

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DO ISOLAMENTO SONORO DE VIDROS
DE DIFERENTES TIPOS E ESPESSURAS,
EM VITRAGEM SIMPLES E DUPLA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Minéia Johann Scherer

Santa Maria, RS, Brasil.

2005

**ESTUDO DO ISOLAMENTO SONORO DE VIDROS
DE DIFERENTES TIPOS E ESPESSURAS,
EM VITRAGEM SIMPLES E DUPLA**

por

Minéia Johann Scherer

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Pizzutti dos Santos

Santa Maria, RS, Brasil.

2005

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DO ISOLAMENTO SONORO DE VIDROS
DE DIFERENTES TIPOS E ESPESSURAS,
EM VITRAGEM SIMPLES E DUPLA**

Elaborada por
Minéia Johann Scherer

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA

Eng. Dr. Jorge Luiz Pizzutti dos Santos
(Presidente / Orientador)

Eng. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda (UFSC)

Eng^a. Dr^a. Dinara Xavier da Paixão (UFSM)

Santa Maria, 23 de novembro de 2005.

Dedico:

Ao meu pai, que mesmo não mais presente certamente
me iluminou e guiou meus passos.

À minha mãe e irmão, que não mediram esforços para a realização
deste sonho e sempre estiveram prontos a me ajudar e apoiar.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Jorge Luiz Pizzutti dos Santos, pela orientação, dedicação e incentivo à realização deste trabalho.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo apoio e pelos conhecimentos disponibilizados ao longo do curso.

Aos funcionários e bolsista do Laboratório de Termo Acústica da UFSM pela disponibilidade e competência no auxílio na realização dos ensaios.

Às empresas Reflexo e SB Esquadrias, que colaboraram com alguns dos materiais necessários para a pesquisa; e a CAPES, pelos recursos que auxiliaram na compra do restante do material.

Aos colegas da Pós-Graduação, pela amizade, troca de informações e contribuições ao longo deste período de convivência.

Aos meus amigos, familiares e a todos que de uma forma ou de outra são parte desta conquista, meu sincero muito obrigada.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ESTUDO DO ISOLAMENTO SONORO DE VIDROS DE DIFERENTES TIPOS E ESPESSURAS, EM VITRAGEM SIMPLES E DUPLA

Autora: Minéia Johann Scherer

Orientador: Jorge Luiz Pizzutti dos Santos

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de novembro de 2005.

Este trabalho visa determinar o isolamento acústico a ruído aéreo de vidros utilizados na construção civil, como fechamentos ou em esquadrias, de diferentes tipos e espessuras, de forma simples e compondo vitrages duplas. Esta quantificação é feita mediante ensaios normalizados nas câmaras reverberantes do Laboratório de Termo Acústica da Universidade Federal de Santa Maria, de acordo com as normas internacionais ISO 140 e ISO 717 e Projeto de Norma Brasileira 02:135.01-001. Foram ensaiados primeiramente os diferentes tipos e espessuras de vidros individualmente. Após, foram realizadas composições assimétricas de vitrages duplas, ou seja, utilizando vidros de diferentes tipos ou espessuras, variando crescentemente o espaçamento entre eles. Com base nos resultados dos ensaios, verificou-se que o comportamento dos vidros quando utilizados individualmente seguem basicamente a lei da massa. Em relação às composições de vitragem dupla, constatou-se que o isolamento acústico aumenta relativamente rápido com a espessura da camada de ar entre os elementos, quando a mesma é pequena. Porém, a partir de um determinado espaçamento, a proporção de crescimento é menor. Desta forma, foi possível avaliar quais as situações de melhor desempenho dos vidros testados quanto ao isolamento acústico e contribuir para projetistas, fabricantes e construtores no momento de projeto ou de execução de uma edificação confortável acusticamente.

Palavras-chave: acústica; isolamento sonoro; vidros.

ABSTRACT

Master dissertation
Post-graduate program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

GLASSES SOUND ISOLATION STUDY OF DIFFERENT TYPES AND THICKNESSES IN SIMPLE AND DOUBLE GLASS

Authoress: Minéia Johann Scherer

Adviser: Jorge Luiz Pizzutti dos Santos

Date and place of defense: Santa Maria, November, 23th, 2005.

This work aims to determine the acoustic isolation to aerial noise of glasses used in the civil building, as insulations or frames, of different types and thicknesses, in a simple form and composing double glasses. This quantification is done by normalized assays in the reverberation chambers of the thermo-acoustic laboratory of Federal University of Santa Maria, according to international standards ISO 140 and ISO 717 and Brazilian Norm Project 02:135.01-001. First, the different types and thicknesses of glasses had been assayed individually. After, asymmetrical compositions of double glasses had been carried out, that means, using glasses of different types or thicknesses, varying increasingly the spacing between them. Based on the results of the assays, it was verified that the behavior of glasses when used individually follows basically the mass law. In relation to the compositions of double glasses, it was verified that the acoustic isolation increases relatively fast with the thickness of the air layer between the elements, when it is small. However, from a determined spacing, the ratio of increase is smaller. This way, it was possible to evaluate what are the best performance situations of the glasses tested in relation to the acoustic isolation and to contribute for designers, manufacturers and builders at the moment of project or execution of an acoustically comfortable building.

