fixação de normas de emissão aplicáveis às diferentes fontes;

d) Dos incentivos à utilização de equipamentos cuja produção de ruídos esteja contida dentro dos níveis máximos admitidos para cada caso;

e) Da obrigação dos fabricantes de máquinas e electro-domésticos apresentarem informações detalhadas, homologadas, sobre o nível sonoro dos mesmos nas instruções de uso e facilitarem a execução das inspecções oficiais;

f) Da introdução nas autorizações de construção de edifícios, utilização de equipamento ou exercício de actividades da obrigatoriedade de adoptar medidas preventivas para eliminação da propagação do ruído exterior e interior, bem como das trepidações;

g) Da sensibilização da opinião pública para os problemas do ruído;

h) Da localização adequada no território das actividades causadoras de ruído.”

É então que surge o primeiro conjunto de regras a aplicar no campo do ruído, sob a forma do “Regime Geral Sobre o Ruído” (RGR) – Decreto-Lei n.º 251/87 de 24 de Junho – partindo dos princípios defendidos pela Lei de Bases do Ambiente.

O RGR sofreu revisões em 1989 (D.L. 259/89 de 2 de Setembro) sendo inevitável a actualização dos dispostos estabelecidos. A constante evolução do conhecimento e das tecnologias construtivas bem como da crescente consciencialização, por parte da população, do incomodo causado pelo ruído – “O regime actualmente em vigor, ainda que pioneiro e de inegável importância na regulação da poluição sonora, mostra-se hoje claramente insuficiente para a salvaguarda da saúde e do bem-estar das pessoas (...)” [19] – leva a que, em 2000, surja uma nova actualização, passando o RGR deste modo a denominar-se “Regime Legal Sobre a Poluição Sonora” (RLPS), pelo D.L 292/2000 de 14 de Novembro.

Este documento foi recentemente revisto e aprovado pelo Decreto-Lei 9/2007 de 17 de Janeiro, passando-se a denominar novamente de “Regime Geral sobre o Ruído”, e aplicando alterações patentes na directiva nº 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho [6].

2.5.2 REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDIFÍCIOS

O RGR remete para outros regulamentos complementares que por sua vez contém os requisitos, de forma mais específica, a cumprir para as diferentes actividades ruidosas. Destes é importante referir o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE, aprovado pelo Decreto-Lei 129/2002 de 11 de Maio, actualmente em vigor, que *“tem como princípios orientadores a harmonização, à luz da normalização europeia, das grandezas características do desempenho acústico dos edifícios e respectivos índices e a quantificação dos requisitos, atendendo, simultaneamente, quer à satisfação das exigências funcionais de qualidade dos edifícios quer à contenção de custos inerentes à execução das soluções necessárias à sua verificação”* [18]. Para além deste regulamento há que ter em conta as alterações impostas pelo Decreto-Lei 9/2007 de 17 de Janeiro, que focam o problema da exposição ao ruído bem como a incomodidade criada pelas actividades ruidosas.

Após o enquadramento cronológico da legislação resta referir que as exigências actualmente em vigor no nosso país, para os diversos tipos de edificações e que constam do RRAE [18], se prendem com um índice único – o $D_{n,w}$ – expresso em dB, que no fundo traduz o isolamento sonoro a sons aéreos medido “in situ” por bandas de frequência, sendo posteriormente aplicada uma correcção utilizando uma curva de referência [8], uma metodologia que será descrita em pormenor no capítulo seguinte. Em termos de projecto, este valor pode ser estimado com recurso à redução (R_w) sonora e admitindo o decréscimo deste valor causado pelas transmissões marginais, que também poderá ser estimado através de modelos de cálculo (como por exemplo o método descrito na norma ISO 12354 [9]), podendo o valor de R_w ser obtido por ensaios em laboratório ou através dos métodos de cálculo que irão ser descritos no capítulo seguinte, aplicando em seguida uma ponderação de modo a obter o valor único.

Resta referir que para além do isolamento sonoro há também exigências relacionadas com o isolamento sonoro a sons de percussão, a absorção sonora, e níveis de avaliação que se prendem com o ruído de equipamentos que não serão aqui abordadas.

É com base neste documento em conjunção com os diversos projectos de licenciamento das várias especialidades, que as autoridades competentes fornecem o alvará de licença, necessário para proceder à construção do empreendimento.

Existem, no entanto, uma lacuna na legislação. Assim, verificamos que dentro de um fogo, não há qualquer requisito para as divisórias entre compartimentos, o que deixa espaço de manobra para os construtores utilizarem soluções técnicas, baseando-se apenas no factor custo, que não garantem um nível de conforto aceitável.

Quadro 2.1 - Disposições legais relativamente ao isolamento sonoro para edifícios habitacionais e mistos

Situação	Parâmetro	Valor Regulamentar (dB)
Entre o exterior e Quartos e/ou Salas	$D_{2m,n,w} \geq$	33
Entre Habitações verticais	$D_{n,w} \geq$	50
Entre Habitações horizontais		50
Circulação Horizontal – Quartos e/ou Salas		48
Circulação Vertical - Quartos e/ou Salas (se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores)		40
Garagem – Quartos e/ou Salas		50
Comércio, Indústria ou Serviços – Quartos e/ou Salas		58
Entre Habitações	$L'_{n,w} \leq$	60
Habitações – Comércio		50
Equipamentos Colectivos – Quartos e/ou Salas	$L_{Ar} \leq$	35 dB (A) (funcionamento do equipamento intermitente)
Equipamentos Colectivos – Quartos e/ou Salas		30 dB (A) (funcionamento do equipamento contínuo)
Equipamentos Colectivos – Quartos e/ou Salas		40 dB (A) (grupo gerador eléctrico de emergência)

Quadro 2.2 - Critérios alterados pelo D.L. 9/2007

Critério	Situação	Descritor	Exigência Reg. (dBA)
Valor Limite de Exposição	Zonas Mistas	$L_{den} \leq$	65
		$L_n \leq$	55
	Zonas Sensíveis	$L_{den} \leq$	55
		$L_n \leq$	45
Critério de Incomodidade	Actividades ruidosas permanentes durante o período diurno (7h-20h)	$(L_{Aeq} - L_d) \leq$	5
	Actividades ruidosas permanentes durante o período de entardecer (20h-23h)	$(L_{Aeq} - L_e) \leq$	4
	Actividades ruidosas permanentes durante o período nocturno (23h-7h)	$(L_{Aeq} - L_n) \leq$	3

3

TEORIA DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE TRANSMISSÃO AÉREA

3.1 INTRODUÇÃO

Controlar o ruído aéreo consiste em posicionar uma barreira, com o intuito de interromper o caminho de transmissão, entre o emissor e o receptor [5]. É neste âmbito que surge o estudo do isolamento sonoro a sons de transmissão aérea.

Tornou-se então necessário desenvolver metodologias para caracterizar os diferentes tipos de partições que se utilizam para delimitar compartimentos.

A caracterização do isolamento sonoro a sons de transmissão aérea de elementos construtivos tem duas possíveis abordagens: os métodos experimentais em laboratórios ou os modelos teóricos de previsão.

Neste capítulo serão abordadas estas duas metodologias, descrevendo o protocolo definido pelas normas em vigor para a obtenção do índice de isolamento em laboratório, bem como os modelos teóricos que permitem prever o comportamento dos elementos construtivos relativamente ao isolamento sonoro.

3.2 NOÇÕES GERAIS

3.2.1 ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA – R

O índice de redução sonora a sons aéreos constituiu um elemento de análise da performance dos elementos construtivos. Representa-se utilizando a letra “R” e a sua unidade é o decibel (dB).

Este valor pode ser obtido em laboratório ou através de modelos de previsão que irão fornecer uma estimativa da performance de um dado elemento.

Numa medição em laboratório, será necessário analisar a transmissão sonora entre dois compartimentos separados por um elemento com uma superfície de $S \text{ m}^2$.

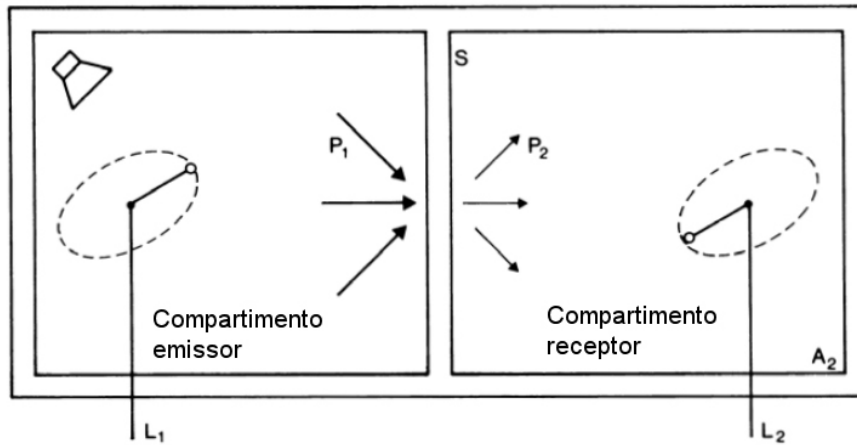


Figura 3.1 - Medição em laboratório do índice de isolamento sonoro R [11]

Admitindo um campo sonoro difuso, num compartimento emissor, com uma pressão sonora p_s , teremos uma intensidade sonora correspondente [14]:

$$I_i = \frac{p_s^2}{4\rho_0 c_0} \quad (3.1)$$

Onde,

I_i - Intensidade sonora incidente (W/m^2)

p_s - Pressão sonora (Pa)

$\rho_0 c_0$ - Impedância ($\approx 400 \text{ rayl}$)

Quando o som incide no elemento que divide os dois compartimentos teremos uma parte da energia reflectida e outra transmitida (ver Figura 3.2). Para avaliar a transmissão do som – relacionando a energia incidente com a transmitida – teremos de admitir então um coeficiente de transmissão τ :

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} \quad (3.2)$$

Onde,

I_i - Intensidade sonora incidente (W/m^2)

I_t - Intensidade sonora transmitida (W/m^2)

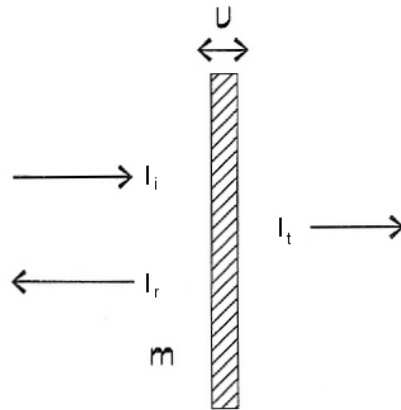


Figura 3.2 - Transmissão de energia sonora através de um elemento

Admitindo um campo difuso no compartimento receptor, teremos uma potência sonora nesse local de W_r :

$$W_r = I_i \cdot S \cdot \tau \quad (3.3)$$

Onde,

- W_r - Potência sonora (W)
- I_i - Intensidade sonora (W/m^2)
- S - Superfície (m^2)
- τ - Coeficiente de transmissão

Teremos de considerar a absorção no compartimento receptor – A – pois este factor irá influenciar o campo que se criará. Como tal teremos que:

$$I_t = \frac{I_r}{A} \quad (3.4)$$

Sendo $R = 10 \cdot \log(\tau)$, e passando a exprimir a equação (3.4) em dB teremos então o índice de redução sonora entre dois compartimentos:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (3.5)$$

Para estimar o índice de redução sonora sem recorrer a ensaios laboratoriais é necessário dividir os elementos em diferentes tipos. Para os elementos construtivos mais comuns que se qualificam como simples ou duplos – de acordo com o número de panos que os constituem – existem modelos teóricos que explicam o seu comportamento, ainda que de uma forma não totalmente correcta. No sub capítulo 3.3 serão abordados os modelos teóricos para este fim.

3.2.2 REDUÇÃO SONORA – R_w

A partir do espectro obtido de um dado elemento construtivo, poderemos obter um valor único, que caracteriza o seu desempenho relativamente ao isolamento sonoro. Para tal, vem estipulado na norma NP EN ISO 717-1 [8] um ajuste, através de uma curva normalizada, apresentada na Figura 3.3. O valor único assim obtido designa-se por redução sonora – R_w – e é expresso em dB.

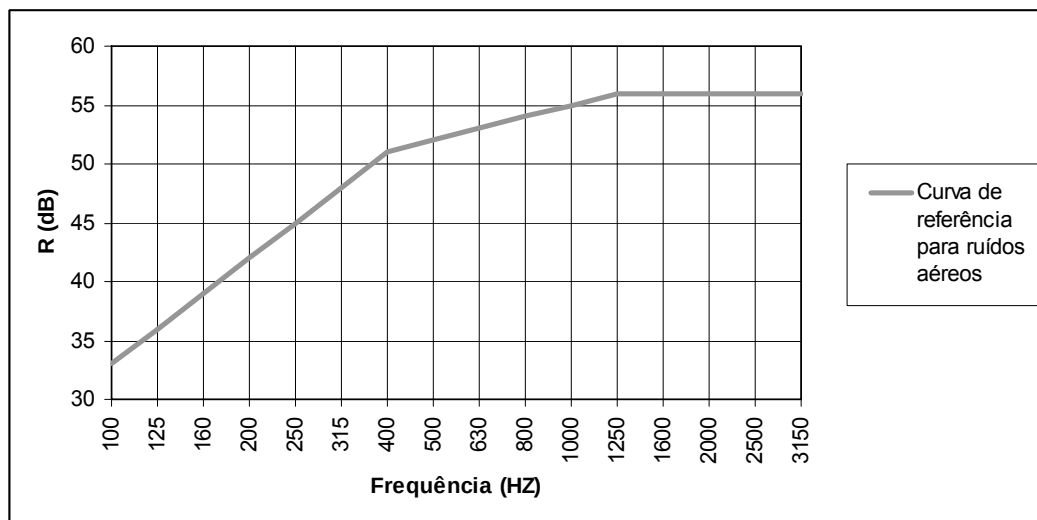


Figura 3.3 - Curva de referência da norma NP EN ISO 717-1

Para realizar o ajuste da curva são necessários os valores de R por frequência. Executa-se então a translação vertical da curva de referência até que o somatório das diferenças positivas entre os valores da curva de referência e os valores da curva de R seja igual ou inferior a 32 dB. A Figura 3.4 mostra um exemplo deste ajuste.

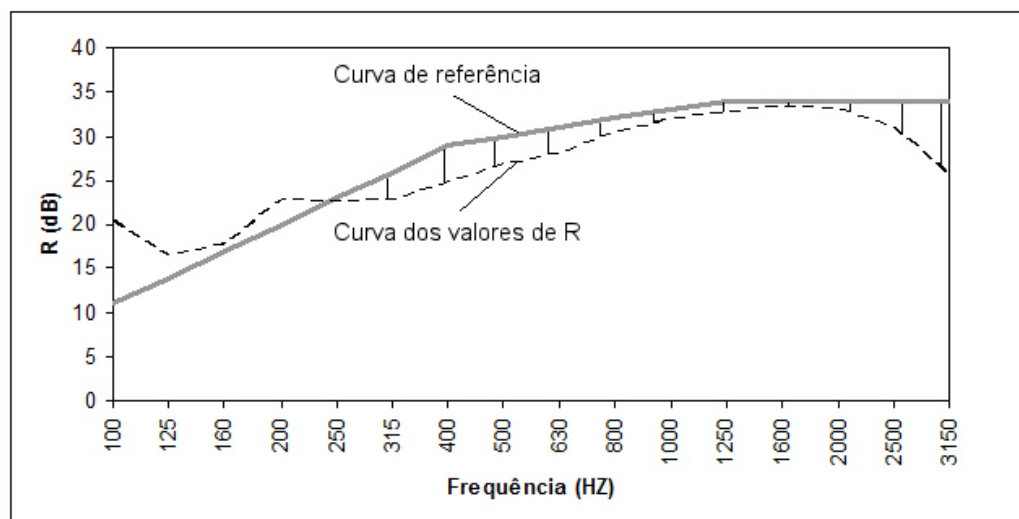


Figura 3.4 - Exemplo de ajuste de acordo com a norma NP EN ISO 717-1

Este indicador tem, no entanto, algumas limitações. Apesar de ser bastante útil para seleccionar soluções construtivas em fase de projecto – permitindo uma comparação da performance de um elemento com as exigências regulamentares ($D_{n,w}$) – não fornece qualquer tipo de informação relativa ao comportamento do elemento por frequências. A curva de referência apresentada na Figura 3.4 não se revela adequada em muitos casos sendo que despreza a influência da diminuição do isolamento sonoro em frequências médias e altas, as quais representam uma componente importante da voz humana, do ruído da televisão e das actividades domésticas [20].

Em projectos mais específicos, em que há exigências de isolamento sonoro para uma dada gama de frequências não será então possível a utilização deste valor.

3.3 ISOLAMENTO SONORO

Hoje em dia sabe-se que o isolamento sonoro a sons de transmissão aérea de um elemento construtivo depende de vários factores como É no entanto fundamental, para perceber os modelos teóricos de previsão da performance em termos de isolamento sonoro a sons aéreos, como já foi referido, separar os elementos simples e duplos.

Para prever o comportamento de um elemento construtivo, relativamente ao isolamento sonoro a sons aéreos, torna-se necessário recorrer a simplificações, admitindo painéis infinitos, e posteriormente considerar o impacto das condições de fronteira.

É de notar que os modelos aqui apresentados resultam de uma reunião de conhecimento analítico com dados numéricos, sendo por isso modelos semi-empíricos. Hoje em dia encontram-se em desenvolvimento modelos numéricos mais complexos, baseados em métodos de elementos finitos e em métodos de elementos de fronteira cujo objectivo será de modelar com mais exactidão os elementos construtivos que se pretendem analisar.

É ainda importante referir que para frequências muito baixas, ainda não são conhecidos os mecanismos que intervêm no isolamento sonoro de um dado elemento construtivo. Pensa-se que o comportamento de um elemento para frequências baixa (abaixo da frequência de ressonância), não

depende apenas das propriedades do material, mas também dos compartimentos separados pelo mesmo [1].

3.3.1 ELEMENTOS SIMPLES

Para compreender o comportamento de um painel simples entre dois compartimentos, torna-se necessário realizar algumas simplificações. Analisando a relação entre energia incidente, absorvida e reflectida, conseguimos obter um balanço de forças que nos permite compreender o funcionamento de um painel simples sem ligações no seu bordo para uma incidência θ .

Quando se pretende estudar uma partição entre dois compartimentos há outras condições que irão influenciar o comportamento do elemento construtivo. Por um lado temos de considerar as ligações nos limites do elemento levando a existência de modos de vibração próprios; além disso não podemos considerar apenas um ângulo de incidência das ondas sonoras devido às reflexões existentes dentro d um compartimentos; para contornar este problema considera-se a existência de um campo sonoro difuso, integrando a equação do isolamento sonoro a sons aéreos em ordem a θ .

Na análise do comportamento de um elemento simples é fundamental atender à frequência. Como tal é necessário definir alguns valores:

- Frequência de ressonância:

No caso em que o elemento se encontra simplesmente apoiado nos bordos:

$$f_{m,n} = 0,45 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \left[\left(\frac{m}{l} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

Se os bordos estiverem encastrados:

$$f_{m,n} = 0,45 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \left[\left(\frac{m}{l} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

Onde,

$f_{m,n}$	- Frequência de ressonância (Hz)
d	- Espessura do elemento (m)
E	- Modulo de Young (Pa)
ρ	- Densidade (kg/m ³)
n e m	- Números naturais;
l e b	- Dimensões do elemento (m)

- Frequência crítica:

Esta frequência está relacionada com o fenómeno de coincidência. Esta ocorrência dá-se quando, para uma dada frequência e ângulo de incidência, o comprimento das ondas incidentes no elemento é igual ao comprimento de onda das ondas de flexão própria do mesmo elemento, como se pode verificar na Figura 3.5. Isto significa que para este valor da frequência as ondas incidentes no elemento serão mais facilmente transmitidas através do mesmo, havendo uma quebra significativa em termos de isolamento sonoro.

As ondas de flexão própria de um dado elemento dependem da rigidez, da massa superficial, da espessura, da celeridade (velocidade de propagação do som no ar). No entanto há que ter em conta que esta frequência vai também variar de acordo com o ângulo de incidência, sendo que o seu valor será mais baixo se o ângulo “ θ ” representar uma incidência normal [10]. Isto quer dizer que quando o ângulo de incidência é igual a $\pi/2$ a frequência crítica terá o valor mínimo[10]. Pode-se obter a frequência crítica (mais baixa) da seguinte forma:

$$f_c = \frac{c_0^2}{1,8 \cdot c_L \cdot h} \quad (3.8)$$

Onde,

f_c - Frequência crítica (Hz)

c_0 - Celeridade (m/s)

c_L - Velocidade de propagação das ondas longitudinais no meio (m/s)

h - Espessura do material (m)

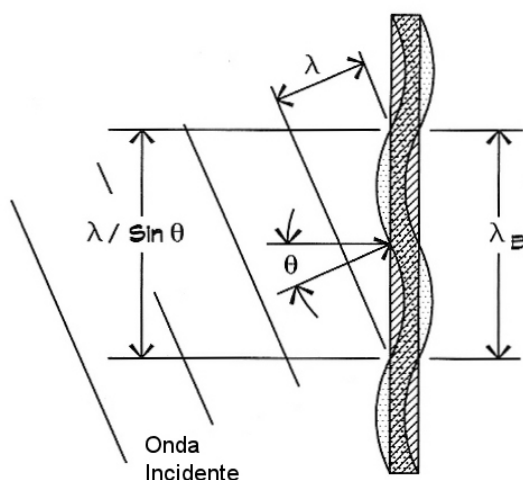


Figura 3.5 - Efeito de coincidência [14]

Como podemos ver pela Figura 3.6, o isolamento sonoro a sons de transmissão aérea varia com a frequência. Para analisarmos os elementos simples, depois de definidas as frequências de ressonância e crítica, é necessário definir as diferentes zonas:

- $f < f_0$:

Para esta zona do espectro o isolamento sonoro é função da rigidez do painel. Não se encontram definidas expressões analíticas para esta região, mas empiricamente, sabe-se que para uma maior rigidez à flexão e menor dimensão do painel se obtém um maior valor do isolamento sonoro a sons aéreos R .

- $f_0 < f < f_c$:

Para valores da frequência maiores que a frequência de ressonância do painel e inferiores à frequência crítica, o isolamento sonoro a sons de transmissão aérea é função das dimensões do elemento, da rigidez, da massa e do amortecimento.

Do balanço de forças aplicadas no elemento, para elementos típicos, obtém-se a seguinte expressão (simplificada), também conhecida por lei da massa e resultante da integração em ordem ao ângulo de incidência (para um ângulo até 78° relativamente à normal) [14]:

$$R = 20 \cdot \lg(m \cdot f) - 47,3 \quad (3.9)$$

Onde,

R - Isolamento sonoro a sons aéreos (dB)

m - Massa superficial do elemento construtivo (kg/m²)

f - Frequência (Hz)

Resta referir que Josse e Lamure formularam o comportamento de elementos simples para esta zona de frequências, baseando-se em quatro factores (dimensões, rigidez, massa e amortecimentos) [17]. No entanto, e para elementos comuns, a esta formulação apresenta resultados semelhantes aos obtido pela equação (3.9) [14].

- $f > f_c$:

Acima da frequência crítica, teremos, para além da massa, a influência do amortecimento. Pode-se utilizar esta expressão, que entra em conta com estes dois factores [14]:

$$R = 20 \cdot \lg\left(\frac{\omega \cdot m}{\rho_0 \cdot c_0}\right) + 10 \cdot \lg\left[\frac{2 \cdot \eta}{\pi} \left(\frac{f}{f_c} - 1\right)\right] \quad (3.10)$$

Onde,

- R - Isolamento sonoro a sons aéreos(dB)
- ω - Frequência angular (rad/s)
- m - Massa superficial do elemento (kg/m²)
- ρ_0 - Densidade do ar (aprox. 1,2 kg/m³)
- c_0 - Celeridade (m/s)
- η - Factor de perdas do material
- f - Frequência (Hz)
- f_c - Frequência crítica (Hz)

Teremos então dois termos que traduzem a combinação dos dois factores em jogo: a massa (m) e o amortecimento expresso pelo factor de perdas η . Analisando a expressão verifica-se que a curva do isolamento sonoro a sons aéreos terá um declive de aproximadamente 9 dB/oitava.

Para além destas considerações, validas para um elemento genérico, há mais um factor importante a ter em conta relativamente a elemento muito espessos. Nos elementos mais finos, devido a sua reduzida espessura relativamente às restantes dimensões, verifica-se uma predominância de ondas de flexão. Nos elementos espessos há que ter em conta as ondas de corte.

Quando as ondas de corte sofrerem uma menor resistência que as de flexão, serão predominantes. Como tal, Sharp determinou a seguinte expressão para a frequência a que se dá esta transição [14]:

$$f_s = \frac{c_0^2 \cdot (1 - \sigma)}{59 \cdot h^2 \cdot f_c} \quad (3.11)$$

Onde,

- f_s - Frequência limite de vibração por ondas de corte (Hz)
- c_0 - Celeridade (m/s)
- σ - Factor de radiação do elemento
- h - Espessura (m)
- f_c - Frequência crítica (Hz)

Para elementos muito espessos em $f_s < f_c$ não se verifica a quebra de isolamento na frequência crítica. Acima de f_s será de esperar uma redução de 6 dB relativamente a lei da massa.

Quando $f_s > f_c$, a partir de f_s a curva de R terá um declive de 6 dB/oitava.

Em termos gerais, a curva teórica de um elemento simples terá o seguinte aspecto:

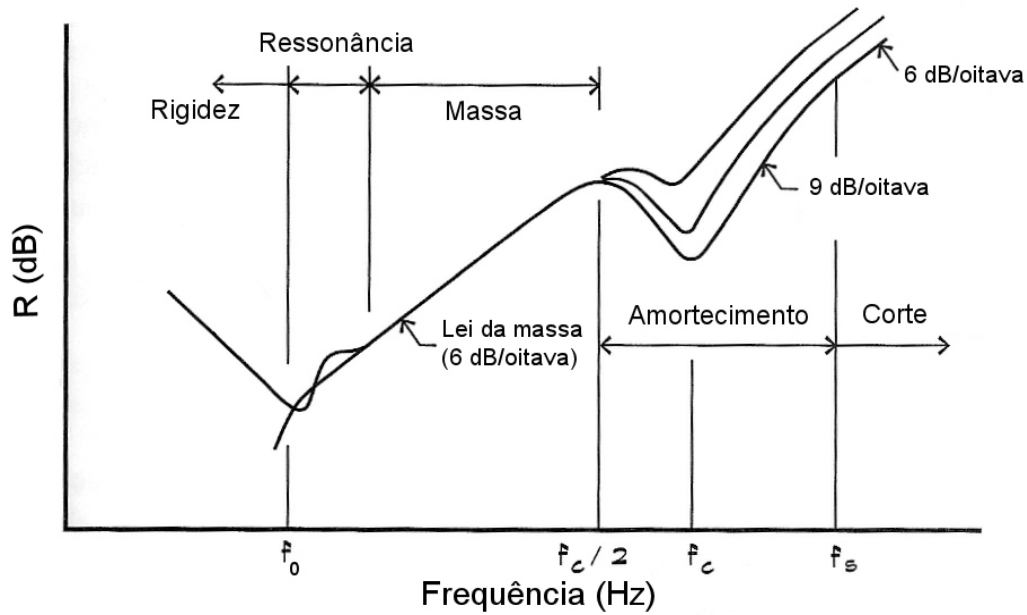


Figura 3.6 - Comportamento teórico relativo ao isolamento sonoro a sons aéreos de um elemento simples em função da frequência [14]

3.3.2 ELEMENTOS DUPLOS

Ao contrário do que se poderia pensar, o isolamento sonoro de um elemento duplo não é a soma do isolamento de cada um dos panos constituintes. Isso seria o caso se o espaçamento entre cada pano fosse suficiente para que o ar não funcionasse como um meio elástico não havendo interação entre os dois panos, o que na prática levaria a paredes com espessuras proibitivas.

Como tal deve se considerar a parede dupla como um sistema massa-ar-massa, em que o ar funciona como um meio elástico e que possui uma frequência de ressonância f_0 expressa por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3,6 \cdot \rho_0 \cdot c_o^2}{m' \cdot d}} \quad (3.12)$$

Onde,

- f_0 - Frequência de ressonância do sistema (Hz)
- c_0 - Celeridade (m/s)
- ρ_0 - Densidade do ar (aprox. 1,2 kg/m³)
- d - Espessura da caixa-de-ar (m)
- m' - Produto da massa superficial dos dois panos do elemento construtivo (kg/m²)

Como vimos na secção relativa a elementos simples, cada pano da parede possui também uma frequência crítica f_c , devido ao efeito de coincidência (expressa pela equação (3.8)).

Para além destes valores fundamentais é também importante realçar o efeito das ondas estacionárias na caixa-de-ar. Estas ressonâncias causam uma queda no valor do isolamento sonoro na zona das altas-frequências (devido ao reduzido tamanho das cavidades nas paredes duplas, as ondas estacionárias criadas terão também um comprimento de onda reduzido). Estes valores da frequência são expressos por:

$$f_n = \frac{n \cdot c_0}{2 \cdot d} \quad (3.13)$$

Onde,

- f_n - Frequência de ressonância de cavidade (Hz)
- n - Número inteiro natural (1,2,3,4, ...)
- c_0 - Celeridade (m/s)

No entanto, e com a aplicação de material absorvente na caixa-de-ar, o seu efeito é desprezável.

Tal como nos elementos simples o comportamento das paredes duplas varia com a frequência:

- Para $f < f_0$

Neste caso a elemento comportar-se-á aproximadamente como uma parede simples com uma massa superficial igual à soma das massas dos dois panos. Para frequências baixas o comprimento de onda das ondas incidentes excede largamente o espaçamento entre panos, o que explica este facto. O valor do isolamento sonoro a sons aéreos R pode ser obtido por:

$$R = 20 \cdot \lg[(m_1 + m_2) \cdot f] - 47,3 \quad (3.14)$$

Onde,

- R - Isolamento sonoro a sons aéreos (dB)
- m_1 e m_2 - Massa superficial dos panos constituintes do elemento (kg/m^2)
- f - Frequência (Hz)

Pela análise da equação (3.14) verificamos que se duplicarmos a massa ou a frequência (subir uma oitava), R aumentará 6 dB.

- $f \approx f_0$

Na região próxima da frequência de ressonância, as ondas sonoras são transmitidas com mais facilidade, verificando-se um decréscimo no isolamento sonoro.

- $f > f_0$

Para frequências superiores à frequência de ressonância do sistema massa-ar-massa, o efeito da cavidade de ar começa a ser visível. O valor de R será expresso por:

$$R = R_1 + R_2 + 20 \cdot \lg(2 \cdot k \cdot d) \quad (3.15)$$

Onde,

- R - Isolamento sonoro a sons aéreos (dB)
- R_1 e R_2 - Isolamento sonoro a sons aéreos de cada um dos panos do elemento construtivo (dB)
- k - Número de onda: $k = \frac{2\pi \cdot f}{c_0}$ (m^{-1})
- d - Espaçamento entre panos (caixa-de-ar) (m)

A partir de f_0 verificamos então um incremento de 18 dB/oitava até uma frequência limite denominada f_l obtida pela seguinte expressão:

$$f_l = \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (3.16)$$

Onde,

c_0 - Celeridade (m/s)

d - Espaçamento entre panos (caixa-de-ar) (m)

Esta frequência está relacionada com o espaçamento entre panos d . A partir de f_1 a curva de R terá um declive de 12 dB/oitava.

Outro factor com grande influência na performance de um elemento duplo é o material absorvente colocado na caixa-de-ar. Sem a presença de material absorvente, as ondas estacionárias que se instalam na cavidade irão facilitar a transmissão entre panos da mesma forma que uma ligação mecânica, o que faz com que a curva dos valores de R se aproxime da lei da massa (equação (3.14)) [14].

A teoria aqui apresentada admite que a cavidade se encontra forrada com material absorvente. No entanto ainda não é possível determinar, de forma analítica, o aumento do isolamento sonoro em função da espessura e da densidade do material absorvente, sendo que os modelos que actualmente existem se baseiam em dados experimentais para o fazer.

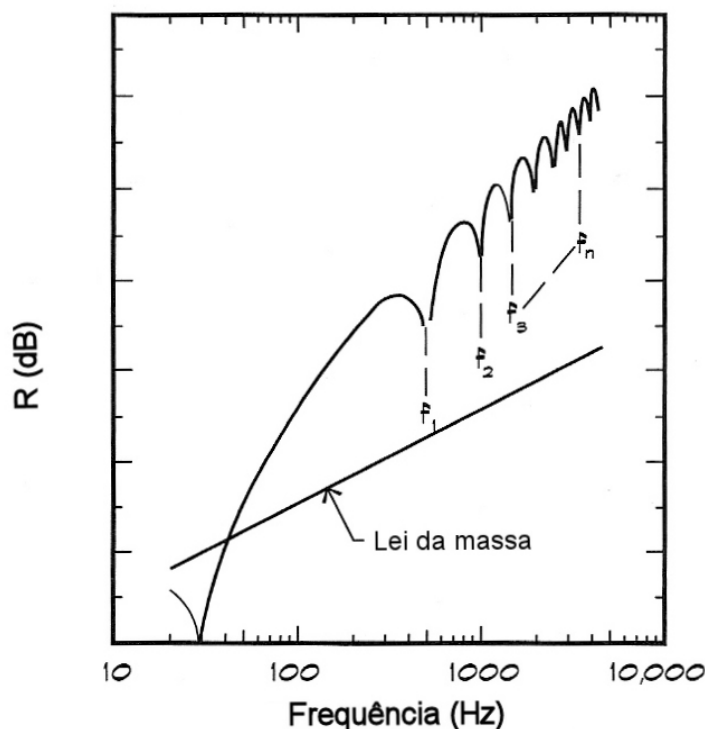


Figura 3.7 - Comportamento teórico relativo ao isolamento sonoro a sons aéreos de um elemento duplo em função da frequência

3.4 NORMALIZAÇÃO

O isolamento sonoro a sons aéreos pode ser obtido realizando ensaios “in situ” ou em laboratório. Para a sua determinação, é necessário seguir determinados protocolos standardizados, bem como impor as características dos laboratórios e do equipamento de medição. A existência de normas é de elevada

importância, pois permite comparar resultados de ensaios realizados em diferentes instituições, já que é garantida uma semelhança das condições de execução dos mesmos

No presente caso é importante referir a norma que rege os ensaios em laboratório, de elementos construtivos, relativamente ao isolamento sonoro a sons aéreos, a norma NP EN 20140-3:1998. Esta norma trata-se de uma adaptação norma ISO 140-3:1995, preparada pelo Comité Técnico ISO/TC 43 "Acústica" em colaboração com o CEN/TC 126 "Propriedades acústicas dos elementos de construção e dos edifícios" foi submetido a votação paralela e aprovada pelo CEN em 1995 [7].

Sendo esta norma um documento bastante específico, focando apenas o método de obtenção dos valores de "R" – isolamento sonoro a sons aéreos. Analisando o documento verifica-se que as exigências em termos de equipamentos de medição, dispositivos de ensaio e cálculo de índices são referenciadas outras normas.

Quanto as exigências para o ensaio poderemos dividir nos seguintes pontos:

- Equipamento
- Dispositivos de ensaio
- Modo de operação e avaliação
- Exactidão
- Apresentação dos resultados
- Relatório de ensaio

A Figura 3.8 representa um organograma que apresenta as referências normativas para a norma ISO 140-3.

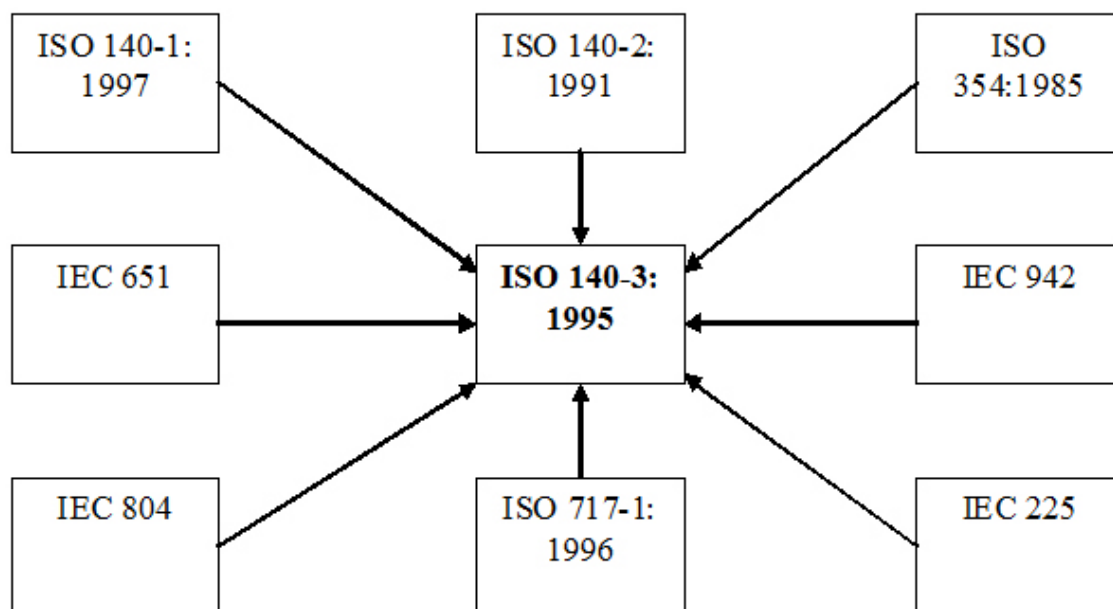


Figura 3.8 - Organograma das referências normativas

As câmaras reverberantes, a amostra (o elemento construtivo ensaiado) e os elementos de compartimentação – as câmaras reverberantes – devem satisfazer os dispostos da norma ISO 140-1. Como tal o elemento a ensaiar deverá ter uma área compreendida entre os 10 e os 20 m², tendo a dimensão menor pelo menos 2,3 m.

Para obter os níveis de pressão sonora nas câmaras reverberantes, utilizando microfones fixos, será necessário colocar os mesmos em 5 posições diferentes, calculando a média energética dos valores obtidos através da seguinte fórmula:

$$\bar{L}_p = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \quad (3.17)$$

É importante verificar a condição de a energia sonora transmitida por vias indirectas ser desprezável relativamente à transmissão directa, de modo a obter os resultados apenas para o elemento testado sem quaisquer transmissões marginais.

