

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**ANÁLISE DO ISOLAMENTO SONORO DE SISTEMAS  
CONSTRUTIVOS RESIDENCIAIS ESTRUTURADOS EM AÇO**

**2004**

*À Tia Antonina.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pelo incentivo incondicional e por me ensinar a buscar honestidade, competência e conhecimento.

Ao Beto, por estar sempre ao meu lado, compartilhando minhas angústias, alegrias e conquistas e por ser o meu porto seguro.

Às minhas irmãs Carol e Giza e ao Breninho.

Ao Curso de Mestrado, especialmente aos meus orientadores Francisco Carlos Rodrigues e Marco Antônio Vecci.

Ao pessoal do mestrado, Inês Lucíola, Patrícia e Renata pela colaboração e o bom humor de sempre.

Aos amigos Pierre e Guilherme de Almeida, por transformar os momentos difíceis em grandes brincadeiras.

Ao arquiteto Márcio Pinto de Barros, grande incentivador da minha empreitada rumo ao mestrado.

Ao Centro Universitário do Leste de Minas Gerais em especial à coordenadora do Curso de Arquitetura e Urbanismo, Carla Paoliello.

Ao “Raimundinho” por nunca me abandonar e tornar possível esta batalha.

À Precon por disponibilizar espaço físico e apoio aos ensaios, em especial ao Sílvio, Alberto, Sidney e “Tio Maurinho”.

# SUMÁRIO

## Apresentação

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivos e justificativa.....	4
1.3	Estruturação do texto .....	7
<b>2</b>	<b>Conceitos de acústica de edificações, isolamento sonoro – revisão bibliográfica</b> .....	8
2.1	Propriedades do som.....	8
2.2	Níveis sonoros .....	11
2.2.1	Níveis sonoros ponderados.....	12
2.2.2	Fundamentos do controle do ruído.....	13
2.3	Absorção Sonora.....	16
2.4	Isolamento Sonoro.....	17
2.4.1	Painéis maciços .....	17
2.4.2	Paredes duplas .....	21
2.4.3	Transmissão pelos flanco .....	24
2.4.4	Redução do nível de ruído (NR) entre ambientes.....	24
2.4.5	Curvas STC e $R_w$ .....	25
2.4.6	Estado da arte do isolamento sonoro de painéis para edificações .....	28
2.4.7	Perda por transmissão em painéis simples .....	32
2.4.8	Perda por transmissão em paredes duplas.....	36
2.4.9	Perda por transmissão em painéis sanduíches .....	38
<b>3</b>	<b>Sistemas Construtivos em Estrutura Metálica</b> .....	44
3.1	Contextualização .....	44
3.2	Vedações em alvenaria .....	47
3.3	Painéis de concreto celular autoclavado.....	52
3.4	Painéis de gesso acartonado.....	54
3.5	Painéis de concreto .....	60
3.6	Outros painéis.....	69
3.6.1	Painéis de plástico.....	69
3.6.2	Painéis de chapa metálica .....	71

<b>3.7 Avaliação das interfaces dos painéis de vedação e estrutura metálica .....</b>	<b>71</b>
3.7.1- Painéis de alvenaria.....	73
3.7.2- Painéis de gesso acartonado .....	74
3.7.3- Painéis de concreto .....	76
3.7.4- Painéis de PVC .....	77
<b>4 Análise de critérios recomendados para isolamento sonoro.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1 A normalização do isolamento sonoro.....</b>	<b>78</b>
<b>5 Análise comparativa da perda por transmissão dos sistemas</b>	
<b>construtivos .....</b>	<b>90</b>
<b>5.1 Blocos de concreto celular autoclavado .....</b>	<b>98</b>
<b>5.2 Painel de concreto com EPS.....</b>	<b>100</b>
<b>5.3 Painel de chapa zincada+EPS.....</b>	<b>101</b>
<b>5.4 Análise comparativa .....</b>	<b>102</b>
<b>Comparação entre resultados experimentais e modelos analíticos .....</b>	<b>104</b>
5.4.1 Parede de tijolo cerâmico .....	104
5.4.2 Parede de bloco de concreto celular autoclavado .....	106
5.4.3 Painel de PVC+EPS+lã de rocha .....	108
5.4.4 Painel de concreto com miolo de EPS .....	109
5.4.5 Painel de EPS+chapa zincada .....	111
<b>6 Considerações finais .....</b>	<b>113</b>
<b>7 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>118</b>
<b>8 Anexos .....</b>	<b>127</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistema Casa fácil Gerdau .....	3
Figura 1.2 – Sistema Usiteto .....	3
Figura 1.3 – Reflexões sonoras provocadas pela forma de implantação do edifício..	7
Figura 2.1 – Movimento ondulatório de um tom puro.....	9
Figura 2.2 – Comportamento de uma onda sonora ao passar por um orifício com dimensão característica L.....	10
Figura 2.3 – Formas de implantação que afetam o desempenho acústico do edifício	16
Figura 2.4 – Influência da massa global do sistema.....	18
Figura 2.5 – Comportamento típico de isolamento sonora de materiais maciços.....	19
Figura 2.6 – Efeito da coincidência.(GERGES, 1992).....	21
Figura 2.7 – Variação da perda por transmissão em paredes duplas .....	22
Figura 2.8 – Montagem de material absorvente entre montantes .....	23
Figura 2.9 – Relação da montagem com o isolamento sonoro (KNAUF, 2000) .....	23
Figura 2.10 – Área de escape e a redução do isolamento .....	24
Figura 2.11 – Perda por transmissão para o concreto celular autoclavado .....	26
Figura 2.12 – Curva de referência ISO 717/1 .....	27
Figura 2.13 – Meios de propagação do som em painéis duplos .....	37
Figura 2.14 – (a) propagação antissimétrica; (b) propagação simétrica .....	39
Figura 3.1 – Sistema construtivo em steel framing .....	45
Figura 3.2 – Módulo pronto em GRFD .....	45
Figura 3.3 – Seções dos perfis formados a frio.....	46
Figura 3.4 – Alvenaria de blocos cerâmicos e estrutura metálica.....	48
Figura 3.5 – Uso de tela metálica para garantir a estabilidade da alvenaria.....	49
Figura 3.6 – Sistema rígido: encunhamento entre alvenaria e estrutura.....	50
Figura 3.7 – Sistema semi-rígido: argamassa com aditivo expensor.....	50
Figura 3.8 – Proteções da estrutura para recebimento de revestimento.....	51
Figura 3.9 – Junta de movimentação no revestimento fachadas com estruturas metálicas.....	51
Figura 3.10 – Montagem da junta de dilatação .....	52
Figura 3.11 – Concreto celular autoclavado armado (SICAL, 1999).....	52

Figura 3.12 – Detalhe de fixação utilizando conectores (SICAL, 1999) .....	53
Figura 3.13 – Encontro dos painéis com o flange inferior da viga, através de cantoneiras e chapas dobradas (SICAL, 1999).....	53
Figura 3.14 – Montagem do painel de concreto celular autoclavado (1- perfil metálico, 2- placa de EPS, 3- cunha de madeira, 4- alavanca; 5- painel). (SIPOREX, 1999).....	54
Figura 3.15 – Sistema de gesso acartonado comum e com maior desempenho acústico.....	55
Figura 3.16 – Instalações elétricas do sistema gesso acartonado.....	56
Figura 3.17 – Componentes do sistema de gesso acartonado (LAFARGE GYPSUM, 1999).....	57
Figura 3.18 – Esquema da junta de movimentação protegida .....	58
Figura 3.19 – Junta protegida com tratamento contra incêndio .....	58
Figura 3.20 – Junta telescópica entre o gesso acartonado e a laje superior.....	59
Figura 3.21 – Colocação do gesso a 1cm a menos que a guia inferior (SILVA, 2002).....	59
Figura 3.22 – Acabamento das juntas de encontro entre painéis (KRUGGER, 2000).....	60
Figura 3.23 – Boathouse at Sawyer Point Cincinnati, Ohio (SILVA, 2000 <i>apud</i> PCI, 1989).....	61
Figura 3.24 – Commissioners of Republic Works Administrative Offices Charleston, South Carolina (SILVA, 2000 <i>apud</i> PCI, 1989).....	61
Figura 3.25 – Acabamentos propostos para painéis de concreto (PRECON, 1999).....	62
Figura 3.26 – Painel cortina (PRECON, 1999) .....	63
Figura 3.27 – Painel de vedação (KRUGGER, 2000) .....	63
Figura 3.28 – Detalhes construtivos de pingadeiras .....	65
Figura 3.29 – Detalhes para fachadas lisas .....	66
Figura 3.30 – Tratamento das juntas verticais (a esquerda) e horizontais (a direita) .	66
Figura 3.31 – Detalhe de drenagem da junta aberta .....	67
Figura 3.32 – Largura e preenchimento das juntas (KRUGGER, 2000) .....	67
Figura 3.33 – Detalhe de conexão do painel e estrutura pelo topo do painel	

(KRUGGER, 2000).....	68
Figura 3.34 – Fixação na base do painel (KRUGGER, 2000) .....	68
Figura 3.35 – Dispositivos de fixação dos painéis protegido por pintura anticorrosiva (KRUGGER, 2000).....	69
Figura 3.36 – Estrutura básica do painel em PVC (MVC, 2003) .....	70
Figura 3.37 – Influência da posição dos pilares metálicos no isolamento sonoro .....	72
Figura 3.38 – Alvenaria de proteção do perfil metálico .....	72
Figura 3.39 – Tratamento do perfil metálico aparente .....	72
Figura 3.40 – Preenchimento do espaçamento existente na alvenaria deformável .....	73
Figura 3.41 – Encaixe dos blocos de concreto celular autoclavado .....	74
Figura 3.42 – Tratamento dos blocos de concreto celular autoclavado .....	75
Figura 3.43 – Perfil metálico funcionando como ponte acústica .....	75
Figura 3.44 – Montagem de divisória para melhoria do desempenho acústico .....	76
Figura 3.45 – Montagem de gesso acartonado com maior desempenho acústico .....	76
Figura 3.46 – Juntas dos painéis de concreto .....	77
Figura 4.1 – Comparativo entre índices de outros países e CB.02:136.01.004 .....	84
Figura 5.1 – Planta câmara de ensaio I (unidades em centímetros).....	93
Figura 5.2 – Corte câmara de ensaio I (unidades em centímetros).....	94
Figura 5.3 – Planta câmara de ensaio II .....	96
Figura 5.4 – Corte AA da câmara de ensaio II .....	97
Figura 5.5 – Resultado de ensaio do bloco de concreto celular autoclavado .....	99
Figura 5.6 – Resultado de ensaio do painel de concreto de 6cm .....	101
Figura 5.7 – Resultado de ensaio do painel sanduíche de chapa zincada+isopor.....	102
Figura 5.8 – Resultado comparativo entre os painéis de vedação estudados.....	103
Figura 5.9 – Resultado da perda por transmissão da vedação constituída de tijolo cerâmico .....	105
Figura 5.10 – Resultado da perda por transmissão da vedação constituída de blocos de concreto celular autoclavado .....	107
Figura 5.11 – Resultado da perda por transmissão da vedação constituída de PVC+EPS+lã de rocha .....	108
Figura 5.12 – Resultado da perda por transmissão do painel de concreto + EPS .....	110
Figura 5.13 – Resultado da perda por transmissão do painel de EPS revestido de	

chapa zincada ..... 111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre a intensidade sonora e os limites da dor e audibilidade...	11
Tabela 2.2 – Níveis de pressão sonora de algumas atividades.....	12
Tabela 2.3 – Transformação da escala física do som para a escala psico-física na ponderação A .....	12
Tabela 2.4 – Valores dos níveis de pressão sonora para as curvas de critério .....	14
Tabela 2.5 – Valores de dB(A) e NC recomendados pela NBR10152.....	14
Tabela 2.6- Relação dos números únicos de isolamento sonoro obtido por procedimentos experimentais. (ISO 717-1, 1996).....	25
Tabela 2.7- Valores que definem a curva de referência do isolamento do ruído aéreo (ISO 7171/1).	27
Tabela 2.8 – Valores da classe de transmissão sonora para alguns elementos construtivos (HARRIS, 1988).....	28
Tabela 2.9 – Freqüências fundamentais dos elementos de vedação analisados .....	32
Tabela 3.1 – Relação entre a espessura do bloco de tijolo cerâmico e o comprimento das juntas de dilatação .....	49
Tabela 3.2 – Tempo de resistência ao fogo das juntas de dilatação em função da largura , da espessura do painel e da profundidade da manta cerâmica (PCI, 1989)..	62
Tabela 3.3 – Relação entre a espessura do painel de concreto e a classe de transmissão sonora (PCI, 1989).....	65
Tabela 3.4 – Dimensionamento das juntas de vedação (SILVA, 2000).....	67
Tabela 4.1 – Diferença ponderada de nível, $D_{N_{tw}}$ de fachadas e paredes internas (Adaptado de CB.02:136.01.004).....	80
Tabela 4.2 – Quadro comparativo entre as recomendações do isolamento acústico dos diferentes países .....	82
Tabela 4.3 – Níveis globais de ruído em dB(A) para o conforto da comunidade segundo a NBR 10151/2000 .....	85
Tabela 4.4 – Proposta de isolamento seguindo os ambientes da CE 02:136.01.004..	86

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1.1 – Cobertura com engradamento metálico .....	3
Foto 3.1 – Painel de plástico reforçado, MVC.....	70
Foto 3.2 – Painel de chapa zincada Perfect House .....	71
Foto 5.1 – Câmara de ensaio I, usada na medição do isolamento sonoro do bloco de concreto celular autoclavado.....	95
Foto 5.2 – Medição da absorção das superfícies internas da câmara de ensaio I .....	95
Foto 5.3 – Câmara de Ensaio II .....	97

## RESUMO

O surgimento de sistemas construtivos residenciais em estruturados em aço de baixo custo, vem acompanhado de uma preocupação em atender a requisitos mínimos de conforto do usuário, além de aspectos relacionados à segurança, sustentabilidade, durabilidade e habitabilidade.

O presente trabalho aborda o conforto acústico proporcionado pelos sistemas construtivos, considerando a análise de componentes de vedação que são propostos nos sistemas construtivos pré-fabricados, uma vez que a redução de massa e a montagem de sistemas leves trazem consigo a preocupação com o isolamento sonoro dos ambientes.

Alguns estudos de casos são apresentados considerando sistemas ensaiados em laboratórios como também sistemas ensaiados *in loco* e apresentados exclusivamente nesta dissertação. Este trabalho apresenta também uma análise dos índices de isolamento sonoro, praticados em outros países, buscando assim recomendações específicas do isolamento das envoltórias dos ambientes da edificação que possam ser aplicadas ao Brasil .

## ABSTRACT

The appearing of residential construction systems in structural with low cost steel comes followed of a preoccupation in attending the minimum requeriments for user comfort, as well as aspects related to security, sustainability, durability and habitability.

The present work approaches acoustic comfort proportioned by constructive systems, considering the analysis of restricted components that are proposed in the construction of pre-manufactured systems, since the reduction of mass and the assembly of light systems bring certainty over sound insulation of the environments.

Some of the case studies consider systems practiced in laboratories, as well as systems practiced in loco, and are presented exclusively in this essay. Furthermore, this work also presents an analysis on indices for sound insulation, practiced in others countries, offering specific recommendations for the insulation for construction that can be applied in Brasil.

# 1

## **Introdução**

A importância de se estudar o conforto acústico em habitações residenciais de baixo custo deve ser considerada pela própria necessidade básica do ser humano, estando esta prevista pela Constituição Federal, como direito a uma habitação, que reúna qualidades mínimas de segurança, saúde, higiene e bem-estar das famílias.

Ao analisar o isolamento sonoro destas habitações, é importante, a priori, conhecer a atual situação da moradia no Brasil como o déficit existente e os programas de incentivo à criação de novas habitações. Em seguida é justificada a necessidade de isolamento sonora das edificações residenciais, tendo em vista os efeitos do ruído nos usuários destas edificações, e expostos os objetivos e justificativas específicas. Por fim é apresentada a estruturação dos capítulos desta dissertação.

### **1.1 – Contextualização.**

De acordo com a Fundação João Pinheiro (FJP,2000) em estudo feito para o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitar (PBQP-H) no ano de 2000, o déficit habitacional brasileiro absoluto passa das 6 (seis) milhões de moradias, o que equivale a

14,8% dos domicílios particulares permanentes. Destes, 65% correspondem à população mais pobre (com renda mensal de até três salários mínimos) na zona urbana e 80% do déficit na zona rural (com renda mensal de até dois salários mínimos). Dentro deste montante estão incluídos não só brasileiros sem moradias, mas também a inadequação dos domicílios por localização em áreas de risco, a falta de infra-estrutura urbana e o adensamento excessivo por unidade habitacional. Estas questões são explicadas por mecanismos sócio-econômicos e culturais, como o crescimento vegetativo, a migração rural, os mercados de trabalho, a distribuição de renda, o desenvolvimento industrial e a importação de tecnologias, entre outros.

Diante deste cenário torna-se clara a necessidade da criação de programas que possam atender as camadas menos favorecidas da população. Tendo em vista esta necessidade, o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitar (PBQP-H) atua, incentivando a criação de sistemas construtivos eficientes e qualificando-os.

O objetivo deste programa é incentivar o desenvolvimento de soluções para a habitação popular, através de sistemas “alternativos” (materiais desenvolvidos a partir da reciclagem, uso de materiais não convencionais), sistemas “inovadores” (formados por elementos pré-fabricados) e programas de mutirão. Acredita-se que a construção pré-fabricada possa atender melhor ao déficit devido à rapidez de execução e ao controle da qualidade adequado do produto.

“A construção voltada para habitação de interesse social obedece a critérios e exigências diferentes dos projetos imobiliários convencionais. Baixo custo e alta produtividade são características indispensáveis para viabilizar um projeto. (...) Recentemente, um novo material vem sendo adotado, no Brasil, como estrutura dessas habitações: o aço.” (TÉCHNE, 2001). A popularização do aço em sistemas construtivos pode ser constatada em residências de baixo custo que adotam superestrutura, sistemas de cobertura (Foto 1.1.), estruturas de esquadrias e portas em estrutura metálica.



FOTO 1.1- Cobertura com engradamento metálico

Além das vantagens proporcionadas pela construção pré-fabricada como a rapidez na montagem, e a qualidade padronizada pela fabricação em larga escala, outras são inerentes à estrutura metálica como: maior espaço útil, já que a estrutura metálica é mais esbelta, precisão milimétrica, adaptabilidade do projeto e a leveza proporcionada à edificação final.

Tendo em vista o déficit habitacional acima citado, a privatização de empresas siderúrgicas estatais e com isso a necessidade de buscar novos mercados, empresas como a Gerdau, a Usiminas e a Cosipa estão produzindo kits metálicos para habitação popular (FIG. 1.1 e FIG. 1.2). Os projetos variam de edificações térreas a edifícios de até sete pavimentos, todos com estruturas principais e cobertura em aço.

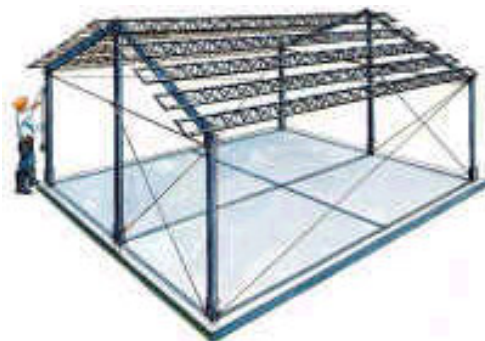


FIGURA 1.1 - Sistema Casa Fácil Gerdau (à esquerda)



FIGURA 1.2 – Sistema Usiteto (à direita)

A utilização de sistemas construtivos em estrutura metálica implica na necessidade de compatibilizar sistemas de vedação com a filosofia de montagem e pré-fabricação estrutural. Baseada nesta necessidade, vários painéis pré-fabricados vêm sendo propostos no mercado da construção civil, sendo alguns baseados em tecnologias de outros países, onde os condicionantes ambientais são diferentes das necessidades brasileiras.

Com o objetivo de garantir o desempenho destes painéis, a Caixa Econômica Federal contratou o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) da Escola Politécnica da USP e estes, juntamente com o Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA), o Sindicato da Indústria e Construção (SINDUSCON) e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) geraram um texto base para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sobre requisitos mínimos a serem atendidos pelos elementos construtivos de edificações habitacionais em até cinco pavimentos (CE-02:136.01). A partir de então a UFMG, a UFOP além dos anteriormente citados participam da discussão do texto base, ainda em fase de elaboração.

Os requisitos mínimos a serem atendidos constam de critérios de segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Os critérios de segurança são: segurança estrutural, segurança contra o fogo e segurança no uso e operação. Critérios de habitabilidade: estanqueidade, conforto higrotérmico, conforto acústico, conforto lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade e conforto tátil. E, por fim, critérios de sustentabilidade: durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental. Como já destacado anteriormente, este trabalho está relacionado com o critério de habitabilidade de conforto acústico.

## **1.2- Objetivos e justificativa.**

De acordo com o projeto de norma da ABNT, CB-02:136.01, a edificação deve “apresentar adequado isolamento acústico dos ambientes e das vedações externas, a fim de proporcionar condições propícias para repouso em dormitórios, atividades

intelectuais, descanso e lazer doméstico em sala de estar e privacidade em qualquer cômodo, no que diz respeito aos ruídos provenientes do exterior da habitação e de outros ambientes no interior da mesma”.

Tendo em vista que o objetivo geral desta dissertação é a análise do conforto acústico de sistemas construtivos residenciais estruturados em aço, e sendo a fachada o elemento vedante do ruído, torna-se importante estudar o isolamento sonoro dos componentes das envoltórias e de todo sistema construtivo desta fachada.

Como objetivos específicos, propõe-se, nesta dissertação, estudar os índices de isolamento sonoro que estão sendo recomendados no Brasil e em outros países e sugerir novos índices de isolamento sonoro de envoltórias e elementos divisórios entre ambientes. Ainda como objetivos específicos, estudam-se neste trabalho, valores de isolamento sonoro de painéis de vedação, bem como equações que descrevam o isolamento das diferentes tipologias de painéis.

A análise do isolamento sonoro dos sistemas construtivos estruturados em aço é baseada, num primeiro momento, nos requisitos mínimos a serem atendidos pelos sistemas construtivos previstos no projeto de norma da ABNT. Em seguida, os critérios de conforto acústico previsto neste projeto de norma serão discutidos e comparados aos índices de isolamento sonoro existentes em outros países, objetivando avaliar e sugerir índices de isolamento sonora que sejam compatíveis com o Brasil. Após a sugestão e avaliação dos índices propostos no projeto de norma é feita a análise do isolamento sonoro dos sistemas construtivos residenciais estruturados em aço.

A avaliação destes sistemas é importante, uma vez que, como dito anteriormente, o isolamento sonoro de um ambiente não depende somente das vedações como portas, paredes e janelas, mas de todo o sistema construtivo, envolvendo as interfaces entre componentes de vedação e a estrutura metálica e os possíveis escapes de som decorrentes destas interfaces. É também objetivo deste trabalho, avaliar o enfraquecimento que a estrutura metálica aparente pode provocar junto ao isolamento sonoro, bem como propor formas de melhorar a isolação global do sistema construtivo.

Em se tratando de componentes de vedação compatíveis com a leveza que a estrutura metálica proporciona e sendo estes componentes igualmente leves, o isolamento sonoro pode ser prejudicado pela falta de massa do sistema de vedação. Tendo em vista esta leveza, tanto da estrutura como da vedação, busca-se, neste trabalho, conhecer os painéis de vedação atualmente utilizados neste sistema e avaliar o isolamento sonoro proporcionado por cada um.

Uma das formas de se avaliar o isolamento sonoro necessário para um sistema de vedação é através do conhecimento dos ruídos externos, seja este proveniente das edificações vizinhas ou do tráfego e do nível de critério de ruído que se deseja atingir no interior das edificações, baseado na NBR 10152 (ABNT, 1987). Com estes dados disponíveis, pode-se determinar o isolamento sonoro requerido que o sistema de fachada deve apresentar para satisfazer às condições mínimas de conforto acústico. É também uma forma de avaliar os índices propostos pelo projeto de norma CB-02:136.01 e indica, também, que o valor do índice de redução sonora do elemento divisório não deve ser analisado isoladamente, mas dentro do contexto esquematizado abaixo:

<b>nível sonoro – nível critério de ruído = diferença de nível requerida</b>
--

Outro método utilizado neste trabalho para avaliar os índices de isolamento é a comparação entre estes e os índices propostos nos outros países, como Estados Unidos, Canadá, Austrália, e alguns países europeus. Entretanto, neste caso, o ruído do entorno é desconsiderado.

O isolamento sonoro dos elementos envoltórios, pode ser determinado experimentalmente, bem como estimados através de expressões analíticas que contemplem a faixa de frequências de 125Hz a 4000Hz. Os procedimentos experimentais são descritos pelas normas ISO 140 partes III e IV. As expressões analíticas apresentadas neste texto foram extraídas da revisão da bibliografia, realizada com o objetivo de identificar equações que descrevessem o comportamento de a transmissão sonora nas frequências de interesse.

### **1.3- Estruturação do texto**

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo o primeiro capítulo introdutório, onde se mostra o panorama geral da questão habitacional brasileira e a importância do estudo do isolamento sonoro, além de expor os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo são tratados conceitos básicos de acústica aplicada a edificações e o estado da arte do isolamento sonoro.

No terceiro capítulo são descritos os sistemas construtivos estruturados em aço, os painéis de vedação tratados no procedimento experimental e analítico, bem como uma análise da existência e tratamento de escapes sonoros ocasionados pelas interfaces entre a estrutura metálica e os painéis de vedação.

No quarto capítulo é analisado o projeto de norma CB-02:136.01, bem como os índices propostos em outros países.

No quinto capítulo é apresentado o isolamento sonoro de cada painel, resultado de procedimentos experimentais e de expressões analíticas, bem como a análise comparativa entre estes resultados.

No sexto e último capítulo são apresentadas algumas conclusões sobre o isolamento sonoro dos painéis analisados e algumas considerações sobre o trabalho.

O Anexo I contém as planilhas de campo resultados dos procedimentos experimentais.

# 2

## **Conceitos básicos de acústica de edificações, isolamento sonoro - revisão bibliográfica.**

“O som é um fenômeno que domina boa parte das nossas vidas, e em forma de palavras, de música, de ruído...é o principal sistema de transmissão de mensagens.

A música supõe a exaltação do som e é usada por todos os povos e culturas com características próprias. Em pleno século XX, aparece também a arte sonora ligada inicialmente aos meios e às tecnologias eletrônicas e logo a instalação e à escultura sonora e visual...”(TECTÔNICA, 1995).

### **2.1- Propriedades do som**

As ondas sonoras se propagam seguindo movimentos de compressão e rarefação que podem ser representados por uma senóide, conforme FIG.2.1.

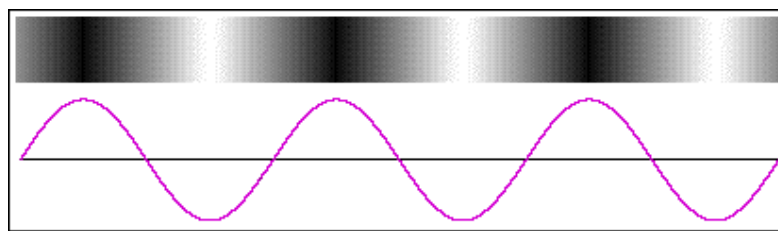


FIGURA 2.1 – Movimento Ondulatório de um tom puro

Na propagação de ondas sonoras não há transferência de matéria, apenas transferência de energia. "Uma boa analogia, é a de uma rolha flutuando em um tanque de água. As ondas da superfície da água se propagam e a rolha apenas sobe e desce, sem ser levada pelas ondas" (GERGES, 2000)

Características intrínsecas a este movimento identificam o tipo de onda. A distância percorrida durante um ciclo, ou distância dada por duas compressões máximas, é denominada comprimento de onda ( $\lambda$ ), que pode ser definido por:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Onde  $f$  é a frequência dada em Hertz (Hz),  $c$  a velocidade do som no ar (344m/s a 25°C e  $1,05 \times 10^5$  Pa) em m/s e  $\lambda$  em metros.

O conhecimento do valor do comprimento de onda é importante uma vez que a isolamento sonora depende também deste fator. Uma barreira sonora por exemplo, deve estar localizada próxima à fonte e possuir dimensões superiores ao comprimento de onda. As propriedades direcionais da fonte sonora também dependem da relação entre as dimensões da fonte e do comprimento de onda. Quanto menor for esta relação, mais direcional será a fonte. Além disso, quando as dimensões da fonte emissora são relativamente menores que as do comprimento de onda, a propagação do som tende a ser esférica e se for uma fonte com dimensões próxima à do comprimento de onda a propagação do som tende a ser linear. Outra característica relacionada ao comprimento de onda pode ser observada quando uma onda sonora se propaga através de orifícios. Se as dimensões do orifício forem inferiores ao comprimento de onda ocorrerá difração da

onda sonora conforme ilustrado na FIG. 2.2.a. Por outro lado, se as dimensões do orifício forem bem maiores que o comprimento de onda não ocorrerá difração (FIG. 2.2.b).

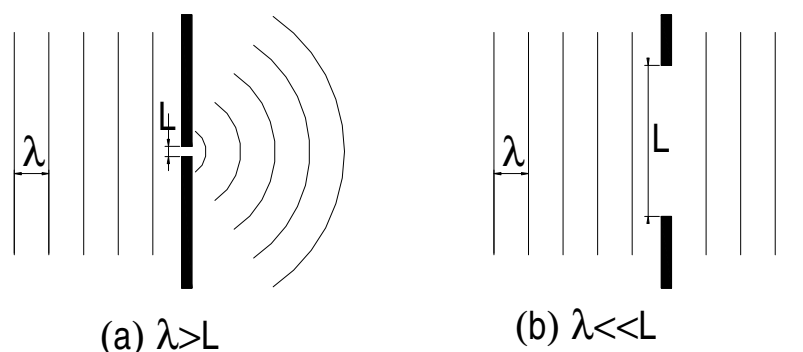


FIGURA 2.2 – Comportamento de uma onda sonora ao passar por um orifício, com dimensão característica L (HARRIS, 1994).

A presença de uma onda sonora altera momentaneamente a pressão local. A pressão atmosférica a uma temperatura de 25° C ao nível do mar é de  $1,05 \times 10^5$  Pa e a pressão sonora ( $P_s$ ) pode ser da ordem de  $1,0 \mu\text{Pa}$  (1 milionésimo de um pascal). A pressão total passa a ser a pressão atmosférica acrescida da pressão sonora, ou seja:

$$P_T = P_{atm} + P_s \text{ sen } 2\pi ft \quad (2.2)$$

Onde  $P_T$  é a pressão sonora total,  $P_{atm}$  a pressão atmosférica,  $P_s$  a pressão sonora,  $f$  é a frequência da onda e  $t$  o tempo. Uma pequena variação da pressão sonora (aproximadamente 10Pa) é suficiente para produzir níveis sonoros desconfortáveis em ambientes residenciais.

Outras características importantes no estudo da propagação sonora são a potência e a intensidade sonoras, as quais estão diretamente relacionadas com a percepção do som. *Potência sonora* é a taxa de emissão de energia acústica de uma fonte sonora, expressa em Watts (W) e depende apenas da fonte que emite o som. O grito de uma pessoa, por exemplo, pode emitir uma potência sonora de 1/1000 W. A *intensidade sonora* é diretamente proporcional à potência e inversamente proporcional à área de propagação.

Para o caso de propagação esférica em campo livre, a intensidade sonora pode ser expressa por:

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \tag{2.3}$$

Onde **I** é a intensidade sonora dada em Watts/m<sup>2</sup>, **W** a potência sonora (watt) e **d**, a distância entre a fonte e o receptor (em metros). Alguns valores de referência de intensidade sonora são apresentados na TAB. 2.1 a seguir.

TABELA 2.1- Relação entre a intensidade sonora e os limites de dor e audibilidade. (HARRIS, 1994)

INTENSIDADE (W/m <sup>2</sup> )	PERCEPÇÃO
1	Limite de dor
10 <sup>-12</sup>	Limite de audibilidade

Ainda com relação à percepção do som cabe ressaltar que a intensidade sonora está vinculada ao volume sonoro, podendo ser fraco ou forte, enquanto que a altura do som está relacionada com a frequência sonora, variando em grave e agudo. Os termos alto e baixo significam sons agudos e graves, respectivamente.