Key words: acoustics; sound isolation; glasses.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Utilização do vidro como fechamento para proporcionar luminosidade e integrar ambientes.....	18
FIGURA 02 – Utilização do vidro como fechamento para proporcionar luminosidade e integrar ambientes.....	18
FIGURA 03 – Utilização do vidro como cobertura de ambientes.....	19
FIGURA 04 – Edifício com fachadas inteiramente revestidas com vidro.....	20
FIGURA 05 – Edifícios com fachadas envidraçadas.....	20
FIGURA 06 – Edifícios com fachadas envidraçadas.....	20
FIGURA 07 – Curvas de compensação A, B, C e D.....	26
FIGURA 08 – Espectro do ruído rosa.....	27
FIGURA 09 – Ruído emitido por veículos pesados e leves.....	27
FIGURA 10 – Espectro de ruído de tráfego.....	28
FIGURA 11 – Ruído transmitido por ar e estrutura.....	29
FIGURA 12 – Reflexão, absorção e transmissão do som.....	30
FIGURA 13 – Curva típica da perda de transmissão para fechamentos simples.....	32
FIGURA 14 – Lei da massa.....	34
FIGURA 15 – Efeito da coincidência.....	36
FIGURA 16 – Reflexão e transmissão em um fechamento duplo.....	38
FIGURA 17 - Diferentes frequências críticas e frequências críticas coincidentes.....	39
FIGURA 18 - Diferença entre o isolamento de uma partição simples e uma dupla.....	40
FIGURA 19 - Diminuição do isolamento por ressonâncias da camada de ar.....	41

FIGURA 20 – Curva de referência da perda de transmissão.....	43
FIGURA 21 – Isolamento de vidros simples.....	48
FIGURA 22 - Isolamento de vidro comum 3mm.....	49
FIGURA 23 - Isolamento de vidro comum 5,5mm.....	49
FIGURA 24 - Isolamento de vidro comum 8mm.....	50
FIGURA 25 - Isolamento de vidro comum 10mm.....	50
FIGURA 26 - Isolamento de vidro comum 12mm.....	51
FIGURA 27 - Isolamento de vidro comum 15mm.....	51
FIGURA 28 - Isolamento de vidro laminado duplo; espessura total de 6mm.....	53
FIGURA 29 - Isolamento de vidro laminado duplo; espessura total de 12/13mm.....	53
FIGURA 30 - Isolamento de vidro laminado duplo; espessura total de 18/19mm.....	54
FIGURA 31 - Isolamento de vidro laminado triplo; espessura total de 12mm.....	54
FIGURA 32 - Isolamento de vidro laminado triplo; espessura total de 18/19mm.....	55
FIGURA 33 - Isolamento de vidro laminado com 4 vidros; espessura total de 18mm.....	55
FIGURA 34 - Isolamento de vidro laminado com 4 vidros; espessura total de 25mm.....	56
FIGURA 35 - Isolamento de vidro laminado com 4 vidros; espessura total de 30mm.....	56
FIGURA 36 - Isolamento de vidro laminado com 4 vidros; espessura total de 40mm.....	57
FIGURA 37 – Isolamento de envidraçados com 8mm.....	58
FIGURA 38 - Curva padrão de isolamento de uma vitragem dupla.....	60
FIGURA 39 - Variação do isolamento de uma vitragem dupla em função do intervalo de ar que separa os dois elementos.....	61
FIGURA 40 - Isolamento de vitragem dupla.....	62
FIGURA 41 - Isolamento de vitragem dupla.....	63
FIGURA 42 - Composição dos vidros duplos.....	63
FIGURA 43 – Isolamento de vidros duplos.....	65
FIGURA 44 – Isolamento de vidros duplos.....	65
FIGURA 45 – Câmaras reverberantes do LaTA para ensaio de isolamento sonoro.....	68
FIGURA 46 – Parede de alvenaria e caixilho para colocação dos vidros testados.....	70
FIGURA 47 – Ensaio de vitragem dupla.....	71
FIGURA 48 – Valores de R (dB) para vidros monolíticos comuns.....	75
FIGURA 49 – Valores de R (dB) para diferentes tipos de vidros com 6mm de espessura.....	77
FIGURA 50 – Valores de R (dB) para diferentes tipos de vidros com 8mm de espessura.....	77
FIGURA 51 – Valores de R (dB) para vidros duplos com 20mm de espaçamento.....	79
FIGURA 52 – Valores de R (dB) para combinações somente com vidros comuns.....	80