O valor da área de absorção, necessário para a obter os valores de R a partir da equação (3.5), será calculado com base na fórmula de Sabine, sendo o tempo de reverberação obtido de acordo com a norma ISO 354 [7]:

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{T} \quad (3.17)$$

Onde,

- A - Área de absorção sonora equivalente da câmara receptora (m²)
- V - Volume da câmara receptora (m³)
- T - Tempo de reverberação da câmara receptora (s)

Os valores deverão ser medidos em bandas de terços de oitava entre as frequências de 100 e 5000 Hz, sendo que se forem necessárias medições suplementares na gama das baixas frequências se poderão obter resultados de medições utilizando filtros de banda de terços de oitava para as frequências centrais de 50, 63 e 80 Hz [7].

No entanto existe uma limitação importante a ter em conta quando se realiza medições em laboratório prende-se com a validade dos resultados para as baixas frequências. Para frequências muito baixas, o comprimento de onda será muito grande, sendo que as dimensões da câmara poderão impedir a criação de ondas estacionárias para esta gama de frequências. A norma ISO 140-3 apresenta em anexo (anexo F da norma) as disposições necessárias para que sejam de esperar condições de campo difuso abaixo dos 400 Hz, especificando as distâncias mínimas, em relação à parede da câmara, de colocação dos microfones de medição bem como o número de posições a utilizar para os mesmos e para as fontes sonoras, o tempo de medição a adoptar e recomendações relativamente ao tempo de reverberação das câmaras.

É importante isolar os compartimentos de ensaio de qualquer sinal perturbador. Assim sendo, a norma refere que, para obter resultados válidos, o nível de ruído de fundo deverá ser, no mínimo, inferior em 6 dB ao nível do ruído gerado pela fonte utilizada no ensaio em conjunto com o ruído de fundo. Será então necessário verificar esta condição. Gerando um ruído na fonte com um elevado nível de pressão sonora na avaliação para elementos comuns e em câmaras devidamente projectadas não serão previsíveis problemas devidos ao ruído de fundo. No entanto não se deve deixar de realizar uma medição como medida de segurança.

4

METODOLOGIA ADOPTADA

4.1 INTRODUÇÃO

Para caracterizar a utilidade das espumas de poliuretano em divisórias ligeiras, foram realizados ensaios em câmaras reverberantes, obtendo um espectro do isolamento sonoro a sons aéreos de acordo com a norma ISO 140-3 descrita na secção 3.4.

Obtidos os resultados, foram realizados cálculos utilizando métodos correntes para elementos duplos baseados na teoria exposta no capítulo 3. Estas previsões serão úteis para validar os modelos de cálculo utilizados ou mesmo permitir a sua adaptação aos resultados obtidos através da aplicação de coeficientes baseados nos dados experimentais. Como hoje em dia não existem modelos de cálculo válidos em todas as situações, a comparação entre os resultados medidos e os calculados terá um grande interesse quando se ensaiam elementos construtivos novos.

4.2 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS DE ENSAIO

Para simplificar a análise dos dados os elementos construtivos serão separados em 4 tipos. Cada um terá associado uma referência do tipo X.Y, em que X representa a densidade da espuma (em kg/m^3) e Y a espessura da espuma (em mm).

4.2.1 TIPO 1: GESSO-ESPUMA-GESSO

Para este tipo de elementos, constituídos por painéis de gesso cartonado com espuma na caixa-de-ar, foram utilizados montantes de 48 mm – um par para suportar cada painel – estando estes distanciados de 1,1 metros, sendo a espessura total da caixa-de-ar constante (100 mm). As placas de gesso utilizadas são do tipo BA13 com uma espessura de 12,5 mm. Na Figura 4.1 apresenta-se o esquema construtivo dos elementos com painéis simples.

Para esta construção foram ensaiadas as configurações apresentadas no Quadro 4.1, que correspondem a densidades e espessuras das espumas utilizadas na caixa-de-ar. Na Figura 4.2 e na Figura 4.3, estão presentes pormenores da montagem da amostra na câmara reverberante onde foram realizados os ensaios.

Quadro 4.1 - Configurações ensaiadas para a construção tipo 1

Configuração tipo 1	
Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
60	30
	60
	100
90	30
	100
120	30
	100
200	30
	100

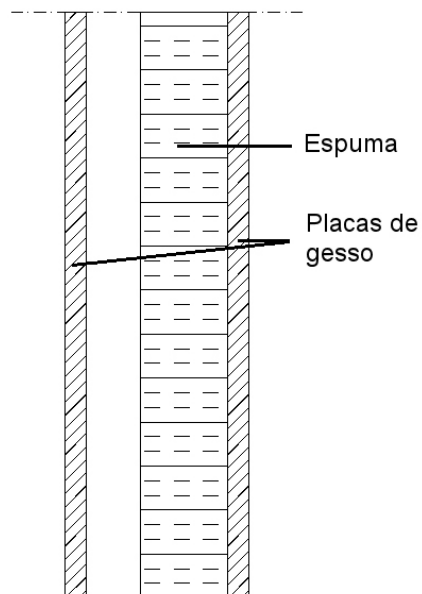


Figura 4.1 – Esquema construtivo da construção tipo 1



Figura 4.2 – Construções tipo 1 e 2 montadas na câmara reverberante



Figura 4.3 – Pormenor dos montantes das construções tipo 1 e 2

4.2.2 TIPO 2: GESSO-ESPUMA-GESEO COM PLACA DUPLA

Esta configuração é semelhante à configuração 1, sendo utilizados os mesmos montantes e tendo a caixa-de-ar a mesma espessura. A diferença reside no facto de cada pano ser constituído por duas placas de gesso cartonado. As espumas utilizadas nesta configuração foram as apresentadas no Quadro 4.2. A Figura 4.2 e a Figura 4.3 apresentam a amostra montada na câmara e o pormenor dos montantes utilizados. A Figura 4.4 mostra o esquema construtivo desta configuração

Quadro 4.2 - Configurações ensaiadas para a construção tipo 2

Configuração tipo 2	
Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
60	30
	100

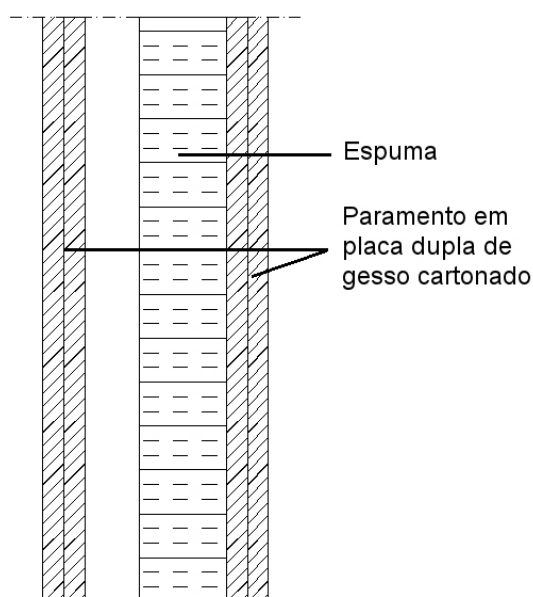


Figura 4.4 – Esquema construtivo da construção tipo 2

4.2.3 TIPO 3: ALVENARIA-ESPUMA-GESSO COM MONTANTES

Esta construção consiste em adicionar a uma parede simples em alvenaria uma placa de gesso, apoiada em montantes e com a espuma entre os dois painéis. Neste caso utilizam-se dois montantes verticais para a placa, cujos centros têm espaçamento entre si de 1,1 m, tendo a caixa-de-ar uma espessura fixa de 60 mm (correspondente à espuma ensaiada neste tipo de paramentos de maior espessura). Na Figura 4.6 apresenta-se um pormenor da montagem deste elemento, estando visível a estrutura de suporte das placas de gesso.

O pano de alvenaria consiste em tijolo de 11 cm de rebocado em ambas as faces, e o pano de gesso cartonado consistem em placas do tipo BA13 com uma espessura de 12,5 mm. As combinações de densidade e espessura das espumas utilizadas nesta configuração encontram-se explicitadas no Quadro 4.3

Quadro 4.3 - Configurações ensaiadas para a construção tipo 3

Configuração tipo 3	
Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
60	30
	60
120	60

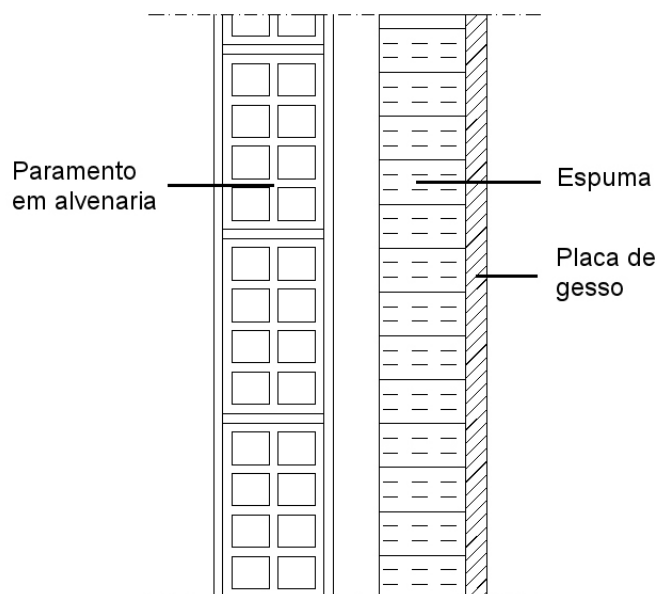


Figura 4.5 - Esquema construtivo da construção tipo 3



Figura 4.6 - Pormenor da montagem da construção tipo 3

4.2.4 TIPO 4: ALVENARIA-ESPUMA-GESSO COLADO

Esta configuração, ao invés da anterior, não incorpora montantes para apoiar as placas de gesso. Estas encontram-se coladas directamente sobre as espumas de poliuretano – ver Figura 4.8. Como tal a caixa-de-ar terá a espessura da espuma utilizada.

Os elementos utilizados são semelhantes aos da construção tipo 3, sendo que o pano de alvenaria consiste em tijolo de 11 cm de rebocado em ambas as faces, e o pano de gesso cartonado consistem em

placas do tipo BA13 com uma espessura de 12,5 mm. As configurações ensaiadas apresentam-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Configurações ensaiadas para a construção tipo 4

Configuração tipo 4	
Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
60	30
	60
120	60

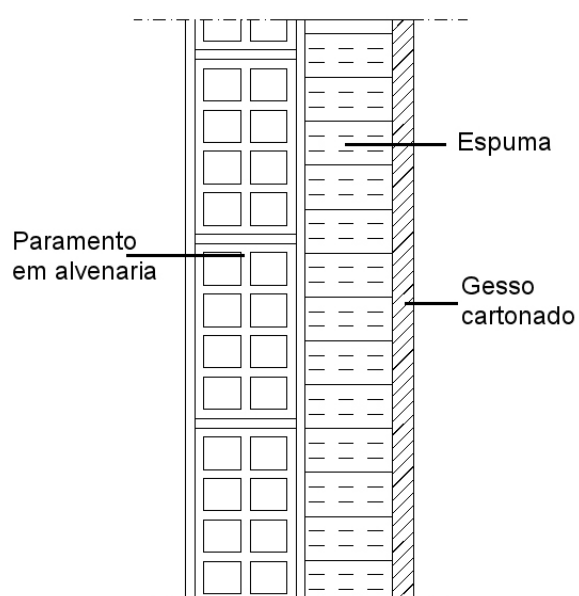


Figura 4.7 - Esquema construtivo da construção tipo 4



Figura 4.8 - Pormenor da colagem das placas de gesso para a construção tipo 4

4.3 MODELOS DE PREVISÃO

O comportamento dos elementos construtivos relativamente ao isolamento sonoro a sons aéreos não é regular em toda a gama de frequências, como já foi referido no capítulo 3. Como tal foram desenvolvidos vários métodos de previsão do isolamento sonoro, baseados em modelos analíticos e numéricos, tentando abranger uma grande diversidade de elementos construtivos. Para muitos casos, segundo alguns estudos realizados [4], é possível prever com bastante precisão o comportamento de diversos tipos de elementos construtivos.

Muito importantes na previsão do isolamento sonoro são os dados de entrada que normalmente se prendem com as dimensões e propriedades dos materiais bem como as condições de ligação entre os panos, sendo que é sempre admitido um campo sonoro difuso.

Para a previsão do comportamento dos elementos construtivos foram admitidas as seguintes características dos materiais:

Quadro 4.5 - Propriedades dos panos das amostras testadas

Propriedades	Gesso	Alvenaria c/ reboco
ρ (kg/m ³)	770	971,5
e (mm)	12,5	130
f_c (Hz)	2712	2500
η	0,01	0,01

4.3.1 MÉTODO DE SHARP

O método de Sharp, publicado em 1973, apresenta-se como uma forma relativamente simples de obter uma estimativa de R por bandas de frequência. Este método, para além da sua componente analítica, tem uma componente numérica resultante de estudos realizados com diversos elementos construtivos.

Este método é de fácil aplicação e requer os seguintes dados de entrada a massa, espessura, velocidade de propagação do material e factor de perdas de cada um dos painéis do elemento, bem como a espessura da caixa-de-ar e se esta contém, ou não, material absorvente no seu interior.

Baseando-se no declive aproximado da recta de R para as diferentes gamas de frequências (definidas no capítulo 3), é necessário definir as frequências limite e os respectivos valores de R, que são função dos dados introduzidos. Na Figura 4.9 encontra-se esquematizado o método, que no fundo se limita a aplicar rectas com um determinado declive, entre intervalos definidos, depois conhecidas as coordenadas dos limites desses intervalos. É de notar que as curvas dos 12 dB/oitava e dos 6 dB/oitava (que se apresentam a tracejado) serão o limite superior e inferior respectivamente. Para o realizar as previsões através deste método foi criada uma folha de cálculo utilizando o software Microsoft Excel, apresentada na Figura 4.10.

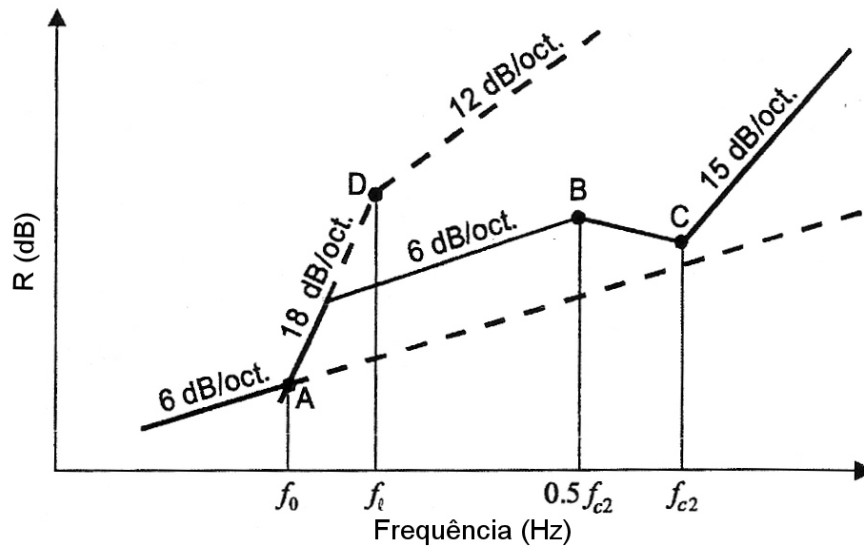


Figura 4.9 - Representação gráfica do método de Sharp [5]

Paredes Duplas (método de Sharp)

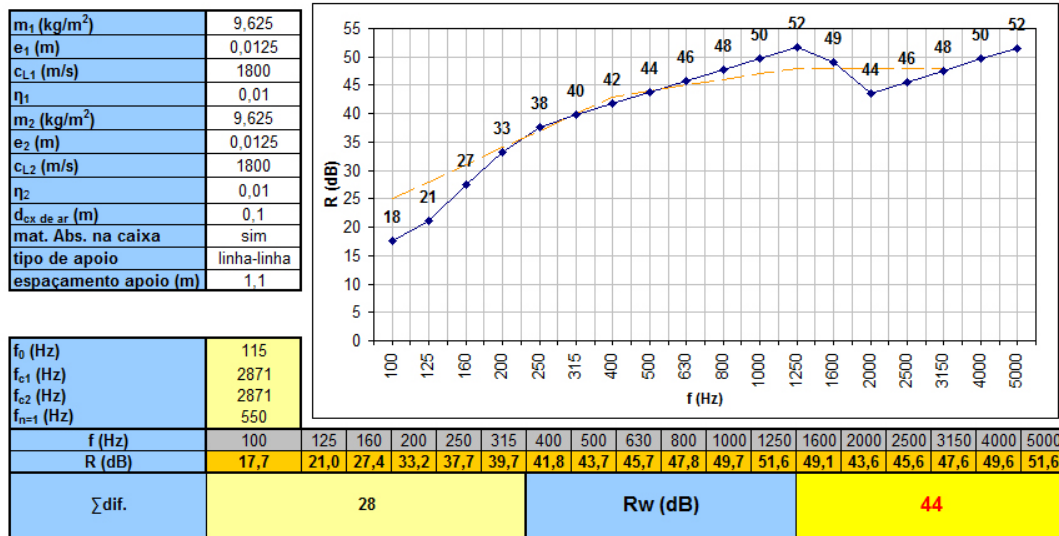


Figura 4.10 - Folha de cálculo para o método de Sharp

Admitindo que o painel 1 será o com a menor frequência crítica, necessitamos então de definir os seguintes pontos:

- Ponto A:

Definindo a frequência de ressonância pela equação (3.12), e o valor de R por [5]:

$$R_A = 20 \cdot \log(m_1 + m_2) + 20 \cdot \log(f_0) - 48 \quad (4.1)$$

- Ponto B:

Obtendo-se a frequência crítica pela equação (3.8), este ponto vai depender do tipo de ligação entre os panos. O modelo foi estudado para três tipos de ligação:

Quando não se utiliza material absorvente na caixa-de-ar, deve-se utilizar a seguinte expressão:

$$R_B = R_A + 20 \cdot \log\left(\frac{f_{c1}}{f_{c2}}\right) - 6 \quad (4.2)$$

Linha-Linha, no caso de o apoio dos painéis ser uma linha para os dois panos. Neste caso R será dado por [5]:

$$R_B = 20 \cdot \log(m_1) + 10 \cdot \log(b) + 30 \cdot \log(f_{c2}) + 20 \cdot \log\left(1 + \frac{m_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m_1 \cdot \sqrt{f_{c2}}}\right) - 78 \quad (4.3)$$

Linha-ponto, no caso de o apoio dos painéis ser uma linha para os dois panos. Neste caso R será dado por [5]:

$$R_B = 20 \cdot \log(m_1 \cdot e) + 40 \cdot \log(f_{c2}) - 99 \quad (4.4)$$

Ponto-ponto, no caso de o apoio dos painéis ser uma linha para os dois panos. Neste caso R será dado por [5]:

$$R_B = 20 \cdot \log(m_1 \cdot e) + 40 \cdot \log(f_{c2}) + 20 \cdot \log\left(1 + \frac{m_2 \cdot f_{c1}}{m_1 \cdot f_{c2}}\right) - 105 \quad (4.5)$$

- Ponto C:

Neste ponto interessa analisar as frequências críticas de cada pano do elemento construtivo.

Assim teremos dois casos diferentes. Quando $f_{c1} = f_{c2}$:

$$R_C = R_B + 6 + 10 \cdot \log(\eta_2) \quad (4.6)$$

Quando $f_{c1} \neq f_{c2}$:

$$R_C = R_B + 6 + 10 \cdot \log(\eta_2) + 5 \cdot \log(\eta_1) \quad (4.7)$$

- Ponto D:

O ponto D resulta da intersecção das curvas dos 18 dB/oitava e dos 12 dB/oitava apresentadas na Figura 4.9.

É importante reparar que depois do ponto A, a curva de R chega a um limite acima do qual o aumento do isolamento sonoro passa a 6 dB/oitava. Isto deve-se à ligação mecânica entre os dois panos – que vai permitir a passagem de vibrações pela estrutura – quando se usam montantes [5].

Existem, no entanto algumas limitações relativamente às simulações que se pretendem efectuar. Não é possível definir a espessura e a densidade do material absorvente utilizado, nem o número de camadas que constituem um painel (no caso de usarmos um painel formado por duas ou placas de gesso). Para além disso, este modelo foi desenvolvido para elementos constituídos por panos finos e homogêneos, pelo que será de esperar algum desvio relativamente aos valores reais quando se estudam paredes com panos pesados.

Além disso, há que analisar o caso em que se utilizam duas placas de gesso por pano – construção tipo 1 –, situação não prevista pelo método de Sharp. Neste caso foi admitiu-se que cada pano de gesso do elemento teria o dobro da massa de um pano com apenas uma placa de gesso, mantendo-se, no entanto a espessura de uma placa. A abstracção de cálculo efectuada resulta em admitir a placa de gesso adicionada como um acréscimo de massa.

4.3.2 MÉTODO DE MEISSER

O método de Meisser é, tal como o de Sharp, um modelo gráfico para paredes duplas, sendo também desenvolvida uma folha de cálculo utilizando o software Microsoft Excel, apresentada na Figura 4.11.

Paredes Duplas (método de Meisser)

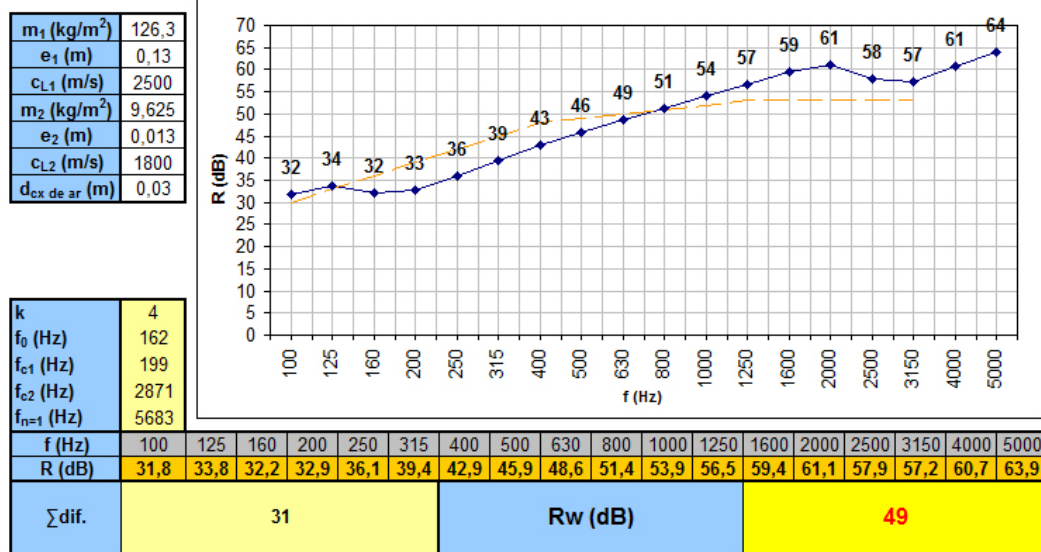


Figura 4.11 - Folha de cálculo para o método de Meisser

O método de Meisser adequa-se mais a elemento duplos com panos pesados.

Este modelo trata-se de um modelo empírico, que tal como o de Sharp resulta em definir as frequências características e respectivos valores de R, traçando a partir destes pontos rectas com declives já definidos.

Inicialmente traça-se uma curva auxiliar, com um declive de 6 dB/oitava, passando por um ponto de cota definida – $f = 500$ Hz, sendo o valor de R obtido pela equação (4.8) – e com correcções nas zonas da frequência crítica (ou frequências críticas no caso de $f_{c1} \neq f_{c2}$), da frequência de ressonância f_0 e das frequências de ressonância na caixa-de-ar f_n . As frequências f_0 e f_c são obtidas pelas equações (3.12) e (3.8) respectivamente.

Definem-se então os pontos através das seguintes fórmulas [15]:

- $f = 500$ Hz:

$$R_{500\text{Hz}} = 13,3 \cdot \log(m_1 + m_2) + K + 13,4 \quad (4.8)$$

Por este ponto passa uma recta com um declive de 6 dB/oitava.

- f_0 :

Ao valor correspondente à frequência f_0 do segmento de recta que passa pelo ponto de frequência igual a 500 Hz, subtrai-se 4 dB

- f_c :

Ao valor correspondente à frequência f_c do segmento de recta que passa pelo ponto de frequência igual a 500 Hz, subtrai-se 5 dB, no caso das frequências críticas dos dois painéis serem diferentes e 9 dB no caso de serem iguais.

- f_n :

Ao valor correspondente a cada uma das frequências f_n do segmento de recta que passa pelo ponto de frequência igual a 500 Hz, subtrai-se 1 dB.

Nos pontos definidos passam rectas com um declive de 10 dB/oitava e -10 dB/oitava até à intersecção com a recta auxiliar. Após a intersecção da recta dos 10 dB/oitava com a curva auxiliar, traça-se uma nova recta com um declive de 8 dB/oitava. A curva final resultará da intersecção de todas estas linhas.

Este método apresenta várias limitações. Sendo um método que depende de poucos factores, não será de esperar uma grande aproximação à realidade; não se considera a presença de material absorvente na caixa-de-ar nem o efeito das ligações entre panos – factor muito importante quando se estuda elementos leves – há que utilizar este método com as devidas reservas.

Tal como aconteceu com o método de Sharp, para as construções tipo 2, duplicou-se a massa de cada pano de gesso mantendo-se a espessura de apenas uma placa.

4.3.3 INSUL

O Insul é um programa de cálculo automático, que de acordo com informação disponível no site do programa [22] é baseado no modelo de Sharp com correcções para os diferentes tipos de elementos.

Para além dos inputs necessários para o método de Sharp, também é possível definir a espessura e a densidade (valores predefinidos) do material absorvente no interior da caixa-de-ar do elemento duplo.

A utilização deste software tem um valor apenas indicativo, permitindo analisar a eficácia de um programa, existente no mercado, no cálculo das diferentes soluções construtivas.

4.4 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Para determinação do isolamento sonoro a sons aéreos em laboratório são utilizadas duas câmaras reverberantes, separadas estruturalmente, nas quais se admite um campo sonoro difuso permitindo desta forma obter o valor de R através da equação (3.5).

O protocolo seguido é o da norma NP EN 20140-3 anteriormente referida.

4.4.1 CÂMARA REVERBERANTE R1

No âmbito dos procedimentos experimentais, convém descrever a câmara receptora R1, que verifica os pressupostos da norma ISO 140-1, sendo assim legítimo admitir-se um campo sonoro difuso para a gama de frequências que se irá estudar.

As características do compartimento receptor influenciam o isolamento sonoro que se irá obter, dado que a sua absorção entra como uma correcção na equação que determinará o valor de R (ver equação

(3.5)). Na Figura 4.12 apresentam-se as dimensões em planta da câmara R1. Para além destas é importante referir o volume, 211 m^3 .

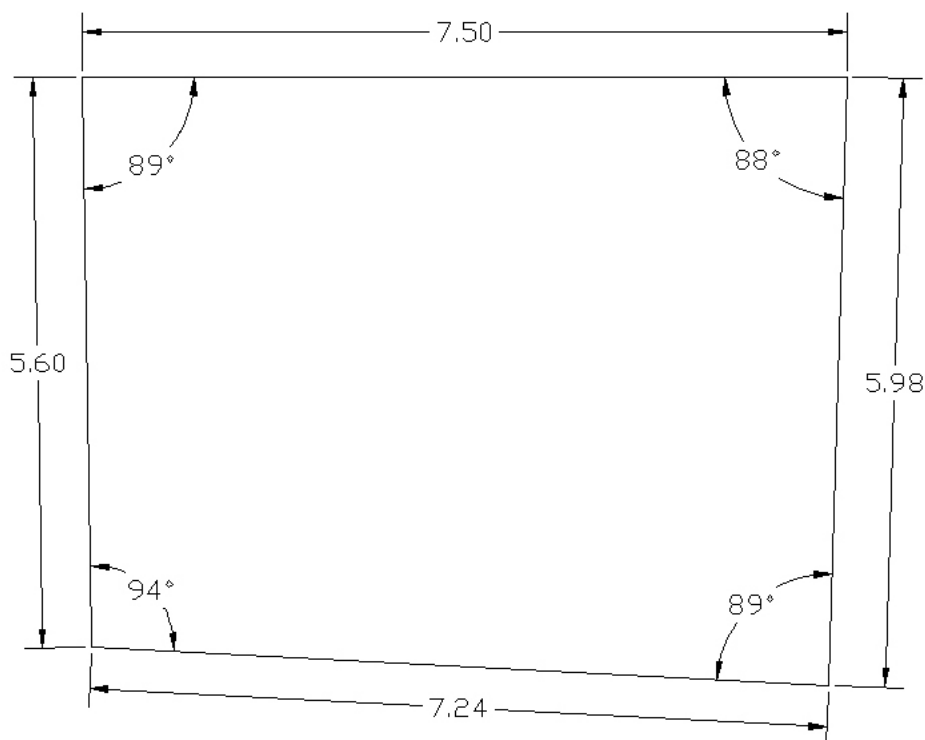


Figura 4.12 - Dimensões em planta da câmara reverberante R1

4.4.2 PROCEDIMENTO

Os ensaios realizaram-se no laboratório de acústica da FEUP, sendo utilizada a câmara E1 como compartimento emissor e a câmara R1 como compartimento receptor.

Os ensaios dos elementos construtivos foram realizados de acordo com a norma ISO 140-3, descrita no capítulo 3.

Depois de montadas as várias amostras na abertura com 10 m^2 , na sala emissora (E1), foi emitido um ruído branco, medindo-se o nível de pressão sonora em três posições diferentes, tanto no compartimento emissor como no receptor (R1). Como os valores obtidos foi calculada uma média energética dos níveis de pressão sonora nos compartimentos R1 e E1, por bandas de frequência de terços de oitava, conseguindo-se o valor de R através da equação (3.5).

Os resultados apresentam-se em bandas de terços de oitava entre os 100 e os 5000 Hz, de acordo com a norma.

O equipamento utilizado nas medições foi o seguinte:

- Sonómetro B&K 2260 (verificado no ISQ -Bol. Ver. 245.70/06.290 de 25 de Maio de 2006);
- Microfone, marca *Brüel & Kjaer* modelo 4189;
- Pré-amplificador, marca *Brüel & Kjaer* modelo ZC0026;

- Fonte sonora, marca *Brüel & Kjaer* modelo 4296;
- Calibrador *B&K 4231* (verificado no ISQ –Bol. Ver. 245.70/06.290 de 25 de Maio de 2006);
- Termo-Higrómetro Digital 4600.
- Sonómetro da marca 01dB-Metavib modelo Blue Premium, classe 1, nº série 60387, (homologado no IPQ e verificado no laboratório de Metrologia do Instituto Português do de Soldadura e Qualidade, verf. nº 254.70/07.330 de 11 de Junho de 2007)
- Microfone marca 01dB-Metavib modelo MCE 212 nº série 80663, (homologado no IPQ e verificado no laboratório de Metrologia do Instituto Português do de Soldadura e Qualidade, verf. nº 254.70/07.330 de 11 de Junho de 2007)
- Calibrador marca Rion modelo NC-74, nº série 34472833, (homologado no IPQ e verificado no laboratório de Metrologia do Instituto Português do de Soldadura e Qualidade, verf. nº 254.70/07.330 de 11 de Junho de 2007)
- Coluna JBL EON.

5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

A análise dos resultados será feita através do espectro da redução sonora, por terços de oitava, obtido para cada elemento ensaiado (R em função da frequência) e, com um valor apenas indicativo, do descritor único R_w , que como já foi referido no capítulo 3, apresenta muitas limitações, sendo que se irá, também analisar este problema no caso em estudo.

Para analisar a precisão dos modelos de cálculo já descritos no capítulo 4, utilizou-se o somatório das diferenças, em bandas de terços de oitava, entre os valores ensaiados e os calculados, admitindo um comportamento regular do espectro da redução sonora.

5.2 ELEMENTOS TIPO 1 E 2

Estas duas configurações foram analisadas em conjunto, visto apresentarem um comportamento semelhante relativamente ao isolamento sonoro, tendo a curva uma variação semelhante em função da frequência.

Para este tipo de material e densidades compreendidas entre os 60 e os 200 kg/m³, na generalidade dos casos, a curva dos valores de R pouco varia em função da densidade. Como podemos concluir pela análise dos gráficos em anexo (A.1.1 e A.1.2 para os elementos tipo 1 e tipo 2 respectivamente), estando os resultados ordenados por espessuras, verifica-se que os valores de R se apresentam semelhantes para as diferentes densidades. Existe, no entanto, uma exceção para os elementos tipo 1 com espumas do tipo 90.30 e 200.30, que em relação aos elementos com espumas 60.30 e 120.30 apresentam uma diferença de cerca de 10 dB na zona dos 2000 Hz. O elemento tipo 1 com a espuma 90.100 (90 kg/m³ de densidade e 100 mm de espessura) apresenta valores de R francamente mais baixos do que nos outros ensaios com espumas da mesma espessura entre os 630 e os 3150 Hz – com uma diferença acumulada na ordem dos 60 dB para a referida banda de frequências. Sendo este um caso isolado, o problema poderá residir na montagem do elemento na câmara ensaio.

Analisando então os resultados por densidades (fazendo variar a espessura), verificamos que o valor de R aumenta com a espessura. Pela análise dos gráficos em anexo (ver A.1.2 e A.2.2 para os elementos tipo 1 e 2 respectivamente), verifica-se uma clara translação na curva com a variação da espessura da espuma utilizada.

Relativamente aos modelos utilizados, verifica-se que para este tipo de elementos, os resultados obtidos pelo método de Sharp e de Meisser se apresentam bastante parecidos. A curva de Sharp ajusta-se ligeiramente melhor, especialmente na gama de frequências mais baixas, até cerca de 315 Hz, (ver Figura 4.9). Nos elementos tipo 1 e 2 os resultados obtidos por estes métodos são bastante inferiores à realidade, verificando-se diferenças acumuladas na ordem dos 240 dB (para ambos os métodos) no

caso dos elementos do tipo 2 com espumas de 100 mm de espessura (ver anexo A.2.3 para o método de Sharp e A.2.4 para o método de Meisser).

O software de cálculo Insul apresenta, para elementos do tipo 1, valores bastante próximos dos medidos, quando a análise é realizada por bandas de frequência. No entanto, sendo os valores ligeiramente mais elevados que os medidos – verificando-se uma diferença acumulada entre os valores ensaiados e calculados de cerca de 60 dB, no caso da espuma 60.30. (ver anexo A.1.5) – a sua utilização envolve algum risco. Relativamente a elementos do tipo 2, os resultados do software Insul encontram-se bastante acima dos valores medidos, chegando as diferenças acumuladas a atingir um valor superior a 100 dB com a utilização de espumas de 30mm de espessura (ver anexo A.2.5), sendo deste modo desaconselhável a utilização deste software.

Na Figura 5.1 apresenta-se um exemplo dos resultados ensaiados e estimados para elementos do tipo 1. Neste caso é utilizada a espuma do tipo 60.30, pelo que as diferenças entre os valores obtidos pelos métodos de Sharp e Meisser divergirão mais da realidade nos casos em que se utilizarem espumas mais espessas.

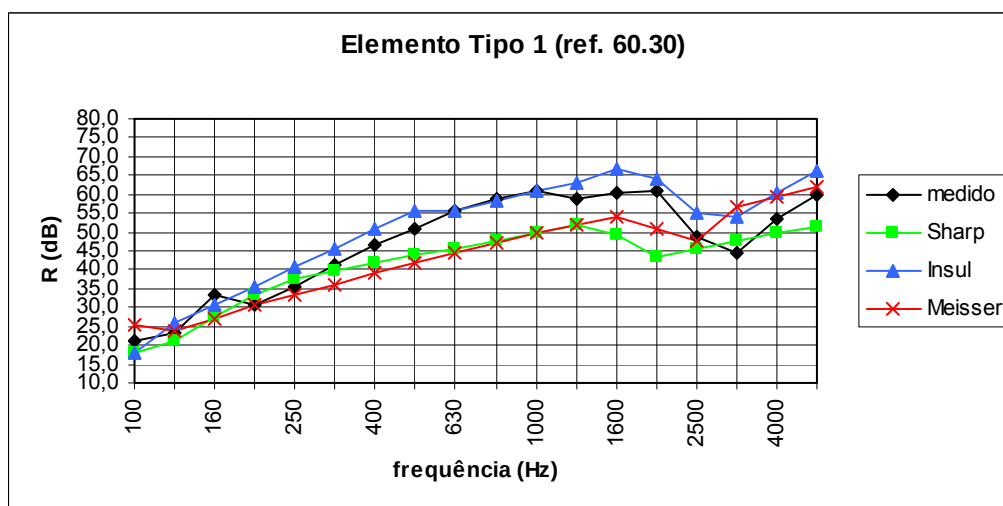


Figura 5.1 - Resultados de R por bandas de frequência de 1/3 de oitava para um elemento tipo 1 com uma espuma 60.30

Na Figura 5.2 apresenta-se um exemplo comparativo dos três modelos de cálculo adoptados, tendo como referência os valores medidos. Podem-se verificar os valores exagerados obtidos com o software Insul, enquanto os que foram calculados com base nos modelos de Sharp e de Meisser, como já foi referido, se encontram bastante abaixo dos resultados dos ensaios.

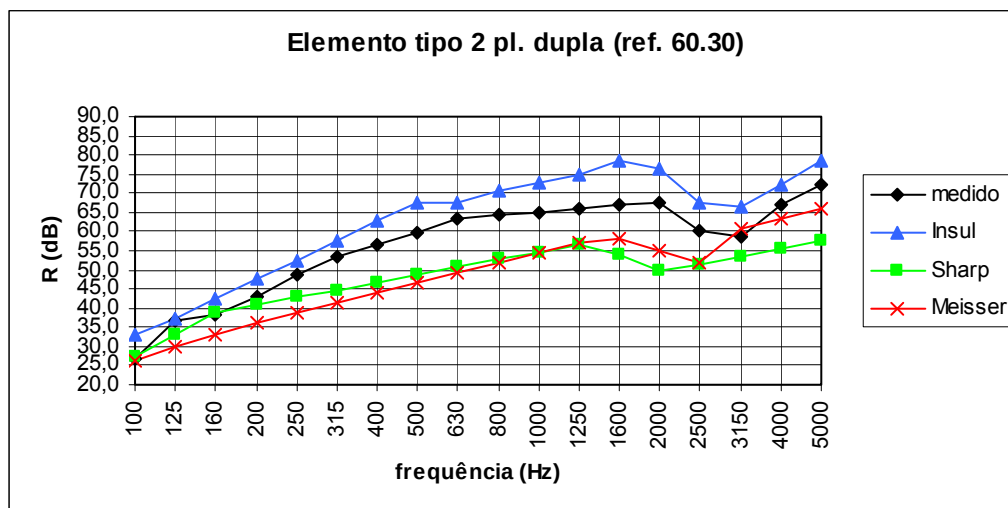


Figura 5.2 - Resultados de R por bandas de frequência de 1/3 de oitava para um elemento tipo 2 com uma espuma 60.30

O indicador único R_w , não fornece informação suficiente para avaliar os diferentes tipos de amostras ensaiadas. Utilizando o exemplo do elemento tipo 1 com a espuma 60.30 e comparando os valores do Quadro 5.1 com as curvas da Figura 5.1, conclui-se que, apesar das diferenças significativas que se verificam na análise por bandas de frequência, entre os modelos de Sharp e Meisser e os valores medidos, o mesmo não se verifica em relação ao valor de R_w , sendo a diferença no ultimo caso de 2 dB. No caso da curva obtida pelo programa Insul, neste caso a mais próxima com a realidade, verifica-se a maior diferença entre o R_w obtido na câmara e o resultante das simulações.