## 2.2- Níveis sonoros

O intervalo de valores de pressão sonora de interesse no estudo da acústica de edificações, relacionados à sensibilidade do ouvido humano, vai de 2x10<sup>-5</sup> a 1Pa. Considerando que este intervalo é bastante amplo, é conveniente utilizar a escala logarítmica ao invés da escala linear, para representar o *nível de pressão sonora* ou NPS, medidos em decibels e definidos conforme a Eq. 2.4 a seguir:

$$NPS = 10\log\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 = 20\log\left(\frac{P}{P_0}\right) \tag{Eq. 2.4}$$

Onde **P** é a pressão sonora e **P<sub>0</sub>** é a pressão de referência, 2x10<sup>-5</sup>Pa. A TAB. 2.2 a seguir apresenta alguns valores de níveis de pressão sonora por atividade:

TABELA 2.2- Níveis de pressão sonora de algumas atividades (EGAN, 1988).

<b>FONTE</b>	<b>NPS (dB(A))</b>
Sussurro	20
Residência silenciosa	30
Estéreo baixo em Residência	40
Faixa da fala	50-70
Rua de tráfego médio, escritório barulhento	60-70
Rádio caseiro ligado alto, orquestra sinfônica ligada num fortíssimo	70-80
Lanchonete	80
Rua muito barulhenta, buzina de automóvel próximo	80-90
Martelo pneumático	90
Passagem de metrô subterrâneo	90-110
Barulho alto no meio da multidão	100
Motocicleta acelerando	100
Grande hidrelétrica (junto às máquinas), trovão muito forte, motor de avião próximo (3 a 10m)	110-120
Show de rock	120
Limiar da dor	130

### 2.2.1- Níveis Sonoros Ponderados

O ouvido humano possui sensibilidades diferentes ao som de acordo com a frequência. Para interpretar fisicamente esta diferença, o comportamento do ouvido humano é modelado, padronizado e classificado como A, B, C e D. Entre estes o mais usado é a ponderação A, que, de acordo com GERGES(2000), aproxima curvas de igual audibilidade para baixos níveis de pressão sonora. Os níveis antes expressos em dB serão expressos em dB(A) se a classe de ponderação for a A. A transformação de dB em dB(A) é feita através de uma correção diferenciada por terça de oitava, conforme descrito na TAB 2.3 a seguir (GERGES, 2000).

TABELA 2.3- Transformação da escala física do som para a escala psicofísica na ponderação A

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Ponderação "A"(dB)</b>
25	-44,7
<b>31,5</b>	<b>-39,4</b>
40	-34,6
50	-30,2
<b>63</b>	<b>-26,2</b>
80	-22,5
100	-19,1
<b>125</b>	<b>-16,1</b>

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Ponderação "A"(dB)</b>
160	-13,4
200	-10,9
<b>250</b>	<b>-8,6</b>
315	-6,6
400	-4,8
<b>500</b>	<b>-3,2</b>
630	-1,9
800	-0,8
<b>1000</b>	<b>0,0</b>
1250	+0,6
1600	+1,0
<b>2000</b>	<b>+1,2</b>
2500	+1,3
3150	+1,2
<b>4000</b>	<b>+1,0</b>
5000	+0,5
6300	-0,1
<b>8000</b>	<b>-1,1</b>
10000	-2,5

### **2.2.2- Fundamentos do Controle do Ruído**

Para se determinar a necessidade ou não de redução de ruído no interior das edificações, faz-se necessário o estabelecimento de valores de referência. O atendimento a estes valores garante ao ambiente um isolamento sonoro adequado para a atividade o qual está destinado. Este valor de referência citado é denominado ruído de fundo e representa o nível de pressão sonora existente no ambiente excluindo todas as fontes sonoras dentro do mesmo. A NBR 10152 (ABNT, 1987) adota como referência para o ruído de fundo as curvas NC (*noise criteria*) e os valores de nível de pressão sonora global. As curvas de avaliação NC são conjuntos de níveis de pressão sonora dados por banda de oitava que são comparados aos níveis de pressão sonora do ambiente. A designação numérica das curvas NC é a média aritmética do nível de pressão sonora nas frequências de 1000, 2000 e 4000Hz – frequências importantes no entendimento da fala. Os valores referentes a cada curva NC estão indicados na TAB. 2.4 a seguir (GERGES, 2000).

TABELA 2.4 – Valores dos níveis de pressão sonora para as curvas de critério.

Curva	NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (dB)					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
NC-65	75	71	68	66	64	63
NC-60	71	67	63	61	59	58
NC-55	67	62	58	56	54	53
NC-50	64	58	54	51	49	48
NC-45	60	54	49	46	44	43
NC-40	56	50	45	41	39	38
NC-35	52	45	40	36	34	33
NC-30	48	41	35	31	29	28
NC-25	44	37	31	27	24	22
NC-20	40	33	26	22	19	17
NC-15	36	29	22	17	14	12

Os valores recomendados para o ruído de fundo de ambientes estão na NBR 10152 e são apresentados na TAB. 2.5 a seguir (ABNT, 1987).

TABELA 2.5- Valores de dB(A) e NC recomendados pela NBR 10152 para cada ambiente.

Locais	dB(A)	NC
<b>Hospitais</b>		
Apartamentos, enfermarias, berçários, centros cirúrgicos, laboratórios, áreas para uso público	35-45 40-50	30-40 35-45
<b>Serviços</b>		
<b>Escolas</b>		
Bibliotecas, salas de música, salas de desenho	35-45	30-40
Salas de aula, laboratórios	40-50	35-45
Circulação	45-55	40-50
<b>Hotéis</b>		
Apartamentos	35-45	30-40
Restaurantes, salas de estar	40-50	35-45
Portaria, recepção, circulação	45-55	40-50
<b>Residências</b>		
Dormitórios	35-45	30-40
Salas de estar	40-50	35-45
<b>Auditórios</b>		
Salas de concerto, teatro	30-40	25-30
Salas de conferência, cinema e de uso múltiplo	35-45	30-35
<b>Restaurantes</b>		
<b>Escritórios</b>		
Salas de reunião	30-40	25-35
Salas de gerência, projetos e administração	35-45	30-40
Salas de computadores	45-65	40-60
Salas de mecanografia	50-60	45-55
<b>Igrejas e templos (cultos meditativos)</b>		
<b>Locais para esporte</b>		
Pavilhões fechados para espetáculos e atividades esportivas	45-60	40-55

Definido os níveis sonoros que se deseja alcançar é necessário identificar a forma de transmissão sonora, que pode ser por meio aéreo ou estrutural, e a forma de atenuar o ruído.

A transmissão aérea ocorre em ambientes abertos, passando por aberturas como janelas, portas, sistemas de ventilação ou através de elementos divisórios. Já transmissão do ruído estrutural representa a transmissão da energia mecânica oriunda da vibração sendo direcionada pela estrutura do edifício. A fonte sonora é um impacto ou a vibração do meio que gerou o ruído. O ruído pode ser gerado pela rede hidráulica, pela estrutura da edificação.

A base para o controle do ruído estrutural é preferencialmente através de intervenção na estrutura ou na fonte, por meio de sistemas de amortecimento.

Em edificações residenciais o ruído aéreo é normalmente atenuado ao longo do caminho, o que deve ser feito preferencialmente no planejamento do edifício. Para isso recomenda-se:

- Grandes afastamentos entre a fonte sonora (por exemplo, o ruído de tráfego) e a edificação.
- Orientar as posições mais adequadas, de forma que o som sempre reflita para áreas que não perturbem os ambientes do edifício (FIG.2.3).
- Usar o terreno natural, cortes no terreno ou barreiras artificiais para impedir que o ruído chegue ao edifício.
- Localizar ambientes internos que requerem um nível de ruído mais baixo, longe de ambientes com alto nível de ruído.
- Vedar os encontros das aberturas com o interior do edifício para evitar que o ruído possa passar pelos flancos.
- Etc...

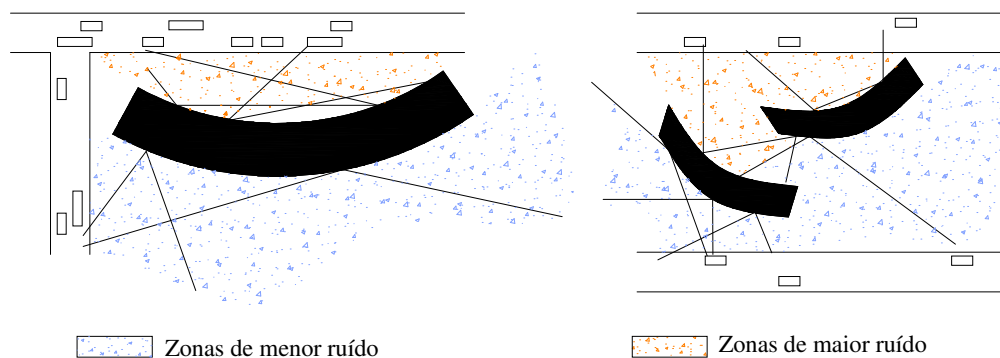


FIGURA 2.3 – Formas de implantação que afetam o desempenho acústico do edifício.

### 2.3- Absorção Sonora

Os problemas referentes ao ruído em ambientes fechados estão relacionados com a capacidade de isolamento sonora das vedações, que controla o ruído de fundo, e com a capacidade dos materiais aplicados no interior da edificação em absorver o ruído interno, para controlar o ruído proveniente da reverberação no local.

A característica de absorção sonora é inerente a todos os materiais, o que ocorre em graus variados. A absorção sonora de cada material é determinada através de seu coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) que representa a capacidade do material em absorver a energia sonora.

A absorção sonora total de um recinto é definida através da seguinte expressão (HARRIS, 1994):

$$A = \sum S_i \alpha_i \tag{Eq. 2.6}$$

Onde;  $A$  representa a absorção total medida em sabines métricos,  $S_i$  é a área de cada um dos materiais existentes no ambiente em metros e  $\alpha_i$  o coeficiente de absorção de cada um destes materiais.

A absorção sonora atua diretamente no campo reverberante de um ambiente, pois quanto maior a absorção total da sala, menor a energia sonora de um campo

reverberante. A redução de ruído em um ambiente, após um tratamento acústico por absorção, é quantificada pela seguinte expressão (HARRIS, 1994):

$$NR = 10 \log \frac{A_2}{A_1} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Onde, NR representa a de redução do ruído em dB,  $A_2$ , o total de absorção da sala depois do tratamento acústico e  $A_1$  o total de absorção da sala antes do tratamento acústico, em sabines métricos. Se, através de tratamento por absorção, a absorção sonora total do ambiente passar de 700 a 2100 sabines métricos, por exemplo, a redução do ruído será de aproximadamente 5dB.

## **2.4- Isolamento Sonoro**

A questão do isolamento sonoro é um dos itens principais no controle do ruído em edificações residenciais. A física do controle do ruído “aéreo” vem sendo extensivamente estudada com relação aos elementos divisórios da edificação, já que existe um esforço em se desenvolver painéis econômicos e leves e que não atendem à clássica teoriado isolamento sonoro, a Lei da Massa. Aplica-se às paredes de maciças e de espessuras consideráveis, enquanto que os painéis que vêm sendo apresentados no mercado se constituem de materiais porosos ou compostos de múltiplas e diferentes camadas. Nos últimos anos vários autores vêm apresentando expressões que buscam representar a transmissão do som para estas novas composições de painéis. Nos itens a seguir são apresentadas expressões que contemplam o isolamento sonoro em elementos maciços, de paredes duplas e ao final deste capítulo, uma breve revisão bibliográfica acerca dos estudos recentes sobre o isolamento do ruído aéreo.

### **2.4.1- Painéis maciços.**

A isolamento sonora está relacionada à capacidade que um elemento divisório - parede ou piso, por exemplo - possui de atenuar o ruído que passa de um ambiente ao outro ou do exterior para o interior da edificação.

O mecanismo básico de transmissão sonora (ignorando efeitos de escapes de som) consiste na vibração do elemento divisório entre o ambiente fonte e o ambiente receptor. As ondas sonoras do ambiente fonte provocam vibração na parede divisória e, através dos elementos constituintes desta parede, é transmitida ao ambiente receptor, como forma de ruído aéreo. No caso de superfícies rigidamente conectadas, ou seja, painéis maciços, a transmissão sonora está relacionada à densidade superficial, à frequência, rigidez e ao amortecimento intrínseco do material de separação dos ambientes. Pode-se observar na FIG. 2.4 a seguir que a transmissão sonora é proporcional à espessura dos painéis e à densidade superficial dos mesmos.

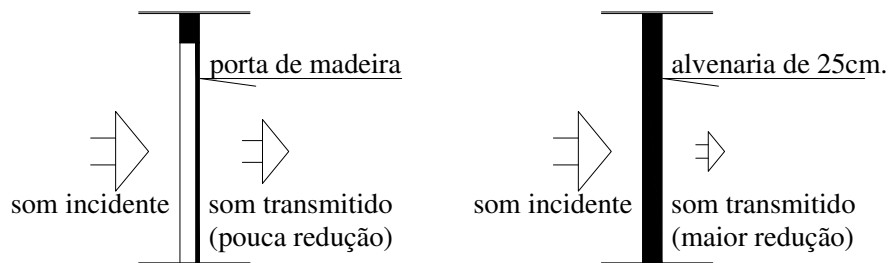


FIGURA 2.4- Influência da massa global do sistema

A energia que uma onda sonora perde ao atravessar um elemento construtivo pode ser quantificada pela *Perda por Transmissão* (PT) e é medida em decibels. A taxa de energia retida ao atravessar um sólido é denominada coeficiente de transmissividade, definida pela Eq. 2.8 a seguir (HARRIS, 1994). Assim como o coeficiente de absorção, valores de  $\tau=1$  significam que 100% da energia sonora foi transmitida.

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Se o elemento for acusticamente transparente, ele possuirá perda por transmissão de 0dB e, quanto maior o isolamento sonoro, maior será a perda por transmissão. A relação entre a perda por transmissão e as frequências está representada graficamente na FIG. 2.5 a seguir.

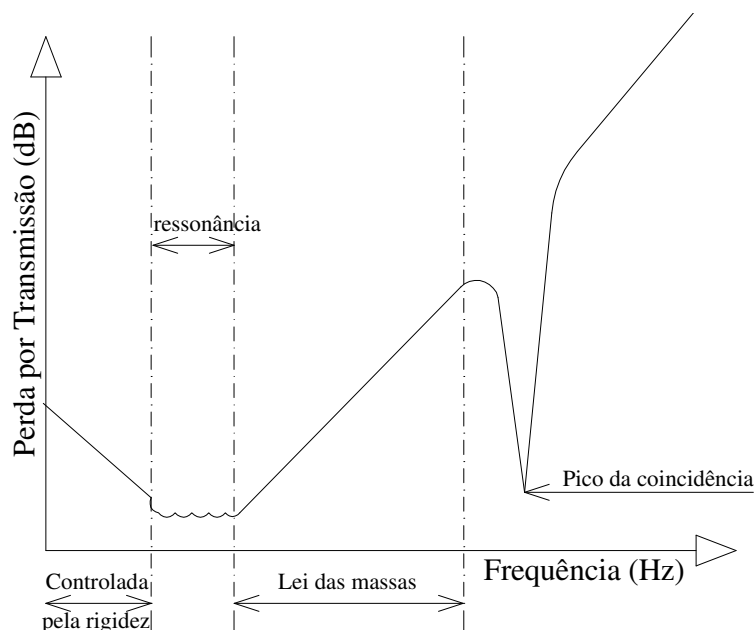


FIGURA 2.5- Comportamento típico de isolamento sonora de materiais maciços

Fonte: Adaptada de Paixão *apud* Mendéz

Para materiais homogêneos como o vidro, madeira ou concreto, a perda por transmissão cresce aproximadamente 6 dB cada vez que se dobra o valor da densidade superficial, conforme identificado na FIG. 2.5 como Lei das Massas. De forma simplificada a Lei das Massas é expressa por (KINSLER, 1982):

$$PT = 20 \log(mf) - 47,5 \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde **m** é a densidade superficial em  $\text{kg/m}^2$  e **f** a frequência (Hz).

De acordo com a lei das massas, a perda por transmissão pode ser a mesma para materiais com mesma densidade superficial. Na verdade existem outros fatores que influenciam a perda por transmissão como rigidez, ressonância e o efeito da coincidência. Para um mesmo material existem faixas de frequências nas quais a perda por transmissão será controlada pela rigidez do material e em outras faixas em que a perda por transmissão é controlada pela massa.

Nas baixas frequências, o isolamento é controlado pela rigidez total do sistema, conforme indicado pela FIG. 2.5. Nestes casos o efeito da onda sonora é como o de uma membrana e o mecanismo de atenuação sonora do material é o amortecimento da onda.

Logo acima da região controlada pela rigidez encontram-se as frequências de ressonância. Nesta região estão localizadas as frequências naturais de vibração da vedação, onde a transmissão sonora é facilitada.

Outro fator que influencia a perda por transmissão é o efeito de coincidência. A transmissão do som no ar ocorre, exclusivamente por meio de ondas longitudinais, enquanto que no sólido, como madeira, concreto, as ondas mecânicas também se propagam por flexão. Quando a projeção do comprimento de onda incidente (onda plana) é igual ao comprimento de onda livre à flexão, ao longo da parede, e a velocidade de propagação da onda incidente se iguala à velocidade de propagação da onda de flexão, ocorre o efeito de coincidência (FIG. 2.6). A frequência em que ocorre este fenômeno é denominada frequência crítica e surge um eficiente mecanismo de transferência de energia entre o ar, a superfície sólida e o ar do outro lado da superfície. Desta forma o isolamento da parede é reduzido, resultando em uma queda na curva da perda por transmissão. Neste contexto, é interessante utilizar-se componentes no sistema de vedação que tenham uma frequência crítica muito elevada ou muito baixa, situada fora da faixa de audição da fala, por exemplo.

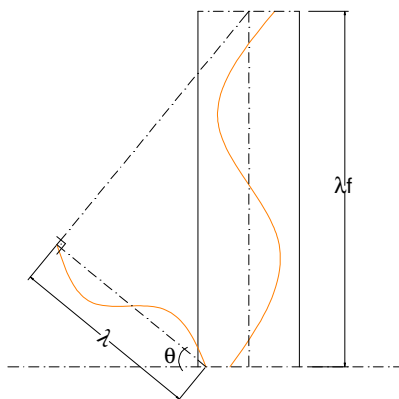


FIGURA 2.6- Efeito da coincidência (GERGES, 2000)

De acordo com KINSLER (1982), para se obter frequência de coincidência em baixas frequências é necessário que a divisória seja espessa e possua baixa densidade superficial. Da mesma forma, para se obter um valor elevado desta frequência, basta que a divisória possua pouca espessura, alta densidade superficial. A frequência de crítica é dada pela seguinte expressão (KINSLER, 1982):

$$f_c = \sqrt{\frac{3c^2}{\pi e} \sqrt{\frac{m}{\gamma}}}$$

Eq. 2.10

Onde **c** é a velocidade do som no ar, em m/s, **e** a espessura do material, em metros, **m** a densidade superficial, em kg/m<sup>2</sup> e **γ** o coeficiente de Poisson.

#### 2.4.2- Paredes duplas

A utilização de painéis duplos espaçados com ar vai de encontro com as soluções que visam reduzir peso no sistema construtivo como um todo. É uma solução viável quando não é possível utilizar elementos divisórios de grandes espessuras. Entretanto existe uma complexidade da transmissão do som onde o isolamento sonoro depende da densidade superficial dos componentes, da profundidade da camada de ar, das conexões mecânicas entre as vedações e da quantidade de material absorvente existente no ambiente.

Esta complexidade de transmissão do som em paredes duplas depende da ressonância, ocorrida pelo efeito da vibração dos dois painéis, da camada de ar, e da frequência crítica dos painéis compositivos. É possível observar, a partir da FIG. 2.8, a variação da perda por transmissão em paredes duplas, em função dos efeitos da ressonância e da coincidência (SALLES, 2001, *apud* SANCHO&SENCHERMES, 1982).

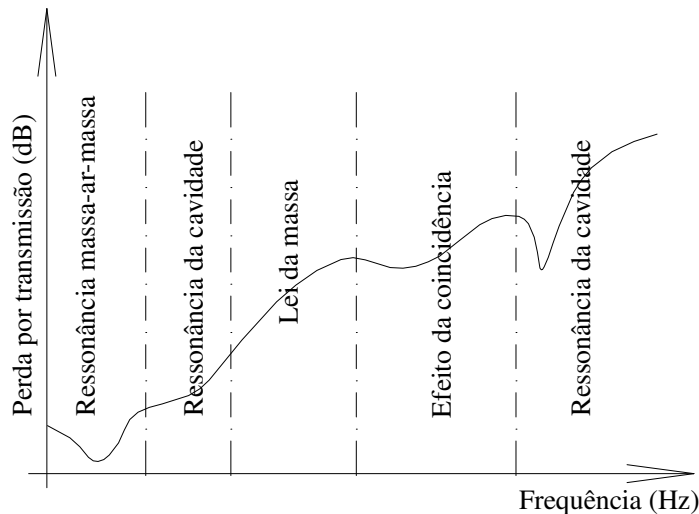


FIGURA 2.7- Variação da perda por transmissão em paredes duplas. (SALLES, 2001, *apud* SANCHO&SENCHERMES, 1982)

Conforme pode-se observar a FIG. 2.7, se a frequência do som incidente for igual à de ressonância, o ar funciona como uma mola e a transmissão do som é facilitada, conforme está indicada na região ‘ressonância massa-ar-massa’ da figura. Se a frequência do som incidente estiver entre a frequência de ressonância e a frequência crítica do sistema, a perda por transmissão sonora será resultado da Lei das Massas e corresponde à perda por transmissão de uma parede maciça com densidade superficial igual à soma das densidades de cada uma das placas. Na região da coincidência ocorre, assim como em paredes maciças, uma queda na perda por transmissão. Acima da frequência crítica, a perda por transmissão do sistema é igual à soma aritmética da perda por transmissão de cada um dos painéis acrescentada de 6 dB.

As quedas na perda por transmissão devido ao efeito da ressonância e da coincidência podem ser atenuadas. A adição de material absorvente na camada de ar diminui os efeitos da frequência de ressonância e, para reduzir o efeito de coincidência, devem-se selecionar materiais que possuam frequências críticas diferentes.

Entretanto, ao adicionar materiais absorventes no interior da cavidade entre painéis deve-se observar se a estrutura deste painel não está funcionando como ‘ponte sonora’. Isto ocorre quando o material absorvente é inserido entre os montantes e estes se tornam

facilitadores da transmissão do som (FIG. 2.7). É importante selecionar elementos de ligação das divisórias com pouca rigidez e, quando possível, montar os perfis de forma desencontrada, conforme ilustrado na FIG. 2.9.

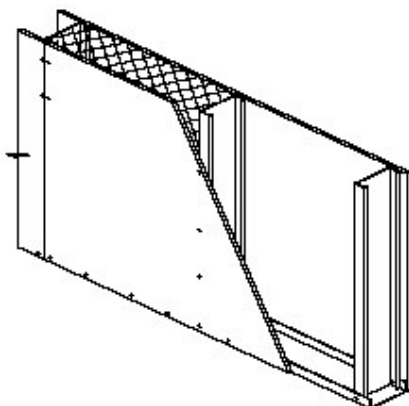


FIGURA 2.8 – Montagem do material absorvente entre montantes (ELHAJJ, 2002).

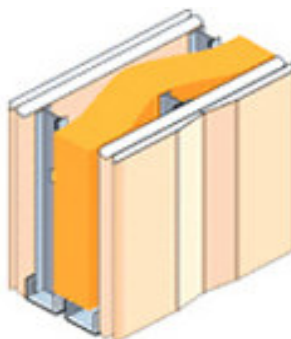


FIGURA 2.9- Relação da montagem com o isolamento (KNAUF, 2000)

No capítulo 5 deste trabalho serão apresentadas expressões analíticas para o cálculo da perda por transmissão para paredes duplas.

#### 2.4.3- Transmissão pelos *flancos*

No trabalho de isolamento sonoro deve-se atentar para espaços de saída facilitada de som ou flancos. Um orifício, ou uma fresta por onde o som possa escapar, pode invalidar todo trabalho de isolamento sonoro do elemento construtivo. Portas e janelas,

por exemplo, são pontos críticos no escape do som, reduzindo drasticamente a perda por transmissão das envoltórias da edificação.

Uma abertura de 0,01% da superfície da parede pode reduzir a perda por transmissão de 50 para 39dB. Quanto mais alta for a PT, maior preocupação deve-se ter nos casos de escape do som. A FIG. 2.10 a seguir, relaciona a classe de transmissão sonora e a área de escape.

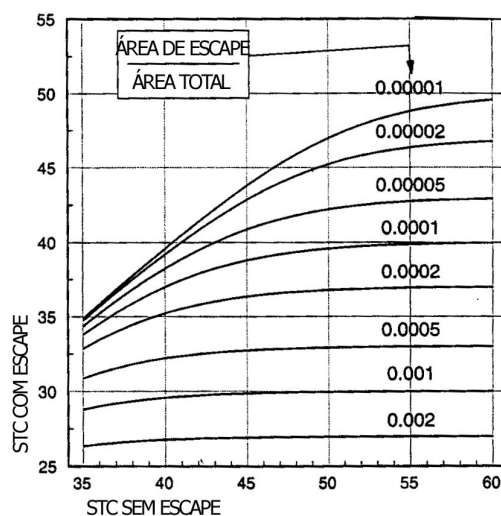


FIGURA 2.10- Área de escape e a redução do isolamento (HARRIS, 1994).

#### 2.4.4- Redução do ruído (NR) entre os ambientes

A diferença de níveis sonoros entre ambientes não é descrita apenas pela perda por transmissão do elemento divisório. Fatores como a área da parede, o volume do ambiente receptor e a absorção interna, descritos abaixo, contribuem para a diferença de redução do ruído ou *noise reduction* (NR) entre os dois ambientes (HARRIS, 1994).

- Área da parede que transmite o som (**S**) – a área da parede é importante porque ela será a fonte sonora do ambiente receptor.
- Absorção do ambiente receptor (**A<sub>2</sub>**), dada em sabines métricos – o nível de pressão sonora do ambiente receptor é alterado pela alta absorção ( $A_2 = \alpha_2 S_2$ ).
- Perda por transmissão da barreira comum – o **PT**.

$$NR = L_1 - L_2 \quad \text{Eq. 2.11}$$

$$NR = PT - 10 \log \frac{A_2}{S} \quad \text{Eq. 2.12}$$

#### 2.4.5- Curvas STC e R<sub>w</sub>

É possível, através do procedimento descrito pela norma ASTM E 413 e pela norma ISO 717/1, obter um número único de referência para o isolamento sonoro, baseado em resultados de perda por transmissão obtida em ensaios experimentais, previstos nas normas ISO 140-3, ISO 140-4, ISO 140-5, 140-9. Pela ASTM E 413 obtém-se a Classe de Transmissão Sonora ou Sound Transmission Class (CTS ou STC) e através da ISO 717/1, o Índice de Redução Sonora Ponderado (R<sub>w</sub>, R'\_{45,w}). O STC é utilizado nos Estados Unidos enquanto que os demais países utilizam o R<sub>w</sub>. Para o índice de isolamento global R<sub>w</sub> as frequências analisadas variam de 125 a 4000Hz enquanto que na classe de transmissão sonora STC o intervalo de frequências vai de 100 a 3150Hz.. Além do R<sub>w</sub>, a ISO 717-1 define também os termos Diferença Normalizada de Nível (D<sub>n</sub>) e a Diferença Padronizada de Nível (D<sub>Nt</sub>, D<sub>tr,2m,nT</sub>). O TAB. 2.6, a seguir define os procedimentos de ensaios que definem cada uma destes índices:

TABELA 2.6- Relação dos números únicos de isolamento sonoro obtido por procedimentos experimentais. (ISO 717-1, 1996).

Índice	Símbolo	Norma definidora
Índice de redução sonora ponderado	R'	ISO 140-4
Índice de redução sonora ponderado	R <sub>45</sub>	ISO 140-5
Diferença normalizada de nível	D <sub>n</sub>	ISO 140-4
Diferença padronizada de nível	D <sub>Nt</sub>	ISO 140-4

Os resultados da perda por transmissão, obtidos nos ensaios definidos acima, são plotados em um gráfico relacionando perda por transmissão e frequência por terça de oitava, como na FIG.2.10 a seguir:

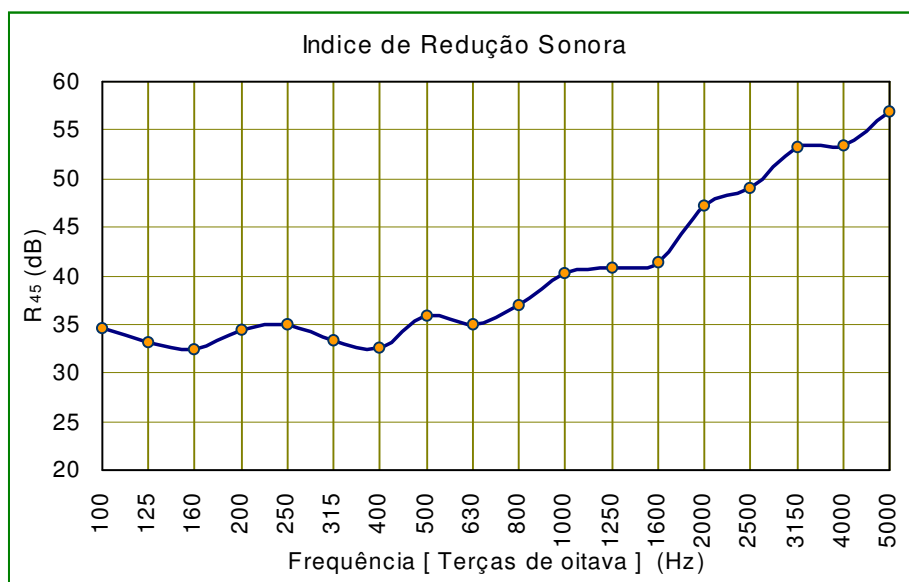


FIGURA 2.11 - Perda por transmissão para o bloco de concreto celular autoclavado.

Através de valores determinados pela ISO 717/1 (TAB. 2.7) é definida uma curva de referência (FIG. 2.12) a ser ajustada junto ao espectro de isolamento sonoro obtido no ensaio.

TABELA 2.7- Valores que definem a curva de referência do isolamento do ruído aéreo (ISO 717/1).

Frequência (Hz)	Valores de referência, dB	
	Um terço de banda de oitava	Banda de oitava
100	33	36
125	36	
160	39	
200	42	45
250	45	
315	48	
400	51	52
500	52	
630	53	
800	54	55
1000	55	
1250	56	
1600	56	56
2000	56	
2500	56	
3150	56	

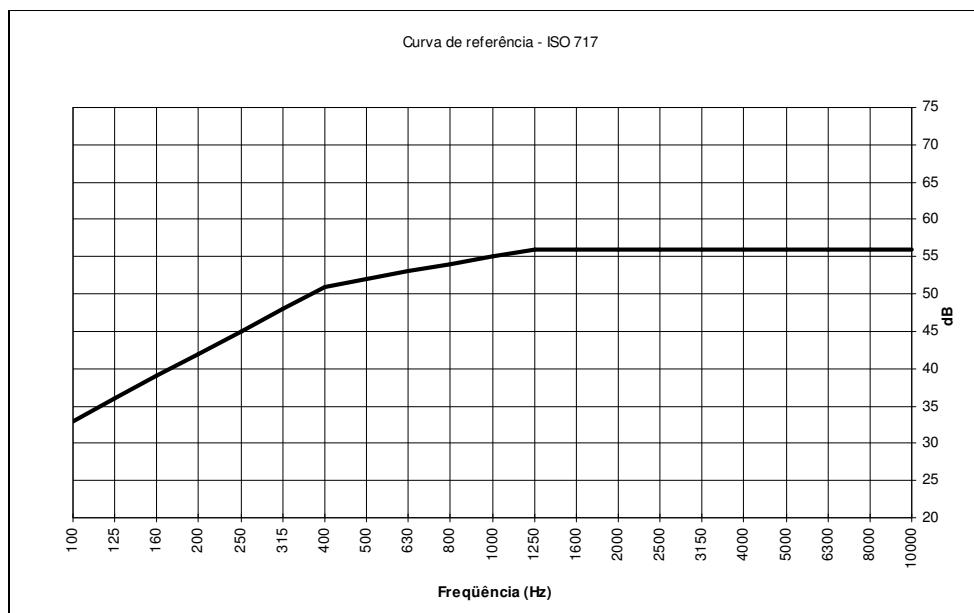


FIGURA 2.12 - Curva de referência -ISO 717/1.