FIGURA 53 – Valores de R (dB) para combinações com vidros comuns + laminados e somente com vidros laminados.....	81
FIGURA 54 – Valores de R (dB) para combinações com vidros temperados + laminados.....	81
FIGURA 55 – Valores de R (dB) para vidros duplos com 50mm de espaçamento.....	83
FIGURA 56 – Valores de R (dB) para combinações somente com vidros comuns.....	84
FIGURA 57 – Valores de R (dB) para combinações com vidros comuns + laminados e somente com vidros laminados.....	85
FIGURA 58 – Valores de R (dB) para combinações com vidros temperados + laminados.....	85
FIGURA 59 – Valores de R (dB) para vidros duplos com 100mm de espaçamento.....	87
FIGURA 60 – Valores de R (dB) para combinações somente com vidros comuns.....	88
FIGURA 61 – Valores de R (dB) para combinações com vidros comuns + laminados e somente com vidros laminados.....	88
FIGURA 62 – Valores de R (dB) para combinações com vidros temperados + laminados.....	89
FIGURA 63 – Valores de R (dB) para vidros duplos com 150mm de espaçamento.....	90
FIGURA 64 – Valores de R (dB) para combinações somente com vidros comuns.....	91
FIGURA 65 – Valores de R (dB) para combinações com vidros comuns + laminados e somente com vidros laminados.....	92
FIGURA 66 – Valores de R (dB) para combinações com vidros temperados + laminados.....	92
FIGURA 67 – Valores de R (dB) para três ensaios analisados comparativamente.....	93
FIGURA 68 – Valores de R (dB) para vitragem simples e dupla de espessura equivalente....	94
FIGURA 69 – Montagem dos caixilhos e vidros para os ensaios na câmara reverberante....	146
FIGURA 70 – Ensaios na câmara reverberante.....	146
FIGURA 71 – Ensaio de vitragem dupla com o menor afastamento.....	147
FIGURA 72 – Detalhe de ensaio de vitragem dupla com o menor afastamento.....	147
FIGURA 73 – Ensaio de vitragem dupla com o maior afastamento.....	148
FIGURA 74 – Equipamentos utilizados nos ensaios (fonte sonora).....	148
FIGURA 75 – Equipamentos utilizados nos ensaios (microfone).....	149
FIGURA 76 – Equipamentos utilizados nos ensaios (analisador acústico).....	149

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Sons compreendidos entre o limiar da audição e o limiar da dor.....	26
TABELA 02 – Diferenças de nível de pressão sonora para o ruído de tráfego.....	28
TABELA 03 – Qualificação do isolamento.....	31
TABELA 04 – Valores de referência.....	43
TABELA 05 – Vidros monolíticos comuns.....	48
TABELA 06 – Vidros laminados.....	52
TABELA 07 – Vidro laminado especial acústico.....	58
TABELA 08 – Vidros duplos.....	64
TABELA 09 – Valores de R_w (dB) e R (dB(A)) para vidros simples.....	75
TABELA 10 – Valores de R_w (dB) e R (dB(A)) para vidros duplos com 20mm de espaçamento.....	78
TABELA 11 – Valores de R_w (dB) e R (dB(A)) para vidros duplos com 50mm de espaçamento.....	83
TABELA 12 – Valores de R_w (dB) e R (dB(A)) para vidros duplos com 100mm de espaçamento.....	86
TABELA 13 – Valores de R_w (dB) e R (dB(A)) para vidros duplos com 150mm de espaçamento.....	89

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I – Descrição dos ensaios realizados.....	105
ANEXO II – Fotografias dos ensaios realizados.....	146

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	04
RESUMO.....	05
ABSTRACT.....	06
LISTA DE FIGURAS.....	07
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ANEXOS.....	11
SUMÁRIO.....	12
CAPÍTULO I.....	15
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 Justificativas.....	17
1.3 Hipóteses.....	21
1.3.1 Hipótese geral.....	21
1.3.2 Hipóteses específicas.....	21
1.4 Estrutura da dissertação.....	22
CAPÍTULO II.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Som.....	23
2.1.1 Propagação do som.....	23
2.1.2 Frequência.....	24