Quadro 5.1 - Valores de R_w para um elemento do tipo 1 e uma espuma 60.30

Método	R_w (dB)
experimental	46
Sharp	44
Insul	49
Meisser	44

Relativamente ao segundo exemplo (elemento tipo 2 com espuma 60.30) as diferenças entre os valores obtidos em câmara e os calculados amplia. Comparando as curvas da Figura 5.1 e da Figura 5.2 verifica-se que a maior diferença reside nas frequências entre os 100 e os 630 Hz. Nesta gama de frequências verifica-se uma maior divergência entre os modelos de Sharp e Meisser relativamente aos valores medidos na câmara.

Analisando o Quadro 5.2, verificamos que a diferença entre o valor do R_w correspondente ao método experimental se encontra 4 dB abaixo do valor obtido através do software Insul. Analisando a Figura 5.2 verificamos diferenças na ordem dos 10 dB em certas frequências, levando à conclusão de que o índice R_w não fornece informação suficiente para situações em que se pretende isolar uma banda restrita de frequências.

Quadro 5.2 - Valores de R_w para um elemento do tipo 2 e uma espuma 60.30

Método	R_w (dB)
experimental	57
Sharp	51
Insul	61
Meisser	49

5.2.1 PROPOSTA DE MODELO DE ESTIMAÇÃO

Analisando os gráficos dos ensaios relativos aos elementos tipo 1 e 2, presentes no (anexos A.1 e A.2), podemos verificar que a forma das curvas obtidas pelo método de Sharp é a que mais se aproxima das curvas obtidas experimentalmente.

Com base nos dados dos ensaios, foram então introduzidas algumas alterações (com base experimental) de modo a ajustar a curva de R calculada aos valores obtidos na câmara reverberante. É importante referir que as alterações efectuadas apenas são validas para os elementos estudados (com e sem espuma), ou seja, na terminologia utilizada no modelo de Sharp, para painéis em gesso com as propriedades apresentadas no Quadro 4.5, sendo as ligações entre painéis do tipo “linha-linha”.

O facto de o método não considerar o factor “espessura do material absorvente” revela-se uma lacuna importante no caso presente. Também se verifica que há um majoramento do efeito dos montantes. Para os montantes utilizados nestes ensaios, a transmissão de energia entre os dois panos não será tão gravosa como se verifica através dos cálculos. Por outro lado os valores calculados para R nos pontos A, B e C (ver Figura 4.9) através das equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.6) dista dos que se observam nas medições efectuadas. Resumidamente, as alterações visaram os seguintes pontos:

- Estudar a influência da espessura da espuma;
- O declive da curva após a frequência f_1 (ver Figura 4.9) afasta-se muito da realidade;
- A quebra da curva na zona da frequência crítica não se iniciará tão marcadamente na banda de frequências correspondente a metade da frequência crítica;
- Os valores de R das frequências críticas obtidos pelas equações (4.3) e das frequências de ressonância obtidos pela equação (4.6) não se ajustam aos valores observados nas medições.

Além dos pontos focados, há que ter em conta a curva de referência com um declive de 6 dB/oitava, que limita o valor mínimo da curva obtida. Nos casos analisados e tomando como exemplo o elemento tipo 1 com uma espuma 60.30, verificamos que este limite mínimo não está em concordância com a realidade. Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 apresentam-se as curvas obtidas pelo modelo de Sharp e pelos ensaios respectivamente, estando explicitada a curva do limite mínimo. Na Figura 5.4 verifica-se que na zona da frequência crítica o valor de R desce abaixo deste mínimo.

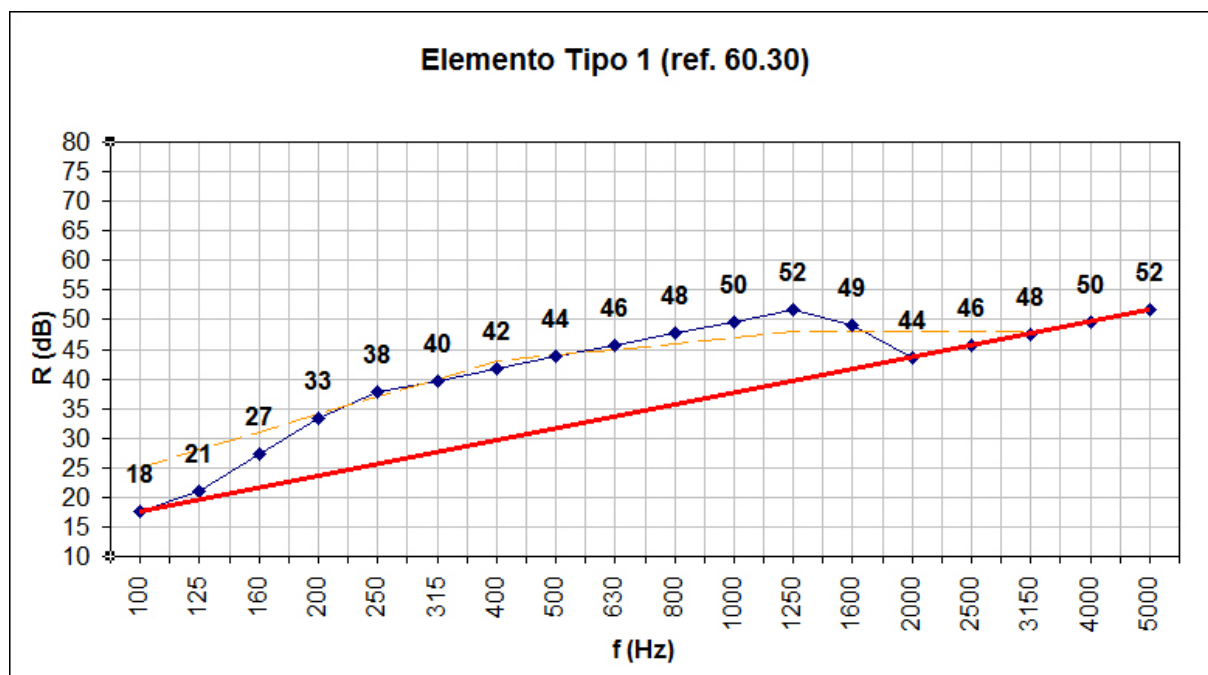


Figura 5.3 - Limite mínimo para os valores obtidos pelo método de Sharp

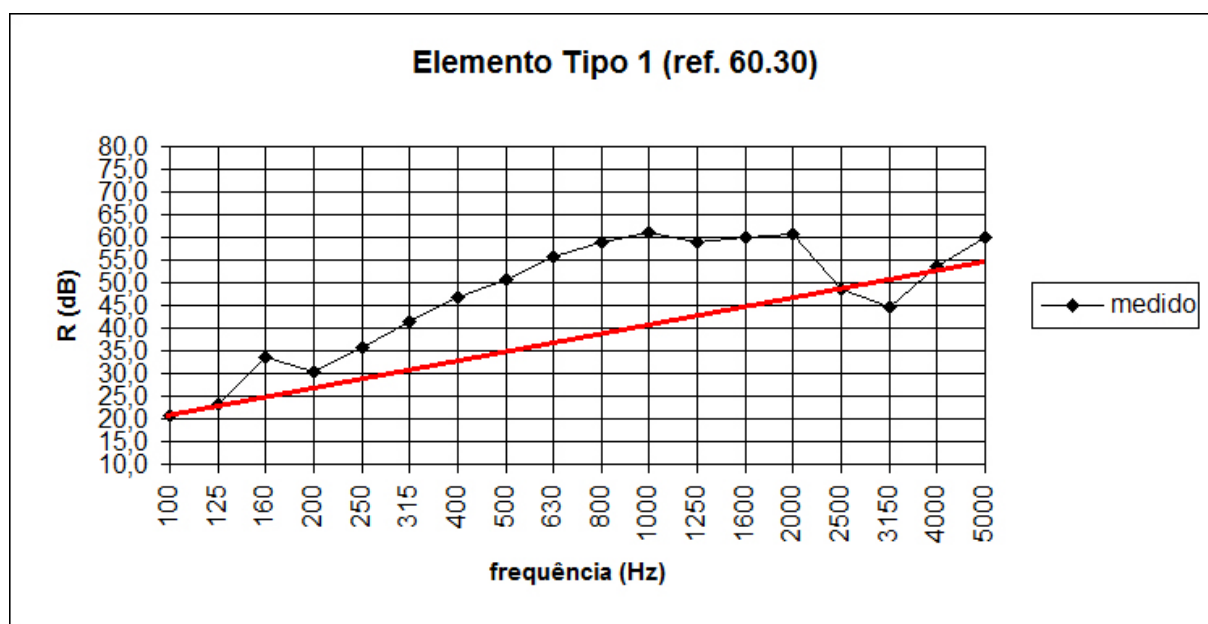


Figura 5.4 - Limite mínimo do método de Sharp aplicado aos valores medidos

Procedeu-se então a alteração do método de modo a que este se adapte melhor aos valores obtidos, sendo importante frisar que estas modificações apenas são válidas para os elementos estudados do tipo 1 e 2. Foram implementadas as seguintes alterações:

- A ordenada $0,5 \cdot f_c$ passou para $0,65 \cdot f_c$

- O declive da curva a partir de f_0 passou de 18 dB/oitava para 15 dB/oitava
- Aos valores de R_A (equação (4.1)) R_B (equação (4.2) e (4.3)) e R_C (equação (4.6)) foram adicionados os seguintes coeficientes em função da espessura da espuma utilizada.

Comparando os métodos de Sharp original e alterado, aplicados a título de exemplo aos elementos do tipo 1 com espumas de espessura igual a 30 mm, obtemos os seguintes resultados:

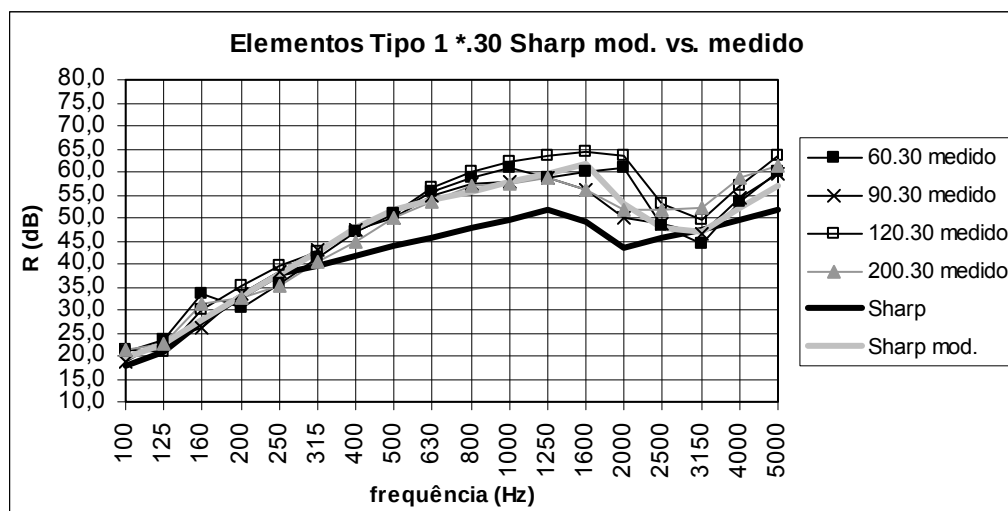


Figura 5.5 - Sharp modificado versus Sharp original em elementos tipo 1 com espumas de 30 mm

Relativamente à partição dupla de gesso cartonado, semelhante aos elementos tipo 1, mas sem incorporar as espumas na caixa-de-ar, verificou-se também uma boa aproximação da curva de Sharp modificada aos valores obtidos por ensaio. Analisando a Figura 5.6 verifica-se uma grande melhoria relativamente ao método de Sharp original para o elemento ensaiado.

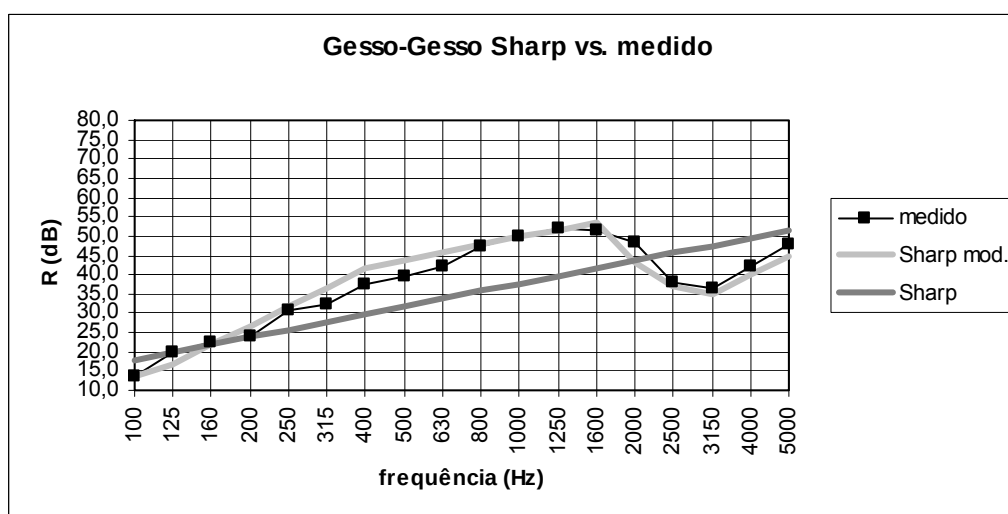


Figura 5.6 - Gráfico comparativo de um elemento duplo em gesso cartonado sem espuma

Em anexo (nos pontos A.1.6 e A.2.6 para os elementos tipo 1 e 2 respectivamente) encontra-se a comparação entre os espectros da redução sonora para os valores ensaiados e calculados pelo método de Sharp alterado. Para elementos tipo 1 verificaram-se diferenças acumuladas de 20 a 40 dB (em média 1 a 2 dB por banda de frequência) entre os valores calculados e os ensaiados, com um comportamento muito semelhante entre as duas curvas, sendo a aproximação bastante precisa. Com o método original para as mesmas situações as diferenças acumuladas situam-se entre 100 e 200 dB.

Para elementos tipo 2 as diferenças acumuladas entre o método alterado e os valores medidos variam entre 30 e 90 dB, muito inferiores aos valores obtidos pelo método original, situando-se as diferenças neste caso entre os 150 e os 250 dB.

Os valores de R_w para as duas situações apresentam-se no Quadro 5.3. Apesar do indicador R_w não ser um bom meio de comparação, com as limitações que já foram referidas, verifica-se a aproximação entre os valores ensaiados e os calculados.

Quadro 5.3 - Valores de R_w ensaiados e obtidos pelo método de Sharp com as alterações propostas

Elemento	Referência espuma	R_w (dB) medido	R_w (dB) Sharp mod.
Tipo 1	60.30	46	46,0
	90.30	46	46,0
	120.30	47	46,0
	200.30	47	46,0
	60.60	50	50,0
	60.100	54	55,0
	90.100	51	55,0
	120.100	54	55,0
	200.100	53	55,0
Tipo 2	60.30	57	54,0
	60.100	63	64,0

Como conclusão das adaptações realizadas, consideram-se as seguintes correcções para o método de Sharp, para a análise dos elementos em gesso cartonado de placa simples e dupla e de paramentos com a mesma frequência crítica, com espumas de densidades entre os 60 e os 200 kg/m³, e com um preenchimento da caixa-de-ar entre 0 e 100%:

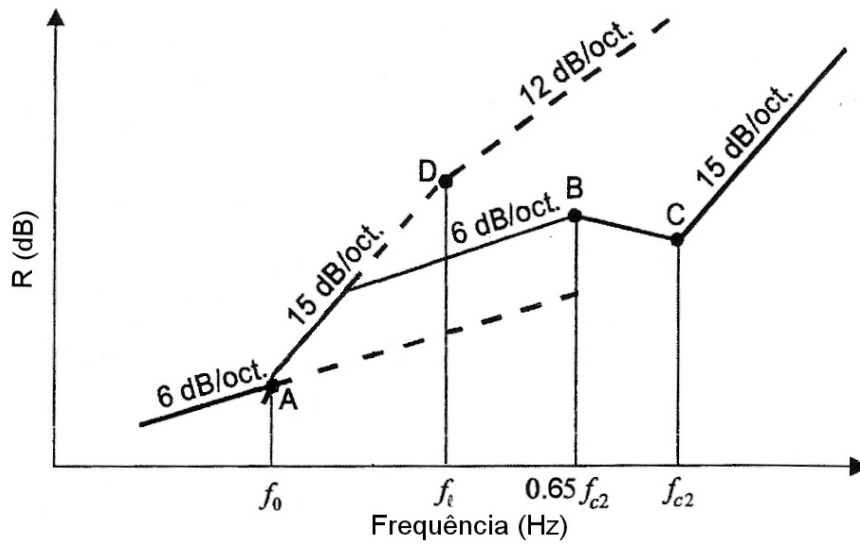


Figura 5.7 - Método de Sharp adaptado

Numerando os paramentos do elementos de modo a que a frequência crítica do paramento 1 – f_{c1} – seja a menor, sendo m_1 e m_2 as massas dos paramentos 1 e 2 respectivamente, η_2 o factor de perdas do paramento 2 e b a distância entre os montantes da estrutura de suporte do elemento, os valores do índice de isolamento a sons de transmissão aérea são obtidos pelas seguintes equações:

- Ponto A:

$$R_A = 20 \cdot \log(m_1 + m_2) + 20 \cdot \log(f_0) - 48 + K_A$$

- Ponto B:

$$R_B = 20 \cdot \log(m_1) + 10 \cdot \log(b) + 30 \cdot \log(f_{c2}) + 20 \cdot \log\left(1 + \frac{m_2 \cdot \sqrt{f_{c1}}}{m_1 \cdot \sqrt{f_{c2}}}\right) - 78 + K_B$$

- Ponto C:

$$R_C = R_B + 6 + 10 \cdot \log(\eta_2) + K_C$$

Os coeficientes K_A , K_B e K_C encontram-se expressos no Quadro 5.4 em função da percentagem de preenchimento da caixa-de-ar com espuma.

Quadro 5.4 - Coeficientes do método de Sharp adaptado

Espessura (% da caixa-de-ar)	K_A	K_B	K_C
0	-4	16	4
25	2	8	8
50	6	14	6
100	10	16	12

5.3 ELEMENTOS TIPO 3 E 4

Para este tipo de construções e para as duas densidades ensaiadas (60 e 120 kg/m³) pode-se concluir que – à semelhança do que se sucede no caso dos elementos tipo 1 e 2 – o isolamento sonoro a sons aéreos dos elementos do tipo 3 e 4 mantém-se semelhante no caso de se a espessura for constante. Nos elementos tipo 3 os resultados foram semelhantes para todos os tipos de espumas utilizadas como se pode verificar na Figura 5.10. Nos elementos tipo 4 verificaram-se variações a nível do R com a espessura. No entanto convém frisar que, devido à falta de dados devido ao reduzido número de amostras testadas, não é possível estabelecer uma relação entre a variação da densidade e da espessura e o aumento do isolamento sonoro a sons aéreos.

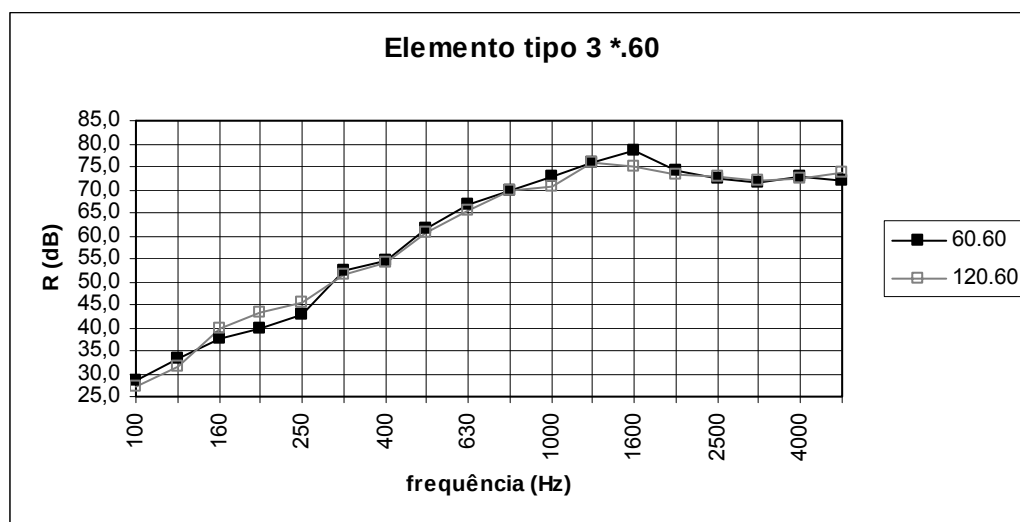


Figura 5.8 - Valores dos ensaios para elementos do tipo 3 com espumas de 60 mm de espessura

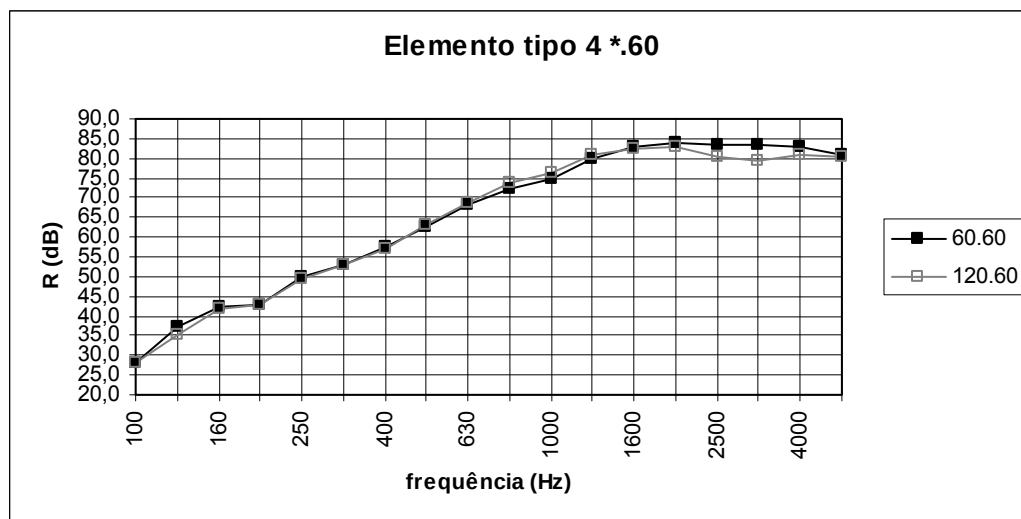


Figura 5.9 - Valores dos ensaios para elementos do tipo 4 com espumas de 60 mm de espessura

O método de Sharp foi estudado para partições leves (como é o caso do gesso cartonado), sendo que os resultados das previsões para elementos que incorporam painéis com uma massa superficial maior distam da realidade. Na zona entre os 100 e os 400 Hz verificam-se grandes disparidades, especialmente nos elementos do tipo 3, sendo o valor de R obtido acima do medido. A partir dos 500 Hz os valores obtidos pelo método de Sharp encontram-se muito abaixo da realidade, especialmente na zona da frequência crítica do pano de gesso, sendo que a quebra que se verifica nos valores estimados não se apresenta com tal grandeza nos valores medidos.

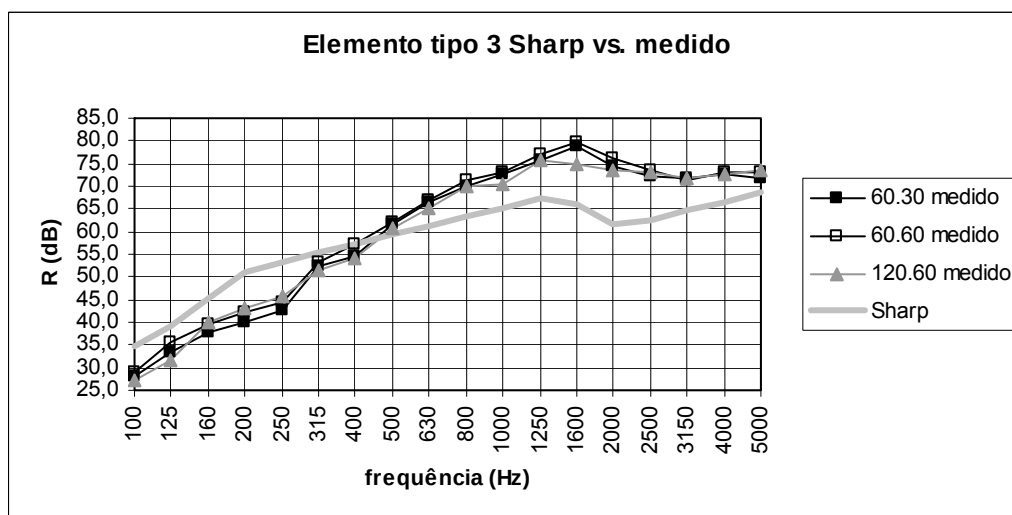


Figura 5.10 - Comparação entre o método de Sharp e os valores ensaiados para elementos tipo 3

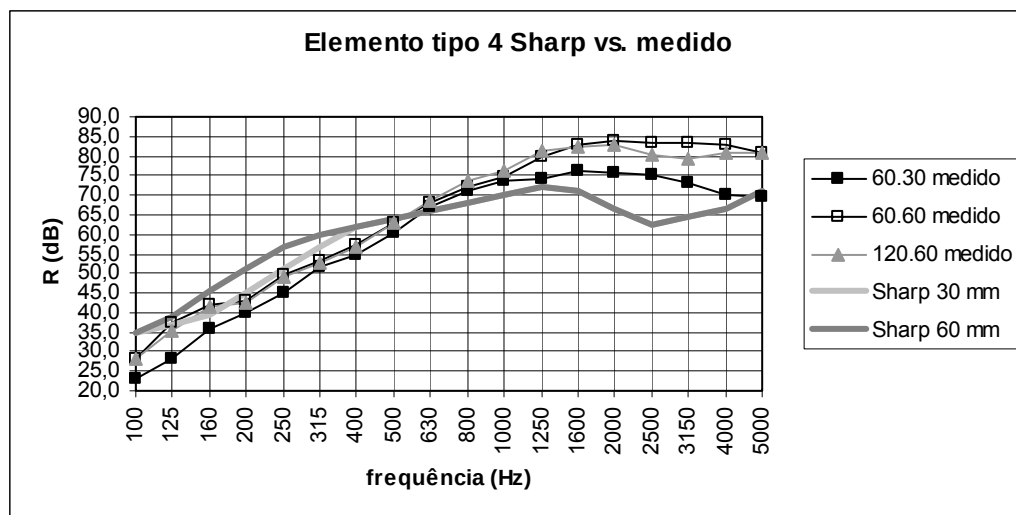


Figura 5.11 - Comparação entre o método de Sharp e os valores ensaiados para elementos tipo 4

É de notar que para os elementos de tipo 4, a diferença entre valores medidos e calculados para baixas frequências é mais gravosa para o caso das espumas com 60 mm de espessura. Nas frequências altas o valor obtido pelo método de Sharp mantém-se igual quer para as espumas de 30 como para as de 60 mm, sendo que na realidade há um aumento de performance.

O método de Meisser, dependendo de poucos factores (como já foi referido), também não se aproxima dos valores medidos, sendo que a curva apresenta um declive muito reduzido. No entanto a forma das duas curvas aproxima-se bastante. Visto que o método de Meisser se baseia em aplicar correcções a uma curva que respeita a lei da massa (tendo um declive de 6dB/oitava), é de esperar que um elemento duplo terá uma performance superior ao previsto por este método.

Na Figura 5.12 apresentam-se os resultados de ensaio de um elemento tipo 3 com uma espuma 60.30 e da respectiva previsão pelo método de Meisser.

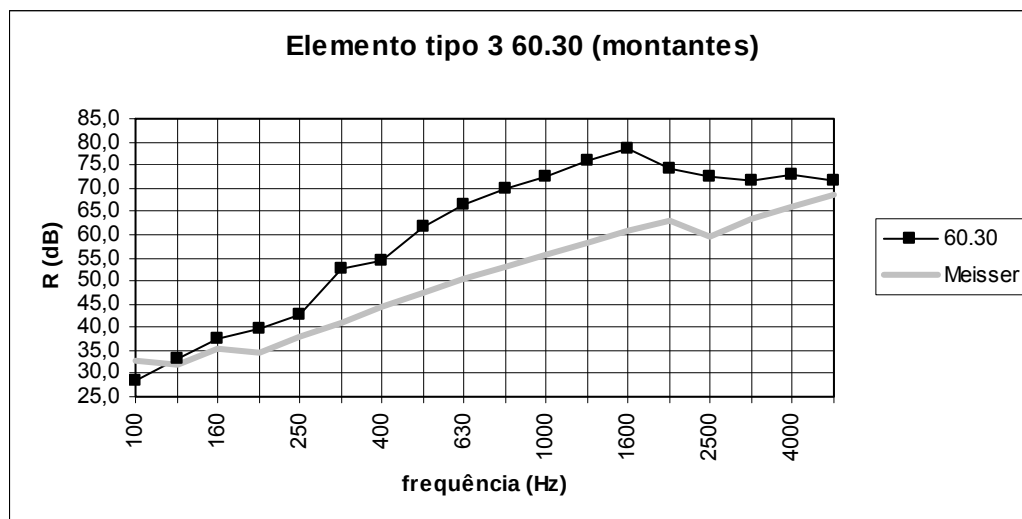


Figura 5.12 – Comparação entre valores medidos e previstos pelo método de Meisser para um elemento tipo 3 com espumas 60.30

Como é visível na Figura 5.12, o declive da recta dos valores obtidos na câmara reverberante é superior ao da recta correspondente ao método de Meisser. Esta situação verificou-se para os restantes ensaios, tanto para elementos do tipo 3 como do tipo 4.

Comparando o método de Sharp e o de Meisser para estes dois tipos de elementos, verificamos que o segundo se aproxima mais da curva real. Tirada esta conclusão, e tal como aconteceu no caso dos elementos do tipo 1 e 2, adaptou-se o método de cálculo aos resultados obtidos. No entanto, dada a escassez de dados, as alterações adoptadas resumem-se a alterar o declive da recta, somando uma constante à equação (4.8), aproximando assim as rectas teóricas e reais. Em anexo (A.3 para os elementos tipo 3 e A.4 para os elementos tipo 4) encontram-se os resultados.

Relativamente ao software comercial Insul, verificaram-se valores bastante aceitáveis. A curva obtida aproxima-se da curva do método de Meisser com as alterações admitidas. Apenas para os elementos do tipo 4 é que se verifica uma divergência em relação aos valores medidos.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE O PRODUTO EM ESTUDO E OUTRAS SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO

Nesta secção pretende-se comparar os resultados obtidos para os elementos à base da espuma “Aglomex” com os de outras divisórias leves contendo material absorvente na caixa-de-ar. Hoje em dia o material absorvente mais utilizado em divisórias semelhantes às ensaiadas é a lã mineral. Como tal é do maior interesse realizar uma comparação entre divisórias leves à base de espumas de poliuretano “Aglomex Acoustic” e soluções construtivas que utilizem lã de rocha ou lã de vidro.

5.4.1 DIVISÓRIAS EM GESSO CARTONADO

Relativamente às divisórias em gesso cartonado, verifica-se a predominância de soluções que utilizam duas placas de gesso por paramento, adoptando-se então as divisórias do tipo 2 como base de comparação.

As divisórias “Placostil” são um sistema construtivo comercializado pela empresa PLACO. Estes elementos são constituídos pelos seguintes materiais:

- Dois panos, cada um deles constituído por duas placas de gesso cartonado do tipo BA13
- Montantes espaçados de 0,6 metros por cada pano. Os montantes de cada um dos panos encontram-se desfasados como se pode verificar na Figura 5.13.
- Lã de rocha com uma espessura de 65 mm.

Os sistemas “Placostil” considerados foram os seguintes:

- SAA 120, com uma caixa-de-ar de 70 mm;
- SAA 140, com uma caixa-de-ar de 90 mm;
- SAD 160, com uma caixa-de-ar de 110 mm.

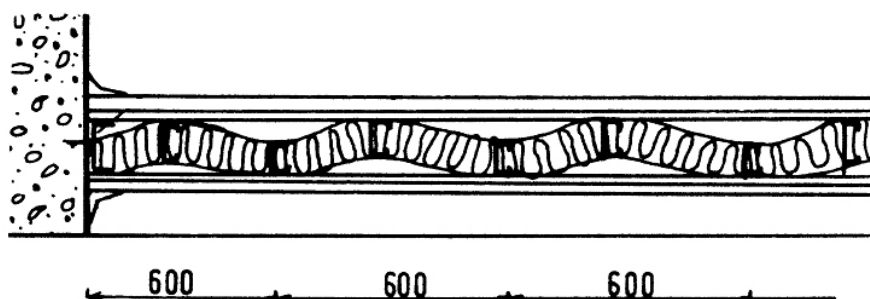


Figura 5.13 – Detalhe em planta das divisórias “Placostil”

Os sistemas SAA 120 e SAA 140 apresentam um desempenho semelhante, sendo o somatório das diferenças por frequência 11 dB. O sistema SAD 160 destaca-se, com uma diferença na ordem dos 50 dB, das restantes divisórias Placostil

Analisando os resultados apresentados graficamente na Figura 5.14, verificamos que o elemento tipo 2 com a espuma 60.100 se aproxima bastante do sistema SAD 160, sendo a diferença acumulada entre estas duas divisórias aproximadamente 11 dB. O elemento tipo 2 com espuma 60.30 apresenta valores do isolamento sonoro mais baixos que os sistemas Placostil, sendo a diferença relativamente as divisórias SAA 120 e SAA 140 de aproximadamente 50 dB, o que pode ser explicado pela reduzida espessura da espuma utilizada.

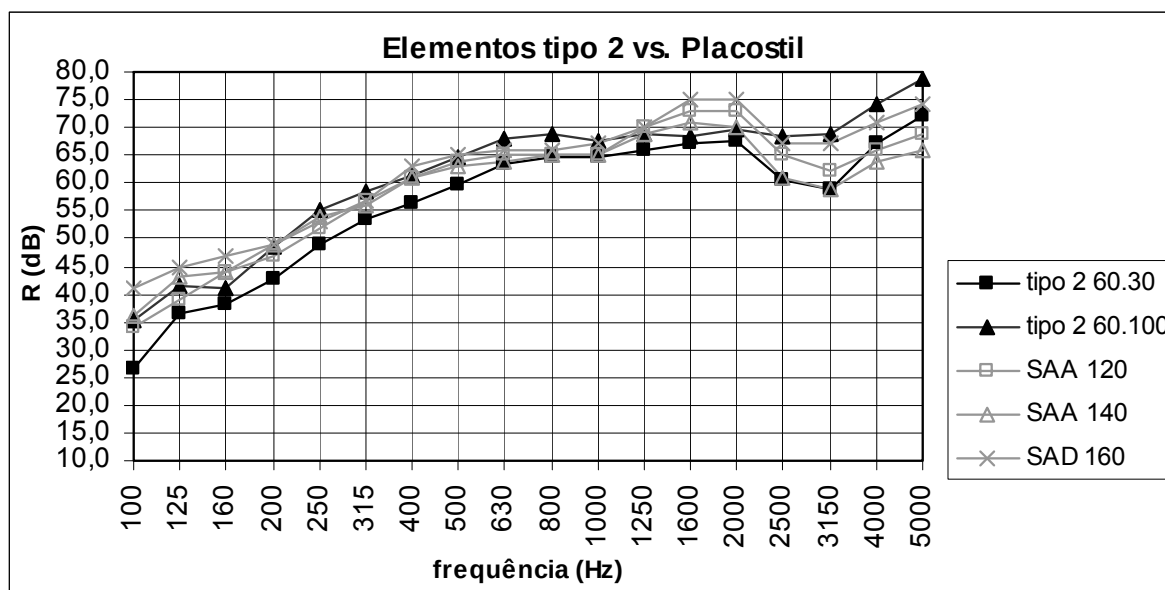


Figura 5.14 - Comparação entre sistemas "Placostil" e elementos tipo 2

Os sistemas de divisórias "Pladur acústico 122/600" são comercializados pela empresa URALITA. Em semelhança com as divisórias Placostil, este sistema consiste numa divisória em gesso cartonado com lã mineral na caixa-de-ar como se pode verificar na Figura 5.15.

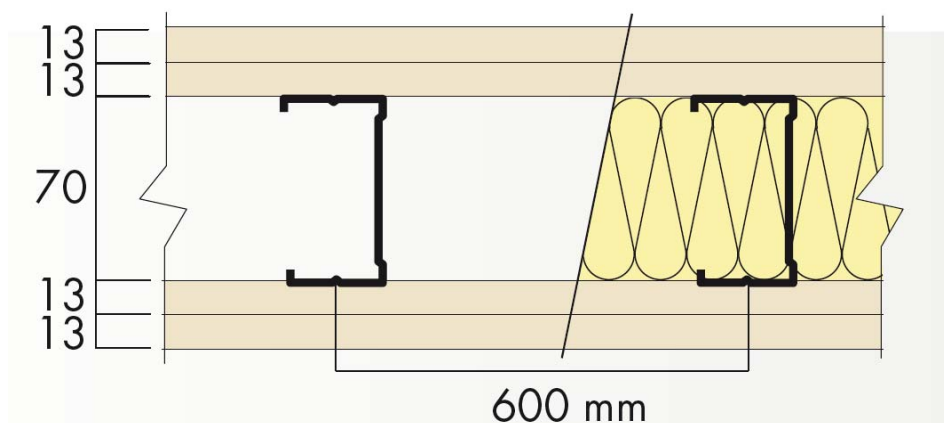


Figura 5.15 - Detalhe da divisória Pladur acústico 122/600

Para este elemento apenas se encontra disponível o indicador único R_w , pelo que a comparação não será efectuada por frequência. Analisando o Quadro 5.5 verifica-se que mesmo o elemento com a espuma menos espessa apresenta um valor de R_w 3 dB acima do sistema Pladur. No entanto há que ter em conta a menor espessura da caixa-de-ar da divisória 122/600.