Os dois gráficos são sobrepostos de forma que a diferença entre os valores em cada terça de oitava seja menor ou igual a 8dB e que a soma de todos os valores do espectro de isolamento sonoro, que estão abaixo da curva de referência, seja menor ou igual a 32dB. Quando é conseguido este ajuste, verifica-se o valor da perda por transmissão a 500Hz na curva de referência, sendo este o valor do  $R_w$  ou CTS.

O índice de isolamento global ou a classe de isolamento sonora servem de referência para os profissionais especificarem e detalharem divisórias de acordo com o isolamento requerido. Entretanto, este número não dispensa a análise do espectro sonoro pois um mesmo elemento construtivo pode apresentar um bom isolamento em uma faixa de freqüências e em outras o isolamento ser inferior ao requerido.

A TABELA 2.8 a seguir fornece alguns valores de STC obtidos na bibliografia para os elementos divisórios mais utilizados:

TABELA 2.8 - Valores da classe de transmissão sonora para alguns elementos construtivos (HARRIS, 1988)

<b>TIPOLOGIA CONSTRUTIVA</b>	<b>STC</b>
Concreto, 8cm	47
15cm de concreto+1,5cm de gesso	53
Alvenaria de blocos de concreto, 40cm+1,5cm de gesso	63
Alvenaria de tijolos cerâmicos furado, 25cm	40
Alvenaria de tijolos cerâmicos maciços, 20cm	50
Alvenaria de tijolos cerâmicos maciços, 10cm	45
Parede de concreto celular 12,5cm de espessura	42
Compensado de madeira, 20mm	30
Parede de gesso acartonado, painéis de 12mm de espessura, camada interna de ar de 5cm e lâ de vidro de 5cm	44
Duas placas de madeira de 3cm espaçadas de 4cm	23

Tendo em vista a complexidade dos painéis que vêm sendo utilizados nas edificações, apresenta-se, a seguir, um estado da arte sobre o isolamento sonoro dos elementos divisórios constituídos de camadas múltiplas e também de painéis maciços.

#### 2.5.6- Estado da arte do isolamento sonoro de painéis para edificações

A previsão do isolamento sonoro através de expressões analíticas vem sendo amplamente estudada em busca de resultados que traduzam a transmissão do som pelos painéis e que se aproximem aos experimentais. Dentre estas expressões, a Lei da Massa é a mais conhecida. Entretanto, conforme já esclarecido ao longo deste capítulo, não atende todas as frequências de interesse e se aplica somente a modelos de painéis maciços. Além disso, o surgimento de painéis de vedação compostos de diferentes materiais traz consigo a necessidade de se estabelecer algumas expressões que possam corresponder à perda por transmissão dos elementos divisórios. Em busca destas expressões foi feita uma revisão bibliográfica abrangendo o período de 1960 até os dias de hoje, a qual é apresentada a seguir.

Dentre os trabalhos revisados destacam-se os publicados por: OSIPOV (1997), SEWELL (1970) e LJUNDREN (1991) que abordam a transmissão sonora em paredes maciças, sejam em faixas de frequências específicas ou em dimensões de painéis específicos, por PRICE (1970) e CRAIK (1996, 2000) que apresentam propostas

analíticas para painéis duplos e por DYM (1974, 1975) e MOORE (1991) que trazem um estudo sobre a transmissão sonora em painéis sanduíches.

O estudo realizado por OSIPOV (1997) trata da transmissão do som aéreo de paredes simples, planas e retangulares em baixas frequências (20 a 250Hz) e utiliza para o desenvolvimento de expressões analíticas três modelos teóricos distintos: modelo de placa infinita, modelo de placa sem apoios em três bordos e modelos de ambiente-placa-ambiente.

O modelo da placa infinita utiliza a expressão clássica da perda por transmissão (Lei da Massa). O modelo de placa livre nos três bordos considera a diferença entre as pressões sonoras dos dois lados da placa e é utilizada na equação da onda a flexão. O coeficiente de transmissividade é então calculado como uma taxa de potência acústica irradiada no ambiente receptor. Já no modelo ambiente-placa-ambiente um acoplamento total entre os modos de flexão da placa e os modos de emissão sonora no ambiente receptor é considerado. Para tal é analisada apenas a geometria retangular. Este modelo permite estudar a influência entre diferentes parâmetros (dimensões do ambiente, tempo de reverberação, posições do microfone), o que não é possível no modelo da placa livre em três bordos e por isso apresentou melhores resultados no trabalho de OSIPOV, quando comparados a resultados experimentais.

SEWELL (1970) também aborda o isolamento sonoro nas baixas frequências e propõe, a partir daí, uma expressão para a perda por transmissão que considera o termo “fator de forma” ou seja, inclui também a geometria do painel, considerando o painel como placa finita, e dessa forma a ressonância do painel. Para isso, baseia-se em considerações teóricas da transmissão forçada do som por um elemento divisorio, obtendo uma boa relação entre as expressões analíticas e procedimentos experimentais.

O trabalho de LJUNDREN (1991) trata do isolamento do ruído aéreo em paredes de pouca espessura, maciças e homogêneas. Em seu estudo são apresentadas soluções analíticas aproximadas para a transmissão do ruído aéreo entre dois ambientes, que são baseadas na teoria de placas de Euler-Bernoulli para transmissão forçada e para o campo

ressonante. Considera, assim, a relação entre a área dos dois ambientes. O seu estudo abrange frequências consideradas baixas e altas, destacando-se a resposta da transmissão forçada na região da coincidência. O resultado deste trabalho são equações expressas para o coeficiente de transmissividade baseadas nas respostas das placas à incidência sonora em termos da velocidade de propagação na placa.

MULHOLLAND e PRICE (1968) estudam a transmissão sonora em painéis de camadas múltiplas com campo de incidência difuso. São utilizados três diferentes modelos teóricos para o estudo de painéis de camadas múltiplas: o método de raios ou de múltipla-reflexão de MULHOLLAND e PARBROOK (1967), o método de onda progressiva, descrito por LONDON (1950) e o método de BERANEK e WORK (1949) da transferência de impedâncias. O método dos raios investiga a influência da camada de ar entre os painéis, considerando estes painéis mais espessos. O método de LONDON envolve equações de variáveis  $2N$  considerando  $N$  o número de interfaces entre os meios. O método de transferência de impedâncias considera a incidência normal sendo este o mais facilmente aplicável. Baseando-se nestes três métodos os autores utilizam da transferência de impedâncias para determinar o coeficiente de transmissividade para incidência aleatória.

O trabalho de CRAIK (1996 e 2000) é representativo ao abordar a transmissão de painéis duplos. Para avaliar a influência e resultado geral da transmissão sonora, CRAIK utiliza a “análise estatística de energia” que depende da frequência em questão e da forma de conexão entre painéis. Em seus estudos são considerados caminhos distintos na transmissão sonora por painéis duplos. Um meio seria painel-camada de ar-painel e outro seria através também das conexões. Em baixas frequências o sistema pode ser considerado como um sistema único, enquanto que em altas frequências deve ser considerado como subsistemas interconectados. Os resultados mostram que a “Análise Estatística de Energia” é uma das teorias mais apropriadas para o estudo de painéis duplos estruturados internamente por montantes, sejam estes metálicos ou de madeira. Percebe-se no seu trabalho que a quantidade de conexões entre as placas afeta a transmissão sonora, bem como o tempo de reverberação da cavidade e a perda por transmissão de cada placa.

DYM (1974) analisa painéis sanduíches constituídos de duas camadas externas rígidas e núcleo flexível. Em um primeiro instante o aborda a vibração livre ocorrida no painel e em seguida analisa a transmissão do som por meio das impedâncias características dos meios e a interface entre estes. São apresentadas equações que definem a perda por transmissão em função das impedâncias características dos painéis e os resultados desta perda por transmissão são comparados a resultados experimentais. Confirma-se nesta comparação o pico da coincidência para o modo de propagação simétrico. Além disso, os resultados analíticos indicam que a coincidência simétrica ocorre anterior à coincidência antissimétrica.

Assim como no trabalho de DYM, MOORE (1991) aborda a transmissão sonora em painéis sanduíches, constituídos de placas externas finas e face do núcleo flexível. Os modelos utilizados para a análise são painéis de constituição isotrópica e ortotrópica. É importante neste trabalho o estudo dos modos de propagação simétrico e antissimétricos dos painéis e a ocorrência do pico de coincidência em cada um destes modos de propagação. De acordo com MOORE, na propagação simétrica ocorre a deformação do núcleo, enquanto que na propagação antissimétrica envolve a deformação por flexão sem deformação na seção do núcleo. No modo de propagação simétrico, o pico da coincidência ocorre próximo da frequência massa mola massa de painéis duplos. As tensões ocorridas por estes modos de propagação são identificadas como tensões normais e tensões de cisalhamento e são úteis na definição da impedância do sistema. Este é relacionado com as tensões e as deformações através de uma matriz de impedância, cujos termos também são utilizados para encontrar a transmissão do som neste tipo de painel.

Dos trabalhos analisados serão explicitadas expressões para paredes simples, descritas nos trabalhos de GERGES (2000) e CALLISTER (1999), considerando a influência do fenômeno na coincidência. Em seguida, são apresentadas expressões para paredes duplas com uma camada interna de ar, descritas nos trabalhos de GERGES (2000) e FAHY (1998), vantajosas com relação à parede simples, já que com menos massa resulta em melhor desempenho para o isolamento sonoro. Também, se encontram no

mercado, elementos divisórios constituídos de painéis triplos, ditos painéis sanduíches. As equações utilizadas para prever a perda por transmissão destes painéis são extraídas do trabalho de MOORE (1991).

### 2.5.7- Perda por transmissão em painéis simples.

Considerando a faixa de frequências da análise experimental é importante identificar as frequências fundamentais de vibração dos painéis de vedação para determinar o modelo do elemento divisório considerado nas expressões. Estas frequências, para materiais homogêneos e isotrópicos, constituídos de uma camada única, podem ser obtidas da expressão das frequências naturais de flexão de placas, simplesmente apoiadas, dadas por CRAIG (1981).

$$f_{\phi} = \frac{\pi E^{1/2} h}{2\rho^{1/2} [12(1-\nu^2)]^{1/2}} \left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 2.13}$$

Onde **E** representa o módulo de Young, em N/m<sup>2</sup>, **h** a espessura do painel em metros, **ρ** a densidade do material em kg/m<sup>3</sup>, **ν** o coeficiente de Poisson, **a** e **b** as dimensões do painel em metros, e **m** e **n**, números inteiros, positivos maiores que zero. Seguem, na TAB. 2.9, as frequências fundamentais das vedações constituídas de paredes simples analisadas neste trabalho.

TABELA 2.9 – Frequências fundamentais dos elementos de vedação analisados

Elemento	Dimensões (cm)	f <sub>φ</sub>
Tijolo cerâmico – esp. 12cm	275x370x12, 5	50,88Hz
Bloco de concreto celular autoclavado – esp 12,5cm	275x370x12	89,62Hz

Como as frequências fundamentais do tijolo cerâmico e do bloco de concreto celular autoclavado se situam abaixo de 125Hz, que é o limite inferior do intervalo analisado neste trabalho, considerar-se-á a teoria de placas infinitas, desconsiderando a região das

ressonâncias. Utiliza-se, portanto o modelo de placa fina, de extensão infinita e isotrópica.

A definição de perda por transmissão é expressa pela EQ. 2.14, onde o coeficiente de transmissão ou transmissividade ( $\tau$ ) é a razão entre a potência sonora transmitida e a potência sonora incidente.

$$PT = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right) \quad \text{Eq. 2.14}$$

A primeira expressão utilizada para analisar os painéis maciços (EQ. 2.15) é apresentada nos textos de KINSLER (1982), FAHY (1998) e GERGES (2000). Esta expressão é referida como Lei da Massa. Expressões específicas são utilizadas para representar os fenômenos da coincidência e da ressonância. Entretanto, as expressões relativas à região da ressonância não serão utilizadas, visto que o modelo considerado são placas infinitas. A segunda expressão utilizada é proposta por CALLISTER (1999), onde são adaptadas equações propostas por SEWELL (1970), SHARP (1978) e CREMER (1942). No trabalho desenvolvido por CALLISTER foram estudadas equações para a perda por transmissão em vidros automotivos e procura-se, no presente trabalho, avaliar a possibilidade de uso das expressões utilizadas por CALLISTER para os painéis de vedação estudados neste trabalho. A comparação entre as equações propostas por SEWELL, SHARP e CREMER e resultados experimentais apontam as faixas de frequências em que estas proposições se adequaram melhor.

Entre a região de ressonância e a frequência crítica, o elemento de vedação deve atender a Lei das Massas, descrita pela EQ. 2.15, onde os parâmetros utilizados são: a frequência ( $f$ ) em hertz, densidade superficial ( $m$ ) em  $\text{kg/m}^2$ , densidade do ar ( $\rho_0$ ) em  $\text{kg/m}^3$  e a velocidade do som no ar ( $c_0$ ) em  $\text{m/s}$ .

$$PT = 10 \log \left( \frac{mf\pi}{\rho_0 c_0} \right)^2 \quad \text{Eq. 2.15}$$

De acordo com LJUNGGREN (1991), abaixo da frequência de coincidência o número de onda incidente  $\mathbf{k}$  é menor que o número de onda de flexão no painel ( $\mathbf{k}_f$ ) (EQ. 2.16). Existe a predominância de ondas forçadas. À medida que aumenta a frequência o número de onda incidente se aproxima do número de onda de flexão do painel. Quando a velocidade do som no meio incidente (ar) se iguala com a velocidade de propagação no painel – frequência crítica – a predominância passa a ser de ondas livres e existem, a partir daí, um ângulo de coincidência para cada frequência. A equação (EQ. 2.17) que descreve a perda por transmissão na frequência crítica é dependente do ângulo da coincidência. (GERGES, 2000).

$$k_f^4 = \frac{f^2 m}{2\pi D} \quad \text{Eq. 2.16}$$

$$PT = 10 \log \left( 1 + \frac{mf\eta}{4\pi\rho c \sec \phi} \right)^2 \quad \text{Eq. 2.17}$$

Onde  $\mathbf{m}$  é a densidade superficial do elemento,  $\mathbf{f}$  o valor da frequência de coincidência,  $\eta$  o valor do amortecimento do material. Acima da frequência crítica GERGES (2000), recomenda a seguinte equação:

$$PT = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{Dk_f^4 \cos^4 \phi \sin \phi}{4\pi c \rho f} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 2.18}$$

Onde  $\mathbf{D}$  é a rigidez da placa à flexão em Nm, que é calculada pela EQ.2.19,  $\mathbf{k}_f$ , o número de onda de flexão livre, adimensional, obtido pela expressão 2.16, e  $\phi$  o ângulo da coincidência em radianos. O ângulo de coincidência é determinante na perda por transmissão. À medida que o ângulo se aproxima de  $90^\circ$  a perda por transmissão aumenta.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Eq. 2.19}$$

**E** representa o módulo de elasticidade do material em kg/m<sup>2</sup>, **h**, a espessura do painel em metros e **v** o coeficiente de Poisson.

CALLISTER (1999), analisou equações utilizadas por CREMER (1942), SHARP (1978) e SEWELL (1970), identificando os intervalos de frequência que melhor se adaptam.

Em frequências abaixo da metade da frequência de coincidência, SEWELL (1970) descreve uma expressão que, segundo CALLISTER, se aproxima mais dos resultados experimentais que a Lei das Massas (EQ. 2.20). Para o modelo de SEWELL é considerada a transmissão forçada, onde  $k_f > k$  (o número de onda de flexão do painel é maior que o da onda incidente).

$$PT = -10 \log \left\{ \frac{\left[ \ln(k\sqrt{A}) + 0,16 - U(\Lambda) + 1/(4\pi A k_0^2) \right]}{\left( (m\pi)/\rho_0 c_0 \right) (1 - f^2/f_c^2)} \right\} \quad \text{Eq. 2.20}$$

**A** é a área da superfície da placa em m<sup>2</sup>, **U(Λ)** é um fator de correção de forma, utilizado quando as placas não forem quadradas. Este termo pode ser calculado pela EQ. 2.21. É interessante observar que a equação proposta por SEWELL considera as dimensões e a geometria do painel, o que não é contemplado nas outras expressões aqui apresentadas.

$$U(\Lambda) = -0,0000311\Lambda^5 + 0,000941\Lambda^4 - 0,0107\Lambda^3 + 0,0526\Lambda^2 - 0,0407\Lambda - 0,0534 \quad \text{Eq. 2.21}$$

Entre a metade da frequência crítica e esta frequência, utiliza-se a interpolação linear entre a lei das massas e a equação proposta por CREMER, para campo difuso (EQ.2.22). Este modelo é proposto para frequências acima da frequência crítica.

$$PT = 20 \log \left( \frac{\mu \pi f}{\rho_0 c_0} \right) + 10 \log \left( \frac{2\eta f}{f_c} \right) + 10 \log \eta - 2 \quad \text{Eq. 2.22}$$

Assim, será apresentado, a seguir, o resultado da perda por transmissão dos painéis que serão descritos no próximo capítulo, bem como a análise comparativa deste resultado com os resultados experimentais apresentados no Capítulo 5. Para isso é necessário identificar o tipo de campo de sonoro no painel. De acordo com FAHY (1998), abaixo da frequência crítica, as expressões apresentadas para a perda por transmissão para a incidência oblíqua devem ser ajustadas conforme a expressão a seguir.

$$PT_{(\phi)} = PT + 20\log(\cos\phi) \quad \text{Eq. 2.23}$$

Onde  $\phi$  é o ângulo de incidência, que deve ser diferente de  $90^\circ$ . A partir da relação da EQ. 2.23, observa-se que as equações apresentadas por GERGES e CALLISTER foram desenvolvidas considerando a incidência normal ( $0^\circ$ ).

Quando o campo sonoro é formado pela reflexão das ondas sonora por várias superfícies, o campo se aproxima do difuso e as ondas se propagam em todas as direções em probabilidades iguais. Para este caso a perda por transmissão é descrita pela EQ. 2.24.

$$PT_d = PT - 10\log(0,23PT) \quad \text{Eq. 2.24}$$

Entretanto, a partir de resultados comparativos já realizados e apresentados na literatura definiu-se o tipo de incidência de campo que é descrito pela EQ.2.25.

$$PT_d = PT - 5 \quad \text{Eq. 2.25}$$

Para a comparação dos resultados será utilizada a EQ. 2.25, que identifica a incidência de campo.

#### 2.5.8- Perda por transmissão em paredes duplas

Em painéis duplos a forma construtiva ou a montagem dos painéis constantemente deixa flancos que diminuem sua capacidade isolante. Além disso as tramas estruturais devem

ser consideradas no isolamento, já que são meios diferenciados de transmissão do som (FIG. 2.13). Na previsão analítica devem existir formas de expressar estas ligações. CRAIK (2000) realizou um estudo sobre a perda por transmissão em paredes duplas compostas por materiais leves, onde aponta a importância de observar as ligações existentes entre as placas constituintes e a variação da perda por transmissão. Assim como as paredes simples o modelo varia em faixas de frequências. Nas baixas frequências o painel pode ser modelado como um subsistema simples, enquanto que nas altas frequências deve subdividir em vários subsistemas interconectados.

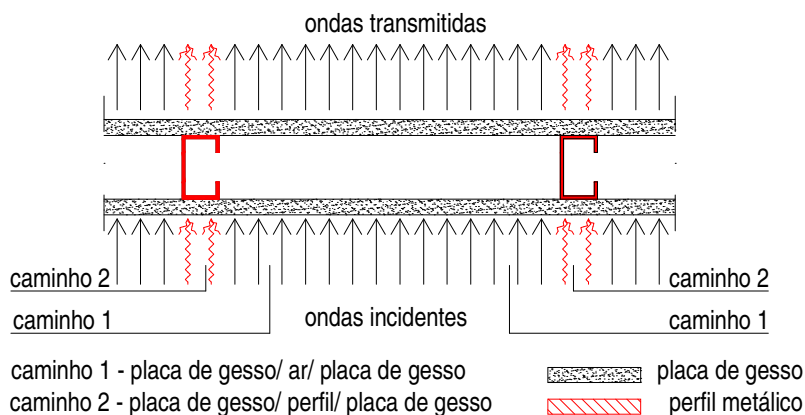


FIGURA 2.13 – Meios de propagação do som em painéis duplos.

A camada interna de ar entre duas placas finas gera uma ressonância massa-ar-massa que enfraquece o isolamento sendo este menor que o correspondente à soma do isolamento de cada placa. Esta frequência pode ser conhecida pela EQ. 2.26.

$$f_{mam} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{d} \left( \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)} \quad \text{Eq. 2.26}$$

As equações utilizadas para painéis duplos são apresentadas por GERGES (2000), e são diferenciadas por faixas de frequência.

- ♣ Para  $f > c/2\pi d$

$$PT = PT_1 + PT_2 + 6,0 \quad \text{Eq. 2.27}$$

♣ Para  $f_{\text{mam}} < f < c/2\pi d$

$$PT = PT_1 + PT_2 + 20 \log 2kd \quad \text{Eq. 2.28}$$

Onde **d** é a distância entre os painéis, **k** é número de onda.

♣ Para  $\rho c/\pi(m_1+m_2) \ll f \leq f_{\text{mam}}$

$$PT = 20 \log(m_1 + m_2) f - 47,4 \quad \text{Eq. 2.29}$$

Entretanto estes cálculos desconsideram as ligações existentes entre os dois painéis. A análise numérica das diversas ligações existentes é possível através da Análise Estatística de Energia (SEA) apresentada por PRICE e CROCKER (1970) e aprofundada no trabalho de CRAIK e SMITH (2000).

#### 2.5.9 – Perda por transmissão em painéis sanduíches

De acordo com MOORE (1991) para o estudo de painéis sanduíches, devem ser observadas a espessura das camadas externas do painel e a ortotropia ou isotropia dos materiais componentes.

A propagação das ondas nestes painéis pode ocorrer na forma simétrica e antissimétrica. Se as placas das faces forem idênticas e o material do miolo isotrópico, então os modos simétricos e antissimétricos de propagação são desacoplados.

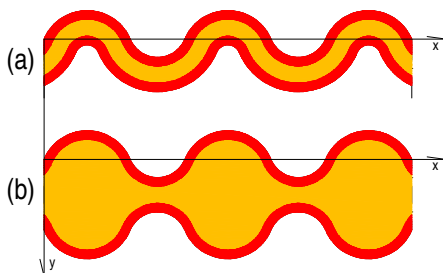


FIGURA 2.14 – (a) propagação antissimétrica; (b) propagação simétrica

Estas formas de propagação provocam surgimento de tensões de flexão, tensões normais de deformação do plano nas placas das faces e tensões de cisalhamento, devido à interface das camadas externas e o miolo do painel. No núcleo do painel ocorrerá dilatação, compressão e cisalhamento. Devido a estas condições, as velocidades das ondas mecânicas são dilatacionais e de cisalhamento no material podem ser expressas por (MOORE, 1991):

$$c_d = \frac{\omega}{k_d} = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \tag{Eq. 2.30}$$

$$c_s = \frac{\omega}{k_s} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{Eq. 2.31}$$

Onde  $c_d$  e  $c_s$  são velocidades de propagação dilatacional e de cisalhamento respectivamente em m/s;  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes de Lamé em  $N/m^2$ ,  $\rho$  a densidade da camada interna em  $kg/m^3$  e  $k_d$  e  $k_s$  são os números adimensionais de onda dilatacional e de cisalhamento.

As tensões existentes na camada interna do painel sanduíche estão relacionadas aos deslocamentos por uma de matriz de impedância 4x4, cujos valores também determinam a o coeficiente de transmissão do painel sanduíche. O coeficiente de transmissividade dos painéis sanduíche é expresso por (MOORE, 1991):

$$\tau = \left[ \frac{\left( \frac{\rho_0 c_0}{\cos \theta} \right) (Z_s - Z_a)}{\left( Z_s + \frac{\rho_\theta c_\theta}{\cos \theta} \right) \left( Z_a + \frac{\rho_0 c_0}{\cos \theta} \right)} \right]^2 \quad \text{Eq. 2.32}$$

Onde  $Z_s$  é a impedância do modo de propagação simétrico do painel e  $Z_a$  a impedância do modo de propagação antissimétrico. Em um caso particular de orientação da onda incidente no plano do painel e de igualdade entre a velocidade de propagação da onda incidente e a velocidade de propagação da onda no painel, a impedância do modo de propagação antissimétrico ( $Z_a$ ) pode ser nula, sendo a equação da transmissividade apresentada por (MOORE, 1991):

$$\tau = \left[ \frac{(Z_s)}{\left( Z_s + \frac{\rho_\theta c_\theta}{\cos \theta} \right)} \right]^2 \quad \text{Eq. 2.33}$$

No caso em que a impedância do modo de propagação simétrico for bem maior que a parcela relativa à impedância característica e ao cosseno do ângulo de incidência ( $\rho_0 c_0 / \cos \phi$ ), o coeficiente de transmissão sonora se aproxima da unidade. Entende-se portanto que nesta frequência houve uma transmissão total e o painel atingiu a coincidência.

Os valores das impedâncias dos modos de propagação antissimétricos e simétricos são descritos em função dos termos da matriz de impedância,  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$ ,  $Z_{13}$ ,  $Z_{14}$ ,  $Z_{33}$  e  $Z_{34}$ , e dos termos  $R_a$  e  $R_s$ , que representam taxas de deslocamentos das direções ‘x’ e ‘z’, para os modos simétricos e antissimétricos respectivamente. Estas relações são descritas nas EQs. 2.34 e 2.35.

$$Z_s = D \left( \frac{k^4}{-i\omega} \right) - i\rho\omega + Z_{11} + Z_{12} + \left( \frac{ikt}{2} \right) (Z_{13} - Z_{14}) + R_s (Z_{13} - Z_{14}) \quad \text{Eq. 2.34}$$

$$Z_a = D \left( \frac{k^4}{-i\omega} \right) - i\rho\omega + Z_{11} - Z_{12} + \left( \frac{ikt}{2} \right) (Z_{13} + Z_{14}) + R_a (Z_{13} + Z_{14}) \quad \text{Eq. 2.35}$$

Onde  $\mathbf{D}$  é a rigidez das placas da face à flexão,  $\mathbf{k}$  o número de onda de incidência e  $\mathbf{t}$  a espessura da camada externa do painel. Os termos da matriz de impedância e a relação entre os deslocamentos verticais e horizontais simétricos e antissimétricos são descritos em função dos números de onda transversal, obtidos através da relação entre os números de onda dilatacional e de cisalhamento e o número de onda de incidência livre:

$$k^2 + k_{zd}^2 = k_d^2 \quad \text{Eq. 2.36}$$

$$k^2 + k_{zs}^2 = k_s^2 \quad \text{Eq. 2.37}$$

Os termos da matriz de impedância e a expressão correspondente a  $\Delta$ , utilizada para o cálculo dos termos da impedância podem ser obtidos através das EQ. 2.38 a 2.44:

$$Z_{11} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} \left[ (k^2 k_{zs} \cos(k_{zs}L) \text{sen}(k_{zd}L)) + k_{zs}^2 k_{zd} \text{sen}(k_{zs}L) \cos(k_{zd}L) \right] \quad \text{Eq. 2.38}$$

$$Z_{12} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} \left[ (k_{zs}^2 k_{zd} \cos(k_{zs}L)) + k^2 k_{zs} \text{sen}(k_{zd}L) \right] \quad \text{Eq. 2.39}$$

$$Z_{33} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} \left[ (k_{zd}^2 k_{zs} \cos(k_{zs}L) \text{sen}(k_{zd}L)) + k^2 k_{zd} \text{sen}(k_{zs}L) \cos(k_{zd}L) \right] \quad \text{Eq. 2.40}$$

$$Z_{34} = \frac{i\rho\omega}{\Delta} \left[ (k_{zd} k^2 \text{sen}(k_{zs}L)) + k_{zd}^2 k_{zs} \text{sen}(k_{zd}L) \right] \quad \text{Eq. 2.41}$$

$$Z_{13} = \frac{k}{\omega\Delta} \left[ (k_{zs} k_{zd} (4\mu k^2 - \rho\omega^2) (1 - \cos(k_{zd}L) \cos(k_{zs}L)) + \right. \\ \left. + \text{sen}(k_{zd}L) \text{sen}(k_{zs}L) (2\mu(k^4 + k_{zd}^2 k_{zs}^2) - \rho\omega^2 k^2) \right] \quad \text{Eq. 2.42}$$

$$Z_{14} = \frac{\rho\omega k k_{zd} k_{zs}}{\Delta} [\cos(k_{zd}L) - \cos(k_{zs}L)] \quad \text{Eq. 2.43}$$

$$\Delta = 2k^2 k_{zd} k_{zs} [1 - \cos(k_{zd}L) \cos(k_{zs}L)] + (k^4 + k_{zd}^2 k_{zs}^2) \text{sen}(k_{zd}L) \text{sen}(k_{zs}L) \quad \text{Eq. 2.44}$$

Onde  $\mathbf{L}$  é a espessura do material do núcleo do painel,  $\mathbf{k}_{zd}$  e  $\mathbf{k}_{zs}$ , os números de onda transversais obtidos nas EQs. 2.36 e 2.37. Ainda para o cálculo das impedâncias é

necessário conhecer as relações do deslocamento vertical e horizontal  $u/w$  nos modos simétricos e antissimétricos de propagação, descritas na EQs. 2.45 e 2.46.

$$\frac{u_s}{w_s} = R_s = \frac{(Z_{13} - Z_{14} - \frac{ikt}{2}(Z_{33} - Z_{34}))}{E_{11}^{fs} t \frac{k^2}{-i\omega} - i\rho\omega + Z_{33} - Z_{34}} \quad \text{Eq. 2.45}$$

$$\frac{u_a}{w_a} = R_a = \frac{(Z_{13} + Z_{14} - \frac{ikt}{2}(Z_{33} + Z_{34}))}{E_{11}^{fs} t \frac{k^2}{-i\omega} - i\rho\omega + Z_{33} + Z_{34}} \quad \text{Eq. 2.46}$$

Onde  $E_{11}^{fs}$  é o módulo de elasticidade aparente da placa da face correspondente a  $E/(1-\nu^2)$ .

A aplicação das expressões analíticas apresentadas neste capítulo aos painéis estudados considera algumas simplificações, já que o objetivo principal deste trabalho não é avaliar e se aprofundar nas expressões para os diferentes tipos de painéis divisórios. Assim, não foram considerados os elementos estruturantes dos painéis, como tramas de madeira e os possíveis flancos existentes na montagem dos sistemas, o que acarretaria em uma análise mais aprofundada seguindo outras formulações e estudos, como a Análise Estatística de Energia já citada neste capítulo.

O estudo de painéis sanduíches, pela revisão bibliográfica feita neste trabalho, não apresenta o grau de desenvolvimento dos painéis duplos e simples. Para estes, expressões analíticas foram amplamente estudadas e comparadas a resultados de ensaios. No caso dos painéis sanduíches, o mecanismo de transmissão do som é mais complexo e, tendo em vista que o seu uso como sistema de vedação é mais recente, existem poucos trabalhos que apresentam resultados experimentais comparados aos analíticos. No capítulo 5 deste trabalho será avaliada a aplicação das expressões analíticas para o cálculo da perda por transmissão dos mesmos.

No capítulo a seguir é feita uma apresentação geral dos sistemas construtivos estruturados em aço e dos painéis cujo isolamento sonoro será avaliado no capítulo 5. A análise das interfaces entre os painéis e a estrutura metálica está abordada de forma qualitativa no próximo capítulo e é de suma importância, tendo em vista que o posicionamento e tratamento da estrutura metálica podem provocar flancos.

# 3

## **Sistemas Construtivos em Estrutura Metálica**

### **3.1 Contextualização**

A necessidade de modernização, da redução do prazo e do desperdício na obra e ainda, o apelo do setor da construção civil em acompanhar a industrialização, já ocorrida em outros setores da economia, são alguns dos fatores que favorecem o uso de sistemas construtivos industrializados nas edificações. Diferente do que se pensa, a tendência da industrialização da habitação surgiu nas décadas de 60 e 70, com as casas móveis americanas e só recentemente chega a ser discutida no Brasil.