2.1.3	Intensidade sonora.....	24
2.1.4	Nível de pressão sonora.....	25
2.1.5	Curvas de compensação A, B, C e D.....	26
2.1.6	Tipos de ruído.....	27
2.2	Isolamento acústico.....	28
2.3	Isolamento de ruídos aéreos.....	29
2.3.1	Isolamento acústico de fechamentos simples.....	32
2.3.2	Isolamento acústico de fechamentos duplos.....	37
2.3.3	Perda de transmissão em superfícies compostas.....	41
2.4	Número único para avaliação do isolamento acústico.....	42
2.4.1	Índice de redução acústica R_w (ISO 717).....	42
2.4.2	Isolamento global em dB(A).....	44
2.5	O vidro.....	45
2.5.1	A utilização do vidro.....	45
2.5.2	Composição do vidro.....	45
2.5.3	Propriedades mecânicas.....	46
2.6	O vidro e o isolamento acústico.....	47
2.6.1	Vidro monolítico comum.....	47
2.6.2	Vidro laminado.....	52
2.6.3	Vidro laminado especial acústico.....	57
2.6.4	Vidro temperado.....	59
2.6.5	Vidros duplos.....	59
CAPÍTULO III.....	66	66
3	METODOLOGIA.....	66
3.1	Materiais ensaiados.....	66
3.1.1	Os vidros.....	66
3.2	Equipamentos utilizados.....	67
3.3	Características do Laboratório de Termo Acústica da UFSM.....	67
3.4	Considerações sobre a Norma Internacional ISO 140.....	68
3.5	Ensaio laboratoriais realizados.....	69
3.5.1	Procedimentos gerais.....	71
3.5.2	Execução dos ensaios.....	72
3.6	Avaliação dos resultados.....	73

CAPÍTULO IV.....	75
4 RESULTADOS.....	74
4.1 Vidros simples.....	74
4.2 Vidros duplos com 20mm de espaçamento.....	78
4.3 Vidros duplos com 50mm de espaçamento.....	82
4.4 Vidros duplos com 100mm de espaçamento.....	86
4.5 Vidros duplos com 150mm de espaçamento.....	89
4.6 Influência do afastamento entre os vidros.....	93
CAPÍTULO V.....	96
5 CONCLUSÕES.....	96
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	103
ANEXO I – Descrição dos ensaios realizados.....	105
ANEXO II – Fotografias dos ensaios realizados.....	146

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

“Enquanto nossos antepassados viviam em relativa tranqüilidade, nós estamos submetidos a um inacreditável aumento nas origens e intensidade dos ruídos, dentro e fora de nossas construções, muitas vezes com sérios e prejudiciais efeitos” (DOELLE, 1972, p.03).

O aumento do ruído, especialmente nos centros urbanos, é sem dúvida um dos graves problemas do nosso tempo, e que vem afetando diretamente a vida das pessoas. Os sons indesejáveis são conseqüências do progresso muitas vezes almejado, do desenvolvimento tecnológico e industrial, do crescimento sem controle e sem planejamento das cidades.

Os efeitos nocivos ao ser humano, causados pela exposição ao ruído vêm sendo objeto de estudo de diversos autores em inúmeras publicações. De um modo geral, é consenso afirmar que as conseqüências do ruído não se limitam às lesões no aparelho auditivo. Repercutem também sobre as funções cerebrais e de diversos outros órgãos e sobre a atividade física e mental.

Além de uma gradativa perda de audição, a exposição curta ou demorada a ruídos intensos, prejudica o sistema nervoso e outros órgãos, provocando alterações na pressão arterial ou na composição hemática do sangue, náuseas, cefaléia, vômitos, perda de equilíbrio e tremores. Inquietude e irritabilidade são as primeiras manifestações dos indivíduos submetidos à ação do ruído (SILVA, 1997, p.03).

Em relação aos comprometimentos no desempenho físico e mental, as conclusões são igualmente preocupantes. É fato comprovado que, na presença de sons desagradáveis, há uma redução na capacidade de concentração da pessoa, na eficiência e produção, tanto em

ambientes de trabalho, como escolares ou habitacionais. O bem estar e as potencialidades humanas são restringidos e a qualidade de vida decai consideravelmente.

Se, por um lado, observamos o crescimento das origens e dos efeitos do ruído, por outro, percebemos que a construção civil não evoluiu a ponto de preocupar-se em minimizar o acesso desses sons perturbadores para o interior da edificação. Pelo contrário, como afirma DOELLE (1972, p.03), “tornou-se uma prática comum substituir as construções convencionais densas e pesadas, por esbeltos, leves, pré-fabricados elementos de construção”.

O desempenho de isolamento acústico de uma construção depende em grande parte dos elementos de fechamento das fachadas, como as alvenarias, painéis ou vidros, e dos sistemas de aberturas, ou seja, das esquadrias existentes.

Os componentes das fachadas foram investigados por RECCHIA (2001) quanto ao isolamento sonoro, sendo constatado que a principal causa da perda de eficiência está nas esquadrias, pela falta de estanqueidade ao ar dos sistemas de abertura. Uma vez estanques, atingiriam a isolação referente ao vidro que as compõem.

Com base no que foi exposto, o presente trabalho tem o intuito de investigar a performance acústica de diferentes tipos, espessuras e composições de vidros comercialmente utilizados em painéis de fechamento ou em esquadrias. Desta forma, será possível avaliar e comparar as situações que apresentam melhor desempenho quanto ao isolamento, ou que se mostram mais aptas para determinada exigência de projeto.