Quadro 5.5 - Comparação entre sistema "Pladur acústico 122/600" e elementos tipo 2

Elemento	Referência espuma	R _w (dB) medido
Tipo 2	60.30	57
	60.100	63
"Pladur"	---	55

É importante frisar que os sistemas aqui apresentados para comparação não apresentam exactamente a mesma montagem das divisórias estudadas no presente trabalho. Há que ter em conta a diferença da espessura da caixa-de-ar bem como o espaçamento dos montantes (1,1 m nos elementos ensaiados e 0,6 m nos elementos que serviram de comparação). Além disso a disposição dos montantes difere nos vários casos, sendo a disposição mais desfavorável a presente no sistema Pladur acústico 122/600, com apenas um montante ligando ambos os paramentos.

Pela análise dos resultados, e tendo em conta as divergências na montagem dos elementos já mencionadas, verifica-se um comportamento bastante semelhante entre as espumas de aglomerado de poliuretano e a lã mineral, relativamente ao isolamento sonoro a sons de transmissão aérea, quando aplicadas em divisórias leves.

5.4.2 DIVISÓRIAS EM ALVENARIA E GESSO CARTONADO

Para comparar os elementos tipo 3 e 4 com uma outra solução de características semelhantes, foi considerado o sistema "Calibel", comercializado pela empresa ISOVER, aplicado sobre um paramento em alvenaria de tijolo furado, com 90 mm de espessura rebocado em ambas as faces. O sistema aplicado foi o "Calibel 10+40", constituído por um painel de lã de vidro "Isover" com uma densidade de 70 kg/m³ e um paramento de gesso cartonado com 10 mm de espessura. Os resultados de ensaio para este sistema foram apresentados em bandas de oitava.

Considerou-se os elementos tipo 4, por serem colados directamente sobre o paramento de alvenaria (tal como o sistema Calibel), a base de espumas com uma densidade de 60 kg/m³. Analisando a Figura 5.16, verificamos uma clara vantagem para os elementos à base de espumas Aglomex. No entanto há que ter em conta a menor espessura dos paramentos adoptados no sistema Calibel, tanto de alvenaria como de gesso, que impedem uma comparação mais precisa.

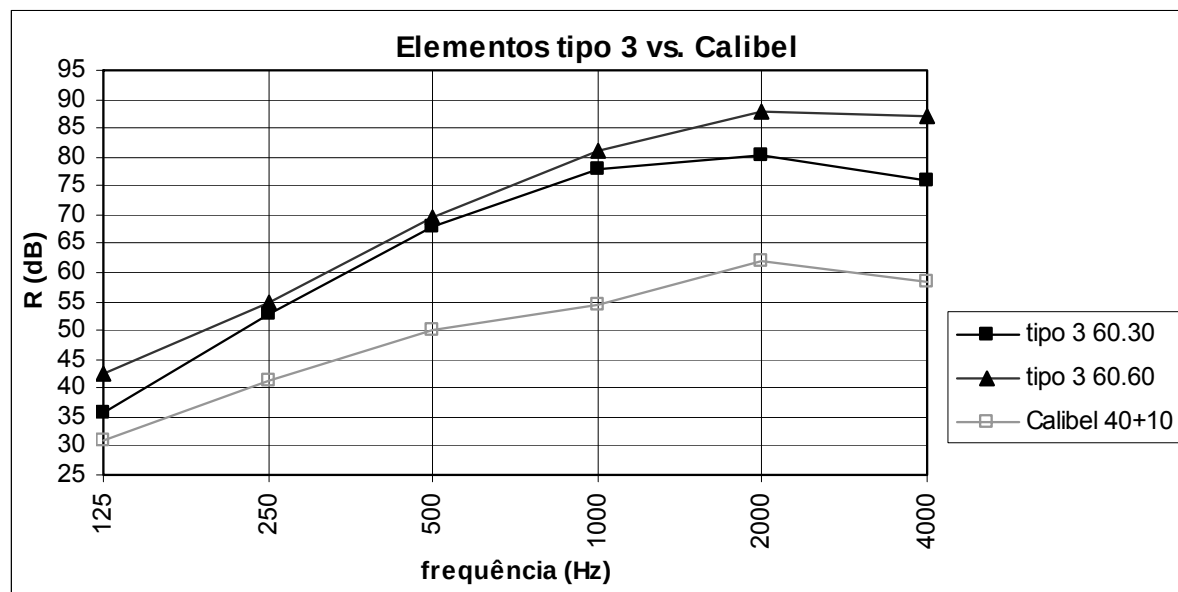


Figura 5.16 - Comparação entre sistemas "Placostil" e elementos tipo 2

6

CONCLUSÃO GERAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

As espumas de aglomerado de poliuretano estudadas apresentam um grande potencial, a nível de isolamento sonoro, como material absorvente a utilizar em caixas-de-ar de elementos duplos. Os resultados obtidos demonstram que, quer para divisórias leves, quer para elementos de alvenaria com um painel em gesso cartonado, o isolamento sonoro aumenta bastante com a utilização deste tipo de espumas no seu interior. Para as densidades ensaiadas, constatou-se que a espessura de espuma se revela um factor importante na performance do elemento relativamente ao isolamento sonoro a sons de transmissão aérea, sendo que R aumenta com a espessura. O facto de ser um produto resultante de resíduos de produção, de fácil utilização e, em comparação com materiais absorventes como a lã de rocha, bastante limpo, torna esta solução muito atraente para a aplicação em divisórias duplas. Relativamente à lã mineral – o material mais utilizado entre paramentos de divisórias leves –, apesar dos elementos utilizados na comparação não apresentarem exactamente as mesmas características no que toca às dimensões e construção, conseguimos (com algumas considerações) chegar à conclusão as soluções ensaiadas e as existentes no mercado apresentam um nível de isolamento sonoro a sons aéreos semelhante.

O modelo de Sharp apresenta resultados bastante próximos da realidade quando se analisam soluções em que os panos do elemento duplo se possam considerar elementos homogéneos, como é o caso dos elementos constituídos exclusivamente por placas de gesso cartonado. No entanto, as limitações existentes relativas aos dados de entrada não permitem fazer variar o tipo de material absorvente utilizado. Nos casos aqui ensaiados, tornou-se necessário realizar algumas alterações de natureza experimental ao método, desta feita aproximando os valores calculados aos medidos, sendo os resultados obtidos bastante positivos.

Para analisar soluções que empregam alvenarias em tijolo furado em conjunto com um painel em gesso cartonado, o método de Meisser apresentou maior semelhança com a realidade se encontra direccionado para este tipo de soluções construtivas.

O software Insul apresenta, no caso dos elementos tipo 1, 3 e 4, valores bastante próximos da realidade, embora existam sempre situações em que o isolamento sonoro calculado exceda os valores obtidos na realidade. No caso dos elementos tipo 2, verificou-se que os valores obtidos com o programa se apresentavam exagerados em comparação com a realidade.

Da análise dos métodos de cálculo conclui-se que não existe um modelo valido para todos os casos. Sendo que as divisórias aqui estudadas representam uma amostra muito reduzida do universo de soluções construtivas existentes e sendo fácil a adaptação dos modelos existentes através da aplicação de coeficientes de correcção baseados na análise de dados experimentais, com o recurso a valores obtidos em ensaios, será de todo o interesse a elaboração de uma base de dados contendo as alterações

aos modelos de cálculo para as diferentes soluções construtivas. Como tal sugere-se a realização de mais ensaios ou a análise de ensaios já realizados. No presente trabalho, o reduzido número de ensaios a elementos dos tipos 3 e 4 (alvenaria e gesso), limitou a análise da variabilidade da performance com a alteração das características da espuma.

Ainda relativamente ao material absorvente, seria interessante compreender o efeito da densidade da espuma no isolamento sonoro. Os ensaios aqui apresentados demonstram que, para densidades entre os 60 e os 200 kg/m³, a performance relativamente ao isolamento a sons aéreos apenas varia com a espessura da espuma. Como a diferença entre não ter qualquer espuma, e utilizar uma espuma com uma densidade de 60 kg/m³ é substancial, seria interessante num trabalho futuro estudar casos em que se utilizam espumas de densidades menores (entre 0 e 60 kg/m³), com o objectivo de estabelecer uma relação entre R e a densidade da espuma.

Concluiu-se então através da comparação entre os dados experimentais e os valores calculados pelo método de Sharp que é possível obter uma boa estimativa do comportamento acústico de elementos em gesso cartonado com espumas de aglomerado de poliuretano aplicadas na caixa-de-ar. Através da introdução das alterações sugeridas no capítulo 5.2.1, obteve-se uma boa aproximação

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Osipov, P. Mees, G. Vermeir - Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings *Applied Acoustics*. 52:3-4 (1997). p. 273-288.
- [2] "acoustics" - <http://www.britannica.com/eb/article-9109556>. - Encyclopædia Britannica Online, 2007.
- [3] Andreia Pereira, António Tadeu, Luís Godinho, Julieta António - *Soluções analíticas para o cálculo do isolamento aos sons aéreos e de percussão de painéis simples e multi-camada: comparação com resultados experimentais e expressões simplificadas*. Coimbra: 2007.
- [4] Ballagh, Keith O. - *Accuracy of Prediction Methods for Sound Transmission Loss*. Praga: 2004.
- [5] Bies, David A.; Hansen, Colin H. - *Engineering noise control : theory and practice*. 3ª Edição. London: Spon Press, 2003.
- [6] *Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de Janeiro*. - Diário da República – 1ª Série Nº 12. 2007.
- [7] *EN ISO 140-3 "Acústica: Medição em laboratório do isolamento a sons aéreos - Parte 3: Medição em laboratório do isolamento sonoro a sons aéreos de elementos de construção"*. - Comité Europeu de Normalização, 1995.
- [8] *EN ISO 717-1 "Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation"*. - Comité Europeu de Normalização, 1997.
- [9] *EN ISO 12354 "Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms"*. - Comité Europeu de Normalização, 2000.
- [10] Fahy, Frank; Gardonio, P. - *Sound and structural vibration : radiation, transmission and response*. 2nd. London: Elsevier : Academic Press, 2007.
- [11] Finn Jacobsen, Torben Poulsen, Jens Olger Rindel - *Lecture note on Fundamentals of Acoustics and Noise Control*. Technical University of Denmark, 2007.
- [12] Jose Maria Bravo, Hermelando Estelles, Jaime Llinares, Jaime Sinisterra, Antonio Uris - Technical note: Comparison of the sound insulation of lightweight partitions with different sound absorbing infills. *Building acoustics*. Volume 9:Número 4 (2002). p. 303-309.
- [13] *Lei de Bases do Ambiente, nº 11/87 de 7 de Abril*. - 1987.
- [14] Long, Marshall - *Architectural acoustics*. Amsterdam ; London: Elsevier/Academic Press, 2006.
- [15] Meisser, M. - *La Pratique de L'acoustique dans les Bâtiments*. Paris: Éditions Eyrolles, 1978.
- [16] Pierce, Alan D. - *The Wave Theory of Sound*. Acoustical Society of America,

- [17] R. Josse, C. Lamure - Transmission du son par une paroi simple. *Acustica*. 14 (1964). p. 267-280.
- [18] *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio*. - Diário da República – 1ª Série-A N.º109. 2002.
- [19] *Regulamento Geral sobre o Ruído, Decreto-Lei n.º 292/2000 de 14 de Novembro*. - Diário da República – 1ª Série-A N.º263. 2000.
- [20] Smith, Sean; Macdonald, Russel; Lurcock, Daniel; Mackenzie, Robin - *Airborne sound transmission, ISO 140 and influence of ISO 717-1 spectrum adaptation terms*. Madrid: 2007.
- [21] Strutt, John William; Rayleigh, Baron - *The theory of sound*. 2nd revised and enlarged. New York: Dover Publications, 1945.
- [22] "technical info" - <http://www.insul.co.nz/technicalinfo.html#1>. - Marshal Day acoustics, 2007.

Anexo A

A.1 Elementos tipo 1

A.1.1 Resultados por espessura

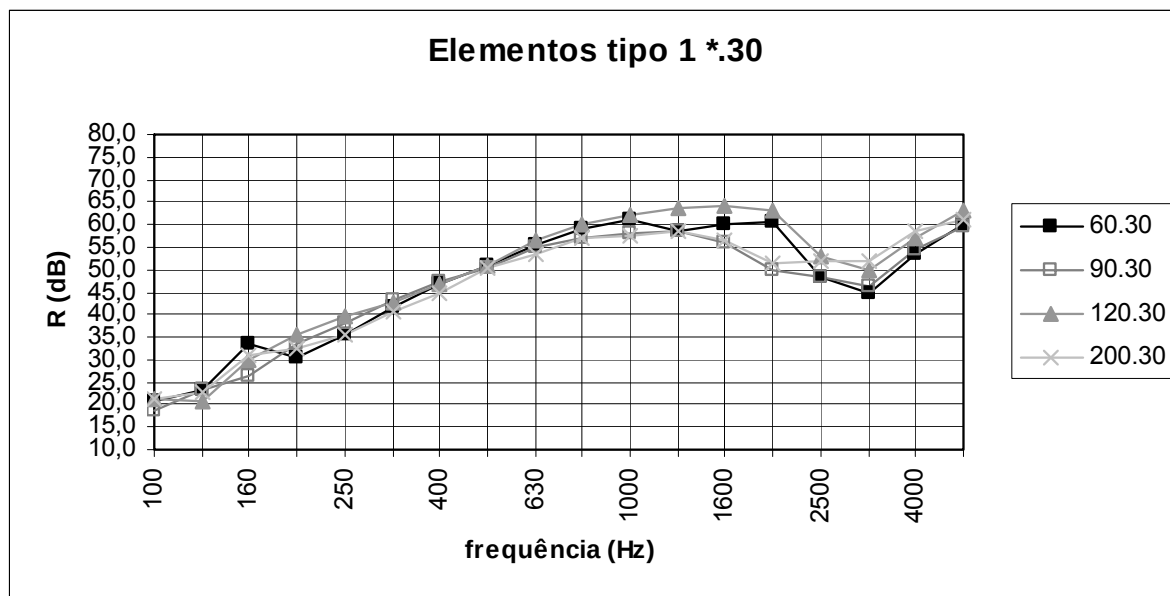


Figura A.1 – Resultados para uma espessura de 30 mm

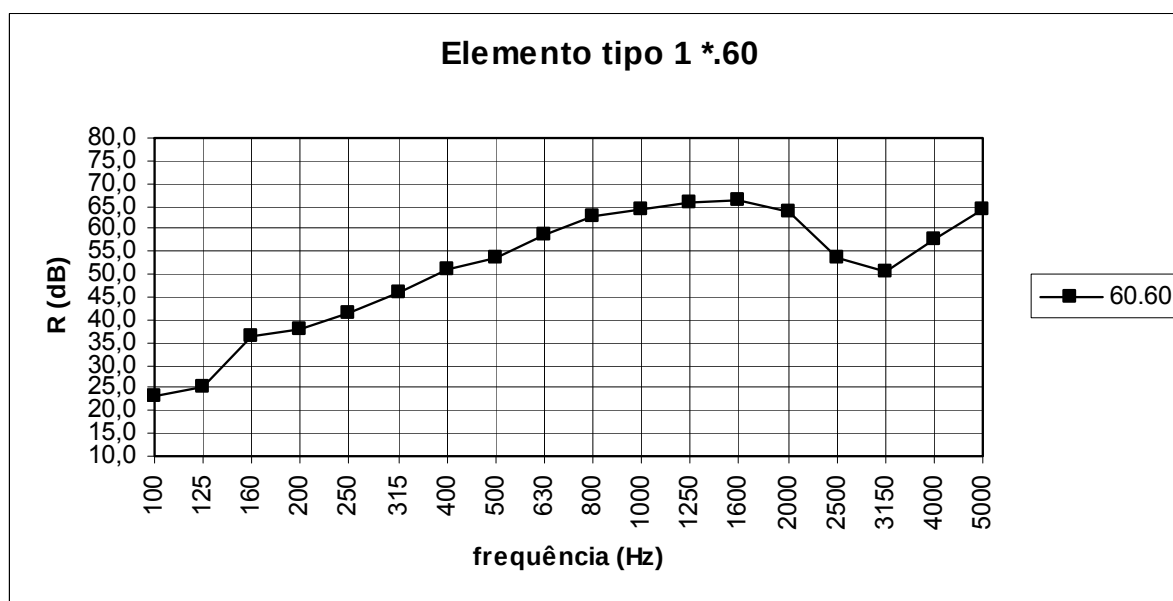


Figura A.2 – Resultados para uma espessura de 60 mm

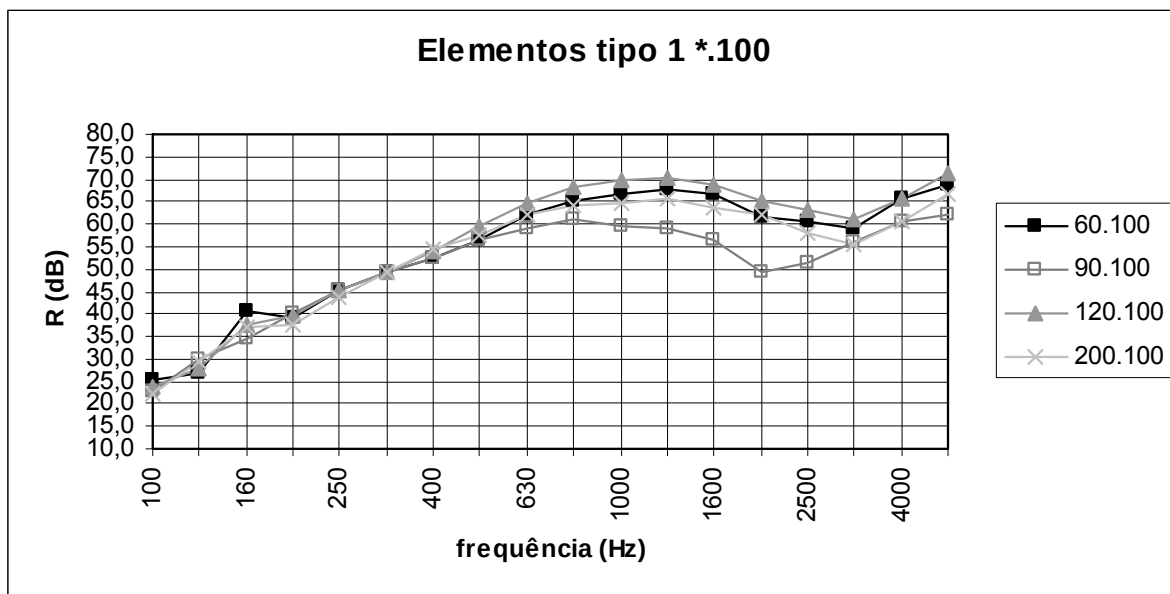


Figura A.3 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.1.2 Resultados por densidade

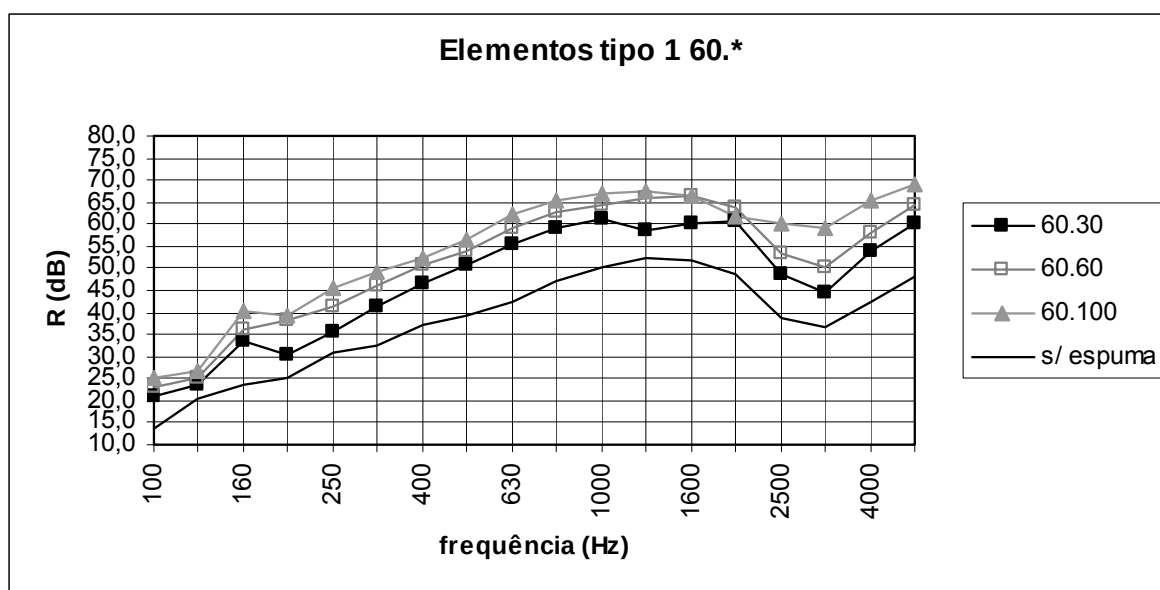


Figura A.4 – Resultados para uma densidade de 60 kg/m^3

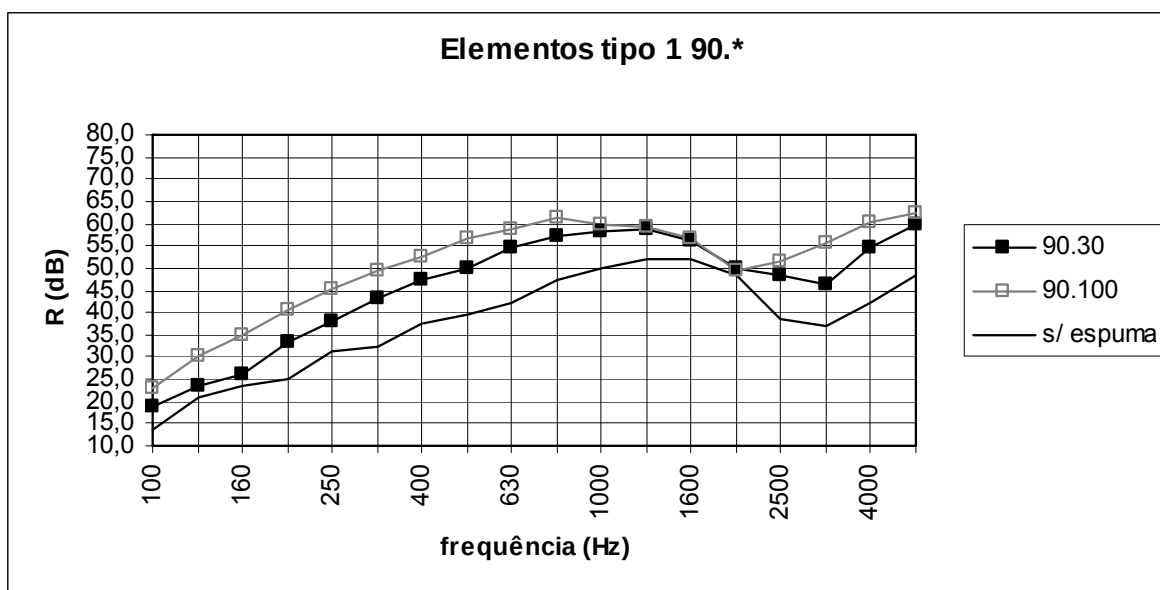


Figura A.5 – Resultados para uma densidade de 90 kg/m^3

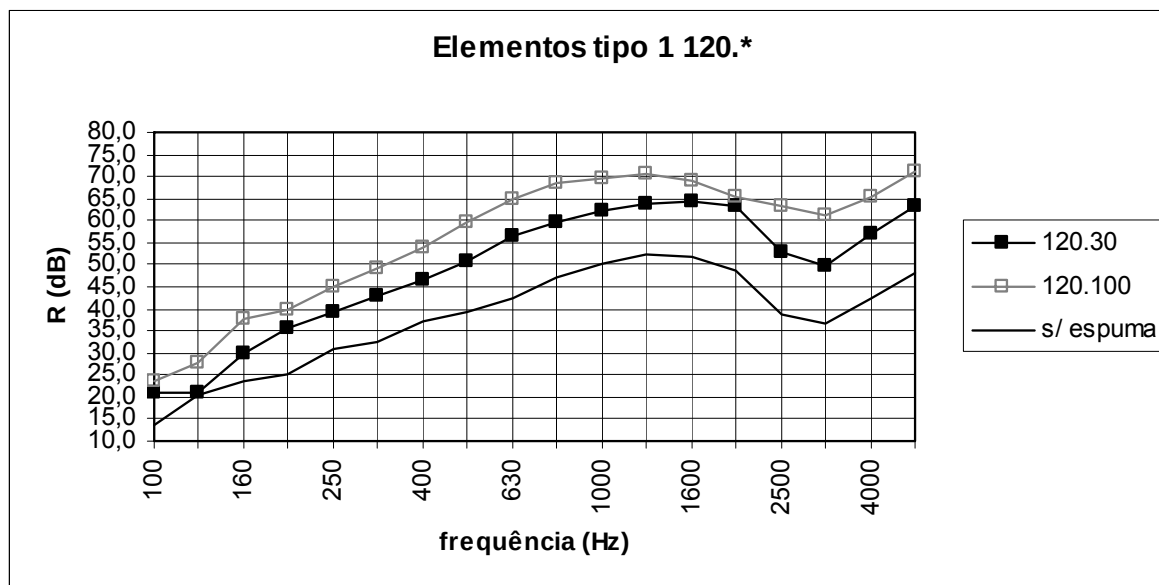


Figura A.6 – Resultados para uma densidade de 120 kg/m^3

A.1.3 Comparação entre o método de Sharp e os valores medidos, por espessura

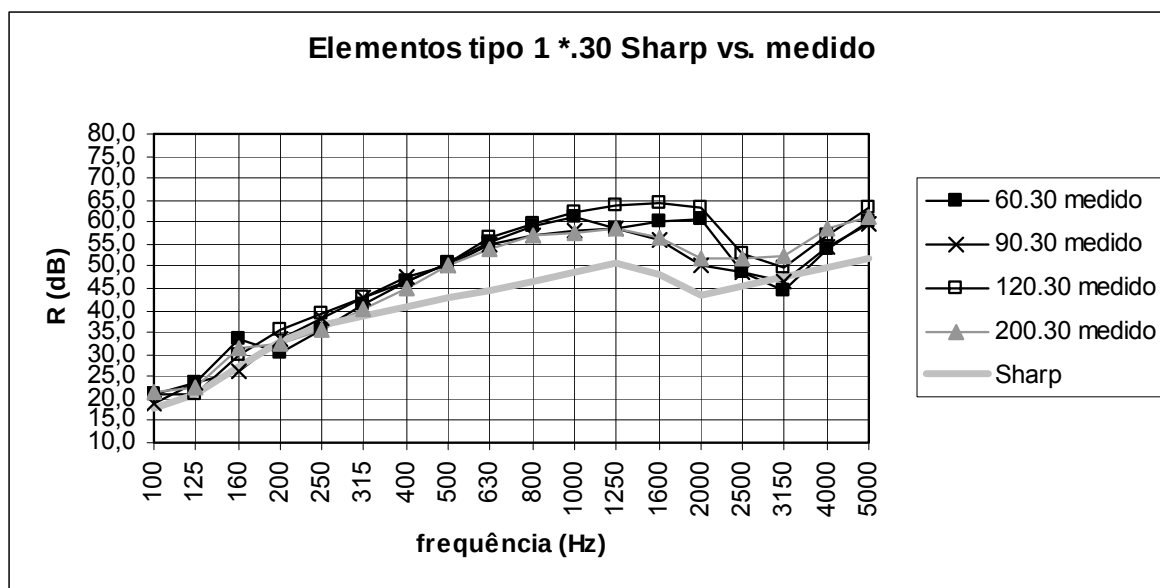


Figura A.7 – Resultados para uma espessura de 30 mm

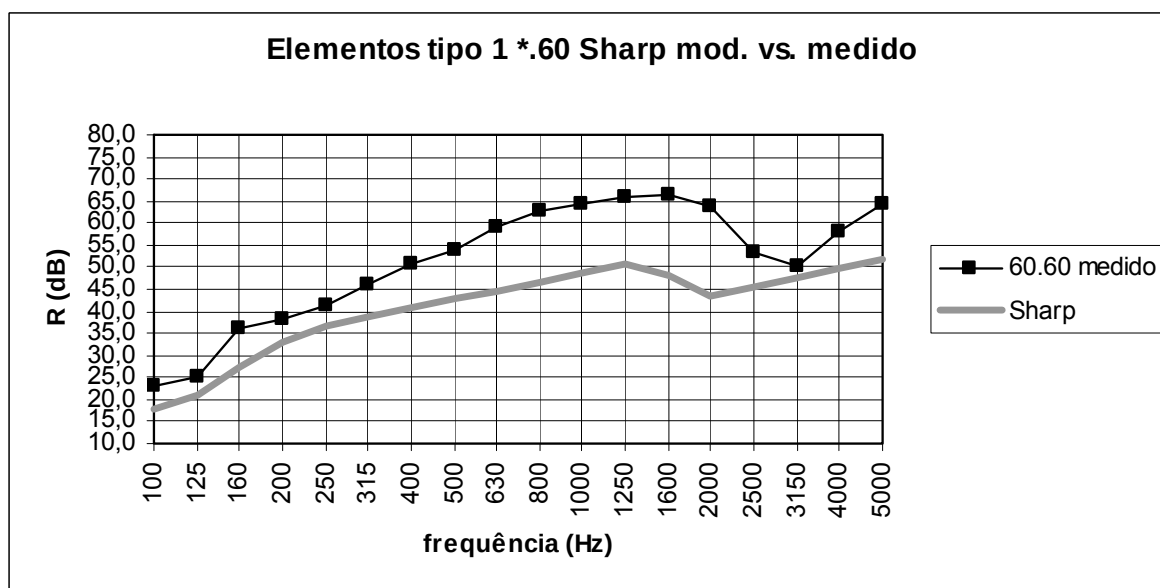


Figura A.8 – Resultados para uma espessura de 60 mm

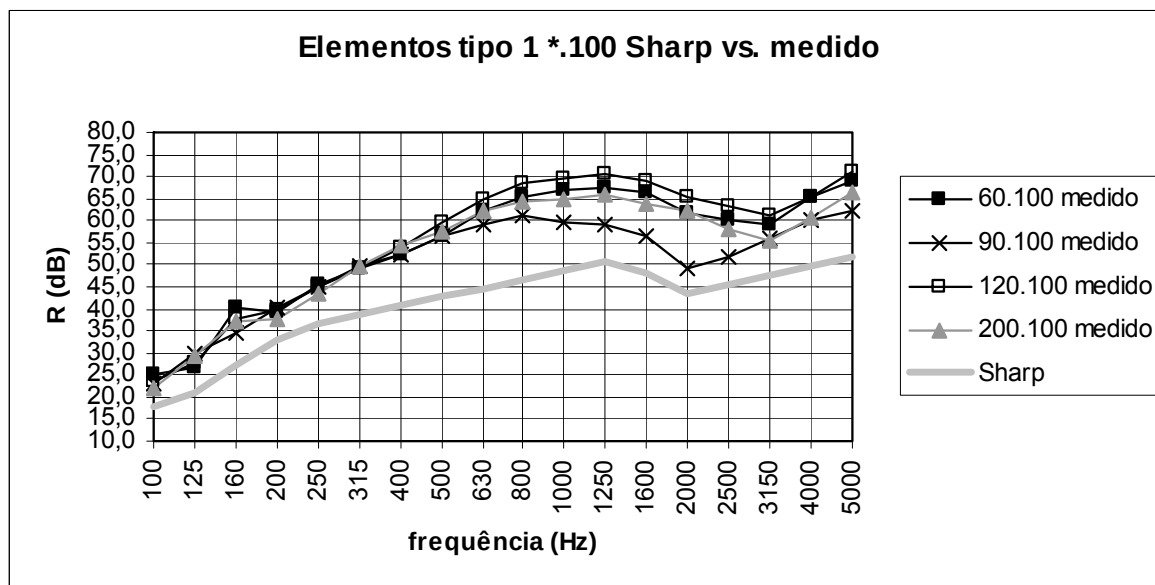


Figura A.9 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.1.4 Comparação entre o método de Meisser e os valores medidos, por espessura

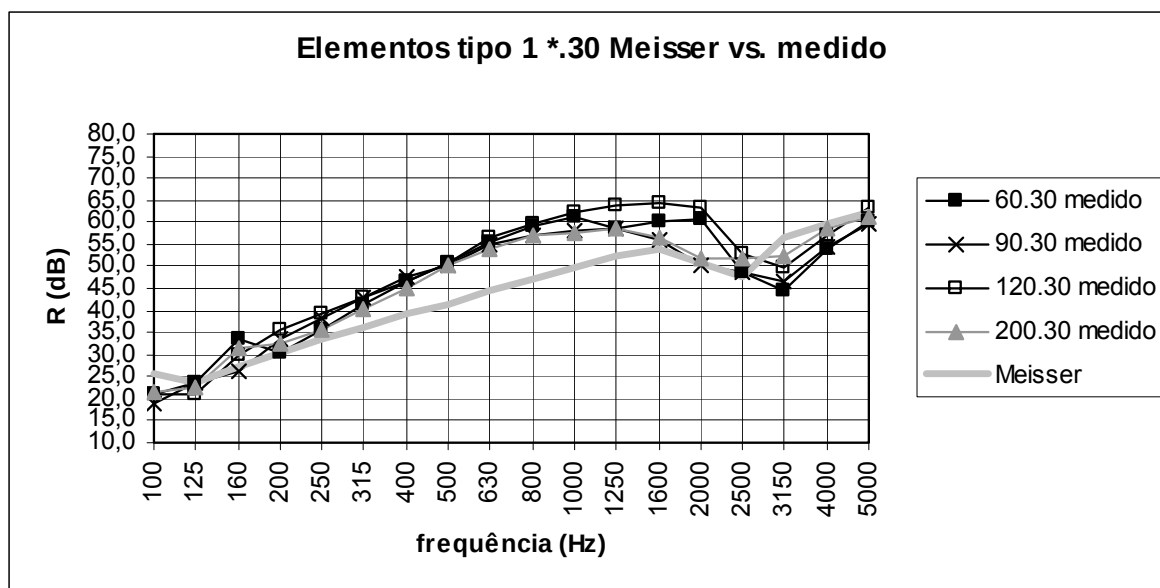


Figura A.10 – Resultados para uma espessura de 30 mm

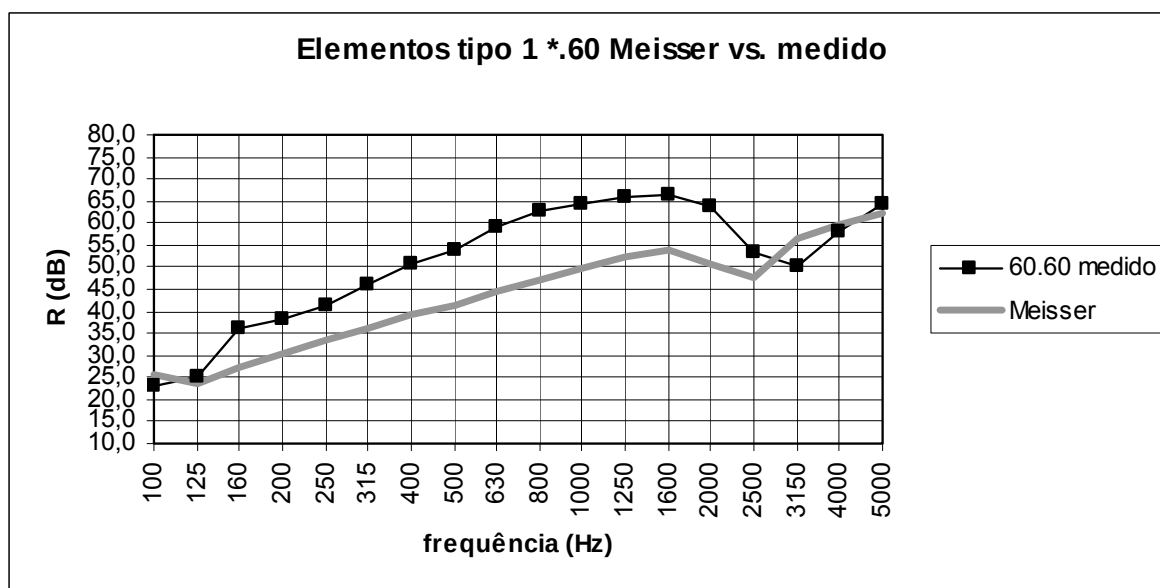


Figura A.11 – Resultados para uma espessura de 60 mm

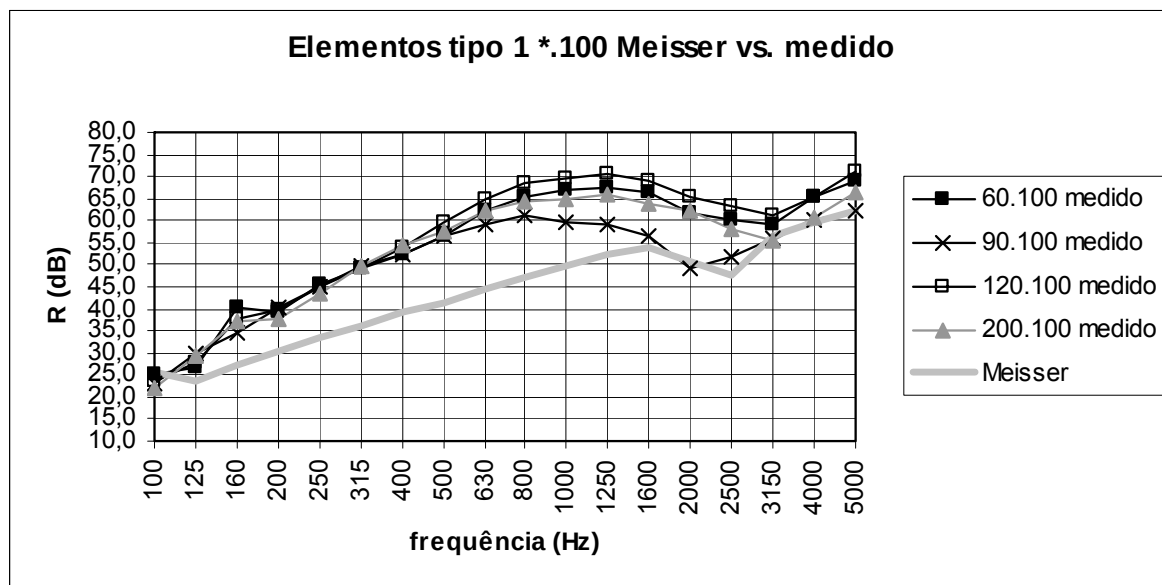


Figura A.12 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.1.5 Comparação entre o software Insul e os valores medidos, por espessura