De acordo com COELHO (2003), os sistemas construtivos, térreos ou de múltiplos andares podem ser reticulados com tapamento externo em painéis e interno em divisórias leves, ou sistemas compostos por uma trama (estrutura de perfis leves, por exemplo), com fechamento fixado a esta estrutura. Neste caso, pode-se adotar o sistema ‘Light Steel Framing’ comumente utilizado nos Estados Unidos. Este se encontra em fase de desenvolvimento e aplicação no Brasil e utiliza os perfis formados a frio de aço zincado (FIG. 3.1).



FIGURA 3.1- Sistema construtivo Steel Framing

Além dos acima citados, os sistemas construtivos industrializados se apresentam também como módulos – e esta é a maior evolução destes sistemas – onde partes da edificação já vêm prontas, sendo apenas deslocada e instalada na localização prevista em projeto. No Brasil já é possível encontrar módulos de instalações sanitárias (FIG. 3.2), mas o objetivo da construção industrializada é que se consiga instalar cada parte da edificação na obra, sem que nenhuma atividade, além da montagem, seja executada no canteiro, ou até mesmo a montagem seja feita em fábrica e transportada para a obra.



FIGURA 3.2- Módulo pronto em GRC (*Glassfibre Reinforced Cement*)

O uso de sistemas construtivos totalmente industrializados para habitações de interesse social ainda não é viável economicamente. Exemplos destes sistemas construtivos, contendo a estrutura metálica, painéis de vedação pré-fabricados e módulos de banheiros, encontram-se apenas em edificações de padrão elevado, onde o custo não é fator determinante no processo.

Apesar de serem utilizados predominantemente em edificações de custo elevado, observa-se um esforço em viabilizar o uso de sistemas industrializados para minimizar o déficit habitacional, principalmente com sistemas estruturados em aço.

O uso da estrutura metálica em habitações populares pode ser visto juntamente com sistema de vedações convencional. Os sistemas construtivos metálicos constituídos de perfis formados a frio (PFF) podem atender bem às exigências da habitação popular. Possuem uma grande variedade de seções transversais (FIG. 3.4), que podem ser obtidas por equipamentos simples: em dobradeiras ou por conformação contínua de roletes (perfiladeiras). Além disso, são formados por chapas finas, de espessuras a partir de 0,43 mm, que resulta em um sistema estrutural leve, e portanto mais viável economicamente. Os vão vencidos pelos perfis formados a frio são menores e atendem à arquitetura das habitações populares. No Sistema Usiteto, da Usiminas, o perfil utilizado para os pilares é o cartola, representado na FIG.3.3 i, que melhor se adapta aos encaixes das alvenarias.

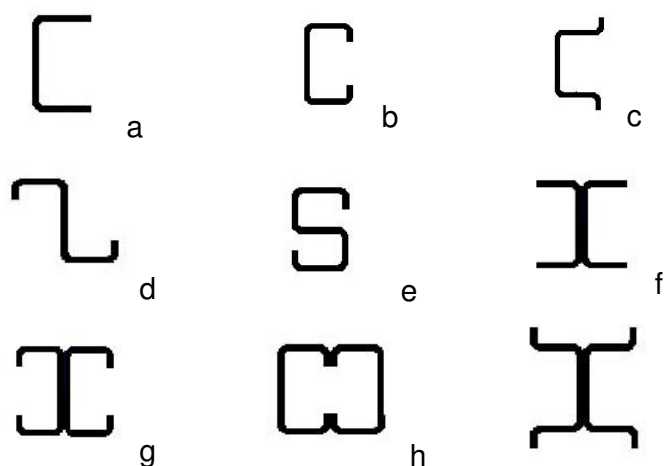


FIGURA 3.3- Seções dos perfis formados a frio

Juntamente com o sistema estrutural, devem ser tratadas as patologias existentes provenientes da interface dos sistemas de vedações e a estrutura metálica. O encontro dos painéis de vedação, sejam estes convencionais ou painéis pré-fabricados, exige uma série de detalhes que devem ser seguidos para evitar patologias. Além disso, o bom desempenho do sistema – isolamento termo-acústico, estanqueidade – dependem da interação existente entre os elementos construtivos, tanto estruturas como vedações.

O objetivo deste capítulo é descrever alguns tipos de vedações e contemplar sua utilização junto à estrutura metálica. As vedações aqui descritas serão posteriormente avaliadas de acordo com isolamento do ruído aéreo proporcionado. A escolha dos painéis a serem estudados deve-se à frequência de utilização na construção civil e ao grau de inovação que possam representar. A alvenaria convencional em tijolo cerâmico furado também será descrita neste capítulo já que o desempenho acústico dos painéis industrializados será comparado ao que é utilizado mais comumente na construção civil, porém com enfoque na interação com a estrutura metálica. Esta interação ainda representa um detalhe importante na construção em estrutura metálica e alvenarias, além de afetar no desempenho dos sistemas de vedação, pode reduzir o isolamento sonoro conforme visto no capítulo anterior, ao tratar de pontos de escape de som. Descreve-se a seguir vedações em alvenaria, seguidas do concreto celular autoclavado, painel de concreto, painéis de gesso acartonado, e outros painéis em PVC e chapa zincada. Nos capítulos 4 e 5, estes painéis de vedação serão analisados sob o ponto de vista do isolamento sonoro.

### **3.2 Vedações em alvenaria**

Denomina-se alvenaria um conjunto de elementos (blocos) que formam uma superfície quer de separação, recebimento de cargas ou de isolamento entre ambientes. Os componentes das alvenarias podem ser: bloco cerâmico vazado (tijolo furado), bloco de concreto, bloco de gesso, tijolo cerâmico maciço, bloco de concreto celular autoclavado ou tijolo de solo-cimento, citando apenas algumas opções existentes no mercado.

As alvenarias podem ser classificadas quanto à função: alvenarias que suportam cargas ou auto-portantes, alvenarias de vedação que servem apenas como elemento divisório, divisórias com bordo livre (muros e platibandas) e alvenarias especiais (acústica, térmica, resistentes a impactos). A alvenaria a ser estudada neste trabalho é a que possui função de vedação, já que o enfoque deste trabalho são edificações estruturadas em aço.



FIGURA 3.4 – Alvenaria de blocos cerâmicos e estrutura metálica

Divergências entre o uso da estrutura de aço e alvenaria estão baseadas na diferença de dilatação e deformação dos materiais. Existem recomendações técnicas que podem ser adotadas para projetar as alvenarias e garantir a elas estabilidade, deformabilidade e dilatação sem que ocorram fissuras. Na avaliação da estabilidade é considerada a esbeltez (relação altura/espessura) menor ou igual a 27 para alvenarias externas e menor ou igual a 30 para as alvenarias internas. Caso a esbeltez ultrapasse estes valores deve-se aumentar a espessura do bloco ou utilizar cintas ou pilaretes, que podem, em alguns casos, serem maiores que a espessura da alvenaria.

Para evitar patologias entre a vedação e estrutura é necessário prever juntas de dilatação nos panos de alvenaria. O dimensionamento destas juntas depende das deformações estruturais admitidas, dos materiais constituintes da alvenaria (coeficiente de dilatação térmica), do módulo de elasticidade da alvenaria, do diferencial térmico da região, do tipo de fixação da alvenaria e das dimensões dos painéis de alvenaria. A TAB. 3.1 abaixo relaciona o comprimento máximo da alvenaria entre juntas de dilatação, em função do tipo de exposição e espessura do bloco.

TABELA 3.1 – Relação entre a espessura do bloco e comprimento das juntas de dilatação.

Espessura do elemento / bloco(m)	Comprimento máximo entre juntas de dilatação (m)	
	Alvenaria interna	Alvenaria externa
0,09	8,0	6,0
0,14	10,0	9,0
0,19	12,0	10,0
0,24	14,0	12,0

A ligação entre a alvenaria e a estrutura depende do tipo de sistema, sendo este rígido, semi-rígido ou flexível . No caso dos sistemas rígido e semi-rígido utiliza-se o dispositivo conhecido como ferro-cabelo, ferro dobrado de amarração, telas metálicas ou fitas metálicas.



FIGURA 3.5 – Uso de tela metálica para garantir a estabilidade da alvenaria

Para determinar qual será o tipo de ligação existente entre a estrutura metálica e alvenaria é necessário observar a distância entre pilares. Se esta for menor que 4,5m a alvenaria poderá ser vinculada, classificada como sistema semi-rígido, e este vínculo é exercido por atrito lateral da rugosidade do chapisco. Para vãos de 4,5 a 6,5m, a alvenaria também deverá ser vinculada (sistema rígido), porém se recomenda o uso de tela soldada ou ferro dobrado de amarração (FIG. 3.5). E para vãos maiores que 6,5m a fixação lateral deverá conter uma placa de EPS no encontro entre os dois materiais e a

alvenaria é classificada como desvinculada e o sistema, deformável. Isso se deve ao fato de quanto maior for o comprimento da estrutura maior será a dilatação térmica do mesmo, sendo necessário inserir um elemento de ligação que deforme com facilidade.

A ligação entre a alvenaria e a viga depende da classificação do sistema como rígido, semi-rígido ou deformável. No sistema rígido deverá ser feito o encunhamento (FIG. 3.6) enquanto que no sistema semi-rígido o fechamento entre a alvenaria e a viga é executado com argamassa contendo aditivo expansor (FIG. 3.7). No sistema deformável é utilizada a espuma de poliuretano expandido ou placa de EPS para receber as deformações das alvenarias e estruturas sem comprometer a alvenaria com trincas.

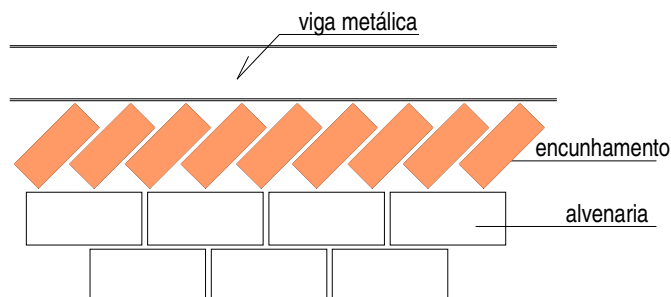


FIGURA 3.6 – Sistema rígido: encunhamento entre alvenaria e estrutura

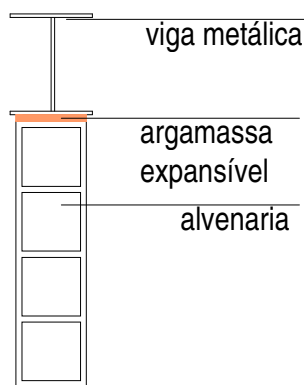


FIGURA 3.7 – Sistema semi-rígido: argamassa com aditivo expansor

No revestimento também são necessários certos cuidados. As transições entre alvenarias e perfis metálicos devem ser revestidas de telas com PVC ou fibra de vidro e fixadas

com argamassa colante. Outra opção é aplicar, externamente ao encontro da estrutura metálica e a alvenaria, tinta elastomérica, que pode ser usada tanto no sistema flexível ou rígido.

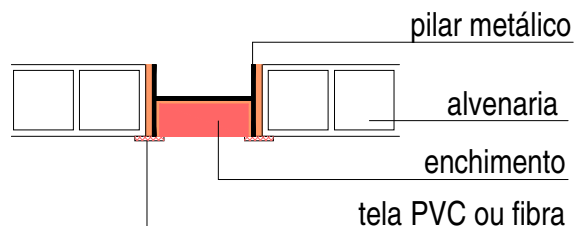


FIGURA 3.8 – Proteções da estrutura para recebimento de revestimento

As juntas dos revestimentos deverão estar localizadas preferencialmente nos alinhamentos das transições entre os perfis metálicos e as alvenarias. Estas juntas significam um corte no sistema de revestimento, sendo feita desde a base até o revestimento final. No caso de ambientes internos as juntas horizontais podem ser dispensadas se existir rodapés ou forros.

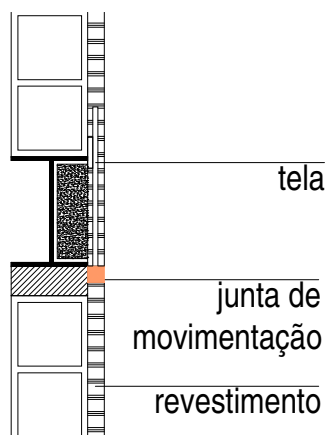


FIGURA 3.9 – Junta de movimentação no revestimento de fachadas

O preenchimento das juntas deve ser executado com materiais flexíveis capazes de absorver as deformações do sistema de revestimento. Normalmente são utilizados corpos de apoio de polietileno expandido ou mastique (silicone ou poliuretano), ou ainda a tinta elastomérica que possui capacidade de deformação de 600%. O preenchimento das juntas só poderá ser feito após a execução do revestimento final.

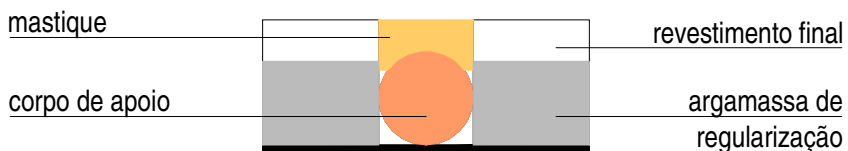


FIGURA 3.10- Montagem da junta de dilatação

### 3.3- Painéis de concreto celular autoclavado

Os painéis de concreto celular autoclavado são constituídos de materiais calcários (cimento, cal) e materiais ricos em sílica, granulados finamente. À composição da mistura são acrescentados produtos formadores de gases (alumina) que, após submetidos à pressão e temperaturas elevadas, formam células fechadas, aeradas uniformemente.

As dimensões podem variar de acordo com a necessidade e os módulos podem se apresentar na forma de painéis propriamente ditos ou de blocos. Neste caso é tratado como alvenaria e os detalhes construtivos foram abordados no item anterior. Entre os painéis é aplicada argamassa colante. Dependendo das dimensões e solicitações podem ser constituídos também de armadura de aço, que combate o esforço à tração.



FIGURA 3.11- Concreto celular autoclavado armado (SICAL, 1999)

A interface dos painéis com a estrutura metálica é feita através de argamassa flexível e conectores, cantoneiras ou chapas dobradas para fixação do painel à estrutura (FIG. 3.12, 3.13).

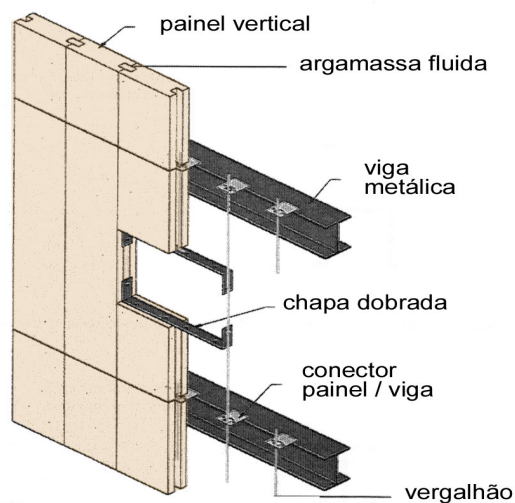


FIGURA 3.12- Detalhe de fixação do painel utilizando conectores. (SICAL, 1999)

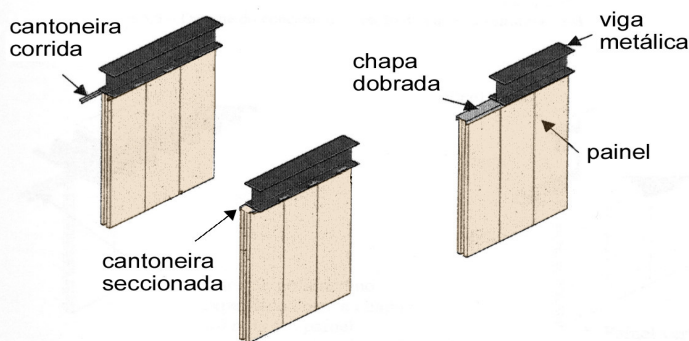


FIGURA 3.13- Encontro dos painéis com o flange inferior da viga, através de cantoneiras e chapas dobradas. (SICAL, 1999)

A montagem dos painéis de concreto celular autoclavado pode ser feita por duas pessoas, através da montagem das guias, cunhamento do painel e acabamento das juntas com argamassa e cimento-cola, conforme mostra a FIG. 3.14.

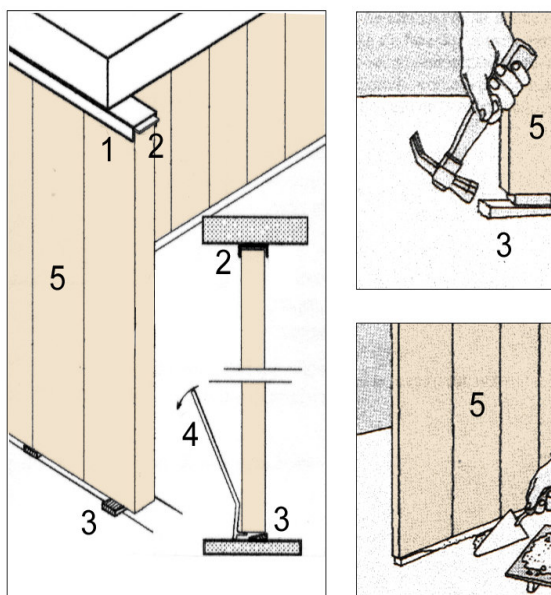


FIGURA 3.14- Montagem do painel de concreto celular autoclavado (1-perfil metálico; 2-placa de EPS; 3- cunha de madeira; 4-alavanca; 5- painel. SIPOREX,1999).

No caso dos blocos de concreto celular autoclavado a junção entre os painéis é feita por encaixes macho-fêmea e a interface com a estrutura metálica segue as recomendações apresentadas no item anterior, já que se tratará, neste caso, de uma vedação em alvenaria. Encontros à 90° de alvenarias são amarrados verticalmente com vergalhões e *grout*, a fim de garantir estabilidade à estrutura.

### 3.4- Painéis de gesso acartonado.

Os painéis de gesso acartonado são normalmente utilizados como divisórias internas e são compostos por duas placas de gesso revestidas com papel cartão e fixadas sobre perfis metálicos zincados. Existem algumas variações deste sistema para atender à necessidade de maior resistência ao fogo ou à umidade. O painel resistente ao fogo, possui o papel carta na cor rosa e o painel resistente à umidade, na cor verde Além disso, algumas composições podem ser feitas na montagem do gesso acartonado a fim de obter melhor desempenho acústico ou a fixação em grandes vãos.

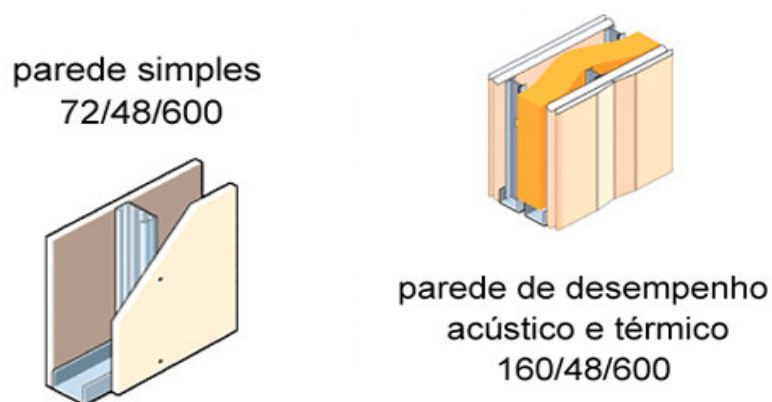


FIGURA 3.15 – Sistema de gesso acartonado comum e com maior desempenho acústico.

Algumas vantagens e desvantagens da vedação em gesso acartonado podem ser enumeradas a seguir (SILVA, 2002):

Vantagens:

- redução da massa e conseqüente diminuição do peso próprio a ser transferido para as fundações;
- possibilidade de ganho de área útil devido a menor espessura das paredes – este ganho pode chegar a 4% em uma edificação de 100m<sup>2</sup>;
- acesso simplificado para manutenção das instalações hidráulicas e elétricas – vedação oca;
- possibilidade de ajuste no desempenho acústico – lã de vidro ou composição de chapas duplas ou triplas;
- flexibilidade de formas arquitetônicas – superfícies curvas são possíveis mediante o umedecimento;
- facilidade do acabamento – a placa de gesso garante superfícies mais uniformes;
- redução no volume de material;
- rapidez da execução de fechamento.

Dentre as desvantagens pode-se destacar:

- sensibilidade à umidade;

- ausência de kits hidráulicos que sejam compatíveis com o sistema;
- dificuldade de detectar problemas na parte hidráulica;
- não podem ser empregadas como contraventamento, já que não podem receber cargas de lajes e pilares;
- a fixação de armários e prateleiras deve ser definida previamente;
- os revestimento utilizados devem ser bem estudados para que não haja uma diferença muito grande de dilatação de materiais;
- insuficiência de normalização.

Os painéis devem ser montados após a elaboração de todos os projetos, desde o arquitetônico até os complementares. As instalações complementares (elétrica, hidráulica, telefonia, informática) devem ser previstas para obter a adequada passagem dos dutos dentro de montantes e aberturas a serem feitas nas placas de gesso. (FIG. 3.16).



FIGURA 3.16 – Instalações elétricas do sistema gesso acartonado

Após a instalação dos dutos de água, luz, esgoto e telefonia, são fixadas as placas de gesso, que são encontradas nas dimensões nominais de 1,20m de largura por 2,60 a 3,00m de comprimento e 12,5; 15,0 e 18,0mm de espessura. Os perfis metálicos zincados possuem largura de 60mm e nas guias utilizam-se perfis R48 e R70, com largura nominal de 48 e 70mm, respectivamente. Para os montantes, são comumente utilizados os perfis M48-35 e M70-35, com largura nominal de 70mm e 69mm e altura nominal de abas de 35mm. Podem ser adotados outros tipos de tratamento superficial dos perfis, como zinco e alumínio (MITIDIARI FILHO, 1997).

Além destes, são utilizados como componentes básicos de montagem: parafusos de fixação das chapas à estrutura, fita de papel reforçada, para cobrir juntas, massa especial de acabamento a base de gesso e aditivos, inclusive resinas, cantoneiras metálicas para acabamento e proteção das chapas em cantos e bordas cortadas, e em casos específicos lã de vidro para enchimento das paredes.

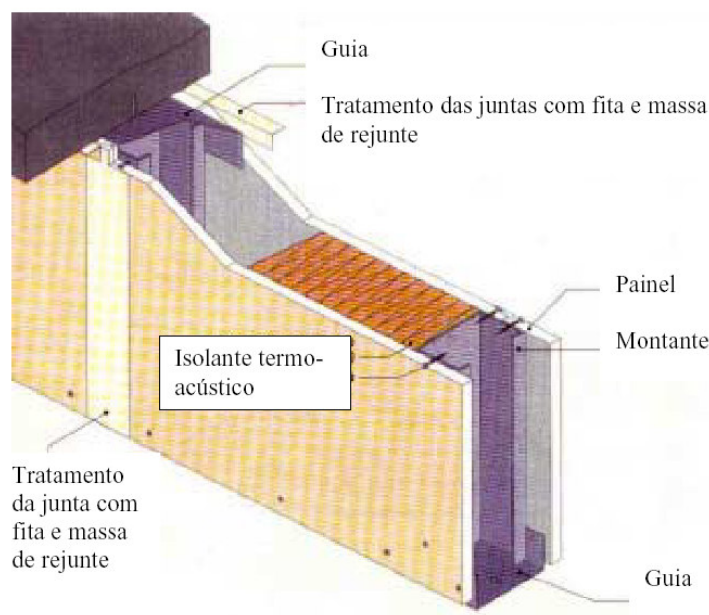


FIGURA 3.17 – Componentes do sistema de gesso acartonado (LAFARGE GYPSUM, 1999)

Dois tipos de juntas são necessários para o bom desempenho do gesso acartonado: a junta telescópica ou flexível e a junta de movimentação. A junta de movimentação é

recomendada a cada 50m<sup>2</sup> para sistemas compostos de chapas simples e a cada 70m<sup>2</sup> para chapas duplas. No entanto, distância máxima entre juntas não pode passar de 15m. As FIGs. 3.18 e 3.19 a seguir ilustram a junta protegida, que atende também ao tratamento acústico e proteção contra incêndio.

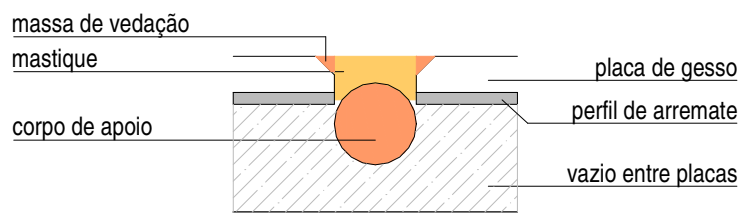


FIGURA 3.18- Esquema da junta de movimentação protegida

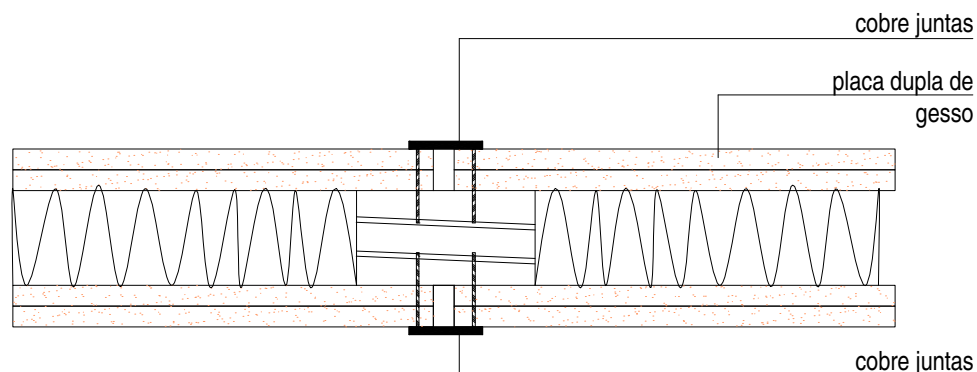


FIGURA 3.19 – Junta protegida com tratamento contra incêndio

A parede composta por gesso acartonado deve permitir uma movimentação em função de deformações da estrutura de suporte. Para tal são inseridas juntas flexíveis ou telescópicas, que são juntas existentes no encontro do painel com a laje superior (FIG. 3.20).

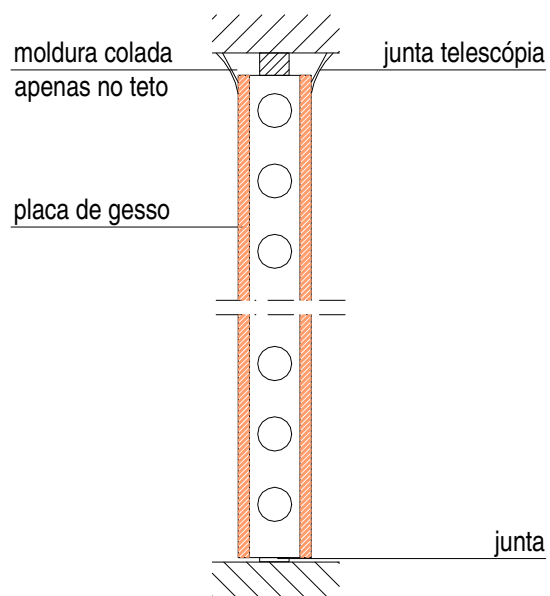


FIGURA 3.20 – Junta telescópica entre o gesso acartonado e a laje superior

Além da junta telescópica os painéis são colocados com 1cm a menos sobre a guia inferior para permitir a dilatação. (FIG. 3.21).

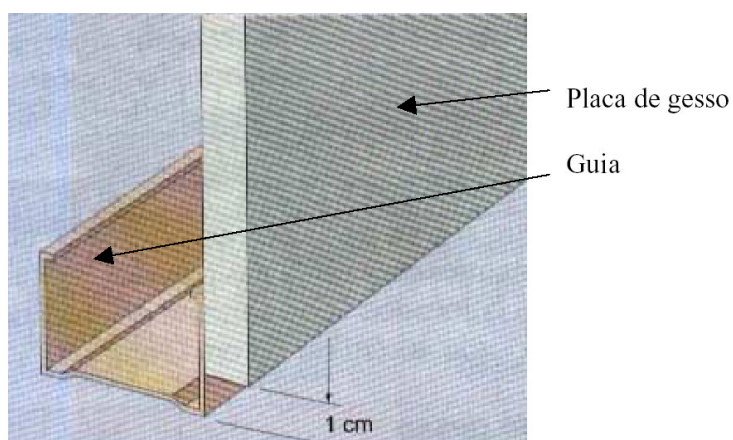


FIGURA 3.21 – Colocação do gesso a 1cm a menos que a guia inferior (SILVA, 2002)

A montagem dos painéis deve respeitar a junta de dilatação entre painéis e esta deve ser tratada utilizando massa de rejuntamento, colocação de fita de papel reforçado e impregnação de massa, conforme mostra a FIG. 3.22.

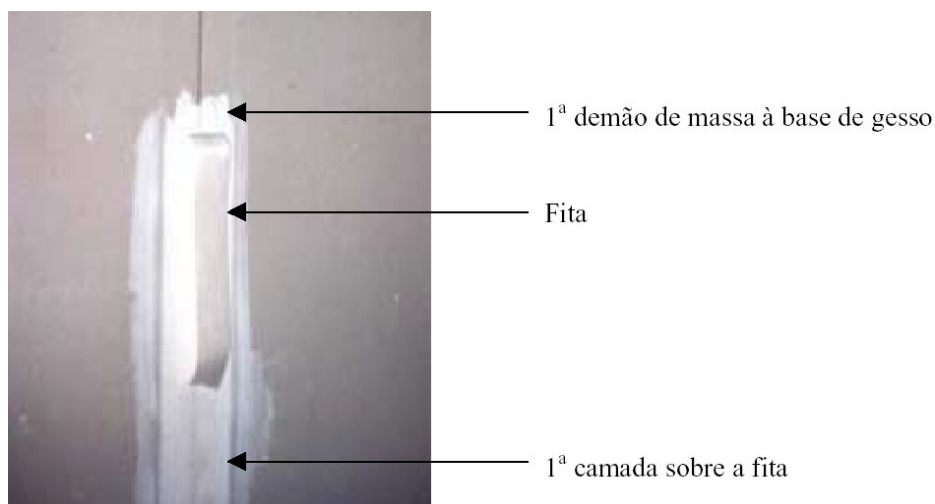


FIGURA 3.22 – Acabamento das juntas de encontro entre painéis (KRUGGER, 2000)

A Caixa Econômica Federal (CEF) aprovou, recentemente, uma recomendação para financiamento de sistemas de gesso acartonado (CAIXA, 2002).

### **3.5- Painéis de concreto**

A primeira notícia que se tem sobre o uso de painéis de concreto pré-moldado é referente à Catedral ‘Notre Dame Du Haut’ em Raincy, França, em 1923, tendo sido utilizado apenas nas divisórias internas (KRUGGER, 2000). No Brasil, o seu uso foi iniciado nos anos 50 com o movimento modernista na arquitetura e pela produção da habitação de múltiplos pavimentos. Talvez pela ausência de tecnologia suficiente para tornar o painel pré-moldado de concreto um elemento de maior flexibilidade estética, o seu uso esteve limitado até pouco tempo. Entretanto, alguns exemplos de utilização em outros países demonstram que este painel não é limitante às formas arquitetônicas (FIG. 3.23 e 3.24).



FIGURA 3.23- Boathouse at Sawyer Point Cincinnati, Ohio. (PCI, 1989, *apud* SILVA, 2002)



FIGURA 3.24- Commissioners of Republic WorksAdministrative Offices Charleston, South Carolina.  
(PCI, 1989, *apud* SILVA, 2002)

Os painéis de concreto pré-moldado são usados como vedações externas pesadas – densidade superficial maior que  $100\text{kg/m}^2$  – e podem ser planos ou apresentar nervuras que funcionam como enrijecedores para aumentar as dimensões sem aumentar a armadura. Estes painéis podem também possuir uma camada interna de material inerte e isolante – como isopor – formando um painel sanduíche. (SILVA, 2001)

A moldagem dos painéis de concreto pode ser feita na fábrica ou no próprio canteiro de obras, dependendo da disponibilidade de espaço. Uma fôrma metálica produz uma superfície extremamente lisa, e pode ser utilizada por aproximadamente 150 vezes, mas possui um custo elevado. As fôrmas de madeira possuem menor custo no processo de

fabricação, porém menor ciclo de reaproveitamento. Os acabamentos dos painéis podem ser lisos, em auto-relevo, em cerâmicas, pigmentos, pastilhas, pedras ou agregado exposto (FIG. 2.25), e podem também já vir com as esquadrias fixadas de fábrica. A resistência à compressão de um painel de concreto varia entre 40 e 70MPa.