Acredita-se que os resultados obtidos na pesquisa são de grande valia para garantir um adequado controle de ruído aéreo. Isto se aplica tanto para edificações com fechamentos em vidro, como para o desenvolvimento de esquadrias com vitragem eficientemente isolante.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Investigar o isolamento acústico a ruído aéreo de vidros comercialmente utilizados na construção civil, através de ensaios normalizados no Laboratório de Termo Acústica da UFSM, sendo avaliados vidros de diferentes tipos e espessuras, de forma simples e compondo vitragens duplas com espaçamentos crescentes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar a performance de isolamento acústico de diferentes tipos de vidro – monolítico comum, temperado e laminado.
- Avaliar a influência da espessura do vidro quanto ao isolamento acústico.
- Investigar o comportamento acústico das vitragens duplas, utilizando composições assimétricas quanto ao tipo ou espessura dos vidros, e verificando a influência do afastamento entre eles.
- Fornecer dados absolutos e comparativos sobre o isolamento de vidros, de modo a contribuir com projetistas, fabricantes e construtores, no momento da especificação deste material para determinado uso.

1.2 Justificativas

A questão do conforto acústico nas edificações vem, aos poucos, tornando-se uma preocupação constante para projetistas, fabricantes e construtores, no momento de projeto e execução das obras. Isso porque cresce também a exigência dos usuários em relação aos níveis de ruído aceitáveis que podem estar presentes no seu dia-a-dia, sem prejudicar suas atividades. Paralelo a isso há um aumento da poluição sonora urbana, que vem se transformando num dos problemas mais graves a serem combatidos nas grandes cidades.

Como já foi dito anteriormente, os efeitos nocivos do ruído para o homem vão além das lesões no aparelho auditivo, afetando a saúde física e psicológica em diferentes níveis.

JOBIM (1997) realizou um estudo em diversos imóveis residenciais na cidade de Santa Maria, verificando que, quanto às condições naturais de conforto, a deficiência no isolamento acústico dos imóveis é a principal causa de descontentamento dos usuários, sobretudo em relação ao ruído que provem do meio externo, ou seja, das vias de circulação.

Assim, verifica-se a importância de estudos e pesquisas que contemplem a questão do conforto acústico, principalmente com enfoque ao isolamento sonoro, que se mostra como a parte mais deficiente. A maioria da população está exposta ao ruído nas suas habitações e locais de trabalho, onde a construção civil não atingiu níveis satisfatórios de controle sobre os sons desagradáveis, seja estes vindos do exterior ou entre os compartimentos.

Com a substituição freqüente dos elementos de construção pesados e espessos, por fechamentos mais leves e de menor espessura, criou-se um desafio aos projetistas quanto ao isolamento sonoro. No entanto, mesmo utilizando materiais de menor massa, podem-se atingir boas performances de isolamento, bastando para isso ter conhecimento sobre o comportamento acústico do material e de como compor o fechamento.

A utilização do vidro na arquitetura vem a cada dia obtendo mais destaque e tendo papel fundamental na composição de grande parte dos projetos de edificações. Isto se deve, primeiramente, a função essencial e natural do vidro: a transparência, que garante a possibilidade da troca da luz e permite a comunicação entre ambientes. Além disso, este material tornou-se símbolo de modernidade, de avanço tecnológico e de estética perfeita.

Não é difícil encontrar exemplos de edificações que tiram partido do uso do vidro para diferentes propósitos. Nas Figuras 01 e 02, abaixo, a principal função da utilização do vidro como fechamento é o aproveitamento da luminosidade e a comunicação entre ambientes, sejam eles internos ou externos.