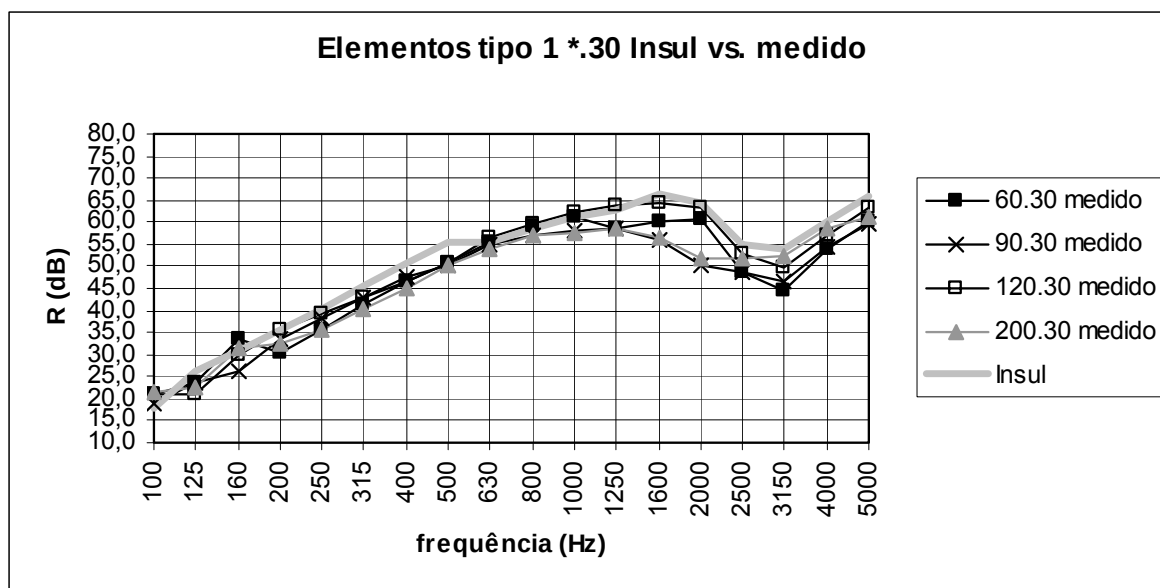


Figura A.13 – Resultados para uma espessura de 30 mm

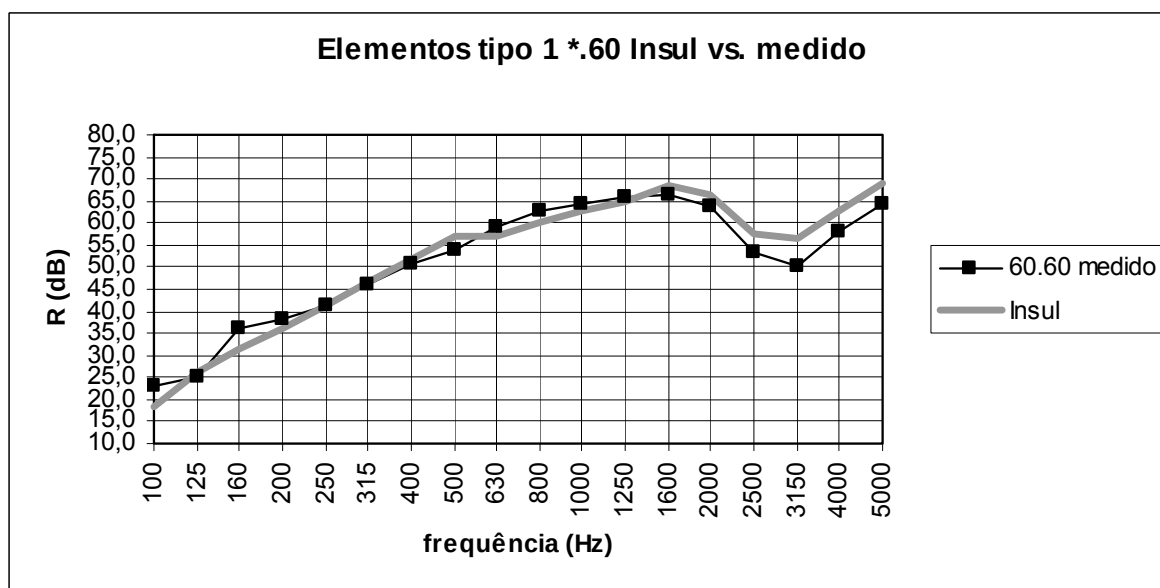


Figura A.14 – Resultados para uma espessura de 60 mm

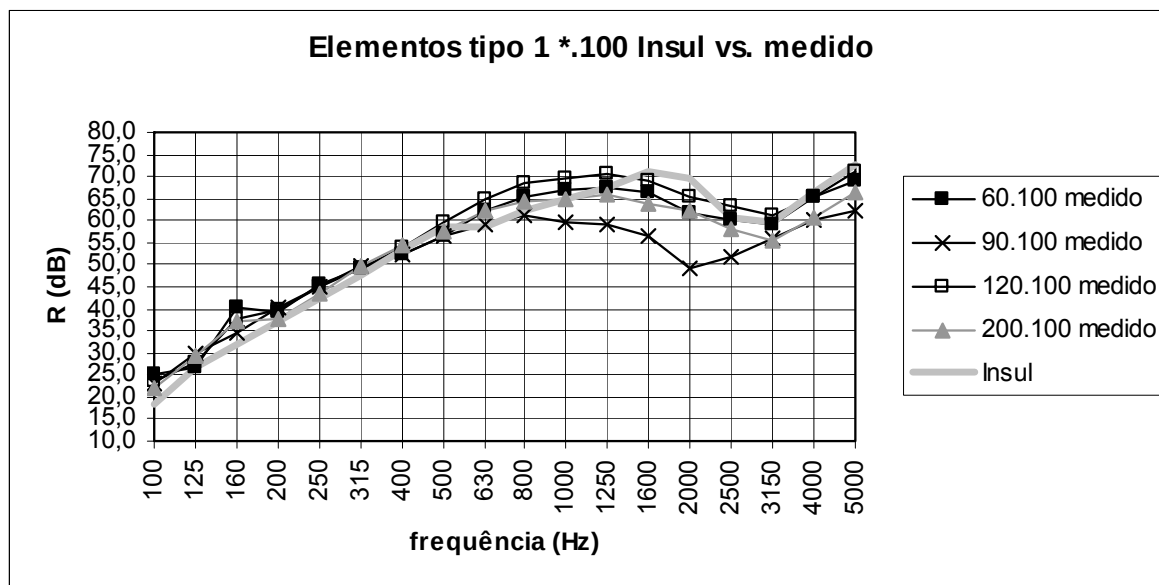


Figura A.15 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.1.6 Comparação entre o método de Sharp modificado e os valores medidos, por espessura

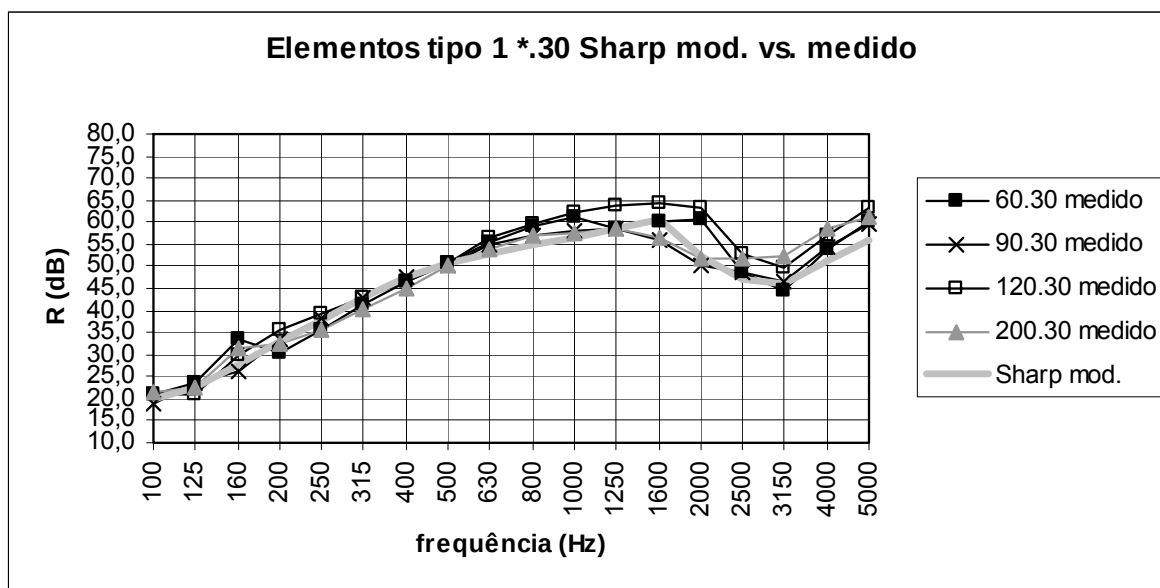


Figura A.16 – Resultados para uma espessura de 30 mm

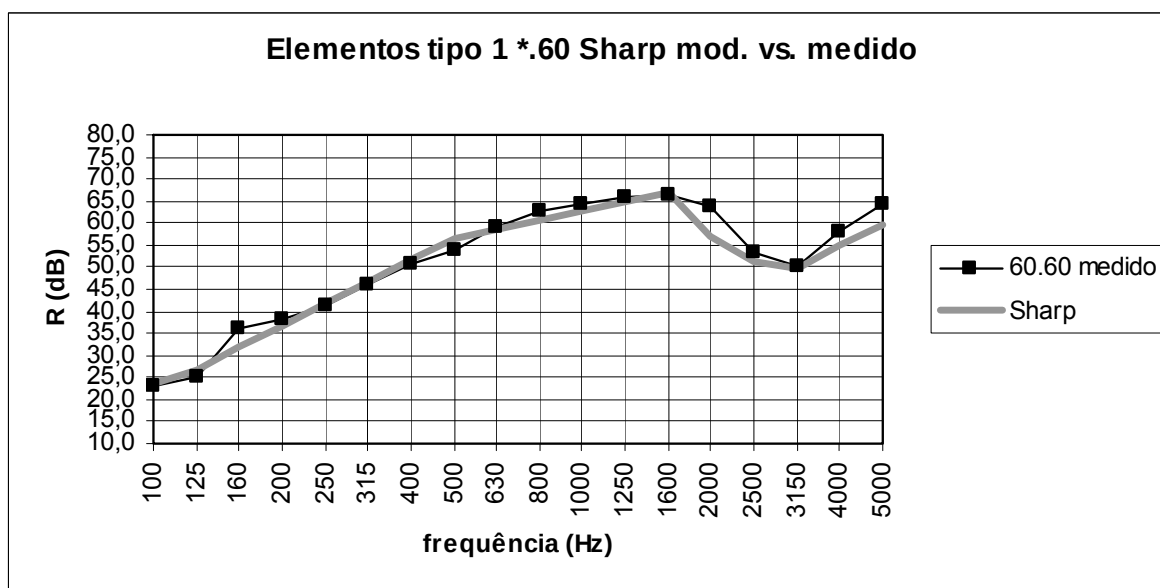


Figura A.17 – Resultados para uma espessura de 60 mm

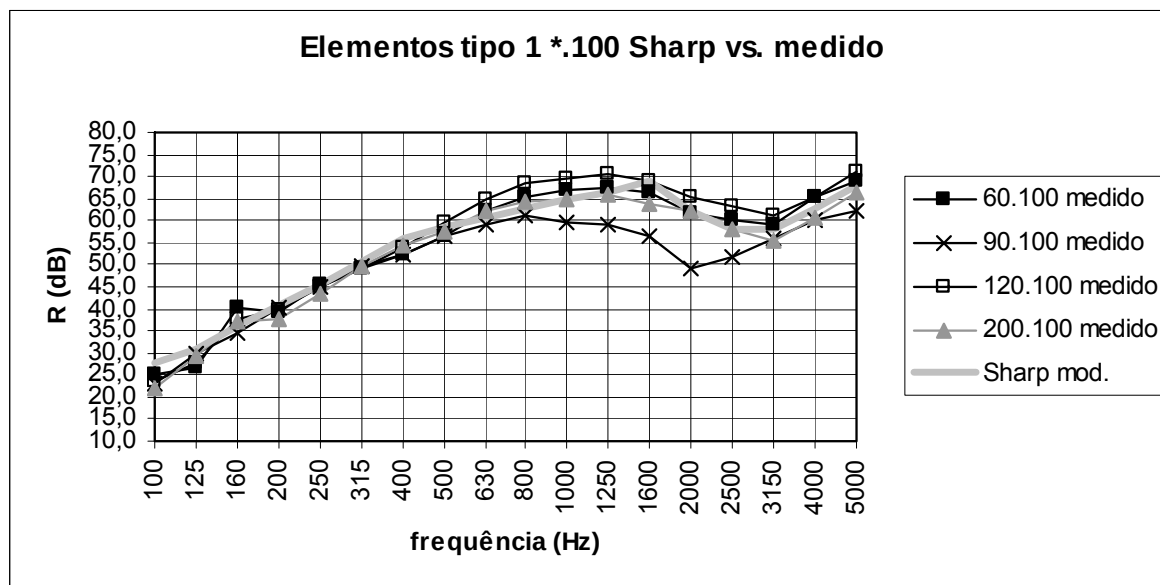


Figura A.18 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.2 Elementos tipo 2

A.2.1 Resultados por espessura

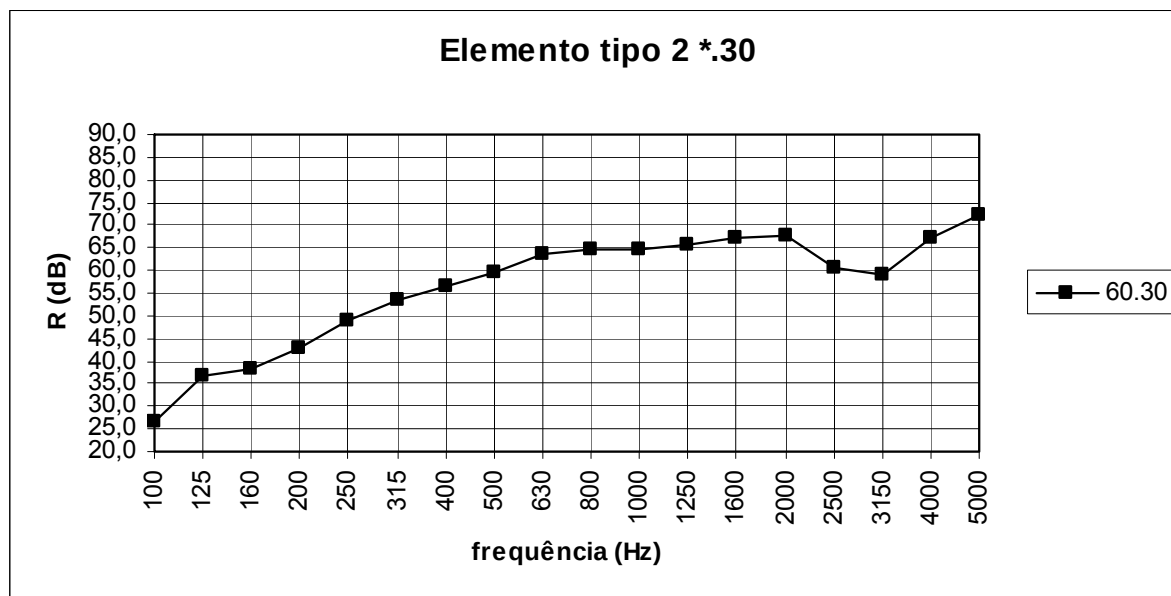


Figura A.19 – Resultados para uma espessura de 30 mm

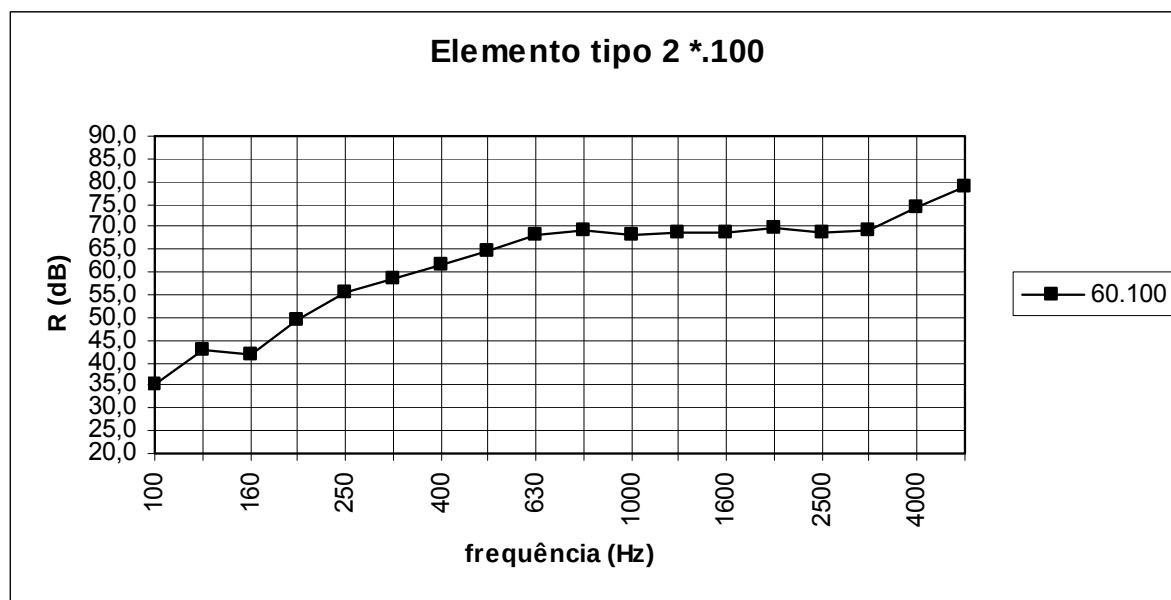


Figura A.20 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.2.2 Resultados por densidade

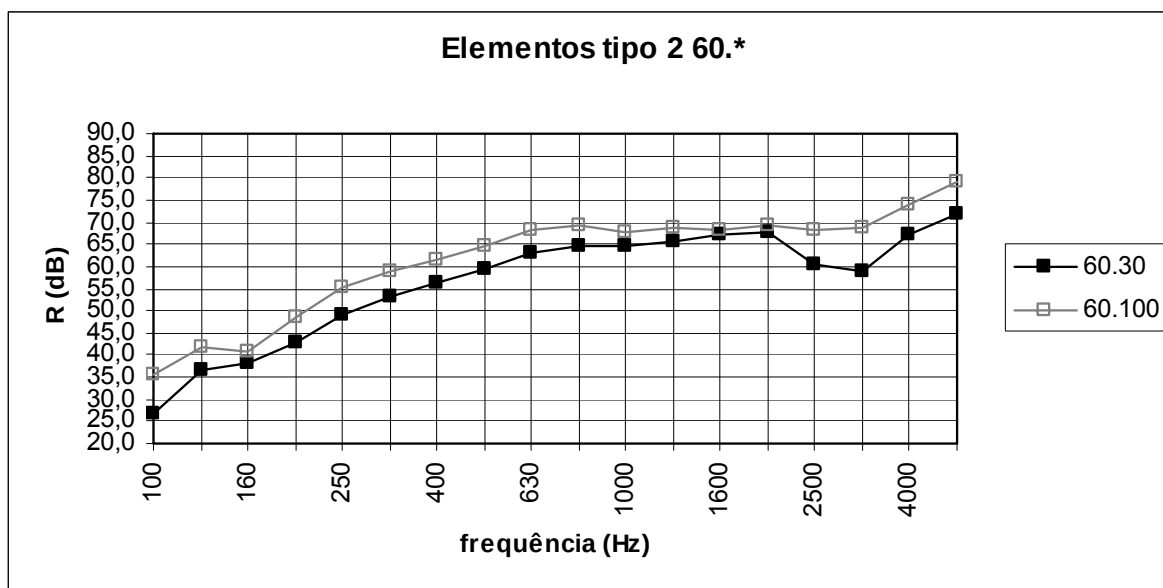


Figura A.21 – Resultados para uma densidade de 60 kg/m^3

A.2.3 Comparação entre o método de Sharp e os valores medidos, por espessura

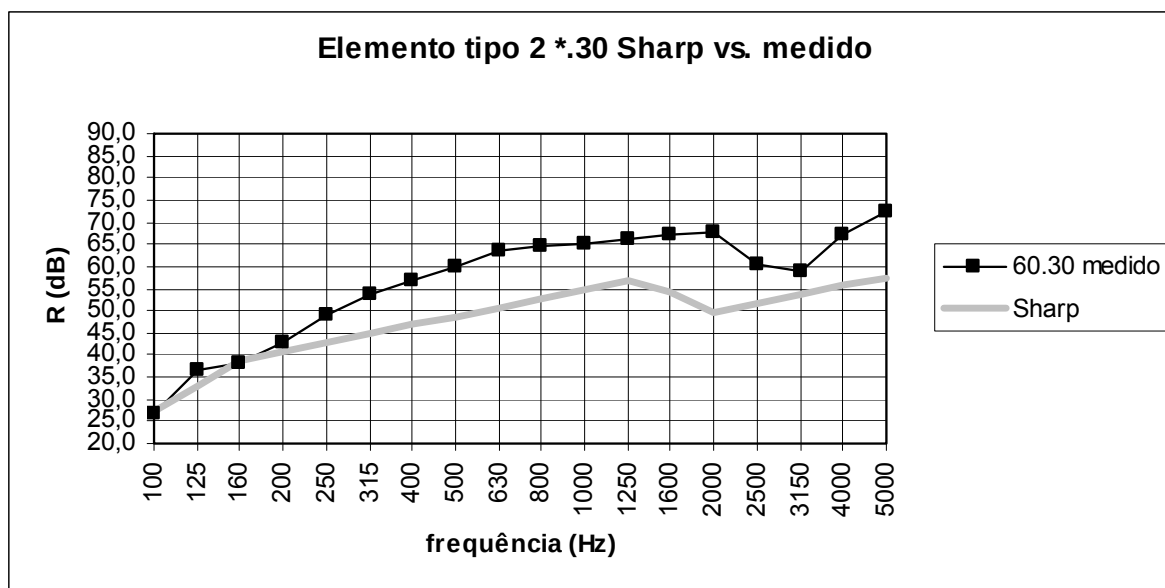


Figura A.22 – Resultados para uma espessura de 30 mm

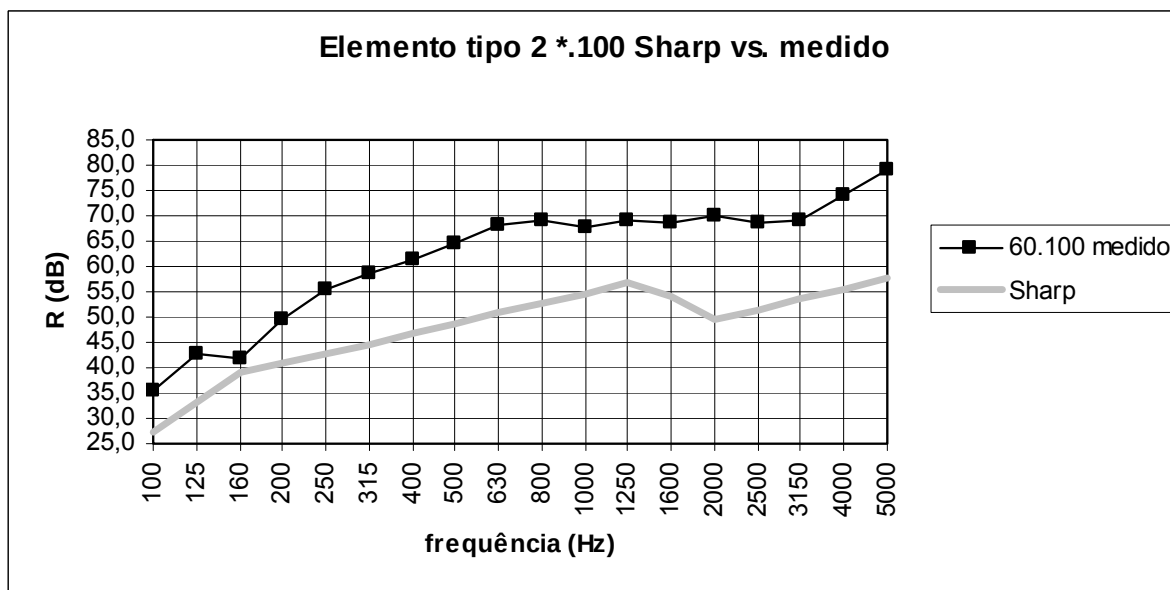


Figura A.23 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.2.4 Comparação entre o método de Meisser e os valores medidos, por espessura

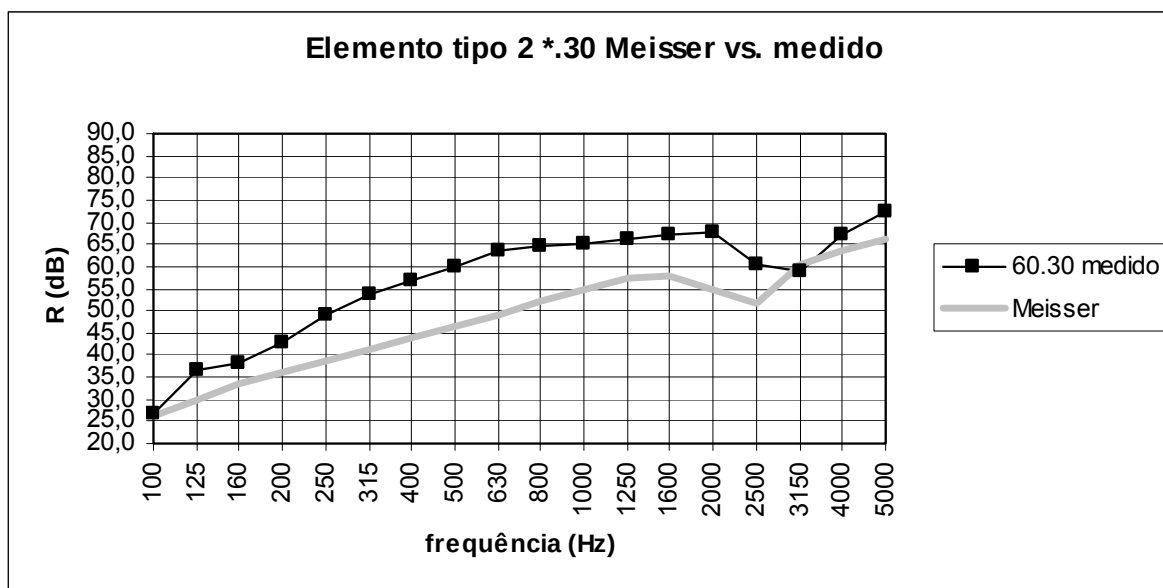


Figura A.24 – Resultados para uma espessura de 30 mm

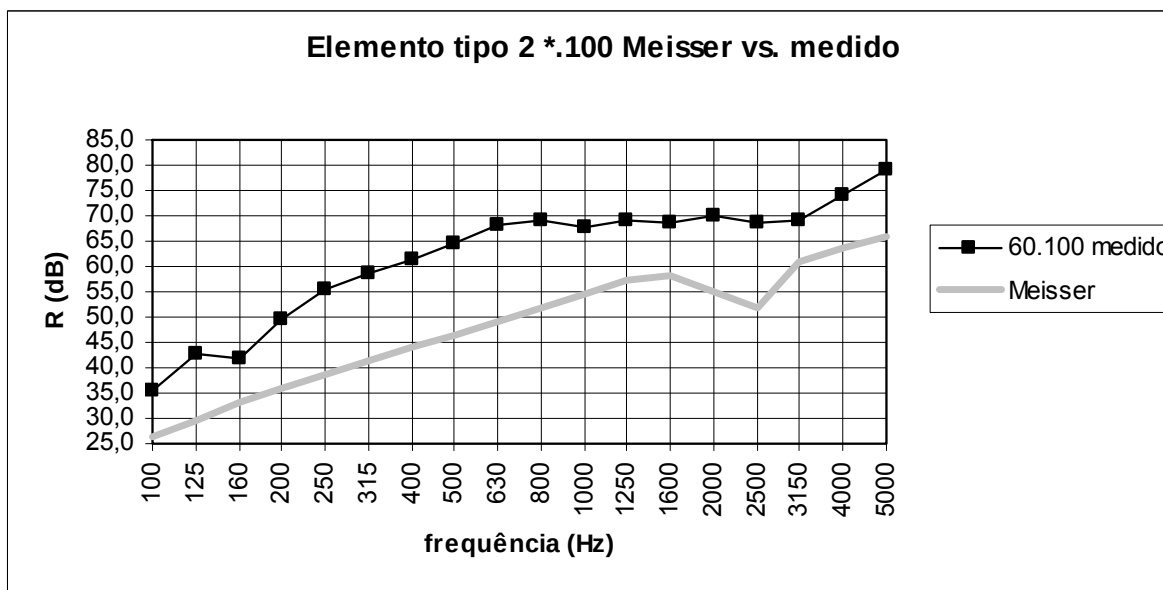


Figura A.25 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.2.5 Comparação entre o software Insul e os valores medidos, por espessura

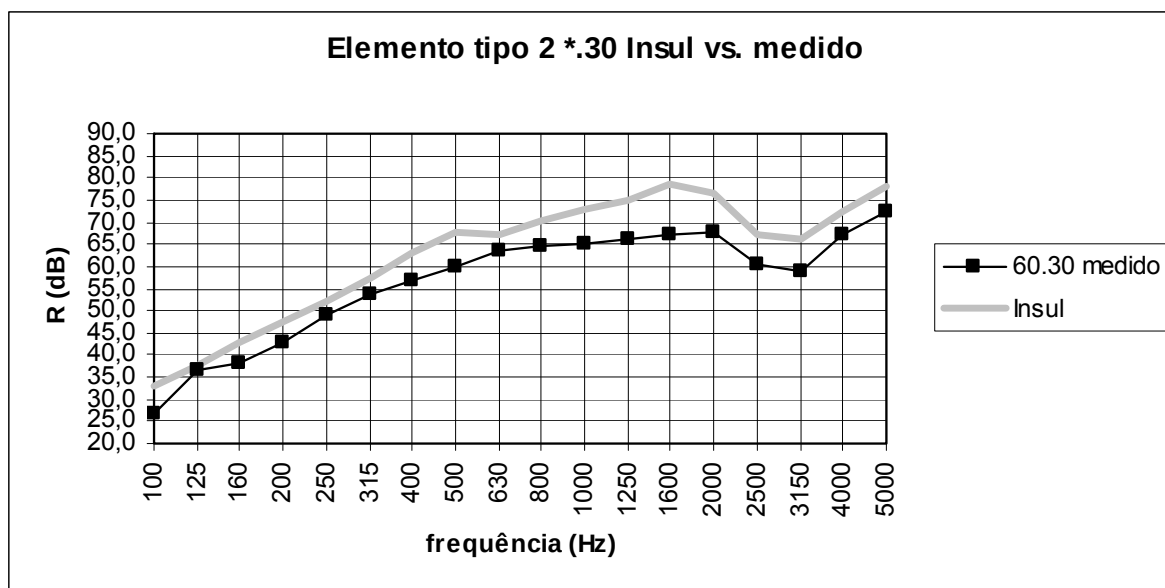


Figura A.26 – Resultados para uma espessura de 30 mm

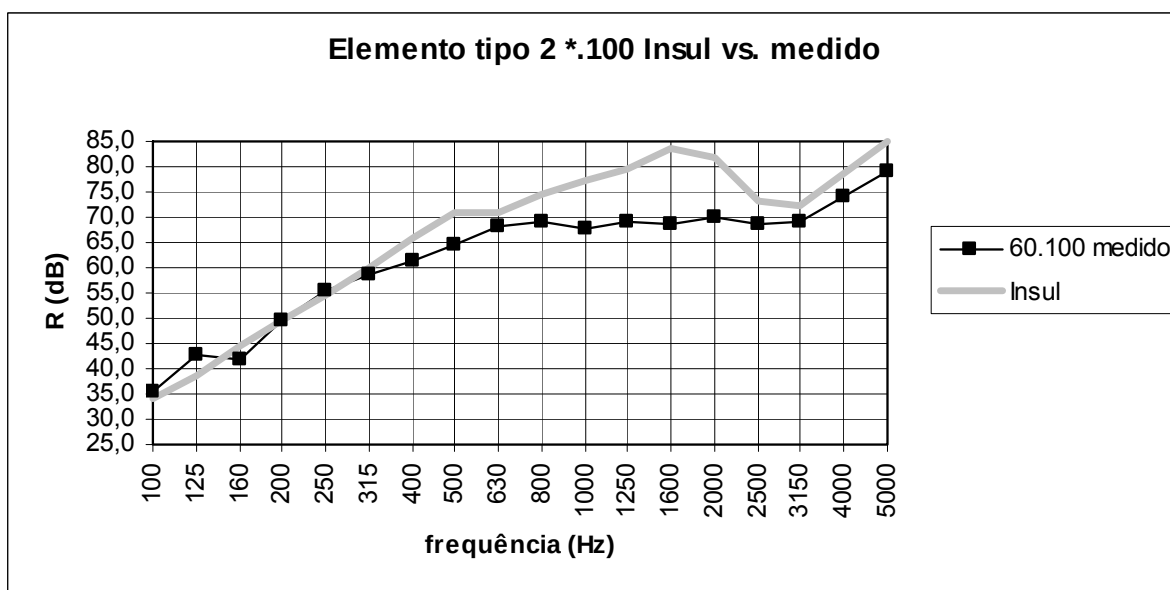


Figura A.27 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.2.6 Comparação entre o método de Sharp modificado e os valores medidos, por espessura