FIGURA 3.25- Acabamentos propostos para painéis de concreto. (PRECON, 1999)

A utilização do painel de concreto como vedação requer um detalhamento prévio de tamanhos, disposições, seções a serem utilizadas, detalhes de juntas, conexões, cantos do edifício e interfaces entre elementos estruturais e de acabamentos. Além disso os painéis, por serem de concreto, necessitam de um reforço para suportar esforços de tração, conseguido através de vergalhões ou telas soldadas.

De acordo com a montagem junto à estrutura, os painéis podem ser classificados como painéis cortina, painéis de vedação e painéis portantes. Os painéis portantes suportam além do peso próprio, as cargas de lajes e painéis superiores apoiados sobre as mesmas, dispensando vigas e pilares de sustentação. Neste trabalho são abordados os painéis cortina e de vedação, que são utilizados junto à estrutura metálica.

Os painéis cortina são fixados à estrutura e nas lajes da edificação recobrimo toda a estrutura, o que é mais usual, enquanto que os painéis de vedação preenchem somente o vão existente entre pilares e vigas. (FIGs. 3.26 e 3.27).



FIGURA 3.26- Painel cortina. (PRECON, 1999)

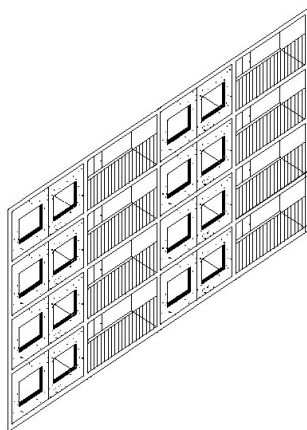


FIGURA 3.27- Painel de vedação (KRUGGER, 2000).

Os painéis devem ser dimensionados para resistir não só a cargas verticais, mas ao esforço de flexão, pois o transporte do painel poderá acarretar outros tipos de solicitações. No detalhamento da vedação deverão ser previstas algumas juntas para que a fachada movimente independente de outros componentes da edificação e também para que recalques de fundação e movimentos da estrutura não afetem a integridade da vedação. A utilização do painel de concreto como elemento de contraventamento deve ser prevista também na fase de projeto.

A possibilidade de padronização do elemento de vedação pode ser apontada como vantagem deste sistema construtivo. Além disso, os painéis possuem boa resistência ao fogo (TAB. 3.2), inércia termo-acústica (TAB. 3.3) e boa relação peso próprio/resistência. Quando existe a necessidade de maior isolamento termo-acústico, poderão ser incorporados elementos em fábrica. Estes painéis podem ser também empregados como função estrutural – o que deverá ser previsto – e devido ao controle de qualidade que os pré-fabricados possuem, é considerado também um material durável com pouca necessidade de manutenção. Apesar disso alguns detalhes de montagem devem ser observados para que não ocorram patologias devido ao acúmulo e drenagem da água e para que os painéis tenham o desempenho pelo fabricante.

TABELA 3.2- Tempo de resistência ao fogo das juntas em função da largura, da espessura do painel e da profundidade da manta de fibra cerâmica. (PCI, 1989 *apud* SILVA, 2002).

Espessura do painel (mm)	Profundidade da Manta de fibra cerâmica					
	Largura da junta - 10mm			Largura da junta - 25mm		
	1 hora	2 horas	3 horas	1 hora	2 horas	3 horas
<b>100</b>	6.35	Nd	nd	20.00	nd	nd
<b>125</b>	0	20,00	nd	12.50	54.00	nd
<b>150</b>	0	0	28.60	6.35	31.75	88.90
<b>175</b>	0	0	0	6.35	22.22	50.00

TABELA 3.3- Relação entre a espessura do painel de concreto maciço e a classe de transmissão sonora (CTS). (PCI, 1989 *apud* SILVA, 2002).

Descrição	Espessura (mm)	CTS
<b>Painel de concreto</b>	100	49
	150	55
<b>Painel de concreto alveolar</b>	150	48
	200	58

O fluxo da água de chuva sobre o painel deve ser detalhado no projeto a fim de evitar manchas na superfície. Assim devem ser considerados detalhes como pingadeiras, parapeitos e vergas, juntas e ranhuras que direcionem corretamente a água pluvial. (FIG. 3.28).

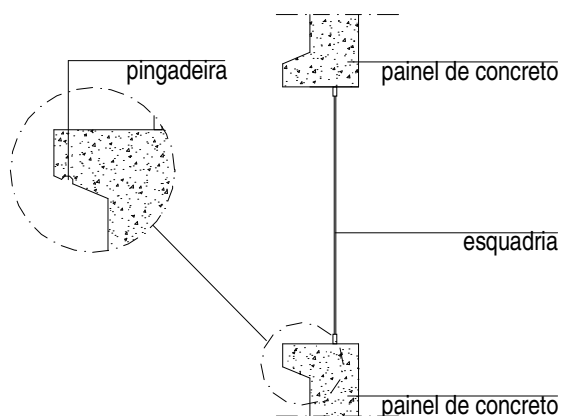


FIGURA 3.28 – Detalhes construtivos de pingadeiras.

Quanto às paredes lisas, estas devem ser interrompidas de forma a conduzir a água e sujeiras para juntas verticais, condutores ou câmaras de descompressão. Além disso, a água da chuva pode ser aproveitada quando coletada por elementos como gárgulas. (FIG. 3.29).

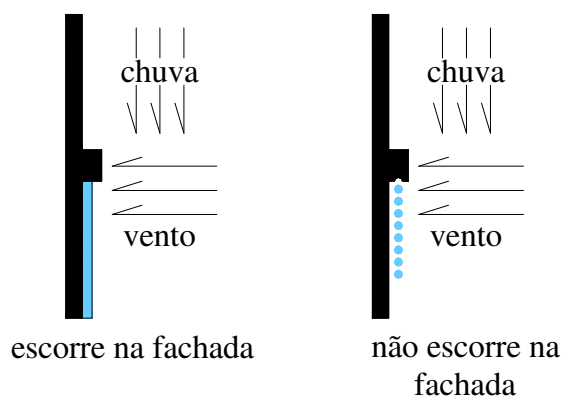


FIGURA 3.29 – Detalhes para fachadas lisas

As movimentações dos elementos e componentes da construção devido a variações de temperatura, provocam tensões que podem acarretar fissuras comprometendo o desempenho da edificação. Assim, devem ser projetadas juntas que permitam que as expansões e contrações. Estas juntas constituem em linhas de separação horizontais ou verticais entre os painéis de concreto justapostos, devendo ser de alguma forma seladas. Cabe ressaltar que as juntas horizontais estão sujeitas aos esforços de compressão devido ao peso próprio dos painéis.

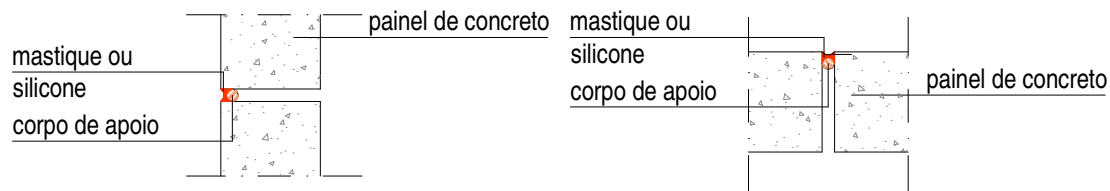


FIGURA 3.30 – Tratamento das juntas verticais (à esquerda) e horizontais (à direita)

As juntas podem ser divididas em juntas abertas ou drenadas e juntas fechadas. As juntas abertas são obtidas através da sobreposição de bordos horizontais complementada por sulcos verticais onde são posicionadas faixas de elemento elástico (FIG. 3.32). Orifícios de drenagem promovem a eliminação da água que eventualmente penetre na junta e devem ser colocados no molde antes da concretagem. No encontro de juntas horizontais e verticais, uma membrana impermeável (borracha butílica ou manta betuminada) garante a estanqueidade (SILVA, 2002).

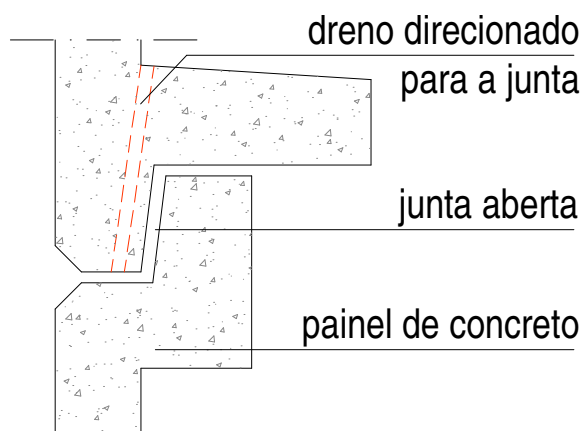


FIGURA 3.31 – Detalhe da drenagem da junta aberta

TABELA 3.4- Dimensionamento das juntas de vedação. (SILVA, 2002).

**Dimensões das juntas de vedação**

<b>Largura de até 12,7mm</b>	Profundidade igual a largura
<b>Larguras entre 12,7mm e 25mm</b>	Profundidade do selante igual à metade da largura
<b>Larguras entre 25mm e 50mm</b>	Profundidade $\leq$ a 12,7mm.

Os selantes de juntas devem ser repostos com o tempo devido a ação do ambiente e agentes agressivos atuantes.

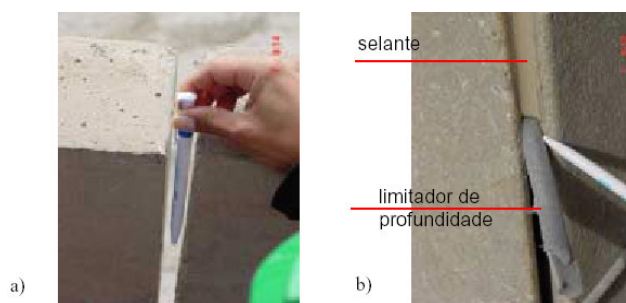


FIGURA 3.32 – Largura e preenchimento das juntas (KRUGGER, 2000)

Alguns cuidados devem ser considerados com as conexões, como: o seu posicionamento, permitindo o acesso à manutenção; projetar um número mínimo de conexões; prever zonas de amortecimento e tolerâncias para absorver variações dimensionais e evitar a locação de conexões logo acima e logo abaixo da laje, para

evitar movimentos de rotação do painel. É importante prever as conexões próximas às colunas a fim de reduzir a flexão das vigas.

As conexões são classificadas como conexão de topo, na base do painel ou entre os painéis. A conexão de topo exige que se trabalhe em dois pavimentos simultaneamente, o que dificulta a instalação, enquanto que na fixação na base do painel as conexões são feitas entre painéis e a fixação é executada em apenas um pavimento. (FIGs. 3.33 e 3.34).

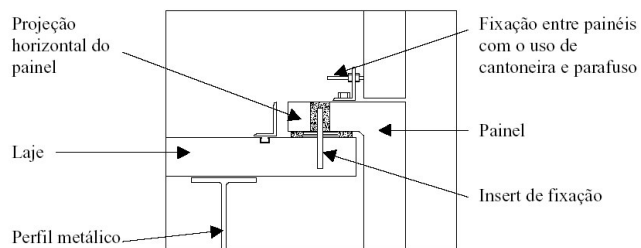


FIGURA 3.33 – Detalhe de conexão do painel e estrutura pelo topo do painel. (KRUGGER, 2000)

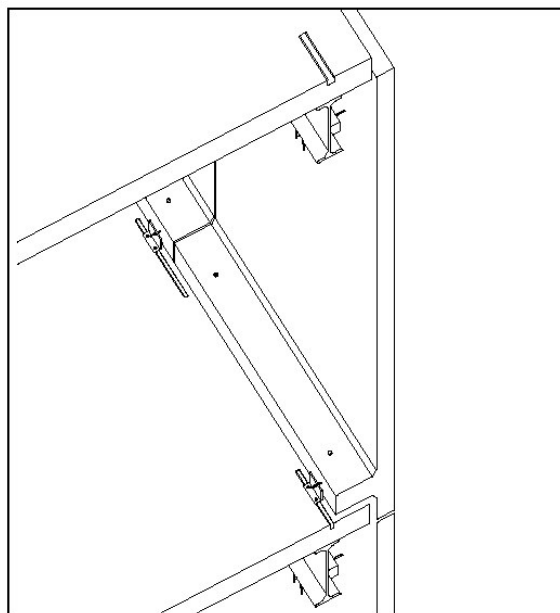


FIGURA 3.34 – Fixação na base do painel (KRUGGER, 2000)

Cabe ressaltar que em edifícios de estrutura metálica, os painéis são fixados preferencialmente na laje de concreto, pois a fixação na estrutura acarreta em solicitações significativas dadas às vedações. Normalmente são utilizadas cantoneiras no topo e cantoneiras ou pinos na parte inferior, devido à maior rapidez na execução.

Devem-se encapsular as conexões em concreto ou tratar através da zincagem, galvanização ou uso de aço inoxidável – neste caso as ligações devem ser aparafusadas. (FIG. 3.35).

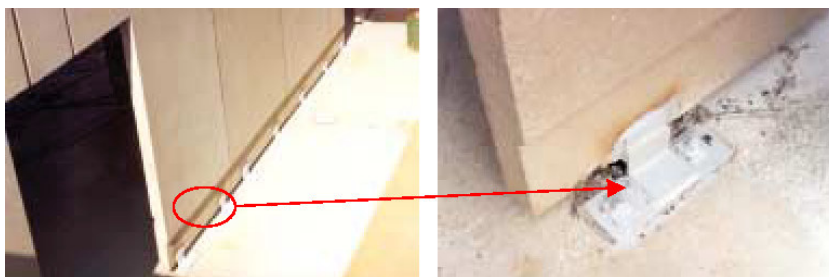


FIGURA 3.35– Dispositivos de fixação dos painéis protegido por pintura anticorrosiva (KRUGGER, 2000)

### **3.6- Outros painéis**

#### **3.6.1- Painéis de plástico.**

Os painéis de PVC são compostos em plástico reforçado (PRFV) e enchimento isolante e termoestável formando um sanduíche de duas camadas de Poliestireno Expandido (EPS) de 25mm - auto extingüível, uma camada interna de lã de rocha de 40mm e revestimento com placas de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), sendo ainda estruturado por uma trama de madeira de 60 em 60cm. Estes painéis são fornecidos com dimensões de 300x260cm. A estrutura básica deste painel é apresentada na FIG. 3.36.

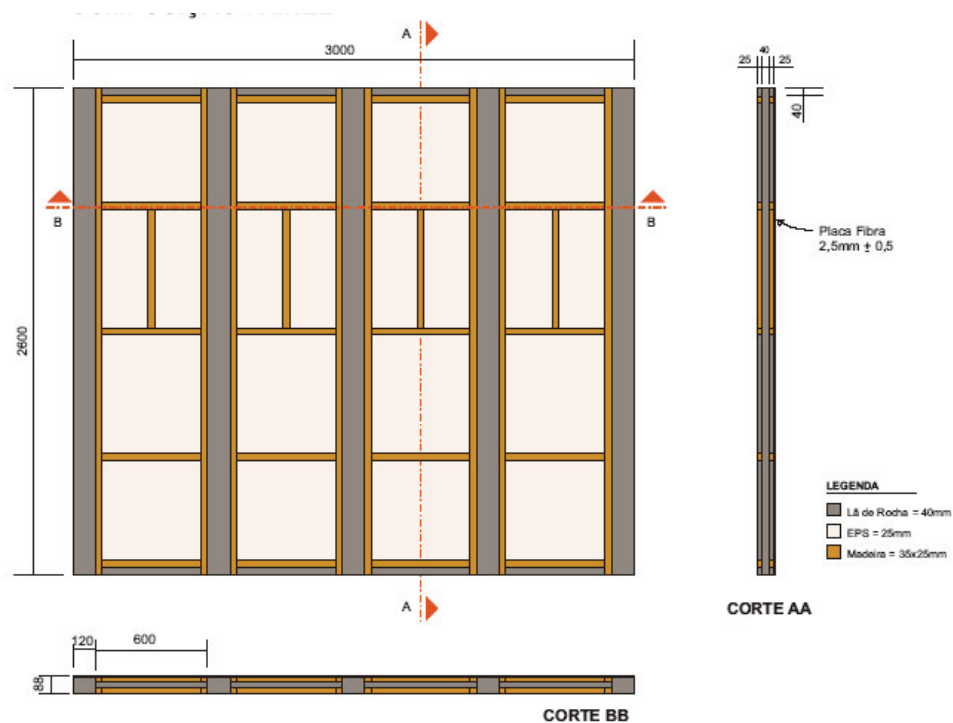


FIGURA 3.36- Estrutura básica do painel em PVC (MVC, 2003)

Os painéis acima citados não constituem painéis estruturais e podem ser empregados, como vedações de sistemas construtivos estruturados em aço. O processo de ligação entre estes painéis e a estrutura é feito através de parafusos sextavados zincados a quente.



FOTO 3.1- Painel de plástico reforçado, MVC

### 3.6.2- Painéis chapa metálica.

São painéis sanduíche formado por duas placas de chapa de aço zincado, espessura de 0,43mm e preenchido internamente por poliestireno expandido ou espuma rígida de poliuretano. As placas possuem dimensões de 300x370cm.



FOTO 3.2– Painel de chapa de aço zincado *Perfect House*.

A montagem deste sistema de vedação á feita através de encaixes laterais (tipo macho-fêmea) e por intermédio de peças confeccionadas em chapas de aço galvanizado de 0,65 mm ZAR230.

### **3.7 – Avaliação das interfaces dos painéis de vedação e estrutura metálica**

Os painéis descritos neste capítulo terão seu isolamento sonoro avaliado a partir de ensaios e de expressões analíticas, nos capítulos 4 e 5 deste trabalho. Entretanto, o isolamento sonoro destes painéis obtido junto ao sistema construtivo pode ser inferior aos previsto, pois a forma de montagem, principalmente as conexões existentes entre materiais diferentes tornam o sistema mais frágil.

A montagem de uma vedação junto à estrutura metálica é determinante no grau de isolamento do sistema. Perfis ‘T’, muito utilizados em edificações podem possuir menor

ou maior isolamento dependendo da disposição do perfil. A FIG. 3.37 exemplifica a afirmação acima.

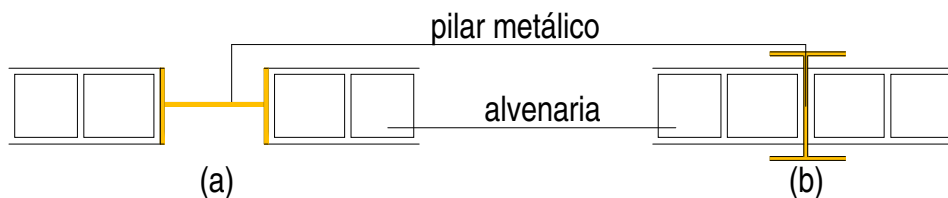


FIGURA 3.37 – Influência da posição dos pilares metálicos no isolamento sonoro

A posição (a) é pior para o isolamento do som que a posição (b), pois as ondas sonoras terão menor dificuldade para atravessar uma porção menor de massa, além da maior rigidez do aço que facilita a condução do som. Esta é a melhor opção se for necessário que o perfil metálico fique aparente. Para um isolamento maior deve-se então envolver a estrutura com um material de isolamento compatível com o sistema de vedação (FIG. 3.38).

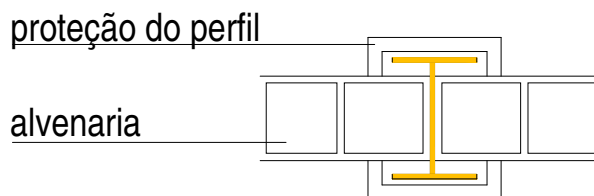


FIGURA 3.38 – Alvenaria de proteção do perfil metálico

Quando for necessário que a estrutura fique aparente pode-se utilizar um perfil caixa e preencher o espaço interno com lã de vidro ou outro material absorvente. (FIG. 3.39).

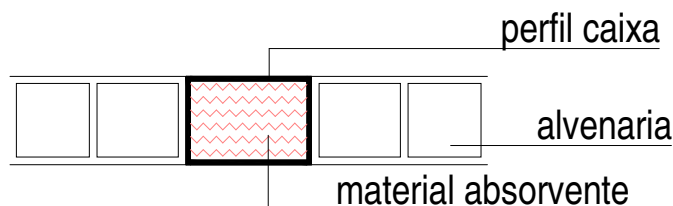


FIGURA 3.39 – Tratamento do perfil metálico aparente

### 3.7.1- Painéis de alvenaria

No caso do encontro com as vigas, a classificação como sistema rígido, semi-rígido ou deformável altera o desempenho acústico do painel em alvenaria. Além da preocupação com o próprio perfil, deve-se observar que quando a ligação for deformável o espaçamento sugerido entre o término da alvenaria e a viga deverá ser preenchido com um material que também isole o ruído. A placa de EPS poderá ser substituída por um neopreme ou outro material flexível. (FIG. 3.40).

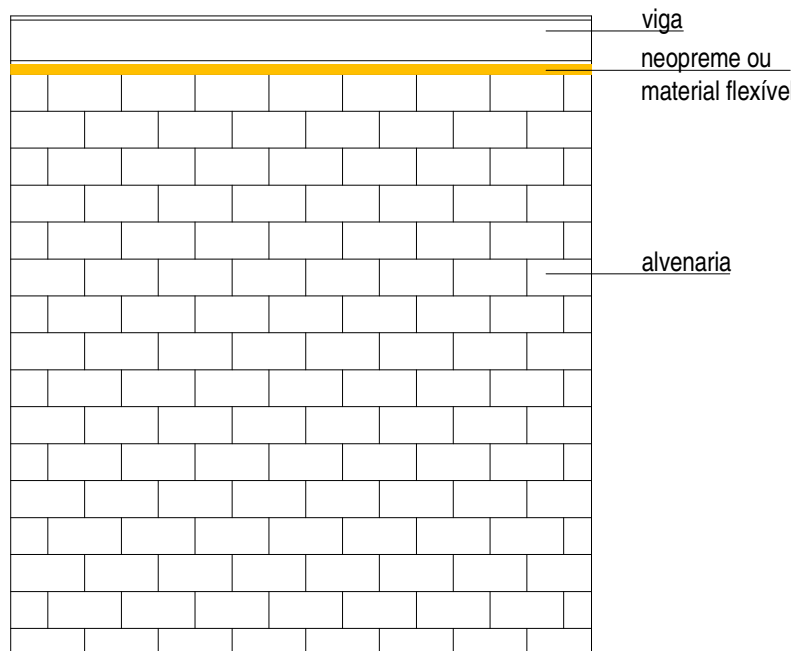


FIGURA 3.40 – Preenchimento do espaçamento existente na alvenaria deformável

Nos revestimentos, o tratamento com mastique e corpo de apoio sugerido anteriormente é suficiente para garantir a eficiência de isolamento sonoro.

Em blocos ou painéis de concreto celular autoclavado que possuem sistema de união por encaixes, o rejunte deve ser feito para que as possíveis frestas existentes entre os elementos não funcionem como pontos de escape. O encontro destes painéis com a estrutura metálica devem seguir os mesmos detalhes que a alvenaria de tijolos cerâmicos. (FIG. 3.41).

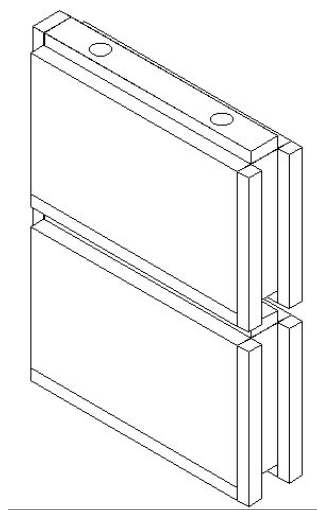


FIGURA 3.41 – Encaixe dos blocos de concreto celular autoclavado

### 3.7.2 – Painéis de gesso acartonado

Os painéis de gesso acartonado quando utilizados sem preenchimento com lã de vidro ou lã de rocha, por possuírem pouca massa e serem de pequena espessura, podem apresentar um isolamento acústico insuficiente. Além disso, existem alguns detalhes de montagem que devem ser tratados para melhorar o isolamento deste tipo de painel.

A montagem do painel é feita a menos 1cm do teto e do piso, para permitir a dilatação da placa de gesso. Estas juntas deverão ser tratadas, no piso por rodapés de madeira que proporcionam um isolamento melhor que rodapés cerâmicos ou metálicos e no teto, utilizar rodapés, nos dois casos com tratamento interno de lã de vidro ou rocha. (FIG. 3.42).

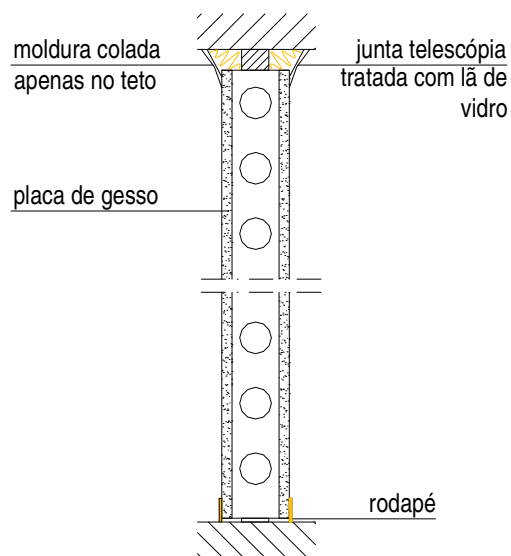


FIGURA 3.42 – Tratamento de juntas telescópicas

O perfil metálico do painel de gesso acartonado pode funcionar como uma ponte acústica, quando o sistema for utilizado com preenchimento de material absorvente, como lã de vidro ou lã de rocha (FIG. 3.43 e 3.44). Neste caso deverá tratar a ligação da placa com o perfil, através de uma manta de material flexível. Em vedações com necessidade de maior isolamento pode-se utilizar perfis duplos que devem ser fixados desencontrados e não alinhados, para que não ocorra novamente uma ponte acústica. (FIG. 3.45).

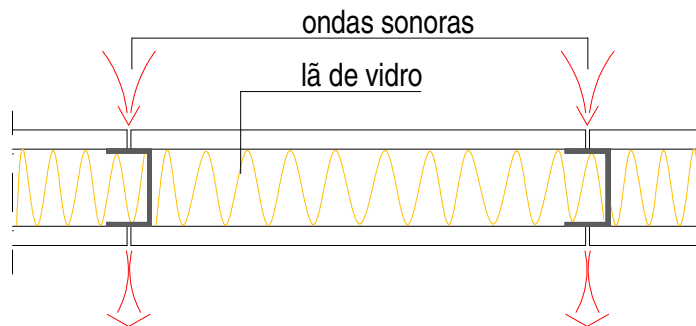


FIGURA 3.43 – Perfil metálico funcionando como ponte acústica

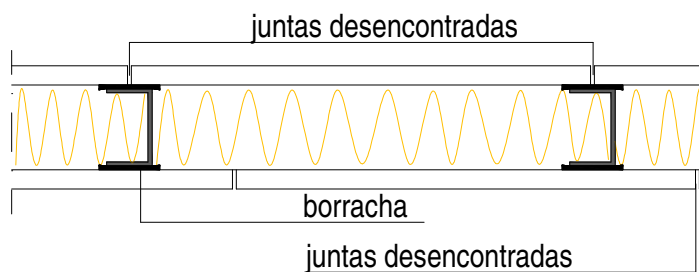


FIGURA 3.44 – Montagem de divisória para melhoria do desempenho acústico

O tratamento das juntas de movimentação com fita adesiva e massa de gesso é aparentemente suficiente para tratar a junta de movimentação. (FIG. 3.43 e 3.44).

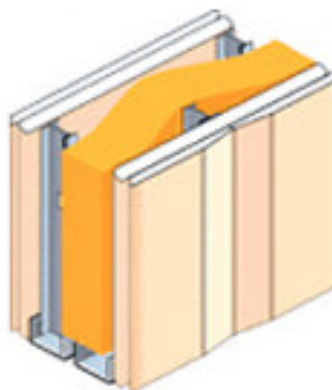


FIGURA 3.45 – Montagem de gesso acartonado com maior desempenho acústico.

### 3.7.3- Painéis de concreto.

Os painéis de concreto possuem uma vantagem junto a outros sistemas pré-fabricados, pois possuem grande densidade e com isso podem garantir maior isolamento acústico. Entretanto, devido às juntas de movimentação, o isolamento pode ser enfraquecido e alguns cuidados devem ser tomados.

O tratamento das juntas pode ser feito pelos próprios materiais de proteção de junta como o neopreme e o mastique. Além disso, o encontro com a estrutura metálica deve possuir um tratamento das frestas e da própria estrutura. Partindo do princípio de proteção da estrutura para evitar o enfraquecimento do isolamento sonoro, pode-se

concluir que os painéis cortina possuem melhor isolamento acústico que painéis de vedação que deixam a estrutura aparente.

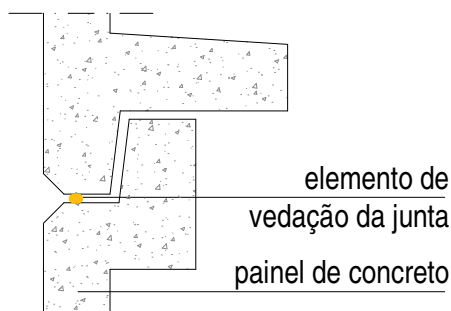


FIGURA 3.46 – Juntas dos painéis de concreto

### 3.7.4 – Painéis de PVC

Painéis de PVC e de chapa metálica ainda não possuem um detalhamento definido de juntas e adequação junto à estrutura. Qualitativamente pode-se dizer que o isolamento sonoro destes painéis pode ser prejudicado pela pouca densidade superficial dos materiais constituintes destes painéis. Quanto aos encontros entre vedação e estrutura, os cuidados a serem tomados partem do princípio de proteger a estrutura evitando a exposição de uma região de pouca massa e evitar que frestas na interface possam prejudicar o isolamento sonoro.

Este capítulo levantou, qualitativamente, detalhes construtivos que podem invalidar o trabalho de isolamento sonoro. Resultados experimentais, eventualmente apresentados pelos fabricantes de cada subsistema construtivo, são de suma importância ao projetar uma edificação e contemplar o conforto acústico da mesma. Entretanto a forma construtiva e a interface entre os diferentes subsistemas podem invalidar os dados utilizados em projeto, já que, conforme demonstrado neste capítulo, espaços entre os subsistemas enfraquecem o isolamento sonoro da edificação como um todo.

Nos capítulos seguintes serão discutidos os índices de isolamento sonora e apresentados resultados experimentais e analíticos da perda por transmissão dos painéis descritos neste capítulo.

# 4

## **Análise de critérios recomendados para isolamento sonoro**

O objetivo deste capítulo é avaliar as recomendações propostas pelo Projeto de Norma CB.02:136.01.001 (ABNT, 2004). As recomendações previstas neste projeto de norma são comparadas aos índices recomendados em outros países tais como, Austrália, Canadá, Coréia, Estados Unidos, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Inglaterra, Finlândia, França, Alemanha, Irlanda, Holanda, Noruega, Polônia, Suécia. Ao final do capítulo é feito um paralelo entre os índices comparados e os propostos no projeto de norma com a NBR 10151 e 10152, que estabelecem níveis de conforto para a comunidade e valores aceitáveis para o conforto por ambientes, respectivamente.

### **4.1- A Normalização do Isolamento Sonoro.**

O projeto de Norma SC 136 da ABNT determina os requisitos mínimos de desempenho de edifícios habitacionais que trata do índice de isolamento acústico mínimo requerido. Neste projeto inclui-se a CB.02:136.01.004 (ABNT, 2004) cujo conteúdo trata do *Desempenho de Edifícios Habitacionais de até 5 pavimentos: Fachadas e Paredes*

*Internas* e prevê valores de isolamento para desempenho identificados como M, I e S. Onde o nível de desempenho M é a condição de atendimento das exigências mínimas, obrigatória. O nível I representa o nível intermediário, entre o mínimo e o superior e o nível S é o nível superior. Os dois últimos dependem da relação custo/benefício e da possibilidade de agregar qualidade aos materiais componentes da edificação. Para caracterizar as propriedades de isolamento sonoro dos sistemas construtivos, o projeto de norma CB.02:136.01.004 admite três procedimentos de ensaio, os quais estão discriminados a seguir:

- método de laboratório: determina a isolação sonora de componentes construtivos, sendo o resultado aplicável a qualquer projeto – Norma ISO 140-3 (ISO, 1978);
- método de engenharia: determina a isolação global da vedação externa de forma rigorosa em campo – Norma ISO 140-4 e ISO 140-5 (ISO, 1978);
- método simplificado de campo: obtém-se a estimativa do isolamento sonoro global da vedação externa, sem instrumentação necessária para medir o tempo de reverberação – Norma ISO 10052 (ISO, 2001).