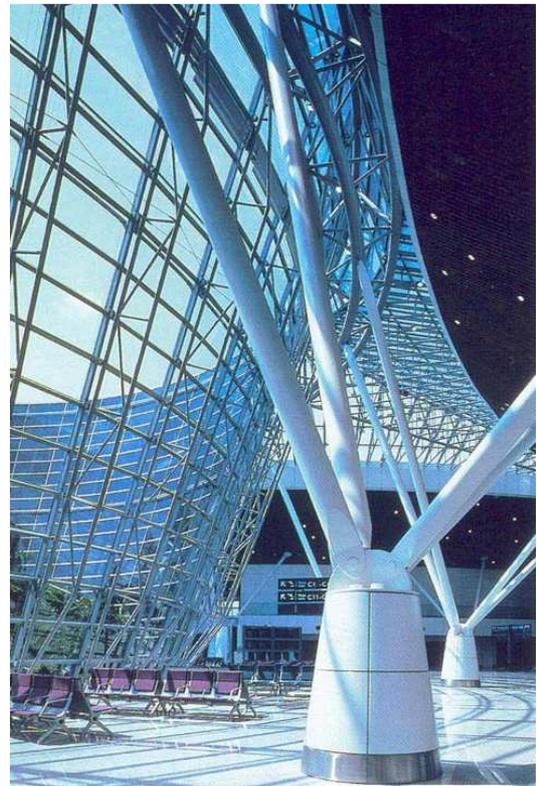
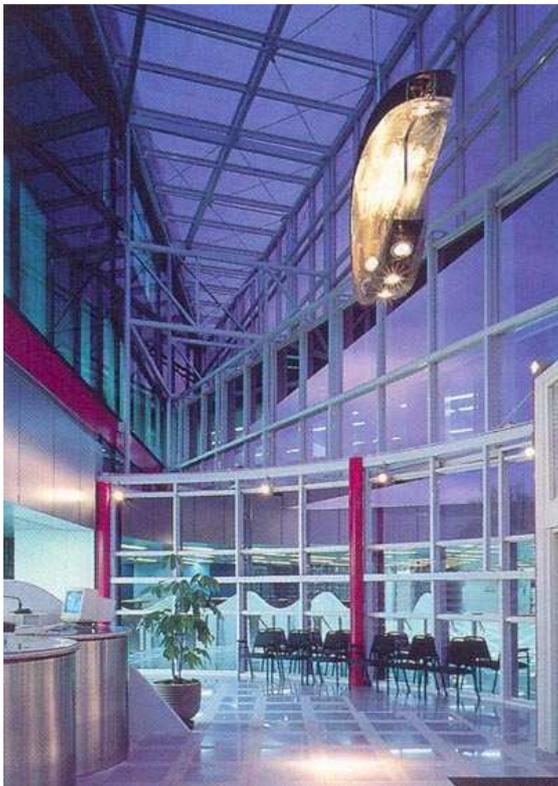


FIGURA 01 e 02: Utilização do vidro como fechamento para proporcionar luminosidade e integrar ambientes.

Também se percebe a tendência da utilização do vidro como material de cobertura, em substituição aos elementos pesados e opacos. Em determinados projetos ou ambientes, o aproveitamento da luz natural é de grande importância, seja por questões de economia de energia, por efeitos estéticos interessantes ou pela busca de um local agradável e atraente, conforme ilustra a Figura 03.



FIGURA 03: Utilização do vidro como cobertura de ambientes.

Além disso, a partir do século XX, o vidro passou a ser considerado sinônimo de modernidade arquitetônica e alta tecnologia, sendo utilizado como fechamento de grandes edifícios. Surgem assim os chamados “panos de vidro”, ou seja, fachadas inteiramente revestidas por este material, que agora é encontrado em diversas cores, com propriedades lumínicas e acústicas variadas. As Figuras 04, 05 e 06, a seguir, ilustram exemplos de edificações que tiram partido do uso de fachadas envidraçadas, principalmente pelo efeito estético que proporcionam.



FIGURA 04: Edifício com fachadas inteiramente revestidas com vidro.

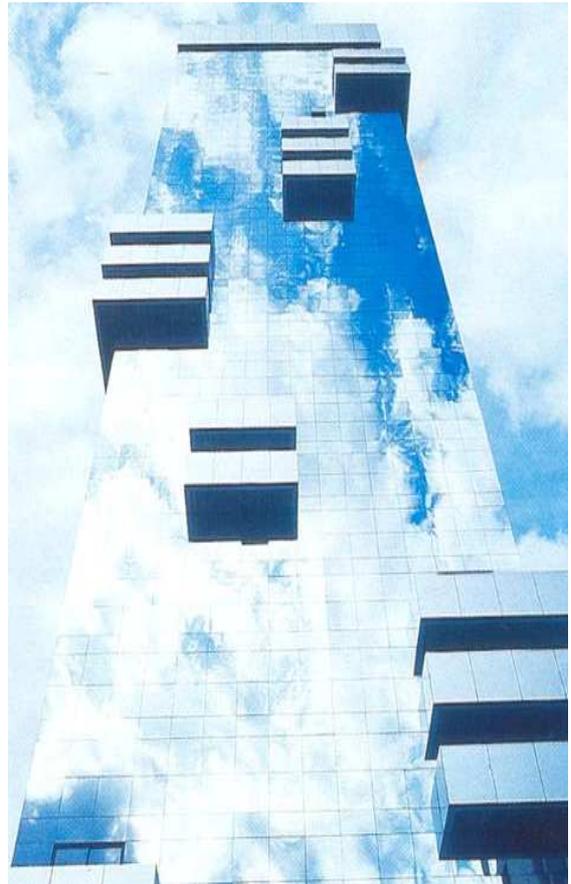
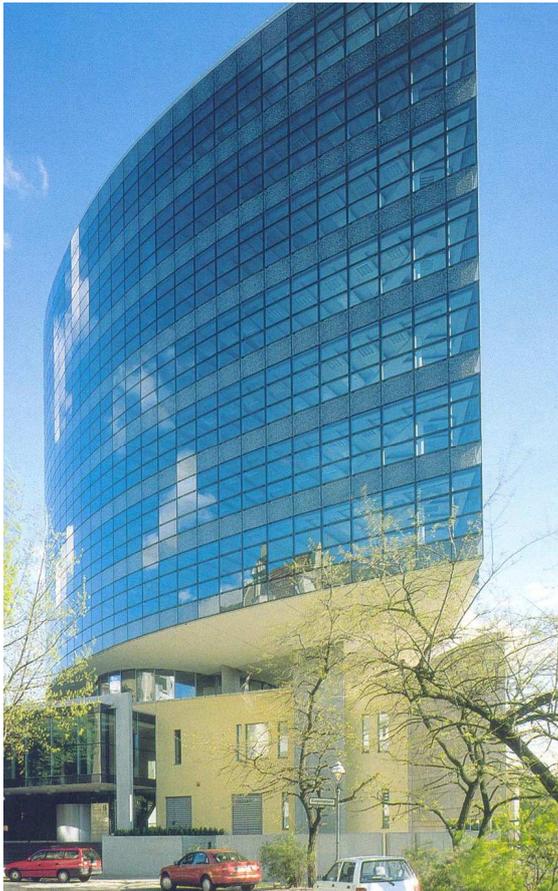