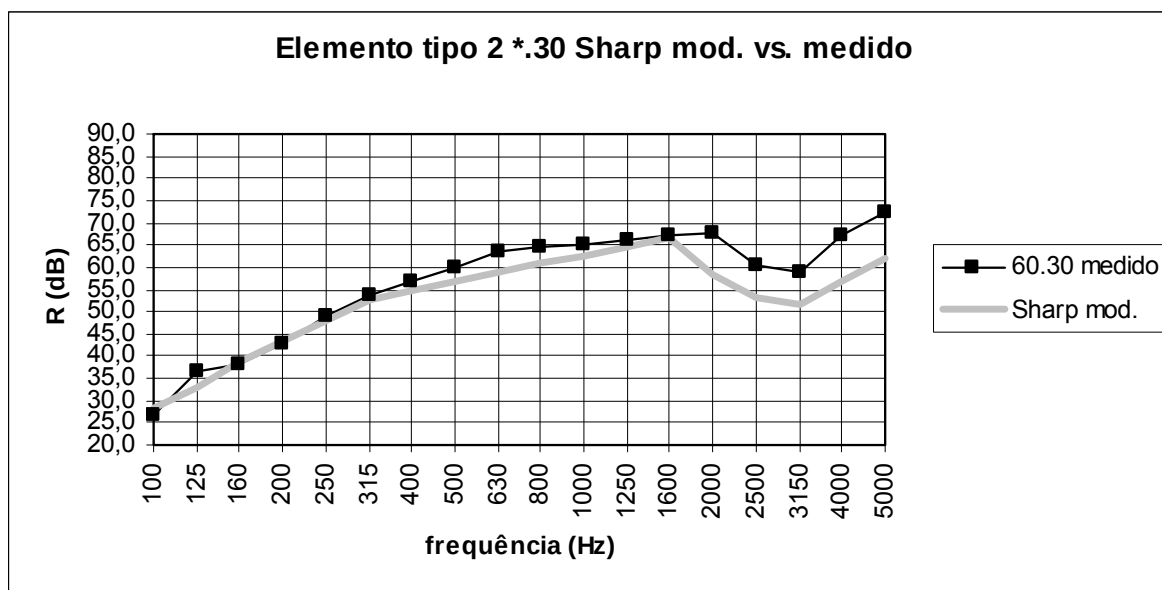


Figura A.28 – Resultados para uma espessura de 30 mm

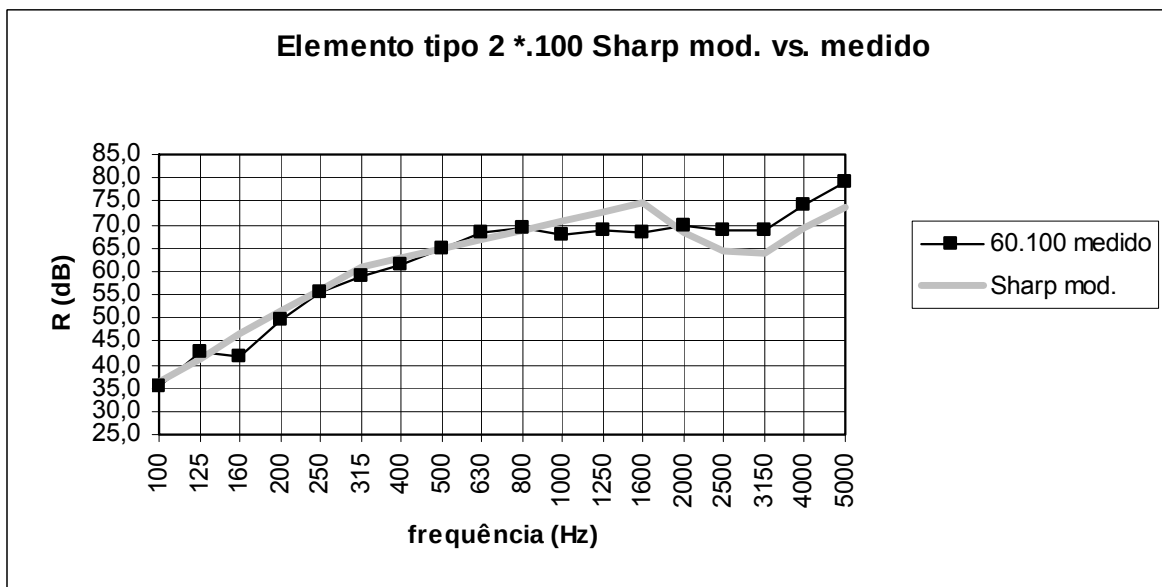


Figura A.29 – Resultados para uma espessura de 100 mm

A.3 Elementos tipo 3

A.3.1 Resultados por espessura

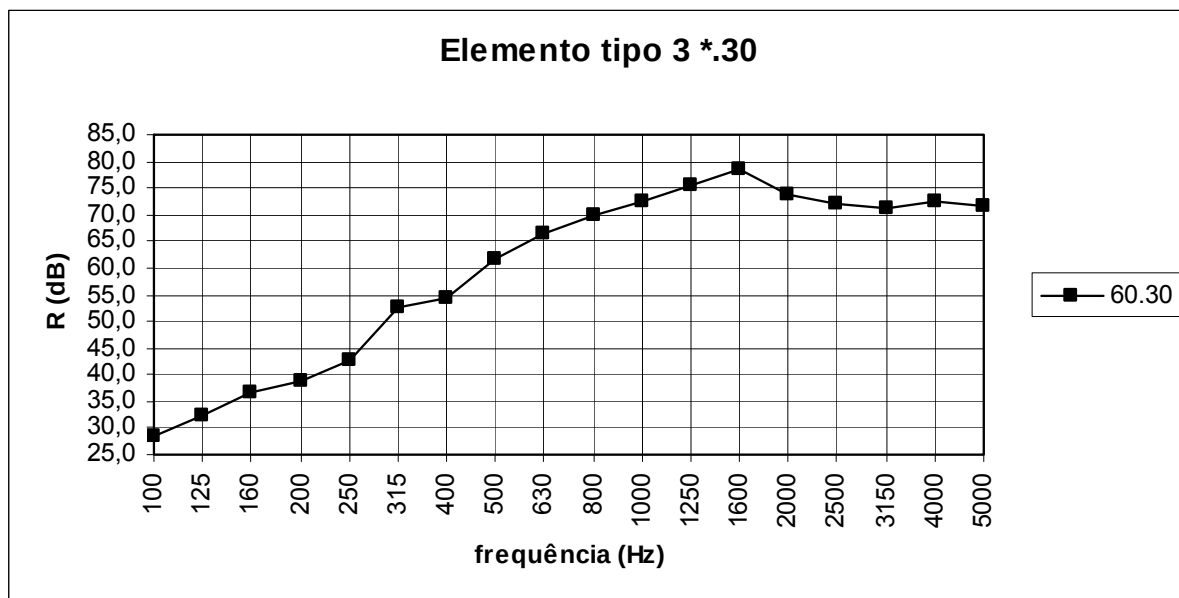


Figura A.30 – Resultados para uma espessura de 30 mm

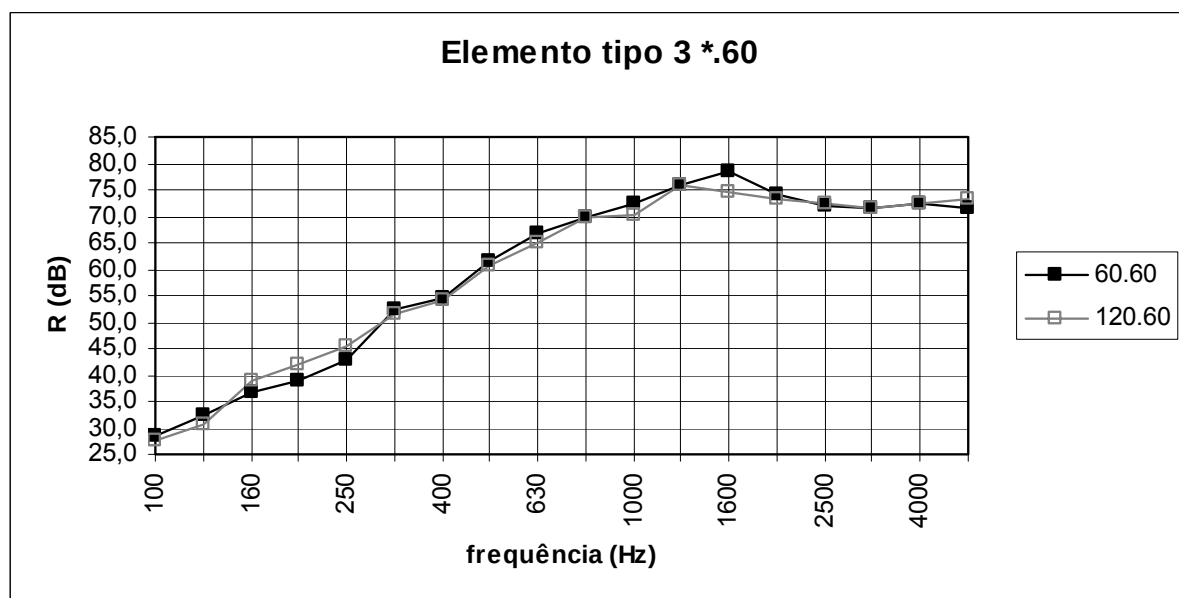


Figura A.31 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.3.2 Resultados por densidades

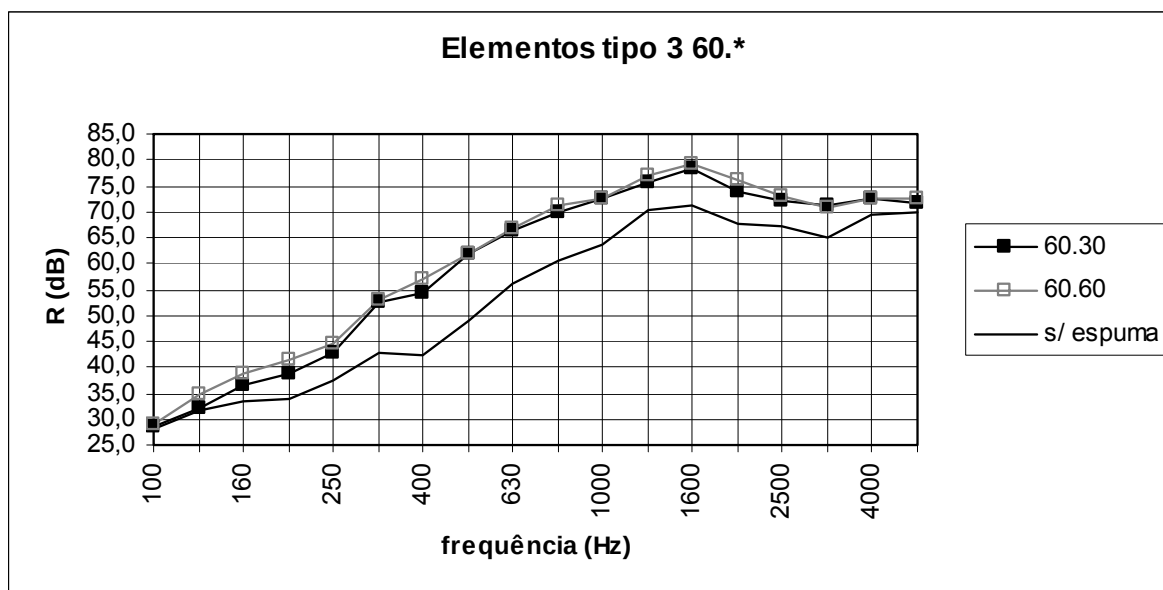


Figura A.32 – Resultados para uma densidade de 60 kg/m³

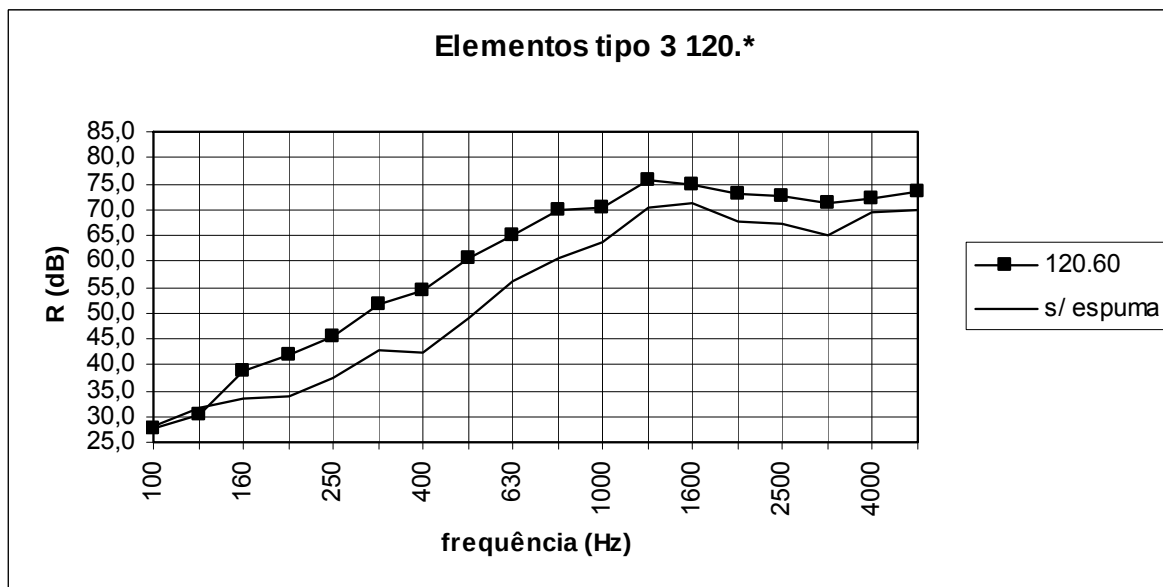


Figura A.33 – Resultados para uma densidade de 120 kg/m³

A.3.3 Comparação entre o método de Sharp modificado e os valores medidos, por espessura

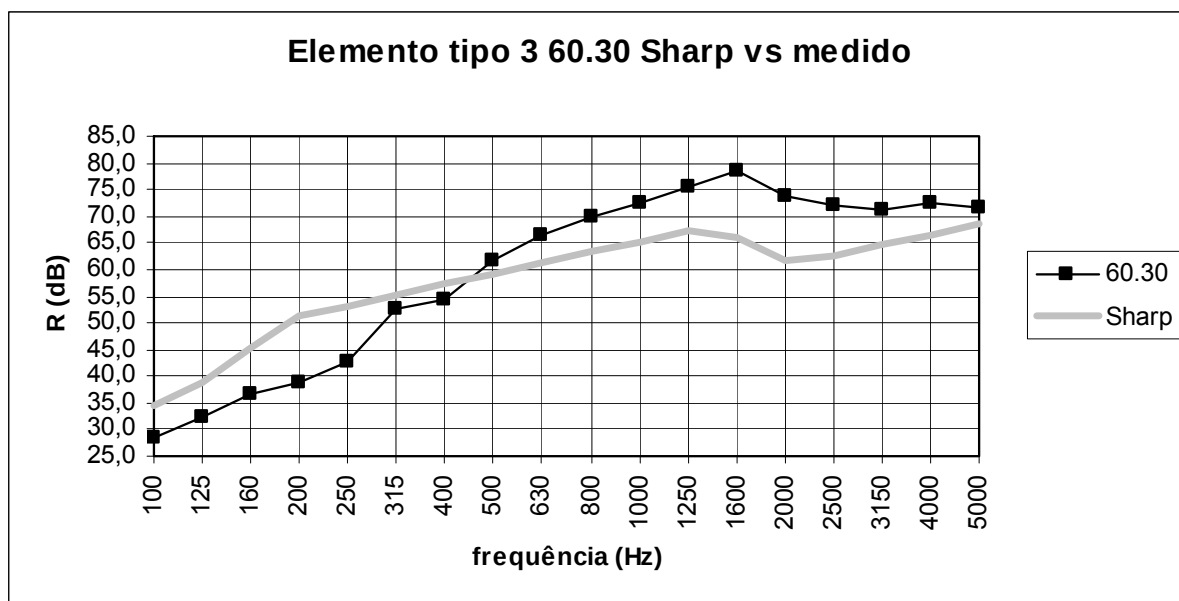


Figura A.34 – Resultados para uma espessura de 30 mm

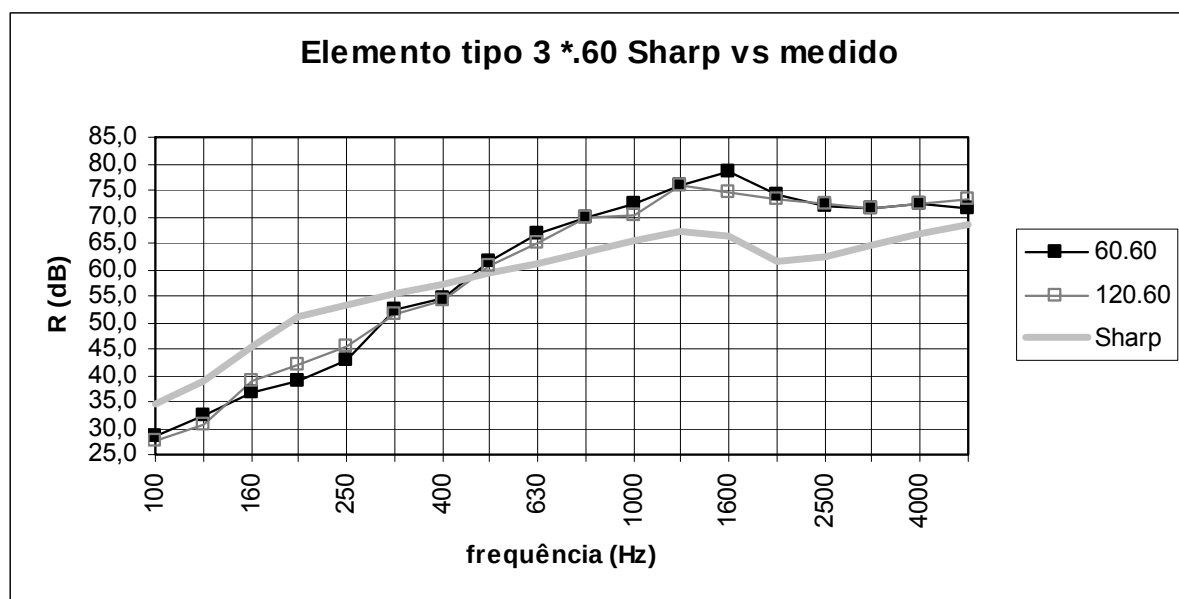


Figura A.35 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.3.4 Comparação entre o método de Meisser modificado e os valores medidos, por espessura

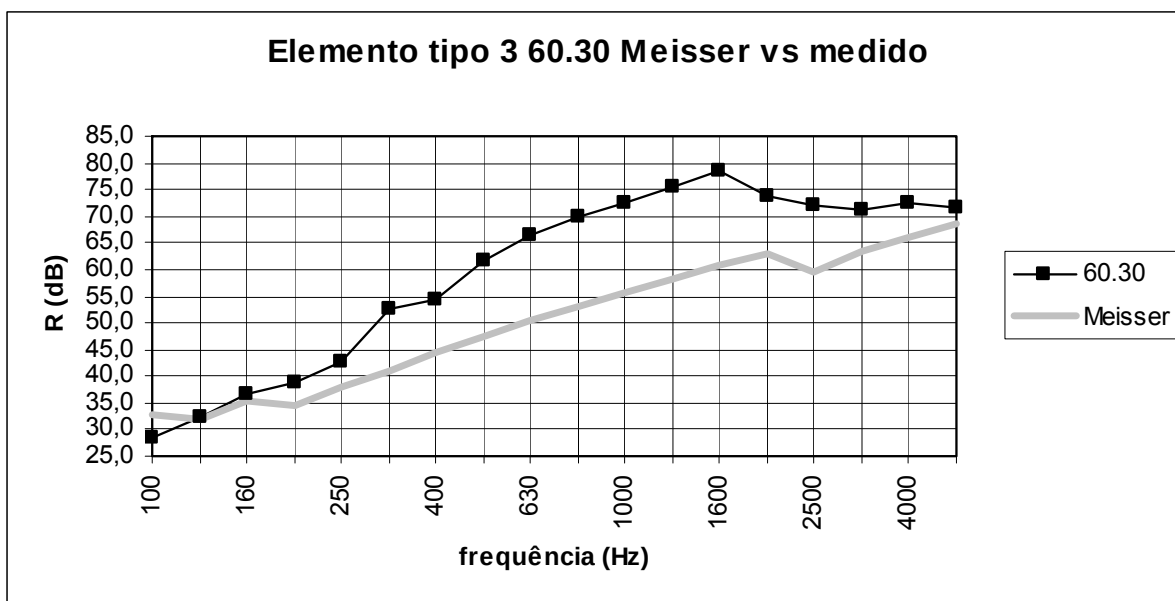


Figura A.36 – Resultados para uma espessura de 30 mm

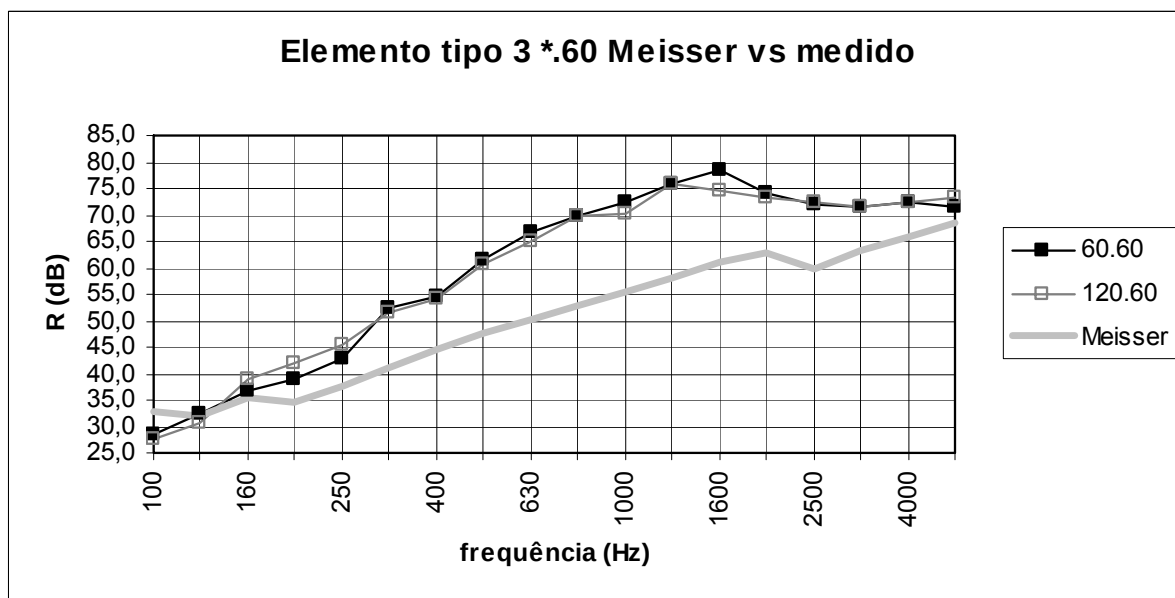


Figura A.37 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.3.4 Comparação entre o software Insul modificado e os valores medidos, por espessura

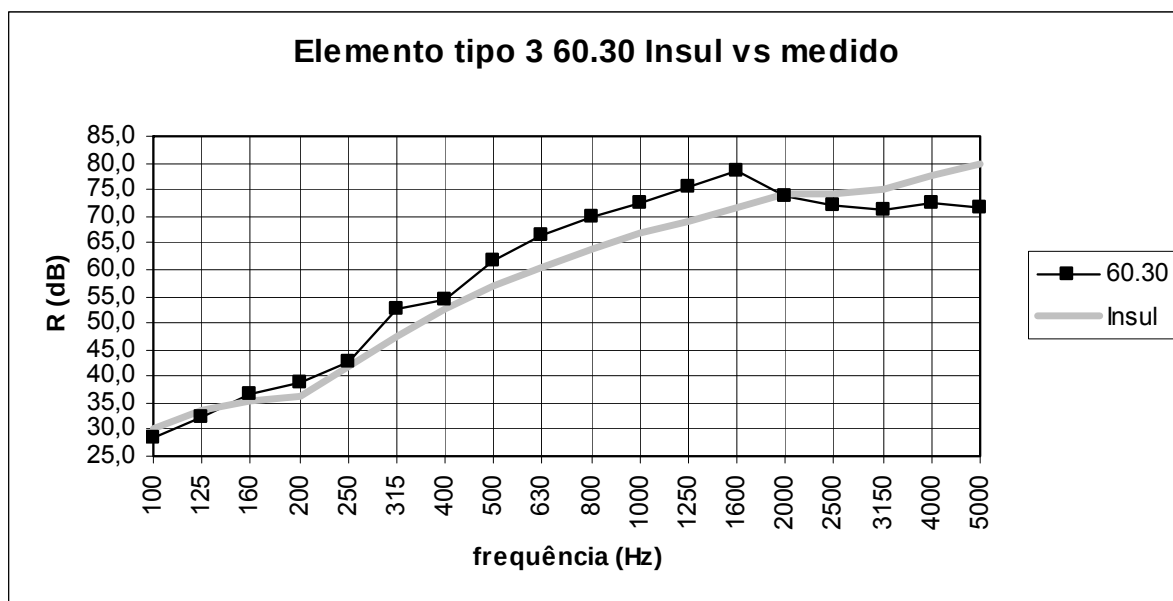


Figura A.38 – Resultados para uma espessura de 30 mm

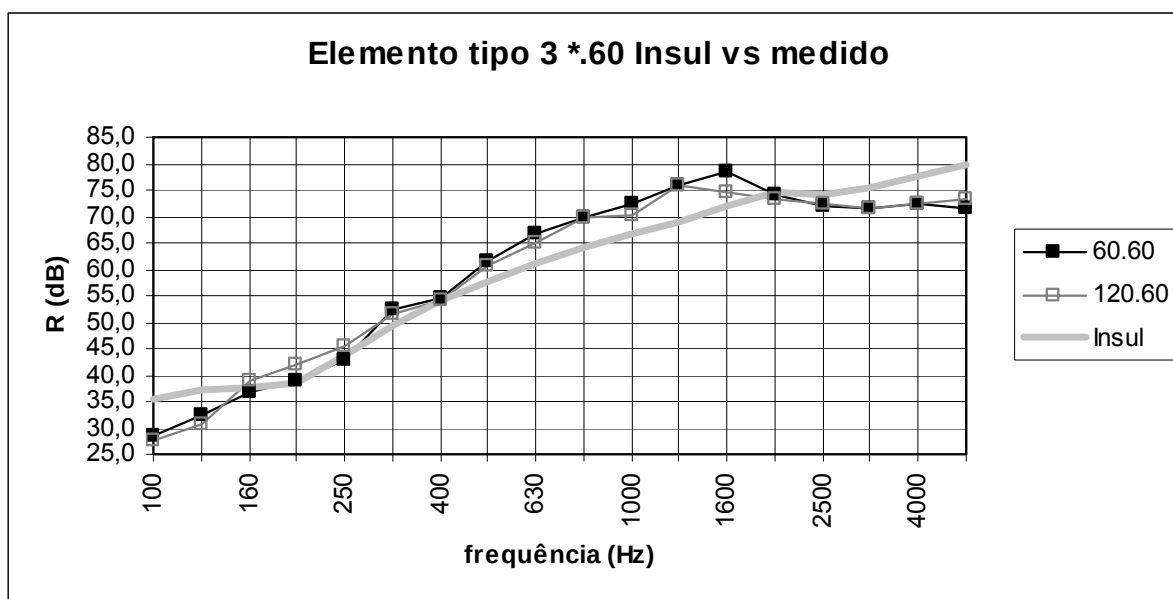


Figura A.39 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.3.5 Comparação entre o método de Meisser modificado e os valores medidos, por espessura

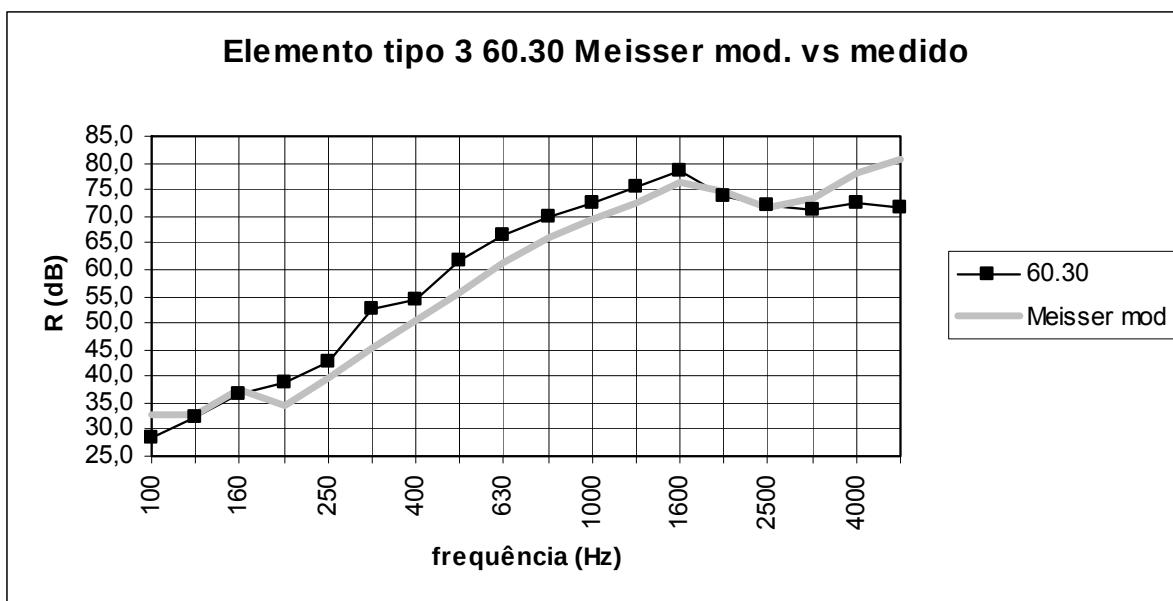


Figura A.40 – Resultados para uma espessura de 30 mm

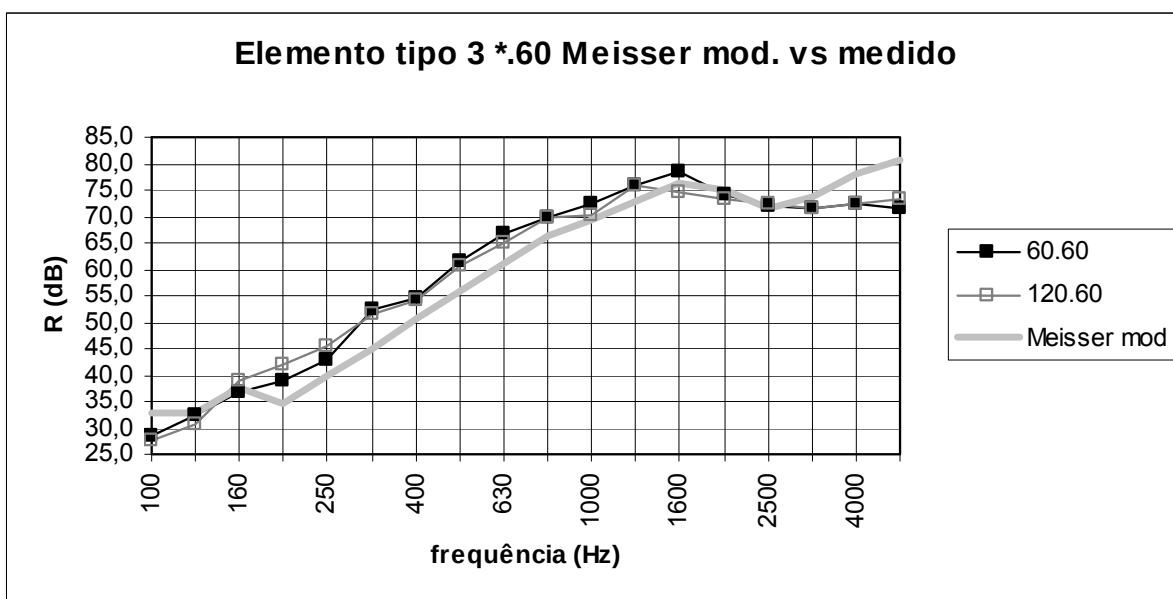


Figura A.41 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.4 Elementos tipo 4

A.4.1 Resultados por espessura

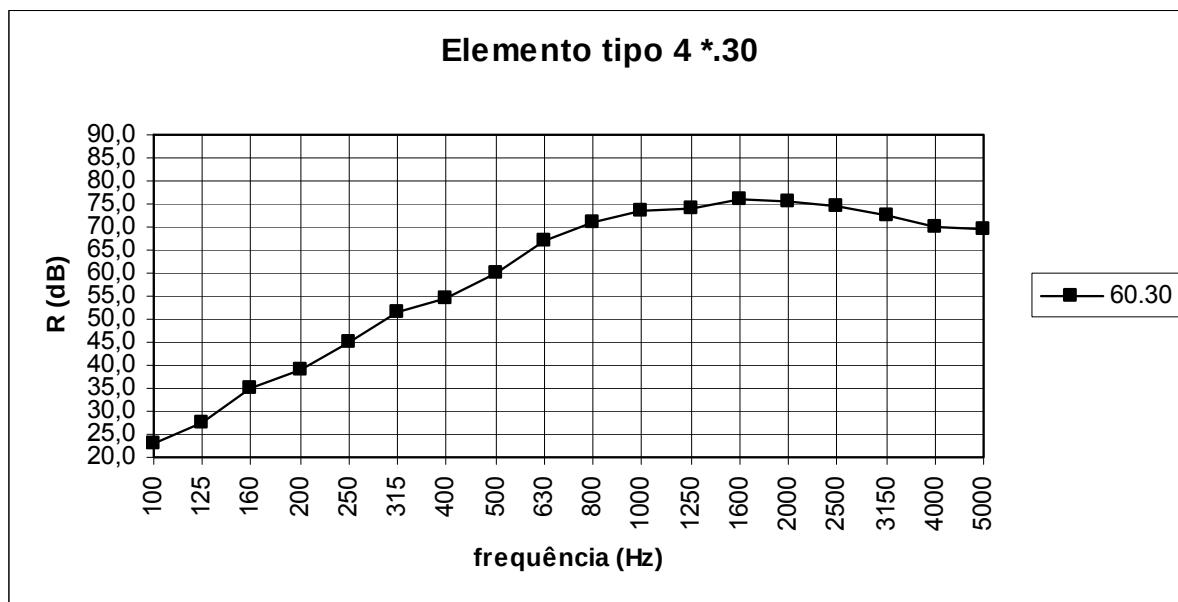


Figura A.42 – Resultados para uma espessura de 30 mm

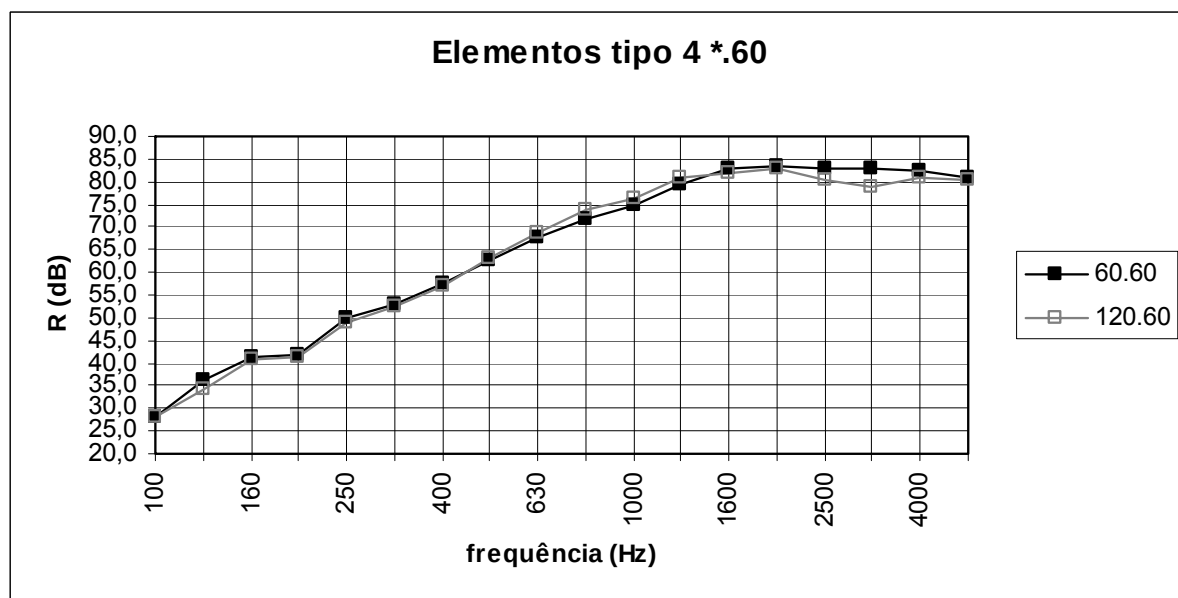


Figura A.43 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.4.2 Resultados por densidades

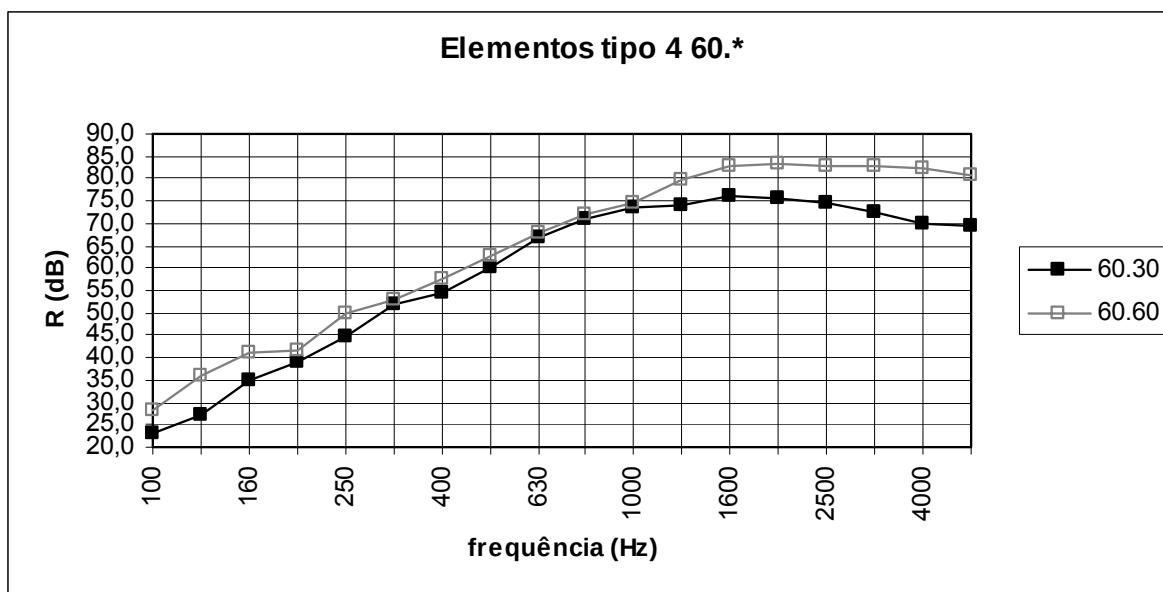


Figura A.44 – Resultados para uma densidade de 60 kg/m³

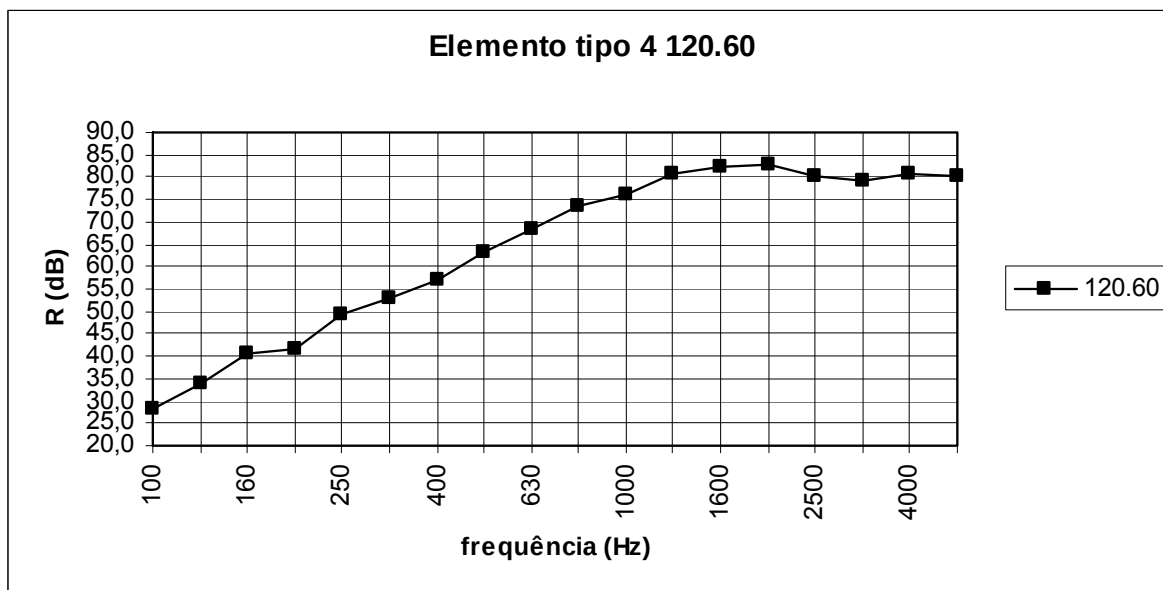


Figura A.45 – Resultados para uma densidade de 120 kg/m³

A.4.3 Comparação entre o método de Sharp e os valores medidos, por espessura

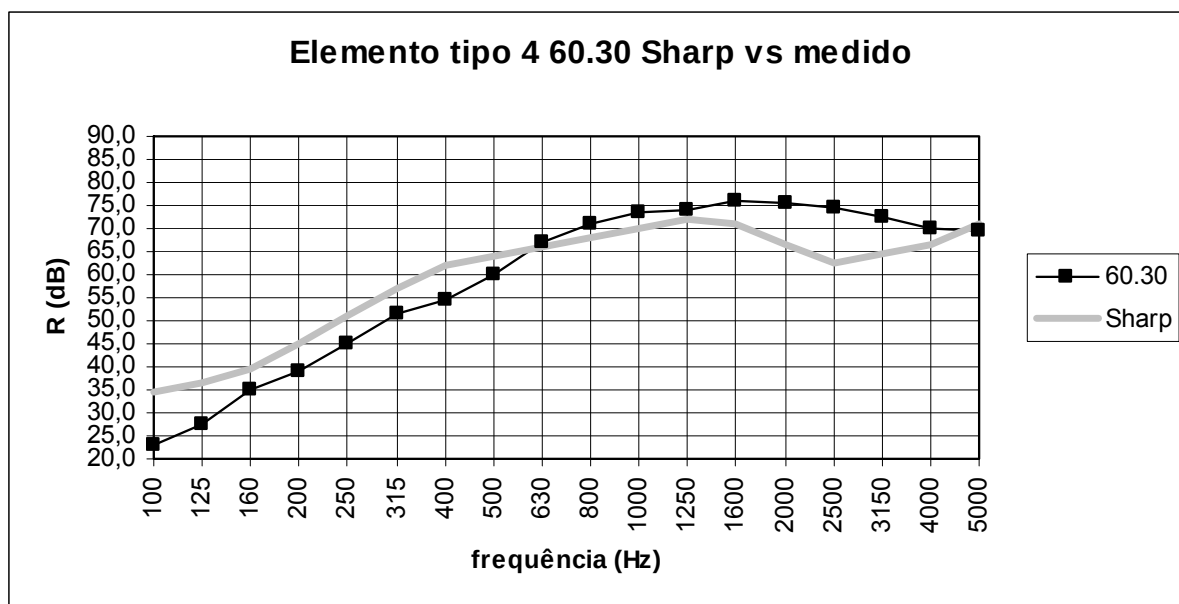


Figura A.46 – Resultados para uma espessura de 30 mm

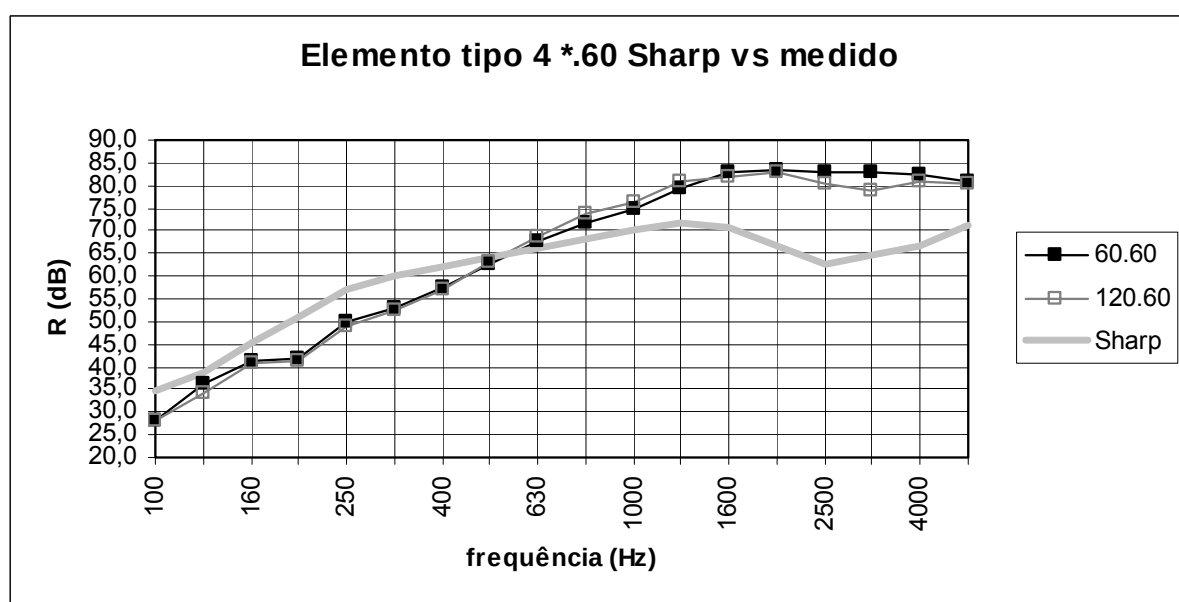


Figura A.47 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.4.4 Comparação entre o método de Meisser e os valores medidos, por espessura