Os métodos listados acima definem tipos de índices diferenciados, dependendo do método utilizado. O método de laboratório define o índice de redução sonora (R) e o índice de redução sonora ponderado ( $R_w$ ), e o método de engenharia define a diferença padronizada de nível ( $D_{nT}$ ) e diferença padronizada de nível ponderada ( $D_{nTw}$ ).

Conforme indicado na TAB. 4.1 a seguir, são recomendados pelo CB.02:136.01.004 valores da Diferença Ponderada de Nível para vedações externas e paredes internas.

TABELA 4.1 – Índice de Redução Sonora Ponderado,  $R_w$ , de fachadas e paredes internas (Adaptado de CB.02:136.01.004)

Elemento	$R_w$ (dB)	Nível de desempenho
Vedação externa de salas e dormitórios	35 a 39	M
	40 a 44	I
	>45	S
Parede entre ambientes de uma mesma unidade habitacional	30 a 34	M
	35 a 39	I
	>40	S
Parede de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores, halls e escadarias nos pavimentos tipo.	35 a 39	M
	40 a 44	I
	>45	S
Parede de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores, halls e escadarias nos pavimentos tipo.	45 a 49	M
	50 a 54	I
	>55	S
Parede entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanências de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, playground, salão festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas.	50 a 54	M
	55 a 59	I
	>60	S
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação)	45 a 49	M
	50 a 54	I
	>55	S

No Projeto de Norma CB.02:136.01.004 também estão recomendados valores para o índice de redução sonora  $R_w$  os quais correspondem aos valores da Diferença Ponderada de Nível ( $D_{nTw}$ ) propostos na tabela 4.1 acrescidos de 5dB(A). Ainda de acordo com este projeto de norma, para localizações próximas a avenidas movimentadas devem ainda acrescentar 5dB(A).

O projeto de norma SC 136 aborda edificações residenciais de até 5 pavimentos, entretanto não existe um documento próprio de recomendações do isolamento sonoro de

edificações com destinação de uso que não seja residencial. Nas regulamentações adotadas em outros países, diferentes critérios de isolamento sonora são adotados de acordo com o tipo de uso do edifício. Estes critérios são descritos a seguir.

No “Building Code of Austrália” (ELHAJJ, 2002) os edifícios são identificados como classes de 1 a 10. A classe 1 representa habitações isoladas e hospedarias, pensões que não excedam 300m<sup>2</sup> e possuam no máximo 12 habitantes por unidade. Classe 2 : edifícios que contenham duas ou mais unidades. Classe 3 : edifícios residenciais que não se encaixam nos itens anteriores, que possuam uma área comum, como salão de festas ou outros. As Classes 4 a 10 incluem edifícios comerciais e industriais.

O National Building Code of Canada (NBCC) (ELHAJJ, 2002), divide os grupos de edificações como: unidades habitacionais unitárias, unidades residenciais multifamiliares geminadas, unidades residenciais multifamiliares de múltiplos andares, unidades multifamiliares de altura elevada e edifícios comerciais, institucionais.

No regulamento dos países europeus podem ser identificados os principais grupos: habitações unifamiliares isoladas, habitações unifamiliares geminadas, edifícios de apartamentos e edifícios hoteleiros.

A classificação utilizada na Coreia (“Building Law”) (ELHAJJ, 2002) é semelhante, entretanto existe uma subdivisão nas residências unifamiliares entre as familiares propriamente ditas, as residências para estudantes e ou alojamentos de empresas com área que não excedam 300m<sup>2</sup> e número de pavimentos que não excedam 3 pavimentos, residências de área de 330 a 660m<sup>2</sup> e número de pavimentos de 3 a 19. As residências multifamiliares subdividem em apartamentos acima de 5 pavimentos, apartamentos com piso que não seja inferior a 660m<sup>2</sup> e que não possua mais de 4 pavimentos e alojamento para estudantes.

O “International Building Code” (ELHAJJ, 2002) utilizado nos Estados Unidos é uma síntese dos vários códigos existentes naquele país, que é determinado por estado. Sua classificação é dividida pelas funções da edificação como os outros códigos, mas cada

um possui uma subdivisão específica. O grupo A engloba os edifícios institucionais governamentais, de lazer, religiosos e é subdividido em cinco subgrupos. O grupo B inclui edifícios de escritórios, profissionais, voltados para a área de negócios. O grupo E é o de edificações educacionais. Grupo F: edificações industriais com operações que não ofereçam risco ao trabalho humano, possuindo dois subgrupos. Grupo H: mesmas funções dos edifícios do grupo F, mas que ofereçam condições de risco para os usuários. Grupo I: voltados para atividades da área da saúde, com três subgrupos. Grupo M: edifícios ou parte dos edifícios destinados a venda de mercadorias. Grupo R: edificações habitacionais ou parte utilizada como habitação. Dividido em 4 subgrupos: R-1 – ocupações residenciais de caráter transitório – R-2 – residências de mais de uma unidade habitacional que possua caráter permanente – R-3 e R-4 – residências especiais. Grupo S: edifícios ou partes voltadas para o comércio que não apresentam riscos, com dois subgrupos. O Grupo U inclui edificações que não se enquadram em nenhuma das opções acima.

A partir dos dados apresentados acima pode-se afirmar que o Brasil ainda não possui uma recomendação de critérios a serem atendidos por uso das edificações e especificidade de cada uma delas. O Projeto de Norma CB.02:136.01.004 é uma iniciativa que precisa ser aprimorada para incluir a especificidade das edificações existentes no país.

Os critérios de isolamento sonoro para edificações residenciais recomendados nos países acima citados podem ser resumidos na TAB. 4.2 e comparados às recomendações da CB 02:136.01.004 na FIG. 4.1 a seguir:

TABELA 4.2 – Quadro comparativo entre as recomendações de isolamento acústico dos diferentes países

<b>País</b>	<b>Código</b>	<b>Parâmetro utilizado</b>	<b>Elementos</b>	<b>Valor (dB)</b>
Austrália	BCA	$R_w, D_{nTw}$	Paredes de duas unidades ou entre uma unidade e área comum	45 ( $R_w$ ) 50 ( $D_{nTw}$ )
Canadá	NBCC	STC	Entre a unidade habitacional e áreas adjacentes	50
Áustria	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	55
			Paredes de residências unifamiliares	60
			Entre pisos de apartamentos	55
Bélgica	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	52
			Paredes de residências unifamiliares	52
			Entre pisos de apartamentos	52

País	Código	Parâmetro utilizado	Elementos	Valor (dB)
Dinamarca	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	52
			Paredes de residências unifamiliares	52
			Entre pisos de apartamentos	53
Inglaterra	IBCO	$D_{nTw}$	Paredes de edifícios de apartamentos	53
			Paredes de residências unifamiliares	53
			Entre pisos de apartamentos	52
Finlândia	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	55
			Paredes de residências unifamiliares	55
			Entre pisos de apartamentos	55
França	IBCO	$D_{nTw}$	Paredes de edifícios de apartamentos	53
			Paredes de residências unifamiliares	53
			Entre pisos de apartamentos	53
Alemanha	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	53-55
			Paredes de residências unifamiliares	57
			Entre pisos de apartamentos	54
Irlanda	IBCO	$D_{nTw}$	Paredes de edifícios de apartamentos	49
			Paredes de residências unifamiliares	49
			Entre pisos de apartamentos	48
Holanda	IBCO	$D_{nTw}$	Paredes de edifícios de apartamentos	53
			Paredes de residências unifamiliares	53
			Entre pisos de apartamentos	53
Noruega	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	55
			Paredes de residências unifamiliares	55
			Entre pisos de apartamentos	55
Polônia	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	52
			Paredes de residências unifamiliares	53
			Entre pisos de apartamentos	53
Suécia	IBCO	$R_w$	Paredes de edifícios de apartamentos	60
			Paredes de residências unifamiliares	60
			Entre pisos de apartamentos	60
EUA	BOCA	STC	Paredes das habitações	45
			Pisos das habitações	45
EUA	UBC	STC	Paredes das habitações	50
			Pisos das habitações	50
EUA	SBC	STC	Paredes das habitações	50
			Pisos das habitações	50
EUA	CABO	STC	Paredes das habitações	45
			Pisos das habitações	45
EUA	ICC IOTFDC	STC	Paredes das habitações	45
			Pisos das habitações	45
EUA	IRC 2000	STC	Paredes das habitações	45
			Pisos das habitações	45
EUA	HUD	STC	Paredes das habitações	52
			Pisos das habitações	52

Dos países listados neste trabalho apenas a Coreia não trabalha com critérios de isolamento sonoro por bandas de terças de oitava. Este segue o critério de isolamento sonoro nas frequências de 125, 500 e 2000Hz.

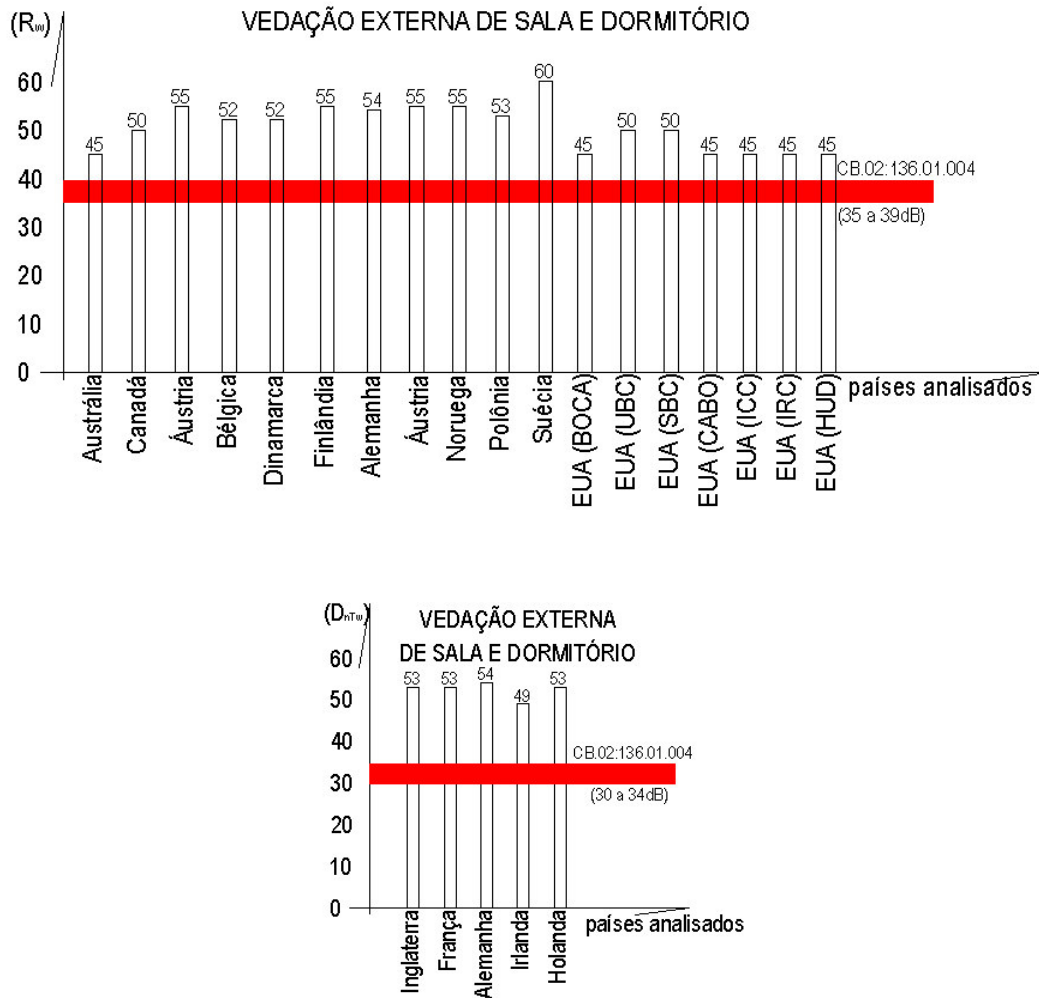


FIGURA 4.1 – Comparativo entre índices de outros países e CB.02:136.01.004

Além destas recomendações internacionais, pode-se citar o trabalho de BRADLEY (2001) onde se realizou uma pesquisa de campo acerca dos critérios de isolamento sonora de parede-meia. Neste trabalho foram realizadas entrevistas com moradores de edificações geminadas no Canadá, onde se abordava a questão do incômodo com o ruído da vizinhança. A relação entre a classe de transmissão sonora dos elementos divisórios e o tipo de ruído (foram relacionados sons de vozes, de rádio e TV e sons de músicas provindas dos mesmos) demonstrou que a população era menos tolerante a sons musicais, seguida de sons de rádio e TV e por fim, o som de vozes. Neste trabalho foi indicado o STC 60 como o ideal para parede-meia.

Pode-se observar que os valores recomendados pelos países europeus estão bem acima dos sugeridos no projeto de norma brasileiro. Este possui valores pouco mais baixos que códigos norte-americanos. Isto mostra certa coerência daquele trabalho pois o nível cultural e as condições financeiras da média da população destes países são distintos das condições do Brasil. Os critérios da TAB. 4.2 são indicados para residências sem diferenciação de classe social e os índices propostos no critério identificado como ‘M’ na CB.02:136.01.004 são recomendações mínimas a serem aplicadas em qualquer tipo de residência. A classificação do nível social da edificação também deve ser um diferenciador nos índices propostos, o que no Projeto de Norma CB.02:136.01.004 pode ser interpretado como sendo a diferenciação entre os níveis identificados como ‘M’, ‘I’ e ‘S’.

Além disso, acredita-se que o nível de isolamento está diretamente relacionado com a localização da edificação. O isolamento dos elementos construtivos pode atender às recomendações, mas a edificação pode estar localizada em uma área industrial muito ruidosa, onde o isolamento sugerido será insuficiente, ou em uma região campestre, onde o isolamento requerido não é tão determinante quanto na área industrial. Tendo em vista a localização da edificação, a norma brasileira NBR 10151 determina níveis globais de ruído para o conforto da comunidade baseado no tipo de ocupação existente (TAB. 4.3).

TABELA 4.3 – Níveis globais de ruído em dB(A), para conforto na comunidade segundo NBR 10151/2000

<b>Áreas</b>	<b>Dia</b>	<b>Noite</b>
Áreas de Sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área mista, predominantemente industrial	70	60

Entretanto, os níveis globais encontrados em áreas urbanas são, frequentemente, superiores aos determinados pela NBR 10151, não sendo possível, portanto, que esta norma seja o único parâmetro para considerar o entorno da edificação.

Partindo dos níveis globais do entorno poderiam existir graduações do isolamento requerido de acordo com a localização da edificação e não somente um acréscimo de 5dBs para edificações localizadas em ruas de tráfego intenso, conforme propõe a CB.02:136.01.004. Estes níveis de isolamento sonoro, ao invés de serem definidos apenas por uma norma geral, podem ser complementados pela Lei de Uso e Ocupação do Solo do município. Através do mapeamento sonoro e da previsão de crescimento das regiões da cidade é possível conhecer os níveis sonoros médios de cada setor, região, ou rua e assim identificar o isolamento requerido baseado nos níveis de critérios de ruído prescritos na NBR 10152. Ainda partindo da NBR 10152 (TAB. 3.3) e através dos valores estimados dos níveis de pressão sonora das atividades dos ambientes fontes (TAB. 3.2) e da NBR 10151 (TAB. 4.3) é possível analisar o Projeto de Norma CB.02:136.01.004. Entretanto a NBR 10151 não contempla o ruído de tráfego, que, conforme já dito anteriormente, são superiores aos níveis globais desta norma. Desta forma são simulados a localização da edificação e o isolamento requerido no ambiente interno à fachada, além de ser considerado o nível de ruído de tráfego. Prevendo o nível de pressão sonora que pode ser gerado dentro de um ambiente, pode-se também avaliar o isolamento entre os vários ambientes da edificação.

Para efeitos comparativos, serão considerados ambientes emissores, ou seja, ambientes que contém a fonte de emissão sonora, o espectro sonoro das curvas NCs. O nível sonoro em dB(A) expresso na tabela será obtida através de uma curva NC, a qual também será adotada níveis sonoros usualmente praticados pelas atividades encontradas nestes ambientes. Estes níveis sonoros serão supostos através das curvas NCs e pela classe de transmissão sonora (STC) recomendadas pela Housing and Urban Development (HIRSCHORN, 1989).

TABELA 4.4 – Proposta de isolamento, seguindo os ambientes da CB.02:136.01.004.

<b>Elemento</b>	<b>NPS do ambiente fonte (dB(A))</b>	<b>Nível de critério de ruído para o ambiente receptor (dB(A))</b>	<b>Isolamento requerido (dB(A))</b>
Vedação externa de salas de estar	78 <sup>(1)</sup>	40	38
	82 <sup>(2)</sup>		42
	85 <sup>(3)</sup>		45
Vedação externa de dormitórios	78 <sup>(1)</sup>	35	43
	82 <sup>(2)</sup>		47
	85 <sup>(3)</sup>		50
Parede entre ambientes de uma mesma unidade habitacional – exceto dormitórios	80	50	30
	84		34
	87		37
Parede de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores, halls e escadarias nos pavimentos tipo.	85	50	35
	82		32
	78		28
Parede de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores, halls e escadarias nos pavimentos tipo.	85	45	40
	82		37
	78		33
Parede entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanências de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como home theater, salas de ginástica, play-ground, salão festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas.	83	50	33
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação)	80	50	30

<sup>(1)</sup> NPS do ambiente fonte retirado do NC e do STC recomendado pelo HUD para residências privadas, nas graduações I, II e III.


Previsão para localidades tranquilas, com entorno silencioso.

Previsão para localidades medianas, com NPS externo razoável.

Previsão para localidades com entorno com NPS elevado.

No trabalho de BRADLEY, já descrito anteriormente, é sugerido que o tipo de ruído a ser isolado por uma parede-meia acarreta em um incômodo maior que o ruído de tráfego, por exemplo, pois a compreensão dos sons de voz, música, rádio e TV impede a concentração do usuário em outra atividade. Já o ruído de tráfego é indefinido, e a sua presença dentro de ambientes, mesmo que seja em um médio nível de ruído, permite alguma concentração em outras atividades. Tendo em vista o acima citado, os níveis de critérios de ruído sugerido para ambientes habitacionais que limitam com áreas interiores de outras residências, ou áreas comuns de edificações coletivas, onde a fonte de ruído provém da fala ou música, são propostos apenas em função do maior nível de pressão sonora do ambiente fonte.

A proposta de índices de isolamento requerido na TAB. 4.4 contempla o entorno em que se insere a edificação. Apesar disso, existirão localidades específicas como um bairro residencial próximo a um aeroporto por exemplo, onde uma vedação com isolamento de 50dB(A) não resultará no nível de critério de ruído recomendado pela NBR 10152. Neste caso a lei municipal de resolução sobre os níveis de ruído resolveria a questão. Além disso, o entorno de uma edificação pode ser modificado com o tempo e com isso os níveis sonoros também. Da mesma forma a Lei de Uso do Solo do município que controla o crescimento das regiões, poderia estimar também quais seriam os níveis de pressão sonora existentes na projeção dos anos subseqüentes.

Além de avaliar os critérios de ruído através dos níveis de critério de ruído e dos possíveis níveis de pressão sonora a serem isolados pelos elementos divisórios, é necessário realizar uma pesquisa de campo criteriosa sobre a aceitação da população aos valores de índice de redução sonora. O dito anteriormente sobre a “tolerância” da população brasileira sobre os níveis de ruído não possui embasamento científico e necessita de averiguação para que possa contribuir com a criação de uma norma específica de níveis de ruído requeridos, inclusive para a criação da classificação dos níveis recomendados por diferenciação de classes sociais.

Observando os níveis de critério de ruído recomendados para o interior das edificações previstas na NBR 10152, os níveis globais de ruído previstos na NBR 10151 e os níveis

de critério de ruído previstos no projeto de norma CE 02:136.01.004, pode-se fazer algumas considerações. Baseando-se nos valores previstos pela NBR 10151 (TAB. 4.3) e NBR 10152 (TAB. 3.3) os níveis de critério de ruído sugeridos pelo projeto de norma CE 02: 136.01.004 são compatíveis. Em outras palavras, se os níveis globais existentes em regiões com atividades listadas pela NBR 10151 fossem iguais ao previsto nesta norma, a CE 02:136.01.004 apresentaria valores para o isolamento sonoro que resultariam em níveis de critérios de ruído previstos na NBR 10152. Entretanto devem-se considerar fatores anteriormente citados como o nível de pressão sonora do ruído de tráfego, o tipo de entorno, se representa um agravante neste ruído de tráfego ou não e outras fontes eventuais que devam ser consideradas. Ainda assim é necessário um estudo aprofundado que revele o grau de tolerância da população, diferenciada por níveis médios de renda.

# 5

## **Análise Experimental da Perda por Transmissão dos Sistemas Construtivos**

São apresentados a seguir os resultados de ensaios de isolamento sonora de alguns painéis de vedação, comumente utilizados na construção civil como elementos de fachada e divisórios de ambientes internos das edificações. Estes resultados consideram apenas a presença do painel de vedação como elemento isolante, sem o ruído de flanco e sem a presença de aberturas, como portas ou janelas. É importante ressaltar que os requerimentos apresentados anteriormente devem contemplar o sistema construtivo como um todo, constituído de painéis de vedação, janelas e portas, além da cobertura.

A análise experimental da perda por transmissão dos painéis divisórios e elementos de fachada como janelas e portas são de suma importância, já que recomendações de isolamento sonoro para os mesmos são baseadas no índice de isolamento sonora ( $R_w$ ), ou classe de transmissão sonora (STC ou CTS). A determinação destes valores é feita através de procedimento experimental previsto na Norma ISO 140 -4/5 e ISO 717 -1. A diferença entre o índice de isolamento sonora ( $R_w$ ) e a classe de transmissão sonora (STC ou CTS) está na faixa de frequências analisada. Enquanto que no  $R_w$  analisam-se faixas

de terças de oitava que vão de 125 a 4000Hz, a STC considera as faixas de 100 a 3150Hz.

Conhecendo-se os valores dos coeficientes de transmissão sonora dos painéis de vedação, bem como os coeficientes de transmissão sonora dos elementos constituintes do sistema construtivo, é possível prever o desempenho da isolamento acústica da edificação como um todo. A perda por transmissão sonora global do sistema construtivo constituído de dois materiais diferentes é determinada pela EQ. 5.1 a seguir (GERGES, 2000).

$$PT_T = 10 \log \frac{(S_1 + S_2)}{(\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2)} \text{ dB} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Onde  $PT_T$  é a perda por transmissão sonora global,  $S_1$  e  $S_2$  são as áreas ocupadas pelos elementos 1 e 2 respectivamente em  $m^2$ , e  $\tau_1$  e  $\tau_2$  seus coeficientes de transmissão e  $PT_i$  a perda por transmissão do elemento “i” em dB.

Para determinação das perdas por transmissão de alguns painéis divisórios foram realizados ensaios em câmaras isoladas acusticamente em todas as superfícies, exceto na superfície do material ensaiado. Os procedimentos seguiram a Norma ISO 140/V “Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades” e a Norma ISO 354 “Measurement of sound absorption in a reverberation room”.

Os equipamentos utilizados durante as medições foram: Analisador de Frequências em Tempo Real, marca Hewlett Packard, modelo HP3569A, número de série 3442A00433; microfone de pressão marca ACO Pacific, modelo ACOJ701XX, número de série 19991; pré-amplificador marca ACO PACIFIC, modelo ACOP 4012XX, número de série 9-701-8. Esses equipamentos são classificados como do tipo 0 (zero), conforme padrões estabelecidos pela norma ANSI S1.42-1986, com erros máximos de leitura de 0,7 dB na faixa de 1/3 de oitava centradas entre 100 Hz e 4000 Hz. Também foi utilizado um calibrador de nível de pressão sonora marca CIRRUS, modelo CRL 511E, tipo 1L, em conformidade com classificação IEC 942/1988.

Devido à indisponibilidade de duas câmaras reverberantes adjacentes, cada ensaio foi realizado em câmaras construídas pelos fabricantes dos painéis ensaiados. O bloco de concreto celular autoclavado foi ensaiado na Câmara 1 e o painel de chapa zincada com miolo em EPS, bem como o painel de concreto com miolo em EPS foram ensaiados na Câmara 2, que serão descritas a seguir.

O bloco de concreto celular autoclavado foi ensaiado em uma câmara com volume de  $25,95\text{m}^3$ , de  $2,75\text{m} \times 3,70\text{m}$  e pé direito médio de  $2,50\text{m}$ . A fonte sonora emitiu o ruído rosa, posicionada a 4 metros do centro geométrico da vedação, com direção de incidência a 45 graus do eixo normal ao plano do painel passando pelo centro geométrico do mesmo. As FIGs. 5.1 e 5.2 mostram o esquema da câmara reverberante utilizada para a determinação da perda por transmissão do bloco concreto celular autoclavado.

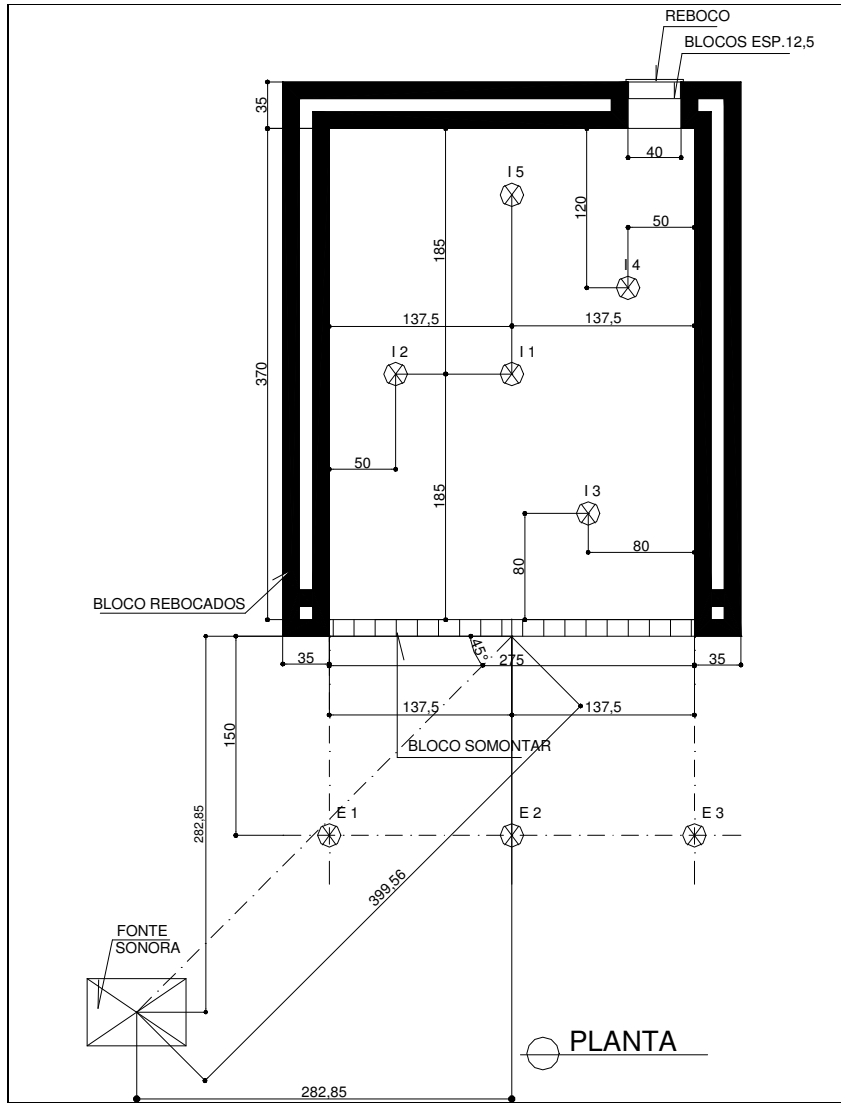
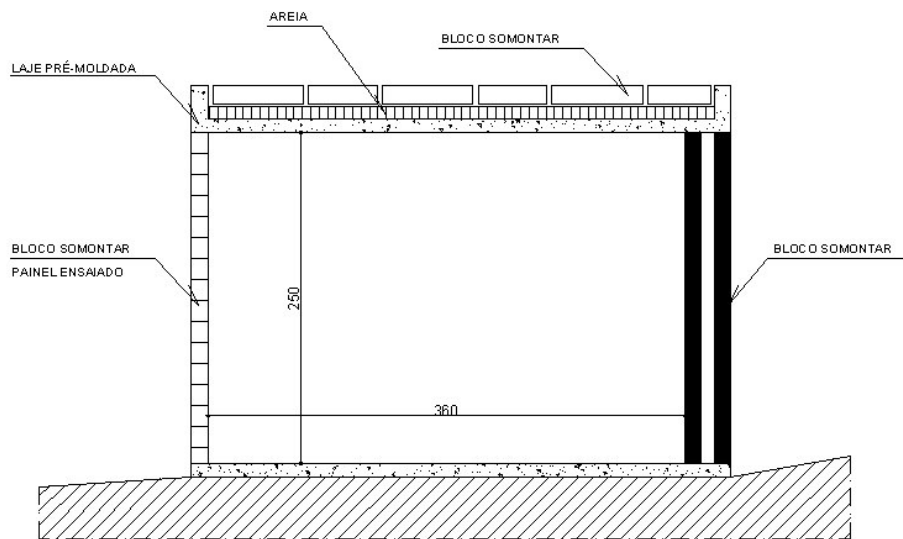


FIGURA 5.1 – Planta da câmara de ensaio I (unidades em centímetros)



CORTE AA - CÂMARA

FIGURA 5.2 – Corte da câmara de ensaio I (unidades em centímetros)

O microfone foi posicionado externamente a 1,5m do painel conforme representado na FIG. 5.1 por E1, E2 e E3. A medição do ruído de fundo foi realizada nos três pontos externos e a medição de nível sonoro equivalente contínuo,  $Leq$  30s, efetuada nos mesmos três pontos com uma repetição de três vezes por ponto. Internamente, foram posicionados cinco pontos em um tripé a 1,0m, 1,2m e 1,4m de altura, com distância mínima das paredes de 0,50m e 0,87m entre pontos. O tempo de integração da medição foi de 30 segundos e foram registradas 3 medições por ponto, um para cada altura do microfone.

A absorção sonora foi medida nos cinco pontos internos, com três medições em cada ponto. Utilizou-se como fonte sonora o ruído rosa com interrupção automática, emitido pelo próprio Analisador de Frequências HP 3569A e integração inversa. Na Fig. 5.4 estão indicadas as posições dos microfones utilizadas na medição da absorção interna da câmara reverberante.



FOTO 5.1 – Câmara de ensaio I usada na medição do isolamento sonoro do bloco de concreto celular autoclavado



FOTO 5.2 – Medição da absorção das superfícies internas da câmara de ensaio I

Os outros painéis ensaiados – painel de concreto com miolo de EPS e o painel composto de EPS no interior e chapa zincada externamente – foram ensaiados em câmaras de dimensões de 3,70m x 3,06m x 2,50m. As medições internas do nível de pressão sonora foram efetuadas em sete pontos com tempo de integração de 30 segundos e o procedimento foi repetido três vezes por ponto. A cada repetição da medição a altura do microfone foi alterada. As medições foram realizadas com o microfone a 1,00m, 1,20m e 1,40m de altura, respectivamente. As medições externas foram feitas a 1,50m em três pontos (E1, E2, E3) eqüidistantes e dispostos paralelamente ao painel. As medições externas também tiveram a recorrência de 3 vezes por ponto, todas com o microfone a 1,20m de altura. A fonte sonora utilizada, assim como na câmara onde foi ensaiado o bloco de concreto celular autoclavado, foi o ruído rosa, neste caso localizado a 5,80m do eixo do painel posicionado como na câmara I a uma direção de 45 graus formados com a normal mediatriz do painel. As primeiras medições foram do ruído de fundo, sendo feita duas vezes em cada um dos pontos E1, E2, e E3. As FIGs. 5.3 e 5.4 representam os pontos de medição, as dimensões da câmara e localização da fonte sonora em planta e em corte. Os equipamentos utilizados na medição foram os mesmos utilizados na medição do bloco de concreto celular autoclavado, já descritos anteriormente. As figuras abaixo identificadas 5.3 e 5.4 e FOTO 5.3 representam a planta, o corte e a câmara de ensaio propriamente dita.