FIGURA 05 e 06: Edifícios com fachadas envidraçadas.

O Laboratório de Termo Acústica da UFSM vem se destacando em pesquisas sobre isolamento sonoro, com a análise de diversos materiais de fechamento e de elementos que constituem as fachadas. Deste modo, vem contribuindo para projetistas, fabricantes e construtores, fornecendo subsídios reais para aplicação na melhoria do conforto acústico das edificações.

De acordo com o que foi exposto, este trabalho visa investigar o comportamento acústico dos vidros utilizados em fechamentos e esquadrias. Considerando a real tendência do uso deste material nas edificações, para os mais diferentes propósitos, a questão relacionada com o isolamento acústico dos vidros tem importância fundamental na concepção dos projetos.

Assim, com a realização desta pesquisa, pretende-se despertar uma maior conscientização que atente aos problemas de conforto acústico e que melhore a qualidade das construções e, conseqüentemente, a qualidade de vida da população.

1.3 Hipóteses

1.3.1 Hipótese Geral

- É possível demonstrar, através de ensaios normalizados, o isolamento acústico a ruído aéreo de diferentes tipos, espessuras e composições de vidros comercialmente utilizados na construção civil, em fachadas e esquadrias.

1.3.2 Hipóteses Específicas

- Com o estudo em questão, é possível ordenar crescentemente a performance de isolamento acústico de vidros, quanto ao tipo e quanto à espessura.
- Com as composições de vitragens duplas, é possível constatar o ganho de isolamento destas em relação ao uso do vidro simples, bem como é possível avaliar a influência do afastamento entre os vidros para uma melhoria de isolamento.

1.4 Estrutura da dissertação

A estrutura para a realização e apresentação da pesquisa em questão, está dividida em cinco capítulos, conforme descrição a seguir:

- Capítulo I: apresenta a importância do tema abordado, os objetivos, justificativas e hipóteses do trabalho.
- Capítulo II: destinado à revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes à pesquisa, que servirão de base para a investigação.
- Capítulo III: será apresentada a metodologia que conduziu o trabalho, os procedimentos de ensaios realizados, os materiais e equipamentos utilizados.
- Capítulo IV: destinado à apresentação dos resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Termo Acústica da UFSM.
- Capítulo V: serão apresentadas as conclusões referentes ao trabalho, observações e contribuições sobre o tema, além de sugestões para pesquisas futuras relacionadas com o assunto.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Som

Segundo SILVA (1997, p.25) “há dois conceitos importantes para a palavra som: o som vibração, ou perturbação física, que percorre um meio qualquer de propagação; e o som sensação sonora, psicofisiológica, que é captado pelo nosso ouvido”.

Não são todas as vibrações que produzem a sensação de audição quando atingem o ouvido humano. A sensação de som só ocorrerá quando a amplitude destas vibrações e a frequência com que elas se repetem estiverem dentro de determinadas faixas de valores (GERGES, 1992, p.01).

Estes sons audíveis ao ser humano podem ser úteis ou agradáveis, como o toque de uma campainha ou o som de um piano. Estes têm, no geral, uma composição harmônica definida. No entanto, compreendem também sons perturbadores ou desagradáveis, aos quais denominamos “ruídos”, e que se tratam de sons complexos, com uma composição harmônica não definida (MÉNDEZ et al., 1994, p. 24).