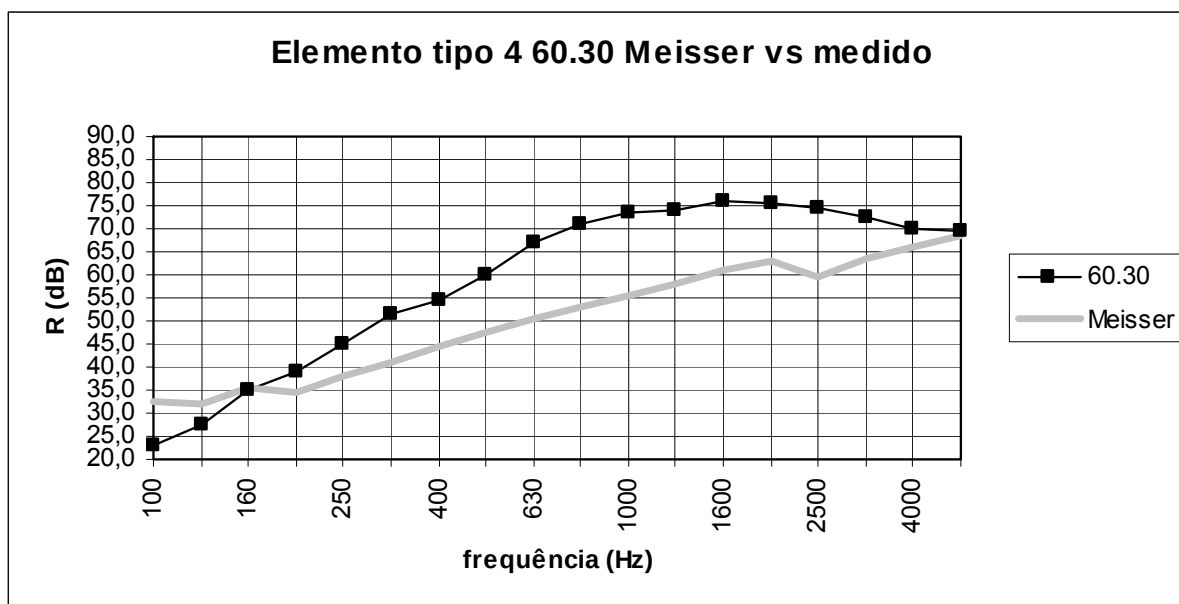


Figura A.48 – Resultados para uma espessura de 30 mm

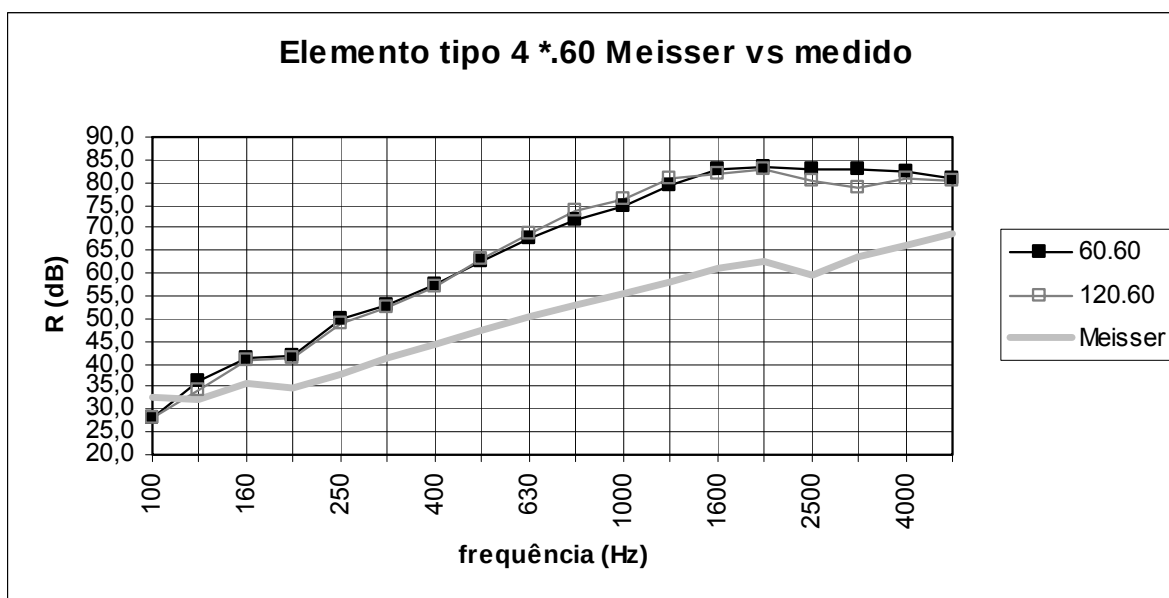


Figura A.49 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.4.5 Comparação entre o software Insul e os valores medidos, por espessura

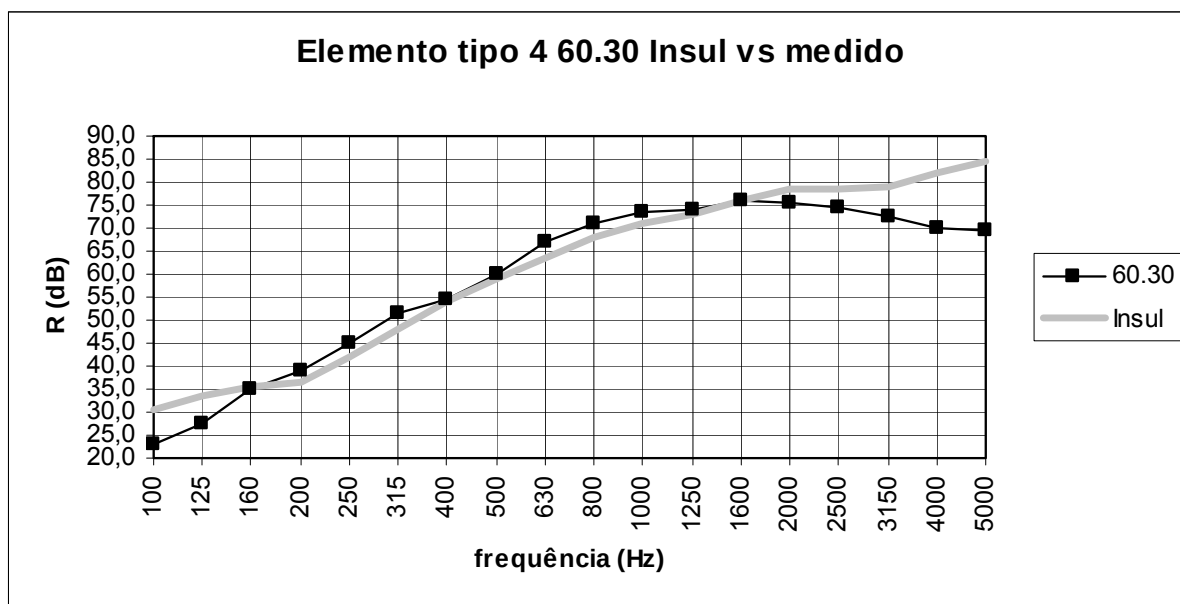


Figura A.50 – Resultados para uma espessura de 30 mm

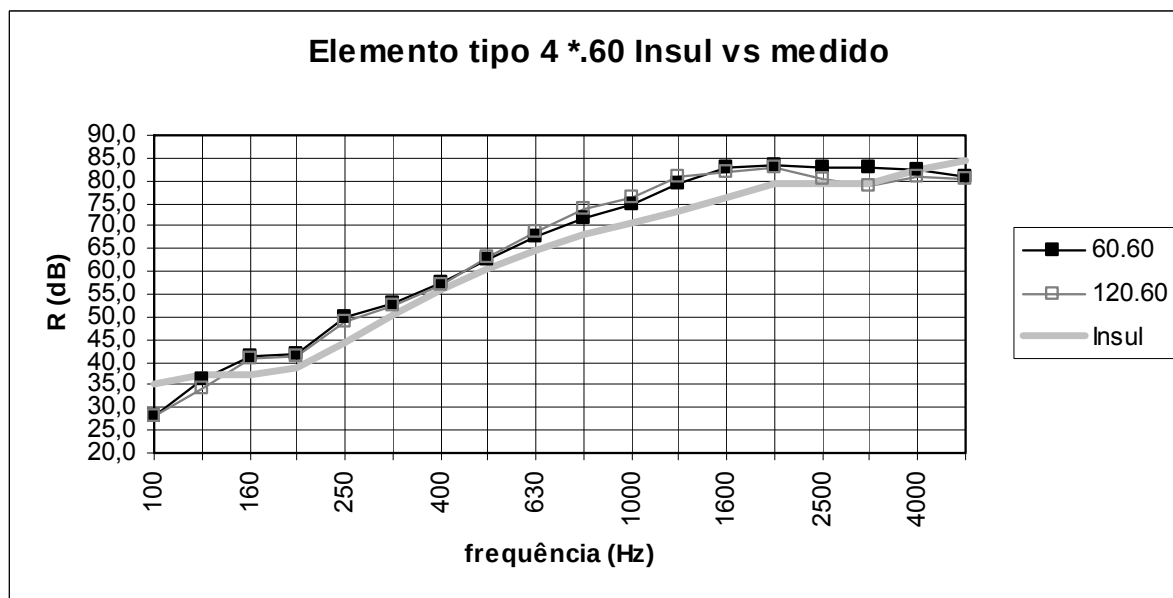


Figura A.51 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.4.6 Comparação entre o método de Meisser modificado e os valores medidos, por espessura

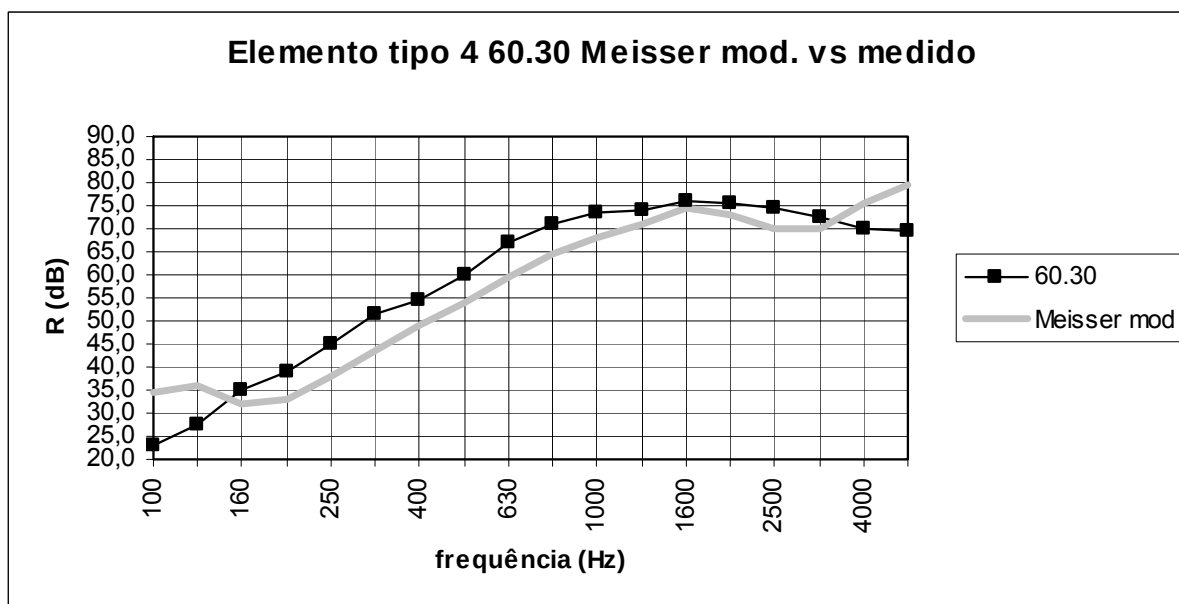


Figura A.52 – Resultados para uma espessura de 30 mm

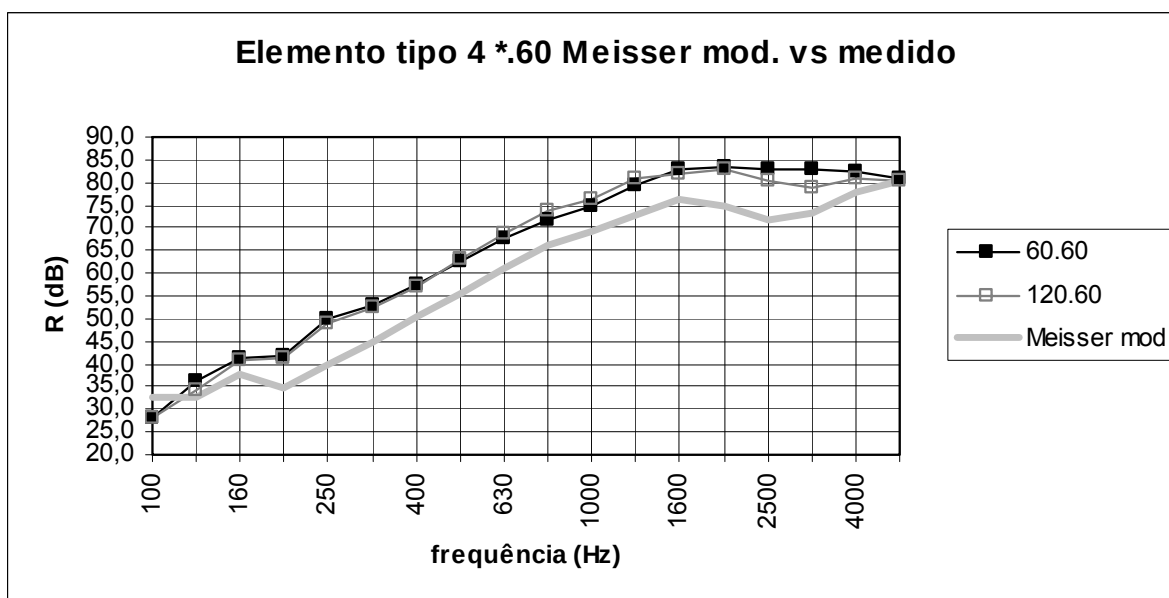


Figura A.53 – Resultados para uma espessura de 60 mm

A.5 Valores de R_w ensaiados

Quadro A.1 – Resultados de R_w

Elemento	Referência espuma	R_w (dB)
Tipo 1	60.30	46
	90.30	46
	120.30	47
	200.30	47
	60.60	50
	60.100	54
	90.100	51
	120.100	54
	200.100	53
Tipo 2	60.30	57
	60.100	63
Tipo 3	60.30	55
	60.60	57
	120.60	56
Tipo 4	60.30	53
	60.60	58
	120.60	58

Anexo B

Este anexo encontra-se em formato digital, no DVD fornecido. Nele encontra-se uma cópia deste trabalho, em formato “.pdf”, juntamente com os boletins de ensaio (também em formato “.pdf”) para as amostras ensaiadas. Os boletins estão organizados nos seguintes ficheiros:

- B.1 Boletim de ensaio – gesso-gesso.pdf
- B.2 Boletim de ensaio – alvenaria-gesso.pdf
- B.3 Boletins de ensaio – elementos tipo 1.pdf
- B.4 Boletins de ensaio – elementos tipo 2.pdf
- B.5 Boletins de ensaio – elementos tipo 3.pdf
- B.6 Boletins de ensaio – elementos tipo 4.pdf

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de um elemento constituído por dois painéis de gesso cartonado BA13 com caixa-de-ar de 100 mm, suportados por dois montantes de 48 mm
Dimensão da Amostra = 10 m²

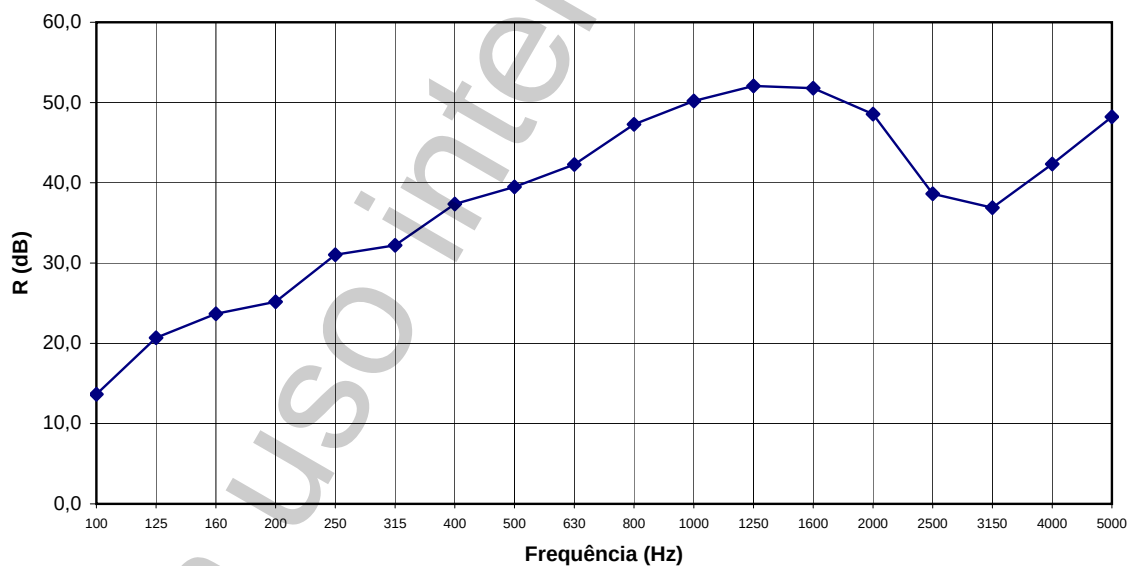
Referência
I-07-FLEX-0-1

Data
25-06-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₁ (dB)	75,2	85,1	90,8	96,2	98,7	97,9	97,0	95,1	93,7	93,0	91,6	89,3	91,2	90,7	88,2	86,2	83,9	80,8
L ₂ (dB)	68,6	70,6	73,3	76,9	73,3	71,3	65,1	60,7	56,4	50,2	45,6	40,9	42,7	45,0	51,9	50,8	42,2	32,3
R (dB)	13,7	20,7	23,7	25,2	31,0	32,2	37,4	39,5	42,3	47,3	50,2	52,1	51,8	48,6	38,6	36,9	42,3	48,2
R _w (dB)	39																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

Referência
I-07-FLEX-0-2

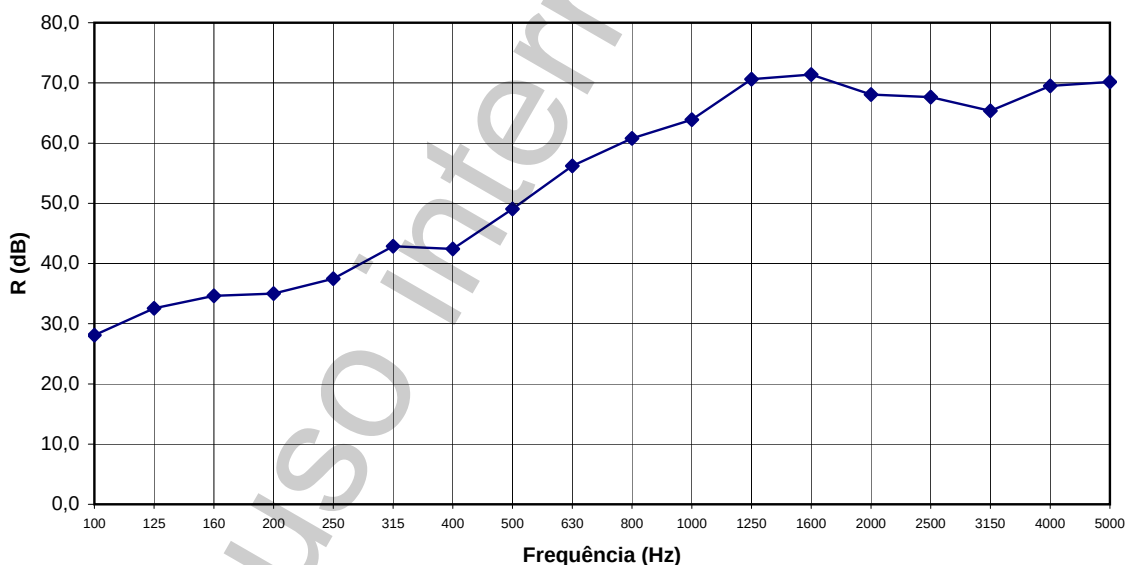
DESCRIÇÃO: Ensaio de um elemento contituído por um pano em alvenaria rebocado de ambos os lados e por um pano de gesso cartonado BA13 apoiado em montantes de 48 mm, com uma caixa-de-ar de 60 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

Data
29-08-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	19,7	14,4	12,8	11,5	12,3	12,2	9,7	6,9	4,6	4,2	3,7	5,5	6,1	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9
L ₁ (dB)	88,3	84,6	92,0	93,6	91,7	93,0	93,5	92,5	92,6	91,9	89,3	87,9	90,6	92,6	93,7	93,3	91,1	91,8
L ₂ (dB)	67,3	58,2	63,6	64,5	59,9	55,7	56,6	48,5	41,3	35,6	29,6	20,9	22,5	27,4	28,4	29,5	22,3	21,4
R (dB)	28,1	32,6	34,6	35,0	37,5	42,9	42,4	49,1	56,2	60,8	63,9	70,6	71,4	68,1	67,6	65,4	69,5	70,2
R _w (dB)	50																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura de **30 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

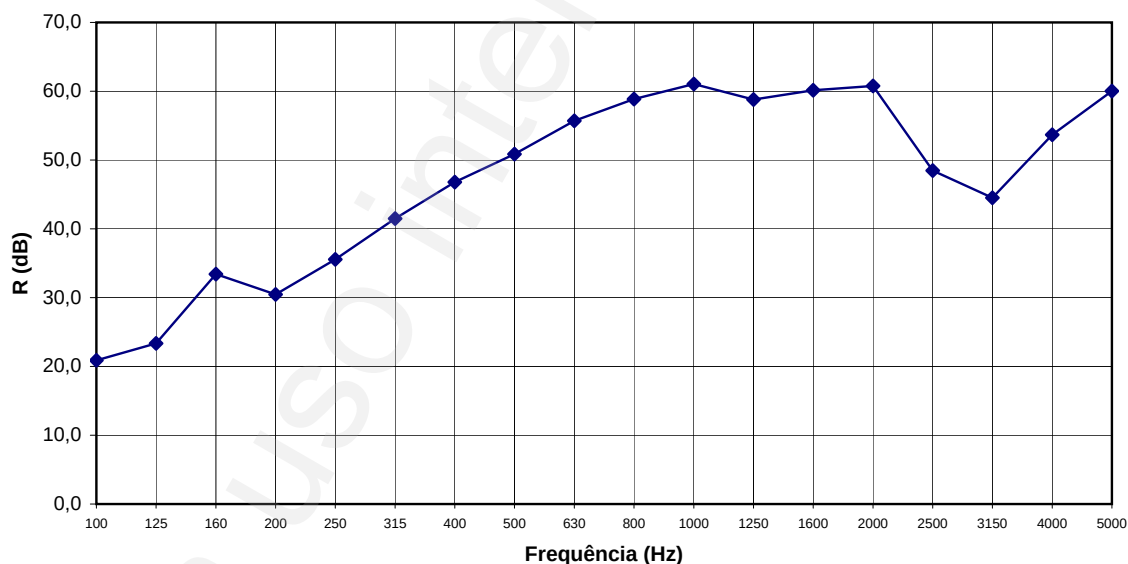
Referência
I-07-FLEX-60-30-1

Data
25-06-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	24,0	13,4	14,6	13,7	14,8	16,0	10,3	9,7	6,9	5,1	5,3	7,4	7,5	6,5	4,8	4,2	4,3	4,9
L ₁ (dB)	88,9	83,5	93,6	95,1	94,1	95,2	96,6	95,5	95,2	94,2	91,6	89,9	92,4	94,5	95,4	95,2	93,6	94,7
L ₂ (dB)	75,1	66,3	66,4	70,5	64,2	59,3	55,3	49,7	44,5	39,8	34,8	34,8	35,6	36,6	49,3	52,2	40,5	34,4
R (dB)	20,9	23,3	33,4	30,5	35,6	41,5	46,8	50,8	55,7	58,9	61,0	58,8	60,1	60,8	48,5	44,5	53,7	60,0
R_w (dB)	46																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura de **60 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

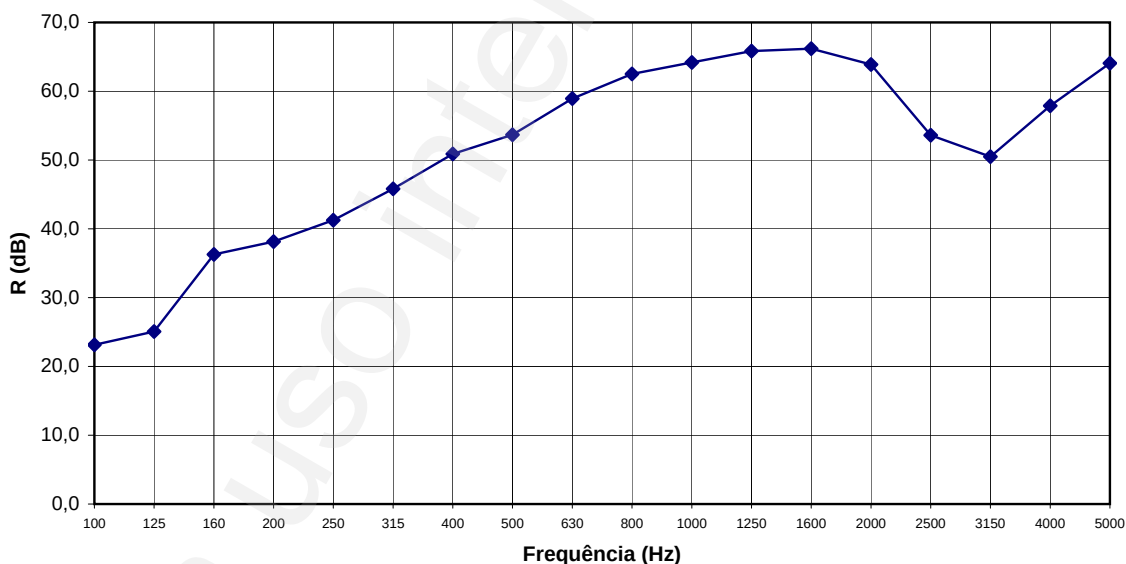
Referência
I-07-FLEX-60-60-1

Data
26-06-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	14,0	10,9	10,2	11,8	12,8	13,7	11,3	10,5	5,9	4,3	4,6	6,1	7,7	6,0	5,1	5,1	5,0	5,3
L ₁ (dB)	70,1	69,2	79,9	82,8	82,8	85,4	88,3	88,3	90,4	91,4	91,0	90,2	93,2	95,3	96,6	96,7	94,0	95,2
L ₂ (dB)	54,0	50,3	49,8	50,6	47,1	45,3	42,9	39,7	36,5	33,3	31,0	28,1	30,3	34,3	45,4	47,7	36,8	30,8
R (dB)	23,1	25,1	36,3	38,1	41,2	45,8	50,9	53,7	58,9	62,5	64,2	65,8	66,2	63,9	53,6	50,5	57,9	64,1
R _w (dB)	50																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura de **100 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

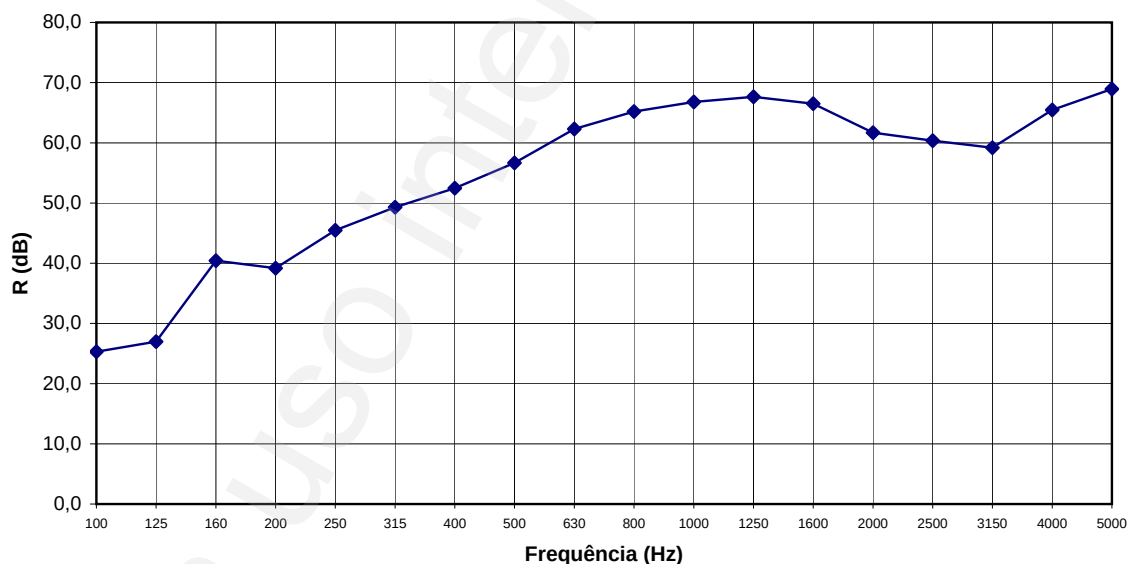
Referência
I-07-FLEX-60-100-1

Data
27-06-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	18,6	13,0	13,1	15,0	16,5	16,7	10,6	9,7	6,3	4,5	4,8	7,6	6,4	4,6	4,4	4,5	4,7	5,1
L ₁ (dB)	82,4	81,1	91,4	90,5	90,2	93,5	94,3	94,0	95,0	93,8	91,4	89,6	92,5	94,2	95,1	95,1	92,9	93,9
L ₂ (dB)	64,1	60,4	57,2	57,2	50,4	49,9	47,3	42,4	37,7	33,1	28,8	25,7	29,3	35,4	37,0	37,4	28,1	24,6
R (dB)	25,3	27,0	40,4	39,2	45,5	49,3	52,5	56,7	62,3	65,2	66,8	67,6	66,5	61,7	60,4	59,2	65,5	68,9
R_w (dB)	54																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **90 kg/m³** e uma espessura de **30 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

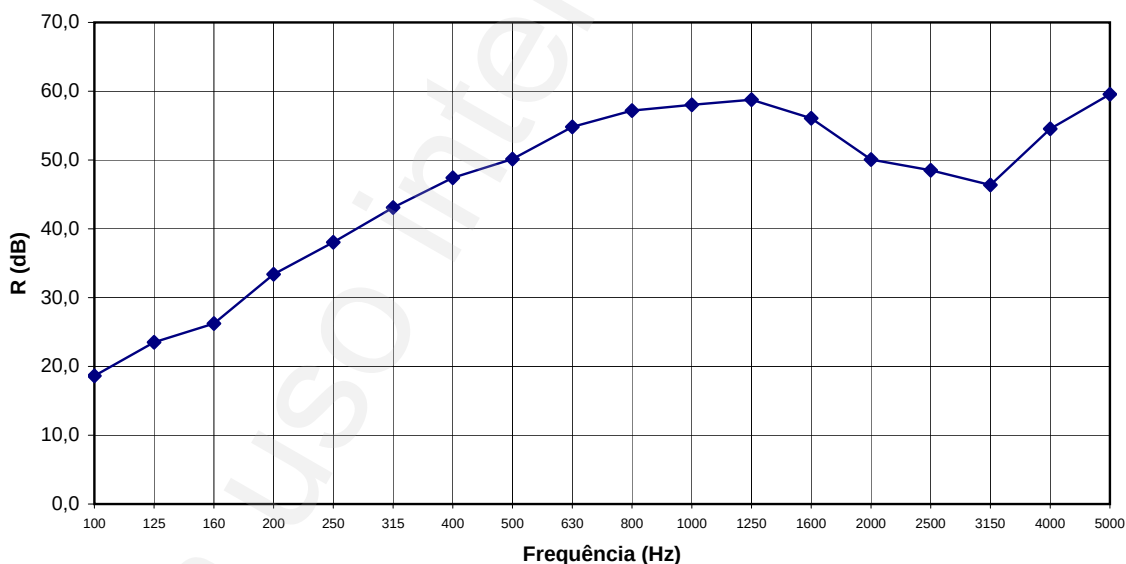
Referência
I-07-FLEX-90-30-1

Data
28-06-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	14,4	7,0	6,7	7,6	6,7	7,9	1,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	1,0	1,7	2,5	3,3	4,0	4,5
L ₁ (dB)	86,4	85,1	91,5	95,3	94,1	94,7	95,2	94,4	94,5	93,9	91,2	89,5	92,5	94,4	95,1	94,9	92,4	93,0
L ₂ (dB)	74,8	67,8	71,4	67,8	61,7	57,3	53,2	49,3	44,6	41,2	37,4	34,4	39,7	47,2	48,9	50,0	38,5	33,2
R (dB)	18,6	23,5	26,2	33,4	38,0	43,1	47,4	50,2	54,8	57,2	58,0	58,8	56,1	50,1	48,5	46,4	54,5	59,6
R_w (dB)	46																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **90 kg/m³** e uma espessura de **100 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

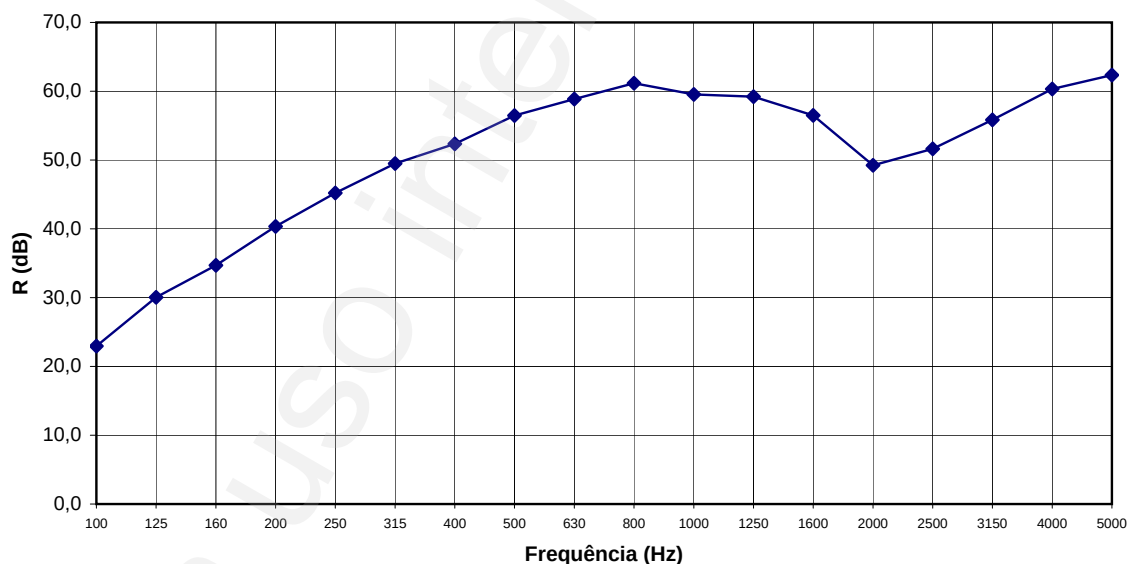
Referência
I-07-FLEX-90-100-1

Data
29-06-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	17,6	10,9	10,7	10,6	11,6	12,2	8,4	8,8	5,2	3,8	3,2	4,5	5,2	4,4	4,4	4,7	4,5	4,9
L ₁ (dB)	86,7	85,4	91,3	93,7	92,6	95,1	94,5	93,9	94,1	93,4	90,9	89,0	92,0	94,0	95,0	94,7	92,0	92,7
L ₂ (dB)	70,8	61,6	62,8	59,3	53,0	51,2	47,7	42,5	40,2	36,7	35,6	33,5	38,8	47,7	45,7	40,3	32,4	30,1
R (dB)	22,9	30,0	34,7	40,4	45,2	49,5	52,3	56,5	58,9	61,2	59,5	59,2	56,5	49,2	51,6	55,8	60,3	62,4
R_w (dB)	51																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **120 kg/m³** e uma espessura de **30 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