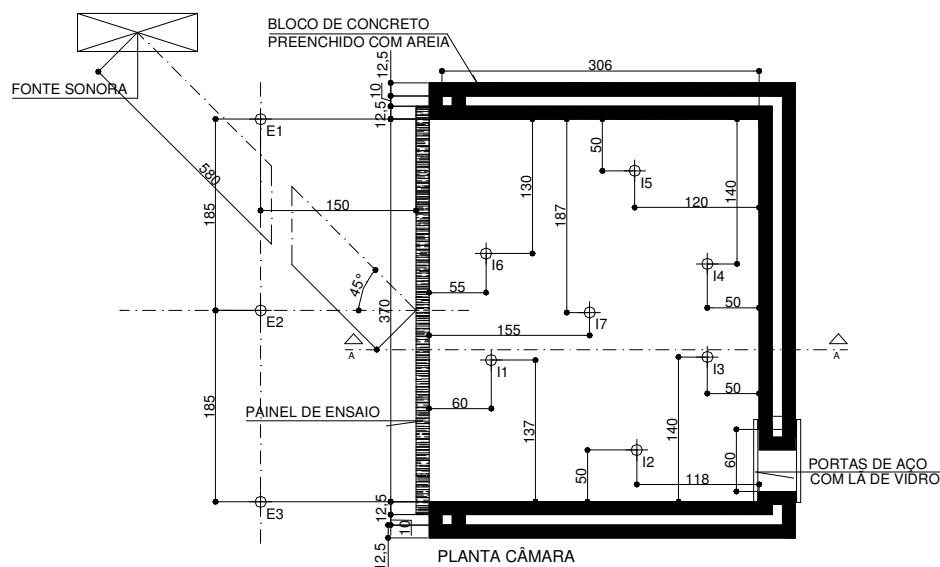


FIGURA 5.3 – Planta da câmara de ensaio II

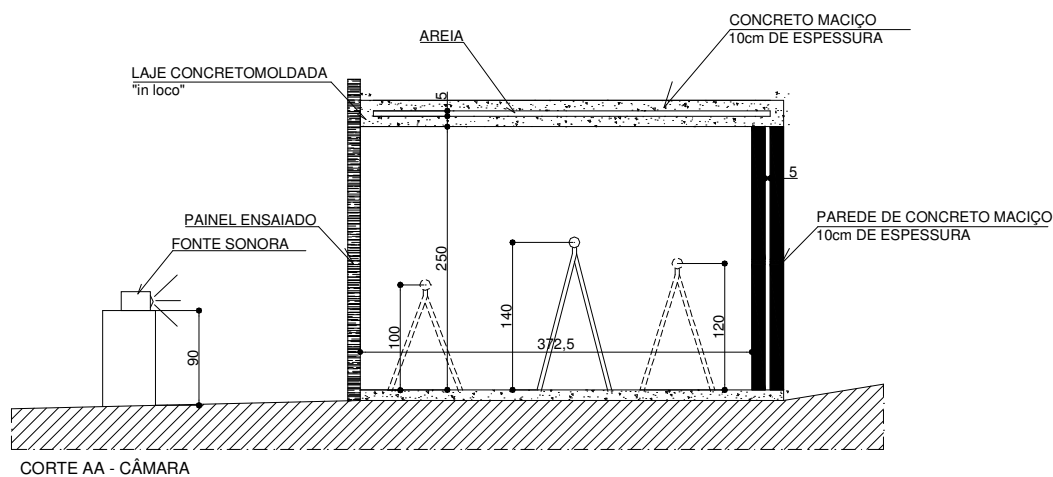


FIGURA 5.4 – Corte AA da câmara de ensaio II/



FOTO 5.3 – Câmara de Ensaio II

Os procedimentos foram realizados conforme a Norma ISO 140/V-1978: *Field measurements of airborne sound insulation between rooms* e o Índice de Redução Sonora Ponderado,  $R_{w45}$ , calculado de acordo com procedimento descrito na Norma ISO 717-1-1996: *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and fo buildings elements*. Assim, é feita uma média dos valores dos níveis de pressão sonora por ponto e

através da Eq. 5.2, extraída da norma ISO 140/V, é calculado o índice de redução sonora.

$$R_{45} = D_1 - D_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ dB} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Onde  $D_1$  é a média aritmética dos níveis de pressão sonora medidos nos pontos externos em dB,  $D_2$ , a média dos níveis de pressão sonora dos pontos internos em dB e o termo em logaritmo é relativo à absorção do ambiente receptor, com T sendo a média dos tempos de reverberação internos em segundos e  $T_0$ , um valor de referência igual a 0,5s. O resultado deste procedimento é um espectro da perda por transmissão por terças de oitava.

A partir dos resultados obtidos no procedimento acima descrito, obtém-se o índice de redução sonora ponderado aparente,  $R_{w45}$ , utilizando-se os procedimentos descritos na ISO 717-1.

A seguir serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios do bloco de concreto celular autoclavado, painel de concreto com miolo de EPS e do painel sanduíche de chapa zincada e EPS, os quais foram realizados como parte das atividades desenvolvidas que resultaram nesta dissertação.

### **5.1- Blocos de concreto celular autoclavado**

O bloco de concreto celular autoclavado utilizado no ensaio possui dimensões de 48 x 28 x 12,5cm. O assentamento é feito pelo sistema de encaixe tipo ‘macho-fêmea’, em todo o perímetro do bloco, sem argamassa. A área ensaiada possui dimensões de 2,75x2,55m, revestida em ambos os lados. A face voltada para a incidência do som foi revestida com argamassa e a face interna revestida com gesso, ambos com espessura de 3mm.

O ensaio foi realizado no dia 19 de março de 2003 das 17:40h às 20:00h, onde a temperatura oscilou de 24 a 29° e a umidade relativa de 59 a 82%. A diferença entre o ruído emissor e do ruído de fundo foi superior a 10dB não necessitando de ajuste na planilha de cálculo.

Terças de bandas de oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
R <sub>w45</sub>	36	35	34	36	37	35	35	39	38	40	44	44	46	52	54	59	59	63	65	68	72

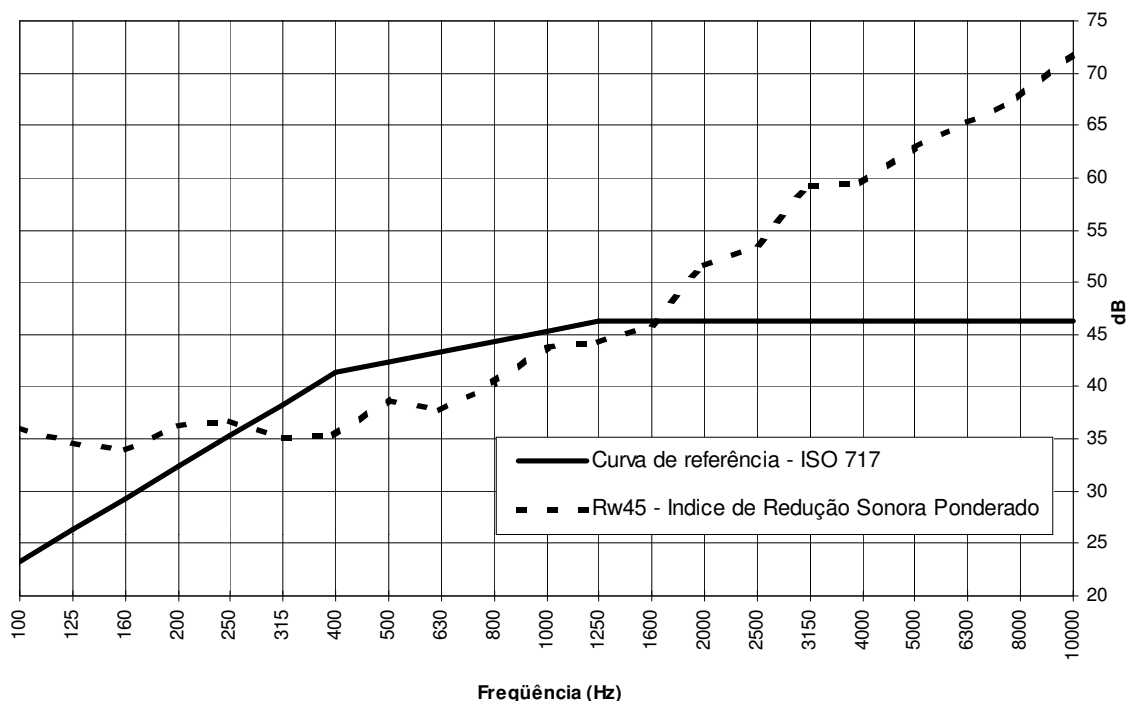


FIGURA 5.5 – Resultado de ensaio do bloco de concreto celular autoclavado

O índice de redução sonora ( $R_{w45}$ ) deste material resultou em 39dB. Significa que uma parede constituída de blocos de concreto celular autoclavado, sem nenhum elemento inserido na sua superfície – uma janela, por exemplo – atende como vedação de uma sala de estar de uma residência que exige um ruído de fundo entre 40 a 50dB(A), desde que o ruído externo não ultrapasse valores de 82 a 92dB(A). Este nível de ruído representa, por exemplo, uma avenida movimentada, ou um rádio caseiro ligado em

volume intenso. Além disso, o isolamento deste bloco, de espessura de 12,5cm é superior ao tijolo cerâmico, tipo “baiano”, com espessura de 9cm (Ver TAB. A1, no Apêndice 1.1). Pode-se concluir que o isolamento do bloco concreto celular autoclavado é compatível com o desempenho requerido por uma habitação popular. Para critérios europeus, norte-americanos, australianos e canadenses este tipo de vedação não atenderia a uma edificação residencial.

Comparando-se este resultado com o ensaio realizado pelo IPT (Anexo 1.4) para parede de blocos de concreto celular autoclavado, observa-se que os resultados são coerentes. O ensaio realizado pelo IPT, de acordo com a norma ISO 140/III, resultou no índice de redução sonora de 41dB, enquanto que o resultado do ensaio realizado para esta dissertação foi de 39dB. A proximidade destes valores, comprova a eficiência do procedimento de ensaio aqui adotado. Além disso, existe uma diferença entre a montagem das duas paredes. A parede ensaiada, apresentada nesta dissertação, é montada por encaixes e rejuntada enquanto que a parede ensaiada pelo IPT é composta de blocos assentados com argamassa.

## **5.2- Painel de concreto com EPS.**

O painel de concreto ensaiado possui 6cm de espessura, sendo duas faces de concreto maciço de 2cm e o miolo em EPS, com 2cm, foi ensaiado em câmara de dimensões de 360x440cm, nos mesmos procedimentos do concreto celular autoclavado. O índice de redução sonora ponderado,  $R_{w45}$ , obtido para este painel foi de 24dB, o que significa um baixo isolamento para um painel de vedação.

Terças de bandas de oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	1000
R <sub>w45</sub>	23	26	22	22	25	23	21	24	17	22	26	23	29	28	29	30	33	37	39	42	45

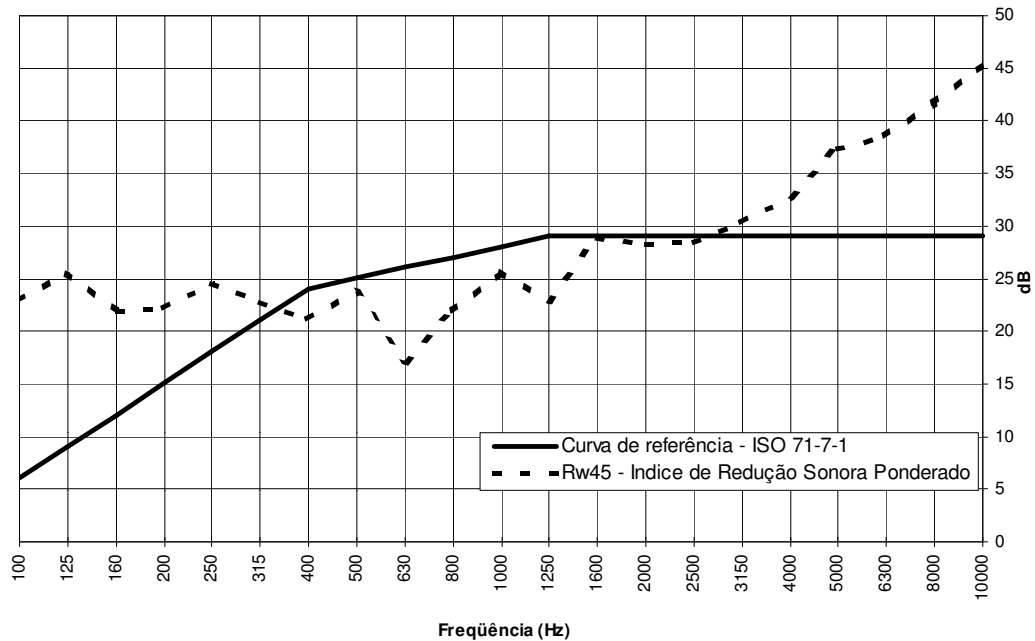


FIGURA 5.6 – Resultado de ensaio do Painel de Concreto de 6cm

### 5.3- Painel de chapa zincada + EPS.

O painel sanduíche formado por duas chapas de aço zincado, espessura de 0,5mm e preenchido internamente por poliestireno expandido, foi ensaiado na câmara com dimensões de 360x440cm. O painel sanduíche de chapa de aço zincado foi ensaiado no dia 15/12/2003, das 12:40 as 13:30hs, com temperatura variando de 34°C e a umidade do ar variou de 40%.

O resultado do índice de redução sonora ponderado, R<sub>w45</sub> do painel sanduíche de chapa zincada resultou em 24dB. Este painel não é, portanto recomendado para vedações em residências.

Terças de bandas de oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
R <sub>w45</sub>	23	26	22	22	25	23	21	24	17	22	26	23	29	28	29	30	33	37	39	42	45

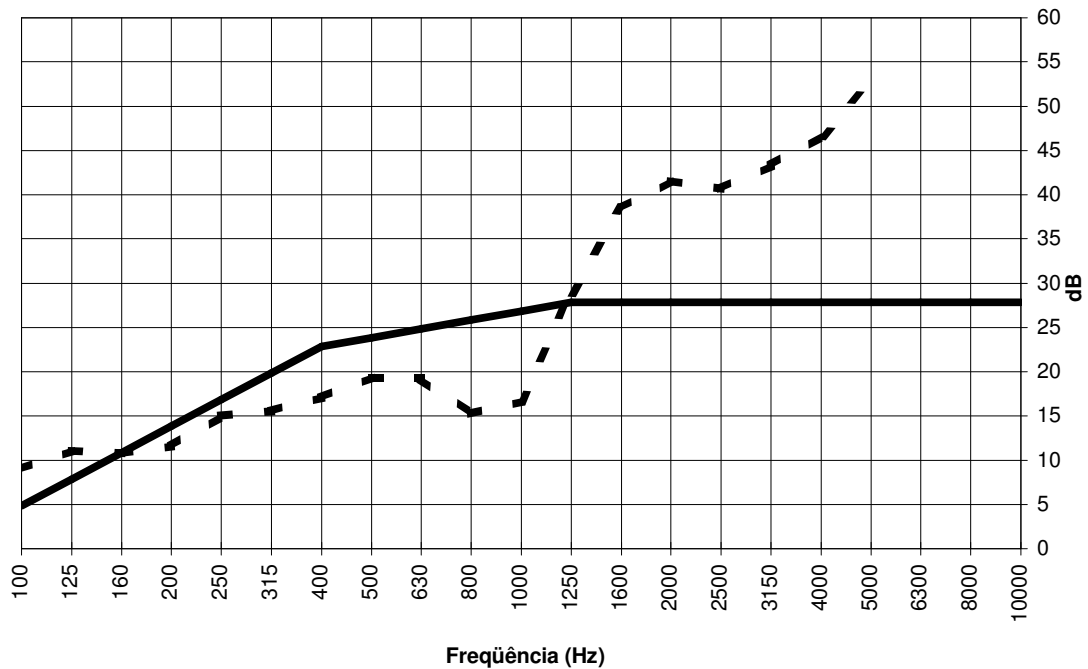


FIGURA 5.7 – Resultado de ensaio do Painele sanduíche de Chapa Zincada+Isopor

#### 5.4- Análise comparativa.

A partir dos resultados de ensaios da perda por transmissão dos elementos divisórios apresentados neste capítulo e dos resultados da perda por transmissão de outros painéis disponíveis na literatura (ver anexo 1), pode-se observar que alguns painéis atendem aos níveis critérios de ruído analisados no Capítulo 4, enquanto outros não atendem aos requisitos mínimos recomendados. Fatores já mencionados nesta dissertação justificam o baixo desempenho de isolamento sonoro como a densidade superficial dos elementos constitutivos dos painéis e a existência de elementos estruturantes que podem estar facilitando a passagem do som. A FIG. 5.8 a seguir, mostra a perda por transmissão dos painéis utilizados neste trabalho.

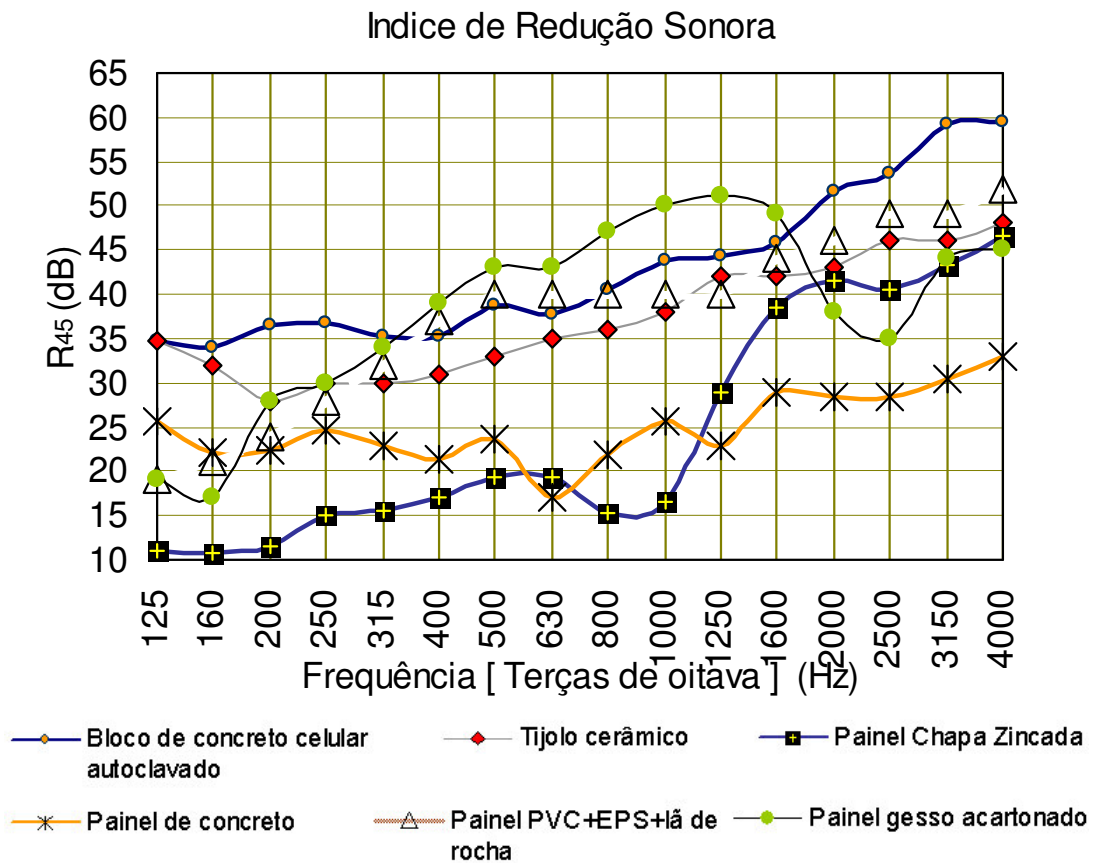


FIGURA 5.8 – Resultado comparativo entre os painéis de vedação estudados.

Os painéis constituídos de bloco de concreto celular autoclavado, tijolo cerâmico, painel de PVC+EPS+lã de rocha e o painel de gesso acartonado podem ser utilizados como elementos de vedação, atendendo aparentemente aos níveis de critério de ruído. Destes, o bloco de concreto celular autoclavado possui melhor desempenho nas baixas e altas frequências (abaixo de 400Hz), enquanto que nas frequências médias, o desempenho é compatível com os outros painéis acima listados. Destes o painel de gesso acartonado, sendo qualitativamente a montagem mais leve destes sistemas, possui melhor desempenho nas frequências de 400 a 1600Hz. O painel de PVC+EPS+lã de rocha também é um elemento de vedação leve e possui bom desempenho acústico. Os painéis sanduíches de concreto e o painel de chapa zincada não atendem aos níveis de critério de ruído propostos neste trabalho e nas normas já relacionadas neste trabalho.

Estes resultados de ensaios demonstram que a perda por transmissão embora possa variar linearmente com o logaritmo da frequência, em alguns trechos também apresenta vales indicando a redução na perda por transmissão em outros trechos. Buscando conformidade com esses resultados, as expressões analíticas extraídas da revisão bibliográfica procuram justificar a tendência das curvas obtidas experimentalmente e que varia em intervalos delimitados pela frequência de ressonância e pela frequência crítica. A faixa de frequências analisadas nas expressões analíticas é a mesma dos resultados experimentais (125 a 4000Hz).

### **5.5- Comparação entre resultados experimentais e modelos analíticos.**

Dos painéis estudados, o tijolo cerâmico furado e o bloco de concreto celular autoclavado serão modelados através das equações de paredes simples propostas por GERGES e CALLISTER. O painel de concreto com miolo de EPS, painel de PVC, lã de rocha e EPS e o painel de chapa zincada e EPS, serão modelados como painéis sanduíches, seguindo o modelo de MOORE. Por último, o painel de gesso acartonado segue o modelo de painéis duplos, combinando as equações para paredes simples de GERGES e de CALLISTER com a de paredes duplas de GERGES.

As características utilizadas para o procedimento numérico foram: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, amortecimento mecânico, densidade superficial e a geometria dos painéis. A partir destas, outras propriedades foram calculadas, como as frequências fundamentais, a frequência crítica e a rigidez a flexão.

#### **5.5.1- Parede de tijolo cerâmico**

Para o painel em blocos de tijolos cerâmicos, na dimensão de 3,70x2,35m, espessura de 0,12m,  $\rho=1900\text{kg/m}^3$ ,  $E= 2,5 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ ,  $\nu=0,19$ , obtêm-se a frequência crítica de 142,14Hz (EQ. 5.5 de CALLISTER) e 149Hz (EQ. 5.4 de KINSLER). A diferença entre os dois modelos de frequência crítica é o termo considerado por CALLISTER, referente ao coeficiente de Poisson ( $\sqrt{1-\nu^2}$ ) que não é contemplado no modelo de KINSLER.

$$f_c = \frac{\sqrt{3}c^2}{\pi h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \tag{Eq. 5.4}$$

$$f_c = \frac{c^2}{\pi h} \sqrt{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E}} \tag{Eq. 5.5}$$

O resultado da perda por transmissão deste painel que possui taxa de amortecimento ( $\eta$ ) igual 0,010 (LARANJA, 2000), está representado na FIG. 5.9 a seguir.

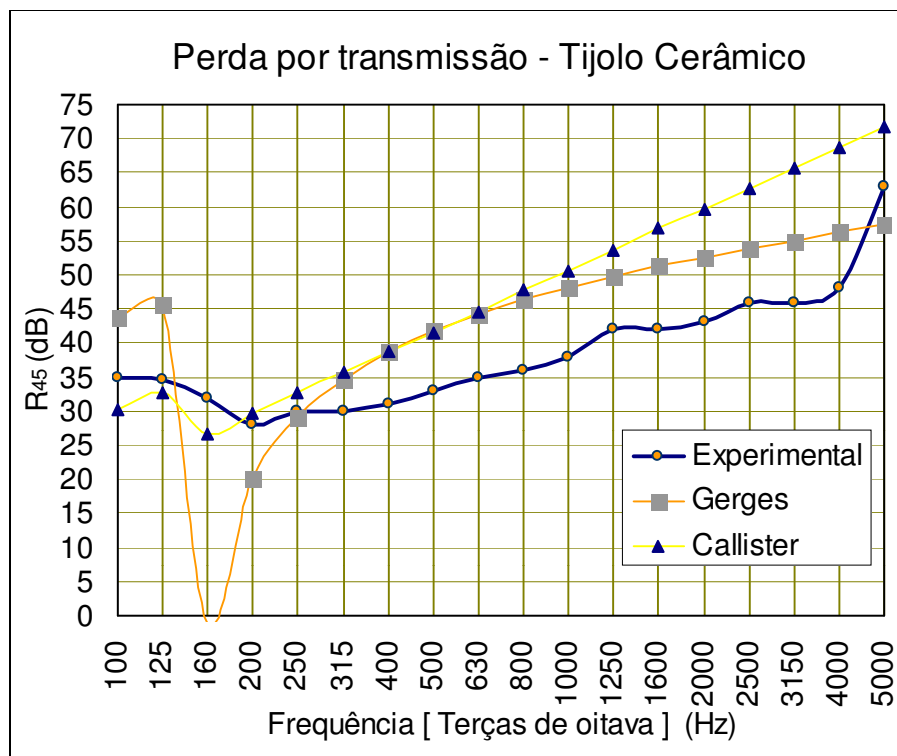


Figura 5.9 – Resultado da perda por transmissão da vedação constituída de tijolo cerâmico.

De acordo o gráfico acima, os resultados das expressões analíticas ficam acima dos obtidos pelo método experimental. Entretanto, a presença da frequência crítica é mais acentuada no modelo de GERGES, reduzindo a perda por transmissão a zero. No modelo proposto por CALLISTER, a queda da perda por transmissão na frequência crítica é compatível com a queda existente no resultado experimental próximo a 200Hz. Como a frequência crítica está localizada nas baixas frequências, o resultado analítico acima desta frequência apresenta comportamento linear. A diferença entre os resultados analíticos e experimentais – 10dB – pode ser oriunda da dificuldade de se obter um

resultado experimental sem a influência de flancos e da adequação da câmara de ensaio. Existe uma coincidência de resultados analíticos entre 315 a 800Hz, que estão aproximadamente 8 a 10dB acima do experimental, entretanto as variações – aumento da perda por transmissão com a frequência – são correspondentes. O resultado experimental apresenta uma pequena redução em torno 4000Hz e conseqüente aumento de forma mais acentuada que nas frequências abaixo de 4000Hz. De acordo com KINSLER, GERGES e FAHY, acima da frequência crítica a perda por transmissão aumenta de forma mais acentuada que nas frequências acima desta – em torno de 18dB – o que não ocorre neste caso acima de 200Hz, mas acima de 4000Hz. Apesar disso, a coincidência da região onde se localiza a frequência crítica calculada a partir de equação de GERGES e CALLISTER e uma queda na perda por transmissão do resultado experimental é um indicativo positivo para este caso.

#### 5.5.2- Parede de bloco de concreto celular autoclavado

Na simulação da perda por transmissão da vedação composta de blocos de concreto celular autoclavado, com 12,5cm de espessura, densidade superficial de  $56,5\text{kg/m}^2$ ,  $E=1,7 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ ,  $\eta=0,015$ , a frequência crítica resultou em 84Hz tanto pela equação de CALLISTER quanto pela equação de KINSLER. Para o cálculo da perda por transmissão foi utilizada a taxa de amortecimento ( $\eta$ ) de 0,015.

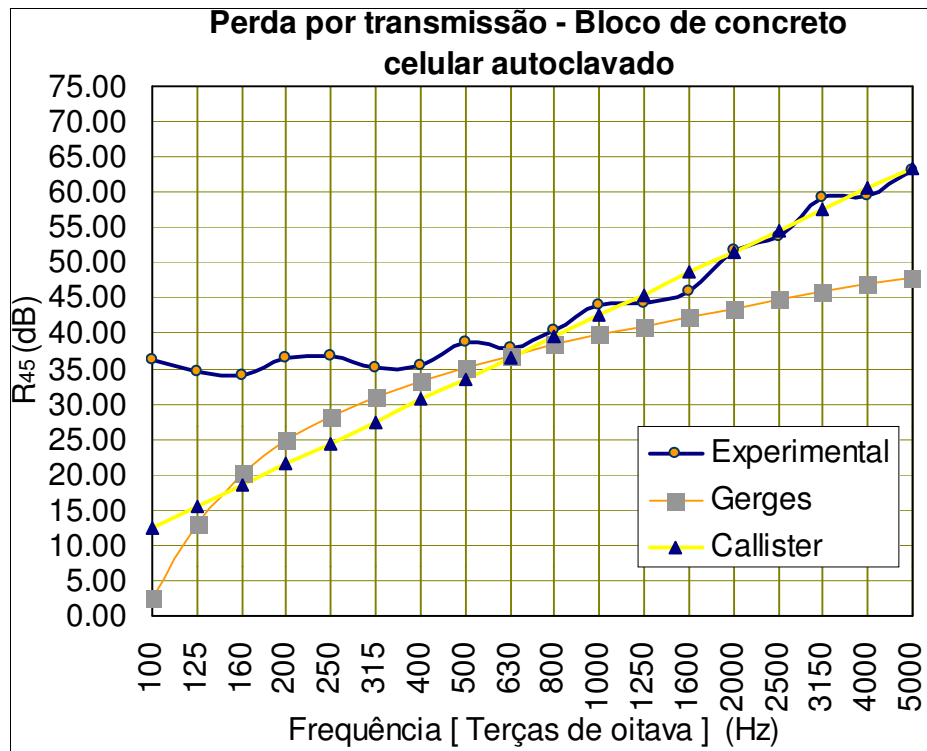


Figura 5.10 – Resultado da perda por transmissão da vedação constituída de blocos de concreto celular autoclavado.

Observa-se no gráfico apresentado na FIG. 5.10 uma aproximação maior entre as expressões propostas por CALLISTER e o procedimento experimental nas frequências acima de 500Hz. Abaixo desta frequência as equações propostas por GERGES e CALLISTER apresentam resultados compatíveis entre si, mas que não se aproximam do experimental, estando estes abaixo dos experimentais. O fato de apresentar a frequência crítica baixa (84Hz) faz com que as equações utilizadas sejam a de CREMER, proposta no trabalho de CALLISTER (EQ.2.22) e a equação proposta por GERGES acima da coincidência onde a rigidez à flexão e os ângulos de coincidência possuem maior influência que a densidade superficial. O espectro sonoro do procedimento experimental não apresenta um ponto de queda da perda por transmissão que se destaque, já que existe mais de um momento em que isso ocorre – 160, 400, 630 Hz – , ao ponto que a redução da perda por transmissão a 630Hz precede um aumento da mesma nas frequências acima desta, sugerindo que esta seja a frequência crítica. Outra observação que pode indicar este valor da frequência crítica (630Hz) como o real, é que a partir desta o espectro sonoro proveniente das equações de CALLISTER se aproxima muito

do experimental. A equação utilizada é a sugerida por este autor para frequências acima da frequência crítica, o que indica que a partir desta frequência o bloco de concreto celular autoclavado se comporta como se estivesse realmente acima da frequência crítica.

### 5.5.3- Painel de PVC+EPS+Lã de rocha

Conforme já dito no início desta seção a perda por transmissão do painel composto de PVC+EPS+Lã de Rocha foi calculada a partir das equações de MOORE, descritas anteriormente. Para tal, utilizou-se o módulo de elasticidade do EPS, de  $2,28 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$ , a densidade de  $1500 \text{ kg/m}^3$ , o coeficiente de Poisson, de 0,33, além da espessura da camada de EPS, de 0,025m. Da face interna, constituída de lã de rocha foram utilizados os mesmos parâmetros para o cálculo que tinham os seguintes valores: módulo de elasticidade  $12,24 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , densidade de  $64 \text{ kg/m}^3$ , o coeficiente de Poisson de 0,19 e a espessura da camada de 0,04m. Para este procedimento foi desconsiderada a trama de madeira que estrutura o painel e a lâmina de PVC que reveste o mesmo.