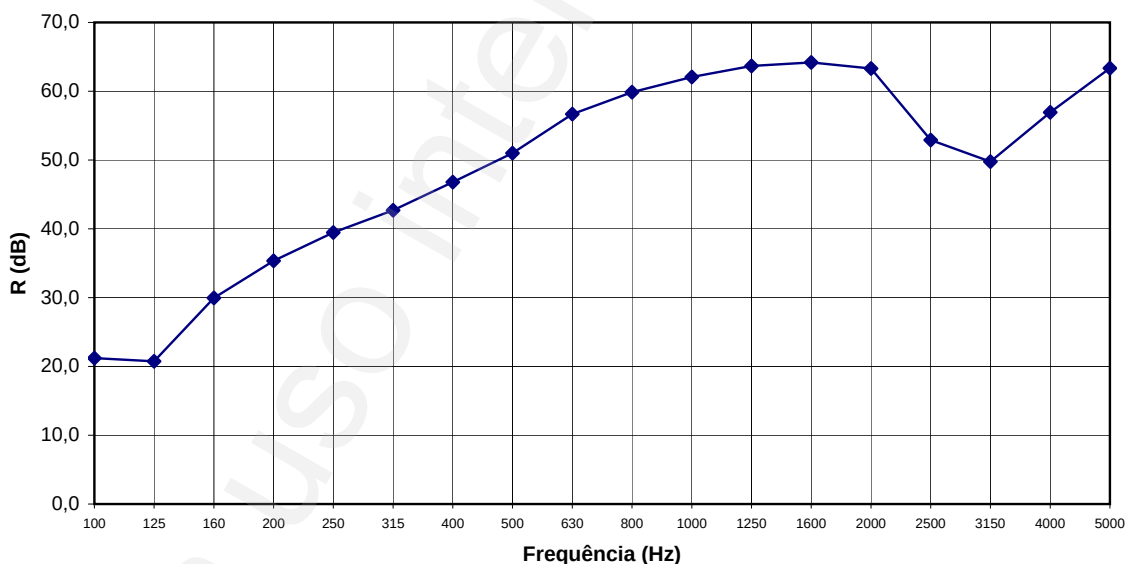
Referência
I-07-FLEX-120-30-1

Data
02-07-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	15,8	9,9	9,2	10,8	10,8	12,7	7,6	6,4	5,0	3,4	2,8	3,7	5,3	4,6	4,4	4,4	4,7	5,1
L ₁ (dB)	82,5	79,9	89,2	90,2	88,6	89,7	90,3	89,6	90,5	89,5	87,2	85,9	88,9	91,5	92,6	92,5	90,3	90,9
L ₂ (dB)	68,3	65,3	65,5	60,7	54,8	52,6	48,9	43,7	38,8	34,2	29,3	25,9	28,0	31,1	42,0	44,2	34,0	27,3
R (dB)	21,2	20,8	30,0	35,4	39,5	42,7	46,8	51,0	56,7	59,9	62,1	63,7	64,2	63,3	52,9	49,8	56,9	63,3
R_w (dB)	47																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **120 kg/m³** e uma espessura de **100 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

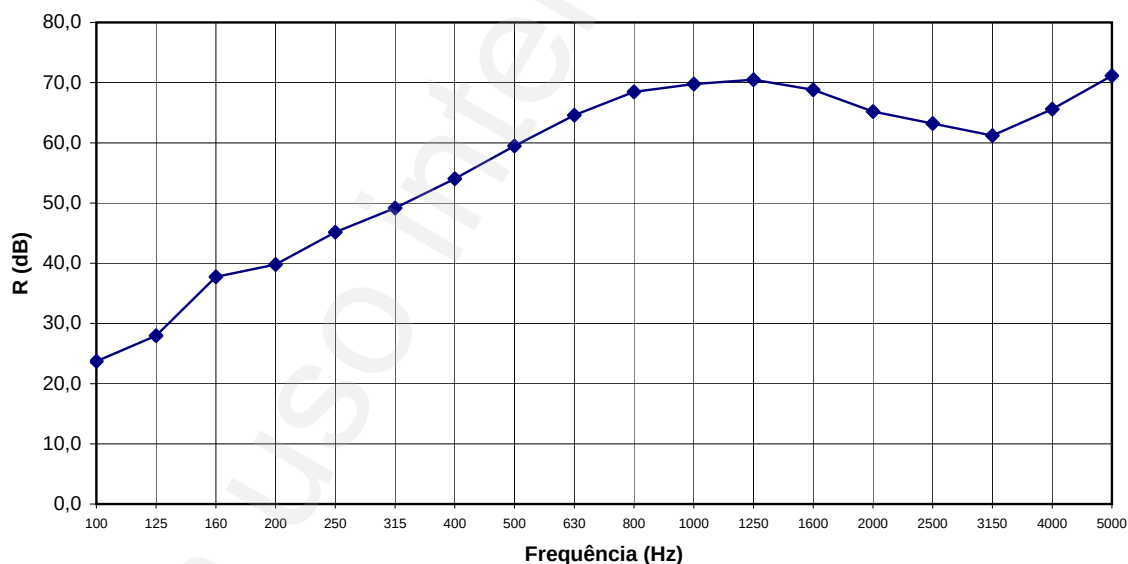
Referência
I-07-FLEX-120-100-1

Data
03-07-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	15,9	12,0	11,0	13,3	14,0	14,6	12,2	10,4	6,4	5,1	4,8	6,2	7,6	6,9	6,1	6,2	5,8	6,1
L ₁ (dB)	66,1	64,9	74,8	77,7	78,2	79,7	83,1	83,6	86,9	90,5	92,0	92,1	92,2	93,2	95,7	95,6	92,8	94,5
L ₂ (dB)	49,5	43,1	43,3	43,8	38,7	36,2	34,5	29,2	27,2	26,5	26,4	25,3	26,7	30,9	34,8	35,9	27,9	23,1
R (dB)	23,7	28,0	37,8	39,8	45,2	49,2	54,0	59,5	64,6	68,5	69,8	70,5	68,8	65,2	63,2	61,2	65,6	71,1
R_w (dB)	54																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **200 kg/m³** e uma espessura de **30 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

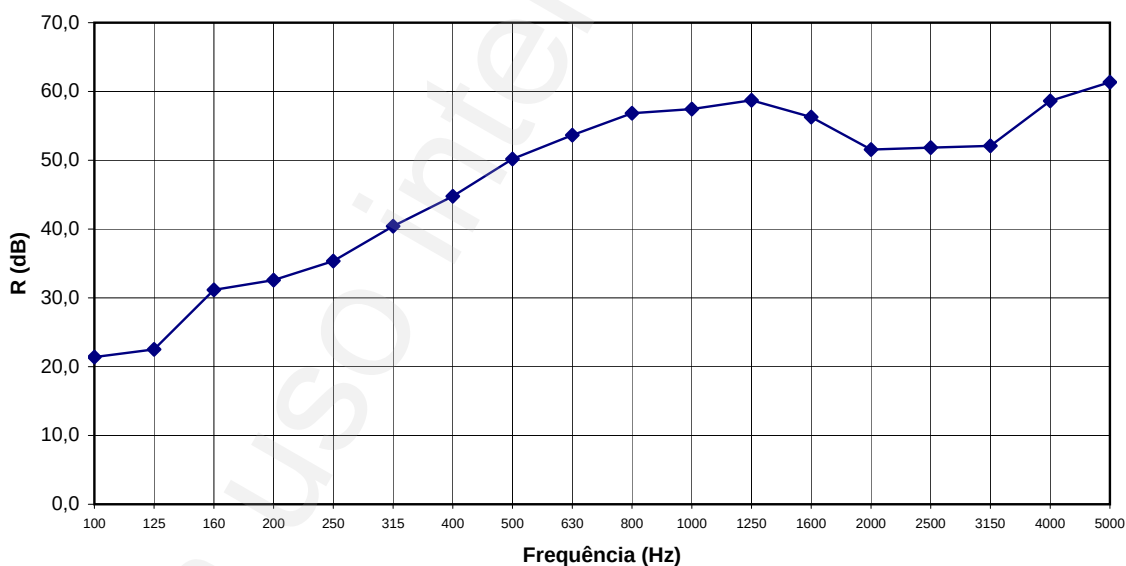
Referência
I-07-FLEX-200-30-1

Data
04-07-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	15,2	11,8	10,4	12,1	10,8	12,3	7,7	6,9	3,2	2,2	2,5	4,8	6,9	5,1	4,5	4,6	5,2	5,3
L ₁ (dB)	68,5	67,3	76,3	79,4	80,0	83,4	86,0	86,6	88,8	89,7	88,6	88,3	91,6	93,9	95,4	95,2	92,9	93,6
L ₂ (dB)	54,1	50,9	51,3	52,7	50,3	48,6	46,7	41,5	40,1	37,3	35,4	33,3	38,7	45,3	45,9	44,6	34,9	32,0
R (dB)	21,4	22,5	31,2	32,6	35,4	40,4	44,8	50,2	53,7	56,8	57,4	58,7	56,3	51,6	51,8	52,1	58,6	61,3
R _w (dB)	47																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **200 kg/m³** e uma espessura de **100 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos simples de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

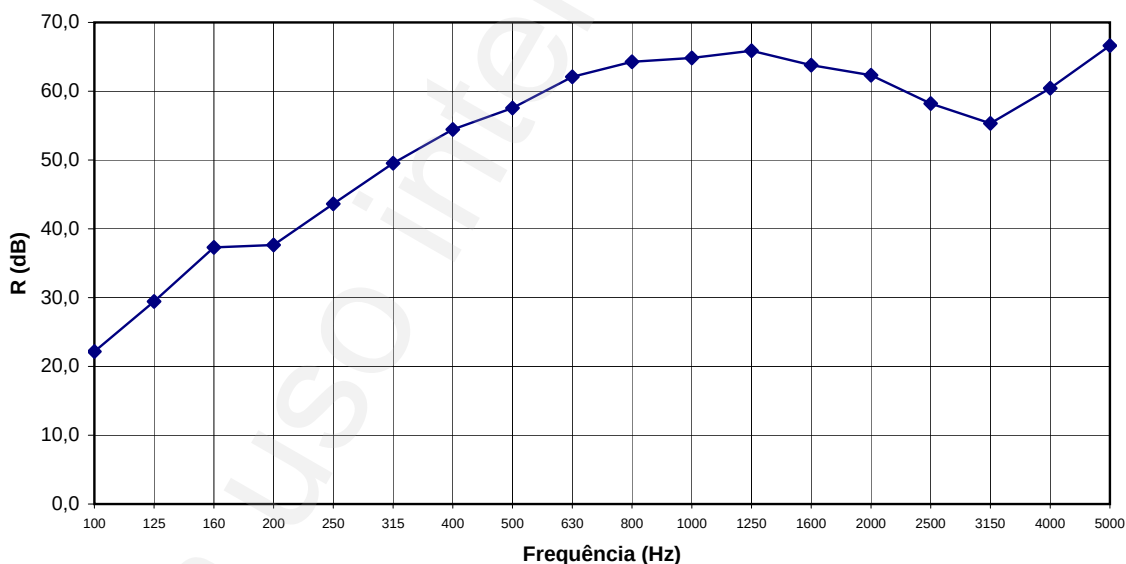
Referência
I-07-FLEX-200-100-1

Data
05-07-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	16,0	8,8	9,9	10,5	11,0	12,5	8,0	7,5	5,0	4,3	3,9	4,1	5,4	4,7	5,6	6,4	4,2	4,9
L ₁ (dB)	86,5	84,6	93,1	94,3	93,0	93,7	94,9	94,0	94,2	93,3	90,9	89,1	92,1	94,7	95,0	94,2	93,2	92,9
L ₂ (dB)	71,4	61,3	62,0	62,6	55,0	49,8	45,9	41,5	37,1	33,5	30,3	26,9	31,6	35,2	39,1	40,4	33,4	26,0
R (dB)	22,2	29,4	37,3	37,7	43,6	49,5	54,4	57,6	62,1	64,3	64,8	65,9	63,8	62,3	58,2	55,3	60,4	66,6
R _w (dB)	53																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura de **30 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos duplos de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

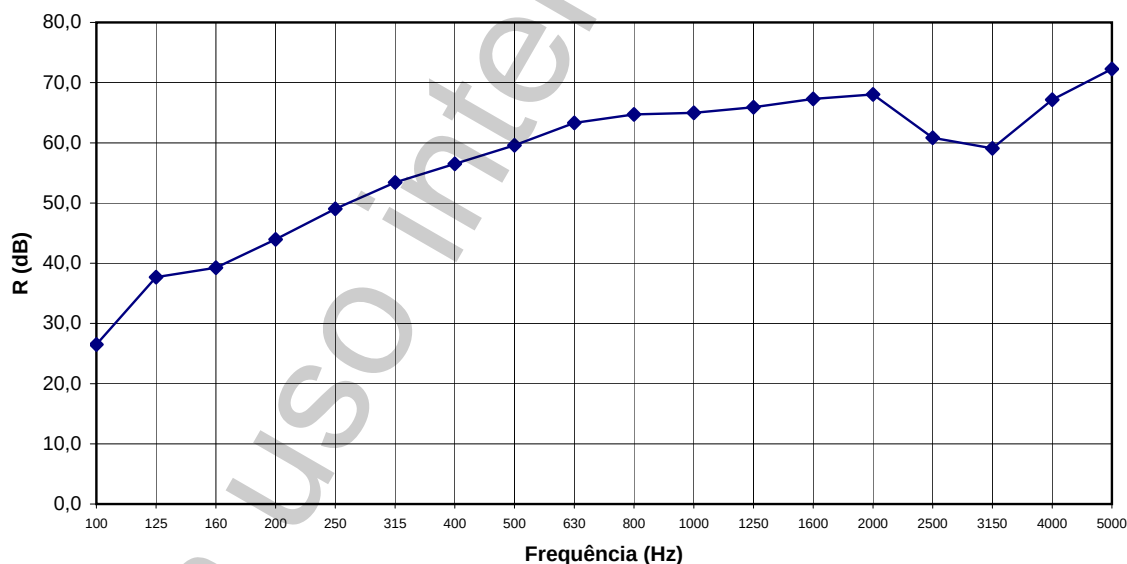
Referência
I-07-FLEX-60-30-2

Data
09-07-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	16,9	10,9	11,4	10,5	9,8	9,9	7,4	6,7	5,7	5,7	5,2	5,8	7,1	6,4	5,7	5,8	5,2	5,1
L ₁ (dB)	77,7	77,0	86,3	89,5	89,7	90,9	93,1	93,7	95,6	95,4	93,3	92,1	95,0	96,4	97,3	97,1	94,4	94,6
L ₂ (dB)	58,3	45,5	53,3	51,4	46,3	43,1	42,0	39,2	37,3	35,1	32,5	29,8	31,0	31,3	38,8	39,5	27,9	22,1
R (dB)	26,5	37,7	39,2	44,0	49,0	53,4	56,5	59,6	63,3	64,7	65,0	65,9	67,3	68,0	60,8	59,1	67,2	72,3
R_w (dB)	57																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura de **100 mm**. A amostra foi avaliada interposta entre dois paramentos duplos de gesso cartonado BA13 com montantes de 48 mm.
Dimensão da Amostra = 10 m²

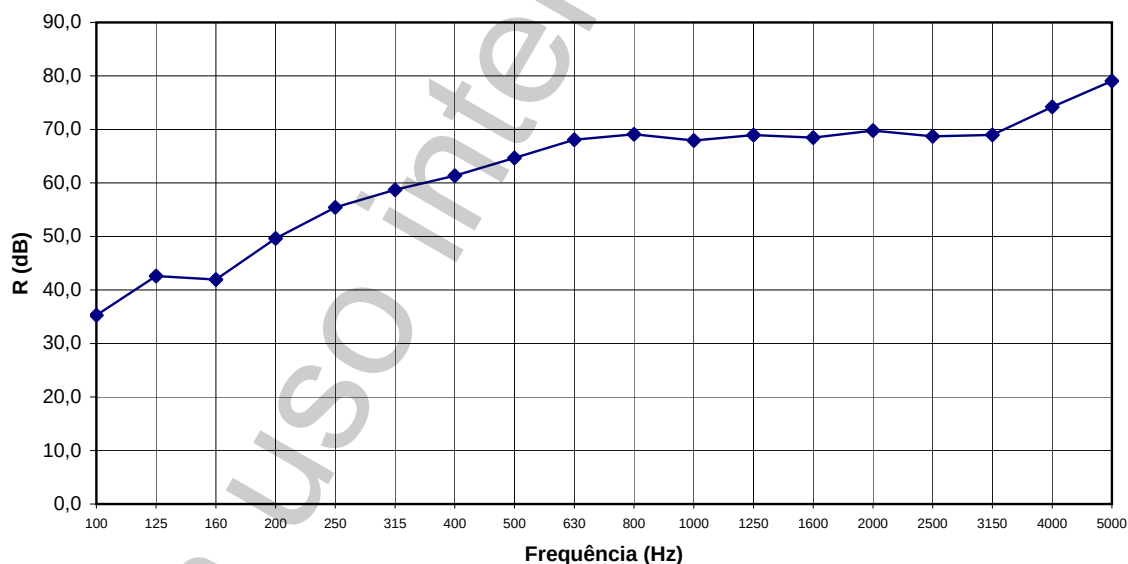
Referência
I-07-FLEX-60-100-2

Data
10-07-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	21,5	13,1	11,7	10,2	11,5	12,7	6,9	6,8	2,4	1,6	1,9	3,2	3,2	3,0	3,3	3,7	4,1	4,7
L ₁ (dB)	72,6	73,1	79,8	83,9	84,0	85,9	87,9	89,0	91,0	92,0	91,3	91,1	93,8	95,8	97,4	97,2	94,6	95,4
L ₂ (dB)	44,3	36,7	44,0	40,1	34,2	32,8	32,1	29,4	27,8	27,4	27,5	25,8	28,6	28,8	31,0	29,7	21,0	16,1
R (dB)	35,3	42,6	41,9	49,6	55,4	58,7	61,3	64,7	68,1	69,1	67,9	68,9	68,5	69,8	68,7	69,0	74,2	79,1
R _w (dB)	63																	

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

Referência

I-07-FLEX-60-30-3

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura **30 mm**, aplicadas na caixa-de-ar (com uma espessura de 60 mm) de um elemento contituído por um pano em alvenaria rebocado de ambos os lados e por um pano de gesso cartonado BA13 apoiado em montantes de 48 mm.

Data

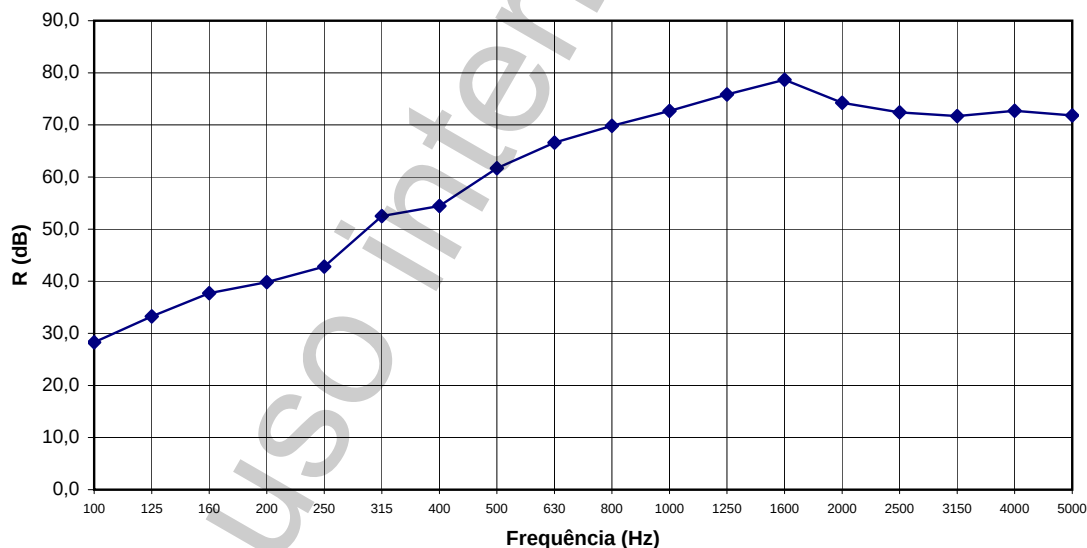
29-08-2007

Dimensão da Amostra = 10 m²

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	18,6	11,3	10,9	10,5	10,9	11,9	7,1	4,1	3,1	2,4	3,0	3,6	4,7	4,3	4,4	4,6	5,0	5,3
L ₁ (dB)	91,7	89,0	97,9	100,4	99,0	100,0	98,7	98,4	98,5	97,6	96,0	94,2	96,4	97,2	98,5	98,3	95,5	96,1
L ₂ (dB)	70,5	61,9	66,3	66,4	61,8	53,1	49,7	41,8	36,8	32,3	27,5	22,0	21,0	25,8	28,4	28,0	23,4	24,0
R (dB)	28,3	33,3	37,7	39,8	42,8	52,5	54,4	61,7	66,6	69,8	72,7	75,8	78,7	74,3	72,4	71,7	72,7	71,8

R_w (dB) 55

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

Referência

I-07-FLEX-60-60-2

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura **60 mm**, aplicadas na caixa-de-ar (com uma espessura de 60 mm) de um elemento contido por um pano em alvenaria rebocado de ambos os lados e por um pano de gesso cartonado BA13 apoiado em montantes de 48 mm.

Data

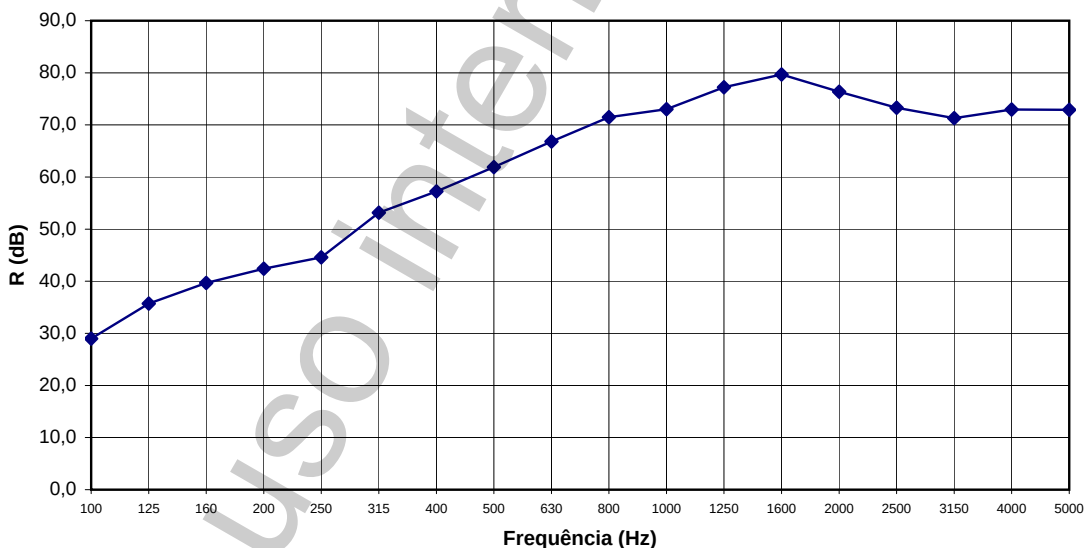
30-08-2007

Dimensão da Amostra = 10 m²

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	16,6	11,9	11,8	15,2	13,8	10,5	6,8	2,5	0,4	0,4	0,5	1,4	1,8	2,6	3,4	4,1	4,6	5,1
L ₁ (dB)	90,7	88,6	97,1	99,9	97,9	99,5	99,2	97,8	98,2	97,5	95,2	93,7	96,2	97,1	97,7	97,7	94,8	95,5
L ₂ (dB)	68,8	59,1	63,6	63,4	59,0	52,0	47,4	40,9	36,4	30,5	26,4	20,2	19,8	23,6	26,7	27,9	22,5	22,3
R (dB)	29,0	35,7	39,7	42,4	44,6	53,2	57,2	61,9	66,8	71,5	73,0	77,2	79,7	76,4	73,3	71,3	73,0	72,9

R_w (dB) 57

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

Referência

I-07-FLEX-120-60-1

DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **120 kg/m³** e uma espessura **60 mm**, aplicadas na caixa-de-ar (com uma espessura de 60 mm) de um elemento contituído por um pano em alvenaria rebocado de ambos os lados e por um pano de gesso cartonado BA13 apoiado em montantes de 48 mm.

Data

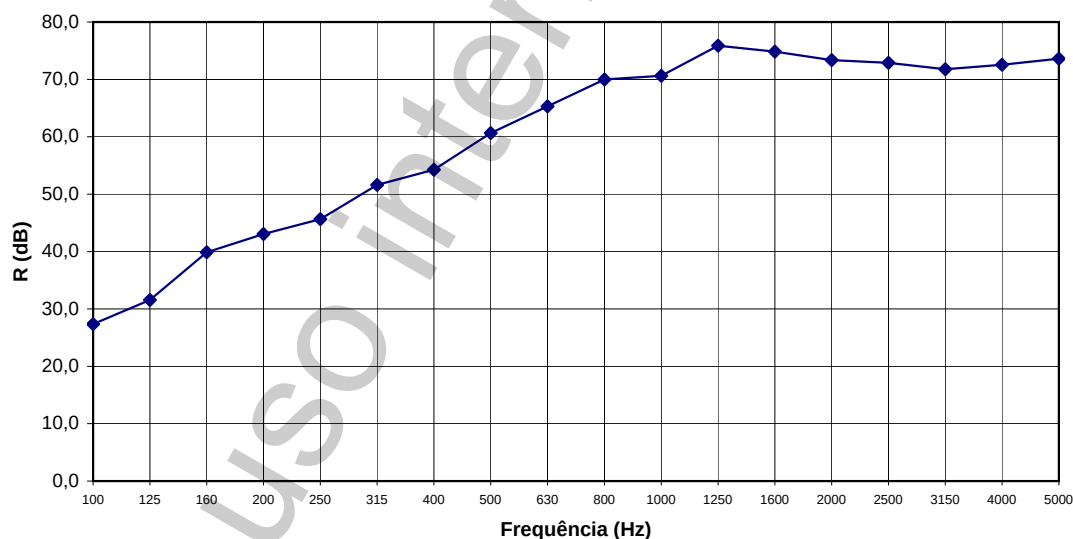
31-08-2007

Dimensão da Amostra = 10 m²

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27	Altura (m) = 4,625	Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835	Volume (m ³) = 211	Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141	Sc= 206,06215	

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	20,4	12,7	11,8	11,3	12,4	13,8	5,4	0,8	0,0	0,0	0,1	0,9	1,1	1,8	2,8	3,6	4,2	4,8
L ₁ (dB)	88,4	88,3	94,4	98,5	95,8	98,7	99,8	98,1	98,2	97,6	94,9	93,6	95,9	97,0	97,7	97,4	94,4	95,4
L ₂ (dB)	68,1	63,0	60,7	61,3	55,8	52,7	51,0	42,6	37,9	32,1	28,5	21,4	24,4	26,5	27,2	27,1	22,5	21,5
R (dB)	27,4	31,6	39,9	43,1	45,6	51,6	54,3	60,6	65,3	70,0	70,6	75,9	74,8	73,4	72,9	71,8	72,5	73,6

R_w (dB) 56

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

Referência
I-07-FLEX-60-30-4

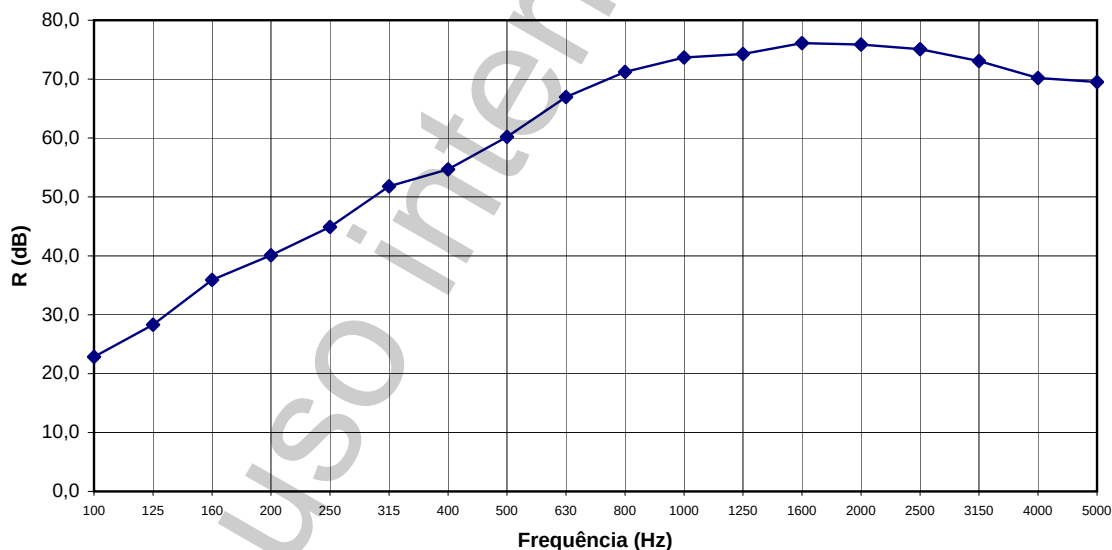
DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura de **30mm**. A amostra foi avaliada interposta entre um paramento de alvenaria de tijolo de 11 cm rebocada em ambas as faces e um paramento duplo de gesso cartonado BA13 colado na espuma.
Dimensão da Amostra = 10 m²

Data
03-09-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	20,2	11,6	11,4	9,7	10,4	11,8	5,7	3,1	0,5	0,4	0,0	0,5	0,9	2,0	2,9	3,7	4,3	4,7
L ₁ (dB)	99,6	97,9	104,7	105,4	102,4	102,2	101,7	99,5	98,2	96,8	93,9	92,2	94,4	95,8	96,7	96,6	93,8	94,8
L ₂ (dB)	83,8	75,8	74,9	71,2	63,1	56,0	52,5	44,4	36,2	30,1	24,4	21,6	21,6	22,8	24,0	25,1	24,2	25,0
R (dB)	22,9	28,3	35,9	40,1	44,9	51,8	54,7	60,2	67,0	71,2	73,7	74,3	76,1	75,9	75,1	73,1	70,2	69,5

R_w (dB) 53

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

Referência
I-07-FLEX-60-60-3

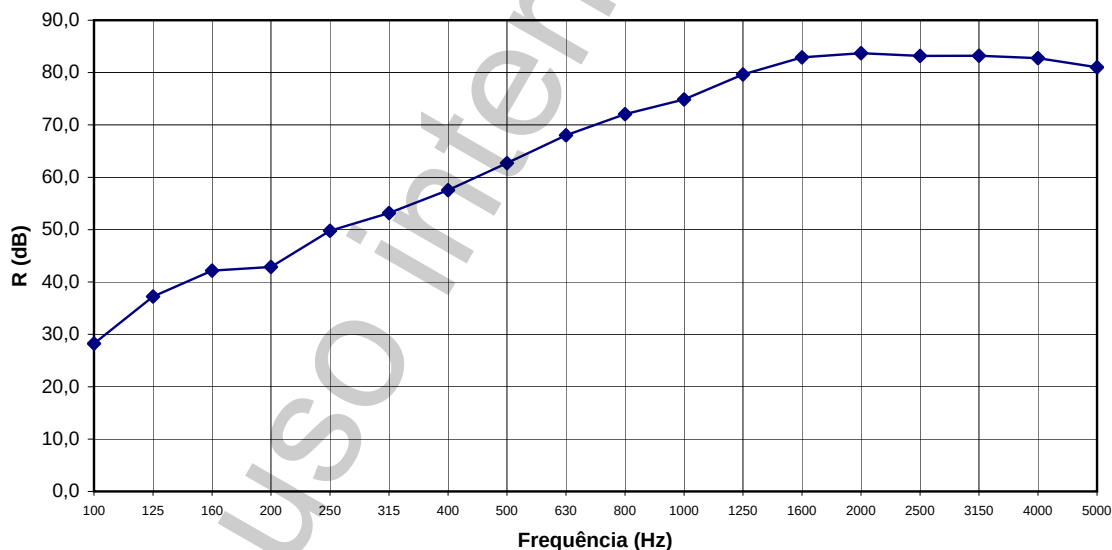
DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **60 kg/m³** e uma espessura de **60mm**. A amostra foi avaliada interposta entre um paramento de alvenaria de tijolo de 11 cm rebocada em ambas as faces e um paramento duplo de gesso cartonado BA13 colado na espuma.
Dimensão da Amostra = 10 m²

Data
04-09-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	17,8	10,8	10,6	9,6	11,5	12,7	4,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,4	0,9	1,9	2,8	3,6	4,3	4,8
L ₁ (dB)	89,7	90,2	97,9	98,4	97,3	97,5	98,7	98,0	98,2	97,3	94,8	94,0	96,0	96,9	97,8	97,5	94,4	95,4
L ₂ (dB)	68,5	59,2	61,9	61,4	53,1	49,9	46,6	40,4	35,1	29,8	24,1	18,0	16,4	16,1	16,9	15,7	12,3	14,1
R (dB)	28,2	37,2	42,2	42,9	49,8	53,2	57,5	62,7	68,0	72,1	74,9	79,6	82,9	83,7	83,2	83,2	82,7	81,0

R_w (dB) 58

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

NORMAS: NP EN 20140-3 (ISO 140-3)
NP EN ISO 717-1 (ISO 717-1)

REQUERENTE: FLEX 2000

Referência
I-07-FLEX-120-60-2

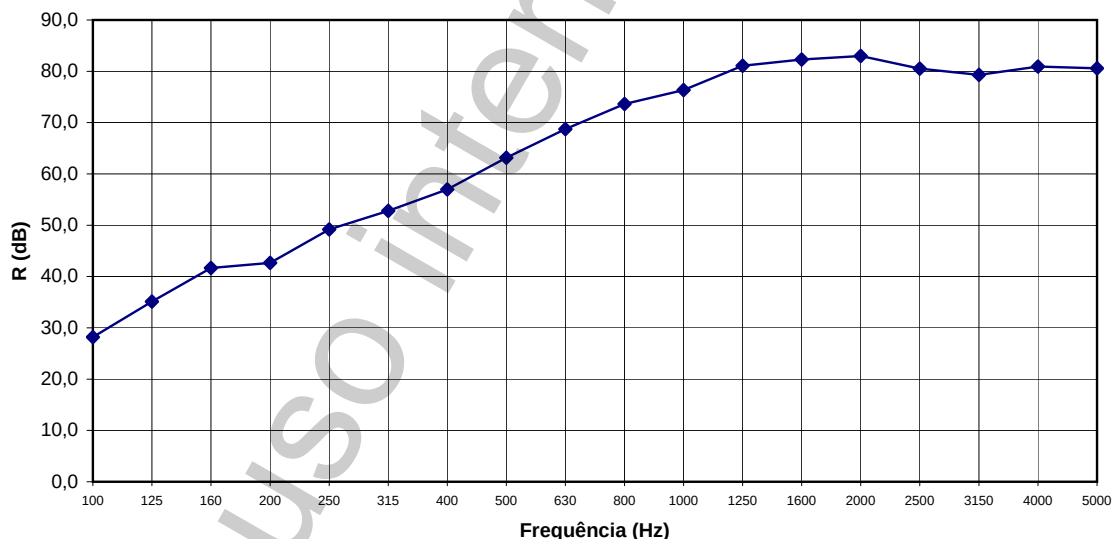
DESCRIÇÃO: Ensaio de Isolamento a ruídos de condução aérea de espumas de poliuretano com uma densidade de **120 kg/m³** e uma espessura de **60mm**. A amostra foi avaliada interposta entre um paramento de alvenaria de tijolo de 11 cm rebocada em ambas as faces e um paramento duplo de gesso cartonado BA13 colado na espuma.
Dimensão da Amostra = 10 m²

Data
05-09-2007

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) 7,27 Altura (m) = 4,625 Temperatura do Ar (°C) = 18
Largura média (m) = 5,835 Volume (m³) = 211 Humidade do Ar (%) = 68
c*V= 34,09141 Sc= 206,06215

GRÁFICO



VALORES

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
TR (s)	17,2	14,1	14,0	13,1	12,3	12,3	11,9	10,9	10,6	9,5	8,8	7,9	7,2	6,5	5,8	4,8	3,9	3,2
L ₀ (dB)	20,4	13,3	12,9	12,6	14,1	15,8	7,3	1,8	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	1,5	2,4	3,3	4,0	4,6
L ₁ (dB)	90,4	90,0	97,1	99,0	98,6	97,4	98,4	98,1	97,9	97,6	94,9	93,6	95,4	96,7	97,6	97,3	94,3	95,1
L ₂ (dB)	69,2	61,1	61,6	62,2	55,1	50,3	46,9	40,1	34,2	28,5	22,7	16,2	16,4	16,6	19,4	19,5	14,0	14,2
R (dB)	28,2	35,1	41,7	42,7	49,2	52,8	57,0	63,1	68,7	73,6	76,3	81,1	82,3	83,0	80,5	79,3	80,9	80,6
R _w (dB)	58																	