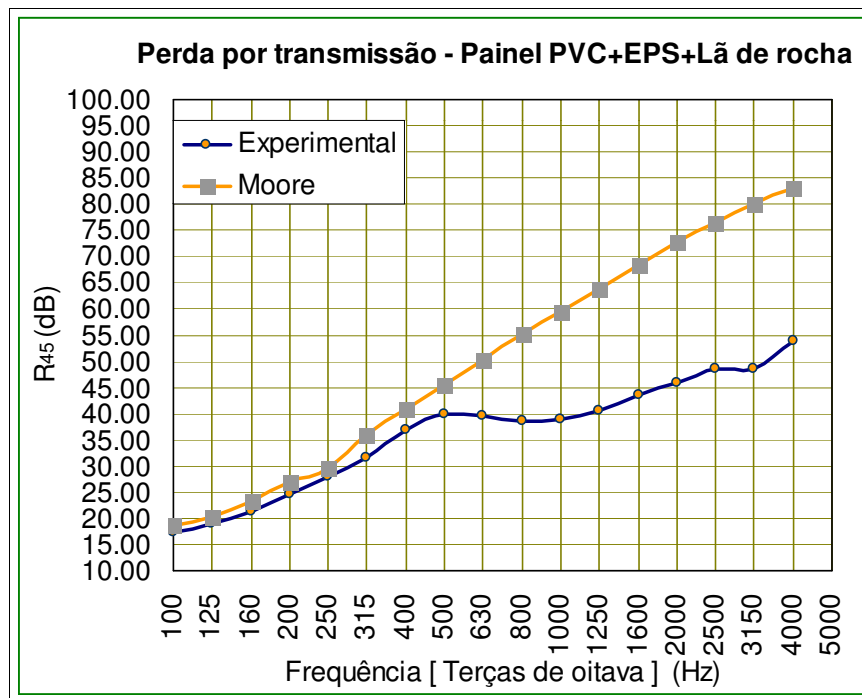


FIGURA 5.11 – Resultado comparativo da perda por transmissão do painel constituído de PVC+EPS+lã de rocha.

Pode-se observar, a partir do gráfico acima que uma aproximação entre o modelo experimental e o analítico nas baixas frequências até os 500Hz. A partir desta frequência o resultado do procedimento analítico possui uma diferença muito grande com o experimental. A perda por transmissão resultante do procedimento analítico é superior ao resultado experimental nas altas frequências. As simplificações feitas para o cálculo a partir da equação de MOORE, pode ser um dos motivos da discrepância existente entre os resultados das perdas por transmissão.

#### 5.5.4- Painel de concreto com miolo em EPS

Outro painel sanduíche aqui apresentado é o painel de concreto com miolo de EPS. Este elemento divisório apresenta as três camadas componentes de espessuras iguais. As expressões analíticas para painéis sanduíches parte do pressuposto que as placas das faces externas são menos espessas se comparadas com o núcleo. Tendo em vista a dificuldade de se encontrar expressões analíticas para este tipo de painel foi utilizado o mesmo modelo de MOORE e analisado o comportamento da mesma placa caso fosse composta apenas de uma camada de 6cm de concreto, a partir das equações utilizadas para paredes simples.

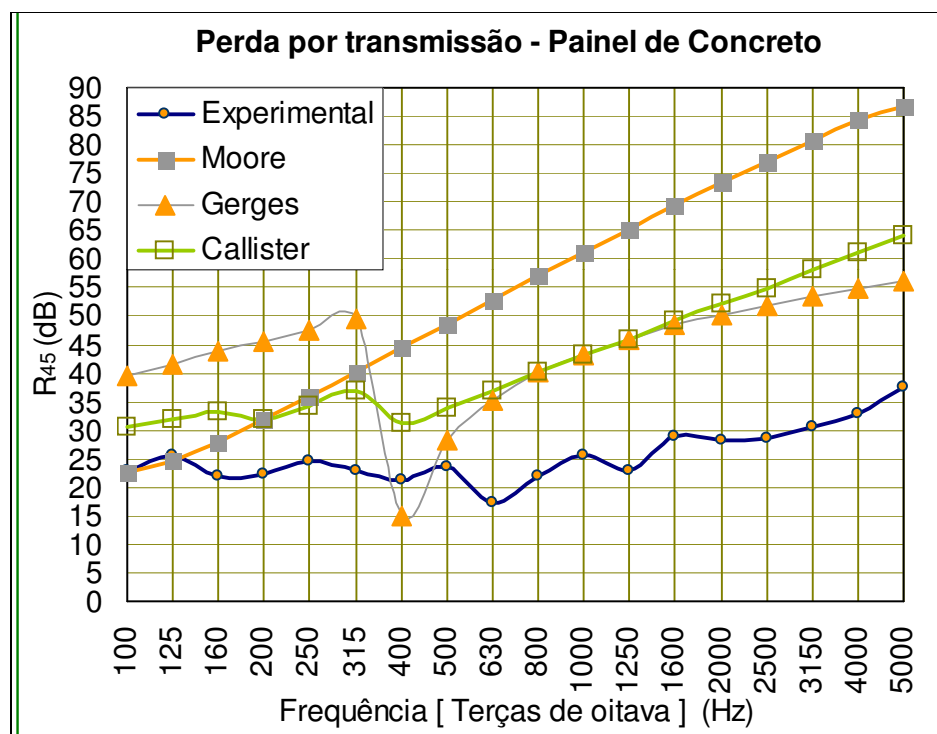


Figura 5.12 – Resultado comparativo da perda por transmissão do painel concreto+EPS

O resultado desta simulação, apresentado no gráfico da FIG. 5.12, indica que existe uma discrepância entre a solução analítica de MOORE (painel sanduíche) e o resultado experimental. Mais uma vez a perda por transmissão resultante da equação de MOORE e do resultado experimental, apenas se aproximaram nas baixas frequências. Neste caso esta aproximação ocorreu nas frequências de 100 e 125Hz e acima destas frequências houve uma diferença muito maior entre os resultados da perda por transmissão. Avaliando os resultados das expressões analíticas para paredes simples, sugerindo um painel maciço de concreto, era de se esperar que o resultado numérico fosse superior ao experimental. Entretanto pode-se observar que a variação da perda por transmissão com o aumento da frequência correspondeu ao resultado experimental. A queda na perda por transmissão, que nas equações de CALLISTER e GERGES ficou próxima de 400Hz, no resultado experimental é possível observar uma queda próxima de 630Hz. Pode-se dizer que para este modelo de painel divisório a comparação dos resultados não foi satisfatória.

### 5.5.5- Painel de EPS+chapa zincada

Para finalizar, o painel composto de EPS e revestido de chapa zincada também foi avaliado através da equação para painéis sanduíches e das equações para painéis simples. Neste caso o núcleo do painel, constituído de EPS, corresponde a maior parcela da espessura do sistema e as chapas de aço zincado possuem 0,50mm de espessura. Tendo em vista esta diferença propõe-se considerar o painel como uma camada simples.

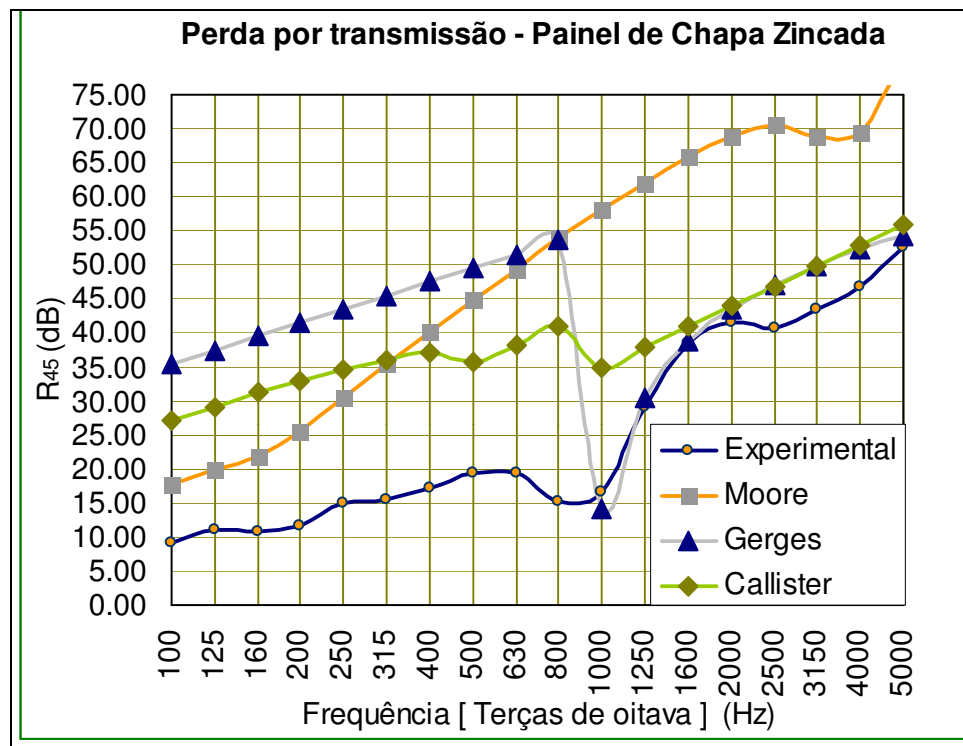


Figura 5.13 – Resultado comparativo da perda por transmissão do painel de EPS revestido de chapa zincada

O resultado deste gráfico não identifica nenhuma das curvas como a que seja mais adequada a este modelo de elemento divisório. Porém, pode-se perceber que existe uma aproximação entre a frequência dita “crítica” expressa nas equações de CALLISTER e GERGES e uma queda existente na perda por transmissão medida experimentalmente. Abaixo da frequência crítica o modelo de painel sanduíche se aproxima mais do experimental, mas existe ainda uma diferença na perda por transmissão. Acima da

frequência crítica os modelos de paredes simples se aproximam bastante do experimental.

Para painéis simples e duplos espaçados com uma camada de ar interna foi possível observar uma boa concordância entre as expressões analíticas e propostas por CALLISTER e GERGES e os resultados experimentais. Entretanto, para painéis sanduíche os resultados experimentais não se aproximam satisfatoriamente das expressões analíticas disponíveis na literatura pesquisada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Sendo assim, sugere-se que sejam investigados outros modelos de predição de perda por transmissão em painéis sanduíches, visto que esta tipologia construtiva vêm sendo frequentemente utilizada na construção civil.

As aproximações entre resultados experimentais e analíticos mostram que as expressões não podem ser utilizadas como únicos indicativos da perda por transmissão destes elementos, tornando-se necessário o procedimento “in situ” para determinar o isolamento sonoro do sistema construtivo. Mesmo os resultados experimentais devem ser questionados, já que a construção do elemento ensaiado junto à edificação pode mudar completamente a condição de isolamento sonoro deste elemento. Para garantir com confiabilidade qual o isolamento sonoro que o elemento construtivo desempenha junto a uma montagem específica é realmente necessário ensaiar as condições construtivas de montagem e interações entre o elemento em questão e os elementos adjacentes como janelas, portas e estrutura, por exemplo.

# 6

## Considerações Finais e Conclusões

Buscou-se com este trabalho, discutir a questão do isolamento do ruído aéreo, considerando que estão sendo criadas normas de desempenho das edificações que contemplem vários critérios a serem atendidos, dentre eles o desempenho acústico. Acredita-se que, para a criação de critérios de isolamento sonoro a serem atendidos pelas edificações residenciais, é necessário, a priori, conhecer a fundo a resposta da população brasileira aos diversos níveis de ruído e de isolamento acústico. Esta resposta só é conseguida através de uma pesquisa *in loco* sobre os valores do isolamento dos elementos divisórios e os níveis de ruído de fundo proporcionados por este isolamento.

Além disso, os critérios de isolamento sonoro devem contemplar todo o sistema construtivo, garantindo os níveis de ruído de fundo recomendados pela NBR 10152 e considerando todos os possíveis flancos existentes na edificação, não observando apenas o índice de redução sonora de cada elemento isolado.

Através deste trabalho, principalmente no capítulo 6 é possível constatar que a determinação da perda por transmissão dos elementos construtivos não é uma tarefa simples. No método experimental é exigido o uso de aparelhagem e câmaras de ensaio

específicas, levando um “tempo considerável” para a montagem e realização dos ensaios. No procedimento analítico é necessário a determinação apropriada do modelo numérico a ser seguido ou dos modelos a serem utilizados. Tendo em vista os cuidados que devem ser tomados para a realização de ensaios e ainda assim, não é conseguida uma aproximação razoável com o método analítico, a determinação da perda por transmissão de elementos divisórios através de equações pode resultar em uma diferença grosseira entre o isolamento real e o previsto.

As diferenças entre os resultados dos procedimentos analíticos e experimentais demonstram a dificuldade em prever o isolamento de um componente construtivo através de equações. Em nenhuma das equações estão contempladas os possíveis flancos, que, como já foi dito anteriormente, reduzem muito o isolamento do elemento analisado. Entretanto, algumas aproximações positivas como a comparação de resultados experimentais e analíticos do bloco de concreto celular autoclavado por exemplo, demonstram que estas expressões podem ser um indicativo do comportamento do isolamento sonoro de alguns elementos como os de constituição de uma camada maciça.

A complexidade dos elementos divisórios, tornando os painéis leves e de pouca espessura, e geralmente compostos de mais de um material ou com elementos estruturantes torna o processo analítico da perda por transmissão também uma tarefa complexa. Os resultados comparativos do capítulo 5 para painéis sanduíches, demonstram que as equações pesquisadas para este tipo de material não podem ser utilizadas para prever o isolamento bem como indicar o comportamento de isolamento sonoro destes painéis. Para tal é necessário que desenvolver equações que contemplem a complexidade compositiva dos elementos divisórios, como o que ocorre no cálculo da perda por transmissão baseada em simulações numéricas fundamentadas em Análise Estatística de Energia, estudada atualmente por alguns autores como, por exemplo CRAIK.

Mesmo que não possam ser utilizados como única forma de se prever o isolamento sonoro de elementos construtivos, estas equações podem ser utilizadas para avaliar a

tendência do espectro sonoro do isolamento. Neste caso, as equações apresentadas neste trabalho para prever a perda por transmissão de painéis simples e painéis duplos com camada de ar interna podem ser utilizadas. A previsão de isolamento sonoro de painéis compostos de camadas de diferentes materiais, designado aqui como sanduíches, não podem seguir equações utilizadas neste trabalho, necessitando, como já foi dito, de uma pesquisa mais aprofundada.

A isolação sonora de alguns dos elementos aqui estudados, conforme dito no Capítulo 5 atende a algumas condições de isolamento requerido, já propostas no projeto de norma em andamento (CE: 02.136.001). Entretanto estes elementos devem ser considerados em conjunto com portas e janelas, que reduzem o isolamento e, a partir daí, não atendem mais às recomendações de índices de isolamento sonoro. Alguns elementos não atendem ao isolamento quando utilizados isolados, como o painel sanduíche de concreto e isopor. Além disso os índices propostos no projeto de norma devem ser avaliados junto às outras normas de conforto acústico de edificações existentes no Brasil e se basear em pesquisas científicas específicas sobre o isolamento sonoro junto às edificações brasileiras.

Tendo em vista o acima citado e o desenvolvimento de uma norma que contemple os critérios de isolamento sonoro, é importante que sejam agregadas informações sobre os materiais de possível utilização na isolação sonora, como já é feito em outros países. Fabricantes de painéis de vedação disponibilizam manuais contendo os resultados de ensaios de isolação sonora, executados por órgãos competentes nesta tarefa. O trabalho do *Boral Australian Gypsum* (PLASTERBOARD BUILDINGS SYSTEMS, 2003), apresentado no Capítulo 5, é um exemplo desta prática na Austrália. Neste documento são apresentados os valores da perda por transmissão para várias composições de painéis de gesso acartonado, ensaiados em um órgão de pesquisa de credibilidade naquele país. Apesar de resultados de laboratórios muitas vezes não corresponderem ao real desempenho de isolamento sonoro dos elementos “in situ”, servem de indicativo para a especificação de materiais compatíveis com o isolamento requerido em cada situação. Como o isolamento sonoro pode ser reduzido pela forma de execução do

painel junto à edificação em si, destaca-se a importância de acompanhar a execução, garantindo um resultado real compatível com o especificado em projeto.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se que seja feita uma avaliação analítica mais aprofundada dos modelos de painéis aqui apresentados, considerando os elementos estruturantes do próprio painel. Além disso seria interessante proceder o ensaio dos elementos de vedação da forma como são montados. À medida que se conhece o índice de isolamento sonoro do elemento em separado, torna-se importante prever a redução deste isolamento devido às suas diversas montagens, sejam elas junto à estrutura metálica ou aos outros tipos de estruturas.

Para alguns sistemas de vedação é imprescindível que no procedimento analítico sejam considerados os caminhos alternativos do som, como os painéis de gesso acartonado e o sistema “Steel Framing”, onde existem tramas metálicas no interior das placas de vedação que se repetem a aproximadamente 60cm além do miolo em lã de vidro ou lã de rocha. Sugere-se, portanto a análise aprofundada destes sistemas que estão sendo inseridos no mercado da construção civil recentemente. Neste contexto, a verificação do isolamento sonoro “in situ” torna-se necessária e imprescindível, enquanto o procedimento construtivo ainda não está padronizado no Brasil. Estes ensaios “in situ” podem ser utilizados para identificar as boas e más práticas construtivas e, assim, contribuir para a elaboração de manuais técnicos de construção civil que contribuam para a qualidade final da edificação.

Além disso, sugere-se o aprofundamento da análise dos critérios de isolamento sonoro partindo do princípio apresentado no Capítulo 1 desta dissertação (ruído externo – ruído de fundo = isolamento requerido) e aprofundado na análise do Capítulo 5. Para isso seria estudado o espectro sonoro de alguns tipos de ruído comuns como ruído de tráfego, pessoas falando alto, rádio caseiro ligado alto, e comparado com as curvas NC para obter o comportamento de isolamento sonora que o material isolante deve possuir. Propõe-se que seja feito um levantamento dos níveis sonoros de ambientes emissores de edificações, e através deste levantamento seja criado um banco de dados, tratado estatisticamente para a referência da condição brasileira.

Outra possibilidade já citada é a pesquisa em campo acerca dos níveis de isolamento sonoro percebidos pela população e seus níveis de aceitação. Um trabalho semelhante foi realizado no Canadá por BRADLEY(2002) e a metodologia poderia ser estudada e talvez aplicada ao Brasil.

Tendo em vista as considerações feitas acima, espera-se que este trabalho contribua para o desenvolvimento do estudo do desempenho de sistemas construtivos, sobretudo sob o ponto de vista do isolamento sonoro e que seja uma referência para o estudo e desenvolvimento do isolamento sonoro de elementos construtivos tanto para a comunidade acadêmica quanto para fabricantes e especificadores em geral.

# 8

## Referências Bibliográficas

<<http://www.casafacilgerdau.com.br/casafacil.asp>>. Acesso em: 12 jun. 2004.

<<http://www.cidades.gov.br/pbqp-h/objetivos.htm>> Acesso em: 12 jun. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Níveis de ruído para o conforto acústico. 1987. (NBR – 10152).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Norma CB 02: 136.01.001. Desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos – Parte 1: Requisitos gerais. (2004).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Norma CB 02: 136.01.004. Desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos – Parte 4: Fachadas e paredes internas. (2004).

ASTM E 413. *Classification E413-87 (1999) Standard Classification for Rating Sound Insulation,* American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA. 1999.

BARING, João Gualberto de A. *O desempenho acústico de caixilhos de fachada no contexto da poluição sonora urbana*. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, 1990, 210p. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo USP, São Paulo, 1990.

BERANEK, L.L.; WORK, G. A. Sound transmission through multiples structures containing flexible blankets. *Journal of the Acoustical of American*. n.21, p. 419-428.

BRAGANÇA, L.; SILVA, F. C. Comparação entre modelos de previsão de isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos construtivos. Revista: *Engenharia Civil UM: Minho*, 2000. n.8, p.5-19.

BRADLEY, J. S. Critério aceitável de isolamento sonora de parede-meia. *Revista Sobrac*. UFSC: Santa Catarina. p. 26-28. 2002. Texto traduzido por Fernando Henrique Aidar. Extraído da publicação: NRCC-45177, *National Reasearch Council Canadá*. Acceptable party wall sound insulation criteria.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Paredes de gesso acartonado. *Requisitos para financiamento pela Caixa*. CEF: 2002. 26p.

CALLISTER, J.R; GEORGE, A.R.; FREEMAN, G. E. An empirical scheme to predict the sound transmission of single thickness panels. *Journal of Sound and Vibration*. n. 222(1), p. 145-151, 1999.

CAVANAUGH, W. J. *Architectural Acoustics*. John Wiley & Sons Inc., 1999.

CHRISLER, V. L. Measurement of sound transmission. *Journal of Acoustics Society of America*. V.1, n.2 p. 175-180. jan. 1930.

COELHO, Roberto A. *Sistema construtivo integrado em estrutura metálica*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, UFMG, 2003 156p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas UFMG, Belo Horizonte, 2003.

COSTA, U. S.; SOUZA, H. A.; NEVES, F. A. Avaliação Comparativa do desempenho acústico de painéis de vedação pré-fabricados. In: *VI Encontro Nacional e III Encontro Latino Americano sobre o Conforto no Ambiente Construído*. São Pedro, 2001.

CRAIG, Roy R. Jr. *Structural Dynamics*. Ed. John Wiley&Sons: Nova York. 1981. 527p.

CRAIK, R.J.M.; SMITH, R. S. Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: airborne sound. *Applied Acoustics*. n. 61, p.223-245. 2000.

CRAIK, R. J. M. *Sound transmission through buildings using statistical energy analysis*. Ed. Gower: Hampshire. 1996. 261 p.

CREMER, L. *Theorie de Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall*. Akust. Z. 81-102. 1942

DYM, Clive L.; LANG, Mark A. Transmission loss through sandwich panels. *Journal of Acoustics Society of America*. V.56, n.5 p. 1523-1532. nov. 1974.

EGAN, M. D. *Architectural Acoustics*. New York, Mc Graw-Hill, 1972. 411p.

ELHAJJ, N. P. E. *Light Steel Frame Housing. Review of Fire and Acoustic Performance*. Upper Marlboro, NAHB Research Center, Inc. 2002. 344p.

FAHY, Frank; WALKER, John. *Fundamentals of noise and vibration*. Londres: E&FN Spon.1998. 518p.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. CENTRO DE ESTATÍSTICA E INFORMAÇÕES. **Déficit habitacional no Brasil 2000**. Belo Horizonte: Rona Editora, 2000. 200p.

GERGES, Samir, N.Y. *Ruído: fundamentos e controle*. NR Editora: Florianópolis. 2000. 600p.

GYERKE, Henning E. Von; ELDRED, Kenneth Mck. Efeitos do ruído no homem. *Noise and News International*. Junho 1993. Traduzido por: AIDAR, Fernando H. Efeitos do ruído no homem. *Revista Acústica e Vibrações*. Sobrac: Florianópolis. N.19, p.1-29. Jul, 1997.

GUY, R. W. The response of a cavity backed panel to external airborne excitation: A general analysis. *Journal of Acoustical Society of America*. V. 65, n. 3, p. 719-731. mar, 1979.

HARRIS, C.M. *Noise control in buildings*. New York, Mc Graw-Hill, 1994.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Crerios Mínicos de Desempenho para Habitações Térreas de Interesse Social*. IPT: São Paulo.1998.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Medição em laboratório das isolações sonoras de componentes construtivos: parede de tijolo cerâmico furado ("tijolo baiano")*. IPT. Divisão de edificações. Núcleo de estudos de acústica. 0300.200. F. 020.F.01. 22/11/82.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Buildings Elements – Part III: Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation between rooms*. ISO-140/3.1978.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Buildings Elements – Part IV: Field Measurements of Airborne Sound Insulation between rooms*. ISO-140/4.1978.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Acoustics – Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Buildings Elements – Part V: Field Measurements of Airborne Sound Insulation of facades elements and facades*. ISO-140/5.1978.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Acoustics – Measurement of Sound Absorption in a reverberation room*. ISO-354.1978.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings elements – Part 1: Airborne sound insulation*. ISO 717/1. 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Acoustics – Field and measurement of airborne and impact sound insulation and of equipment sound – Survey method*. ISO/DIS 10052. 2001.

JONES, Robert. E. Effects of flanking and test environment on lab-field correlations of airborne sound insulation. *Journal of Acoustics Society of America*. V.57, n. 5, p. 1138-1149. mai. 1975.

KINSLER, Lawrence E.; FREY, Austin R.; COPPENS, Allan B.; SANDERS, James V. *Fundamental of Acoustics*. John Wiley & Sons: Nova York, 1982. 480p.

KRUGGER, P. G. *Análise de painéis de vedação nas edificações em estrutura metálica*. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2000.

LAFARGE GYPSUM. Catálogo de produtos. 1999.

LANG, Mark A.; DYM, Clive L. Optimal acoustic design of sandwich panels. *Journal of Acoustics Society of America*. V. 57, n. 6, parte II, p. 1480-1487. 1975.

LARANJA, R.A.C. *Métodos e modelos de predição da redução sonora por paredes e atenuação por barreiras*. Dissertação, M. Eng., PROMEC – UFRGS, 2000.

LJUNGGREN, Sten. Airborne sound insulation in thin walls. *Journal of Acoustical Society of America*. n. 89 (5), p.2324-2337, mai, 1991.

LONDON, A. *Journal of Acoustics Society of America*. n. 22, p. 270-279. 1950.

MAKRIS, Spilios E.; DYM, Clive L.; SMITH, MacGregory. Transmission loss optimization in acoustics sandwich panels. *Journal of Acoustics Society of America*. V.79, n. 6, p. 1833-1843. jun. 1986.

MITIDIERI FILHO, C. V. Paredes em chapas de gesso acartonado. *Techné*, São Paulo: Ed.Pini. n.30, p.65-70. 1997.

MOORE, J.A., LYON, R.H. Sound transmission loss characteristics of sandwich panel construction. *Journal of Acoustics Society of America*. n. 89 (2), p. 777-791. fev. 1991.

Morada popular em kit metálico. *Techné*, São Paulo: Ed.Pini. n.54, set. 2001.

MORREAU, C. J. The insulation of airborne sound the application of laboratory results to practical buildings problems. *Journal of Acoustics Society of America*. V.10, p. 45-49. jul. 1938.

MULHOLLAND, K. A.; PRICE, A. J.; PARBROOK, H. D. Transmission loss of multiple panels in a random incidence field. *Journal of Acoustics Society of America*. V.43, n. 6, p. 1432-1435. jul. 1967.

NASCIMENTO, Otávio Luís do. *Manual da Construção em Aço – Alvenarias*. CBCA 52p. 2002.

Notas de aula do Professor Francisco Carlos Rodrigues. Perfis formados a frio: comportamento e dimensionamento. Departamento de Engenharia de Estruturas. UFMG.

OSIPOV, A.; MEES, P.; VERMEIR, G. Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings. *Applied Acoustics*. V.52, n.3/4, p.273-288. 1997.

PAIXÃO, Dinara Xavier da; GERGES, Samir N. Y. Isolamento Acústico: Frequência crítica em alvenaria de tijolo cerâmico. In: *I Conferência latino-americana de construção sustentável e X Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído*. São Paulo, 2004.

PAIXÃO, Dinara Xavier da; GERGES, Samir N. Y. Perda de transmissão sonora em alvenaria de tijolo maciço cerâmico. In: *VII Encontro Nacional e IV Encontro Latino Americano sobre o Conforto no Ambiente Construído*. Curitiba, 2003.

PEREIRA, T. A. C. *Avaliação do desempenho de sistemas racionalizados de vedação para edifícios com estruturas metálicas*. Dissertação de Mestrado. UFES.2001.

*Plasterboard Buildings Systems. Acoustical Selector.* Boral Australian Gypsum. Melbourne. 2003. 60p.

PRICE, A. J.; CROCKER, M.J. Sound Transmission through double panels using statistical energy analysis. *Journal of Acoustical Society of America.* V. 47, n. 3 (parte 1), p. 684-693. 1970.

PIERCE, Allan D. *An introduction to its physical principles and applications.* Ed: Acoustical Society of America. New York. 1994. 678p.

PRECON. Catálogo de produtos. 1999.

QUIRT, J. D. Sound Transmission through windows. I: single and double glazing. *Journal of Acoustics Society of America.* V. 72, n. 3, p. 834-844. set. 1982.

SEWELL, E. C. Transmission of sound transmission through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. *Journal of Sound and Vibration* n.12, p. 21-32. 1970.

SHARP, B. H. Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering.* n. 11, p. 53-73, 1978.

SICAL. Sistema Construtivo Sical em Bloco de Concreto Celular Autoclavado, Belo Horizonte. (Catálogo de Produtos). 1999

SILVA, Maristela Gomes da.; SILVA, Vanessa Gomes da. *Manual da Construção em Aço – Painéis de Vedação.* CBCA 59p. 2002.

SIMOLENSKI, C. P.; KROKOSKY, E. M. Dilational mode sound transmission in sandwich panels. *Journal of Acoustics Society of America.* V. 54, n. 6, p. 1449-1457. 1973.

SIPOREX.. Painéis divisórios. Ribeirão Pires. Catálogo de produtos. 1999

TAIBO, Lucia N.; DAYAN, Hilda Glasserman. Simplified technique for the evaluation of airborne sound insulation in buildings. *Journal of Acoustics Society of America.* V.72, n. 2, p. 449-459. ago. 1982.

Presentación. REVISTA TECTONICA. ATC Ediciones, SL: Madrid. n.14, p.1. 1995.

USIMINAS - "Revista USITETO", Gerência de Desenvolvimento da Aplicação do Aço – DGA, Usiminas.

WATERHOUSE, Richard V. On standard methods of measurement in architectural acoustics. *Journal of Acoustics Society of America*. V. 29, n. 5, p. 544-547. mai. 1957.

WOODCOCK, Roland; NICOLAS, Jean. A generalized model for predicting the sound transmission properties of a generally orthotropic plates with arbitrary boundary conditions. *Journal of Acoustics Society of America*. V.92, n. 2, p. 1099-1112. fev. 1995.

# 9

## Anexos

### Anexo 1

Neste anexo seguem os resultados de ensaios da perda por transmissão, disponibilizados por Centros de Pesquisa e utilizados nesta dissertação.

#### 1- Perda por transmissão do tijolo cerâmico.

Laboratório: IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas).

Descrição: o bloco de tijolo cerâmico furado tipo “baiano” espessura de 9 cm, assentada “em pé”, 1,5cm de reboco apresentou índice de redução sonora ( $R_w$ ) de 38dB.

TABELA A.1 – Valores da perda por transmissão do tijolo cerâmico furado

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$R_{45}$	35	35	32	28	30	30	31	33	35	36	38	42	42	43	46	46	48	63

#### 2- Perda por transmissão de painel em gesso acartonado

Laboratório: Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT)

Descrição: O painel de gesso acartonado estudado possui duas placas de gesso de 16mm com perfil de 64mm, totalizando uma vedação de 96mm de espessura. As juntas entre os painéis são seladas para que não ocorram flancos pela divisória.

TABELA A.2 – Valores da perda por transmissão do painel de gesso acartonado (Boral Australian Gypsum, 2003)

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R <sub>45</sub>	16	19	17	28	30	34	39	43	43	47	50	51	49	38	35	44	45	52

### 3- Perda por transmissão do painel de PVC+EPS+Lã de rocha

Laboratório: Laboratório de Materiais de Construção Civil – Universidade Federal de Santa Maria

Descrição: O painel é composto de duas placas de EPS, 25mm de espessura, estruturado internamente com barrotes de madeira e lã de rocha. Espessura total de 96mm.

TABELA A.3 – Valores da perda por transmissão do painel de PVC+EPS+Lã de rocha (Universidade Federal de Santa Maria, 2003)

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
R	17,2	19,1	21,3	24,5	28	31,7	36,8	40	39,4	38,7	38,9	40,4	43,7	45,9	48,4	48,6	53,7

### 4- Perda por transmissão da parede de blocos de concreto celular autoclavado

Laboratório: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)

Descrição: blocos de concreto celular autoclavado, dimensões: 12,5cm x 60cm x 30cm, assentados com argamassa industrializada para concreto celular autoclavado, com 10mm de espessura, nas juntas verticais e horizontais.

TABELA A.4 – Valores da perda por transmissão da parede de blocos de concreto celular autoclavado (IPT, 1995)

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
R	30	29	34	31	31	31	34	37	38	41	44	46	47	48	51	51	50