2.1.1 Propagação do som

O som necessita de um meio para propagar-se, seja este elástico ou sólido. O ar é o meio normal de propagação do som que é audível, sem a presença de ar, não há som.

A propagação do som se dá pela colisão das moléculas do meio, umas contra as outras, sucessivamente, formando uma série de compressões e rarefações no meio de propagação. Não há, portanto, deslocamento permanente de matéria, apenas transferência de energia (GERGES, 1992, p.02).

O movimento ondulatório do som é resultado dessa sucessão de zonas comprimidas e rarefeitas, propagando-se em todas as direções, a partir da fonte sonora.

A velocidade do som depende das características do meio de propagação. Segundo GERGES (1992, p.05), no ar, a 20°C, a velocidade do som (c) é de 343 m/s. Uma fórmula simplificada para determinar esta velocidade em função da temperatura (t) em °C é:

$$c = 331 + 0,6 t \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

2.1.2 Freqüência

Chama-se freqüência o número de oscilações ou ciclos completos que um fenômeno periódico (acústico ou outro) realiza por segundo, sendo medida em Hertz (Hz). Segundo MÉNDEZ et al. (1994, p.18), “para que um som seja ouvido pelo homem, sua freqüência tem que estar na faixa de 20 Hz a 20.000 Hz, que são os limites da audibilidade humana”.

No entanto, deve-se considerar que o ouvido humano não é igualmente sensível ao longo de toda esta faixa de freqüência, sendo a zona mais audível situada entre 1.000 Hz e 4.000 Hz (GERGES, 1992, p.03).

A acústica arquitetônica considera um intervalo de freqüências entre 100 Hz a 4.000 Hz, distribuídas em bandas de oitava, onde cada freqüência é o dobro da precedente, ou em terços de oitava. Pode-se classificar as freqüências em baixas ou graves (entre 100 Hz e 315 Hz), médias (entre 400 Hz e 1.250 Hz) e altas ou agudas (entre 1.600 Hz e 4.000 Hz).

2.1.3 Intensidade sonora

Para que tenhamos a sensação de audição, além da necessidade do som estar oscilando em uma faixa de freqüências audíveis, é necessário que ele tenha uma certa intensidade sonora. A intensidade sonora I é a quantidade de energia sonora que atravessa um centímetro

quadrado de área, perpendicular à direção em que o som se propaga (SILVA, 1997, p.30), e é calculada pela fórmula:

$$I = \frac{W}{S} \quad (2)$$

Onde:

W : potência sonora (Watt)

S : área onde incide (cm²)

2.1.4 Nível de pressão sonora

A medida mais comum de um nível sonoro é o Nível de Pressão Sonora, ou NPS, expresso em decibéis, abreviado dB. A escala decibel não é linear, ela expressa a razão logarítmica entre a pressão sonora a medir e uma pressão sonora de referência, que é o limiar da audição.

MÉNDEZ et al. (1994, p.21), define como “limiar da audição” a menor pressão sonora audível pelo homem, da ordem de 20 milionésimos de Pascal (0,00002 Pa) e de “limiar da dor” a maior pressão sonora suportável pelo homem que é de 20 Pascals. Esta relação entre a máxima e a mínima pressão sonora corresponde a uma variação de 1.000.000 de vezes, o que, numa escala linear, resulta em números dificilmente manipuláveis nos cálculos. Por este motivo adota-se a escala dB, de mais fácil manipulação, e também por ela representar mais coerentemente a forma como o ouvido humano interpreta o som.

Assim, o Nível de Pressão Sonora, NPS, é expresso pela fórmula:

$$NPS = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (3)$$

Onde:

P : pressão sonora a medir (Pa)

P_{ref} : pressão sonora de referência (0,00002 Pa)

Desta forma, todos os sons compreendidos entre o limiar da audição e o limiar da dor podem ser expressos numa escala entre 0 e 120 dB, como exemplificado na Tabela 01.

TABELA 01 – Sons compreendidos entre o limiar da audição e o limiar da dor.

P (Pa)	NPS (dB)	Observação
20	120	Avião a jato (limiar da dor)
2	100	Martelo pneumático
0,2	80	Rua
0,02	60	Escritório
0,002	40	Sala de estar tranqüila
0,0002	20	Campo tranqüilo
0,00002	0	Limiar da audição

Fonte: MÉNDEZ, et al, 1994, p.21.

2.1.5 Curvas de compensação A, B, C e D

Como já foi mencionado, o ouvido humano não é igualmente sensível em todas as faixas de frequência. Por este motivo, utilizam-se curvas de ponderação de sensibilidade variável com a frequência, de modo a modelar o comportamento do ouvido humano. Estas curvas são classificadas como A, B, C e D, conforme Figura 07. A curva A é uma das mais utilizadas para medições em edificações.

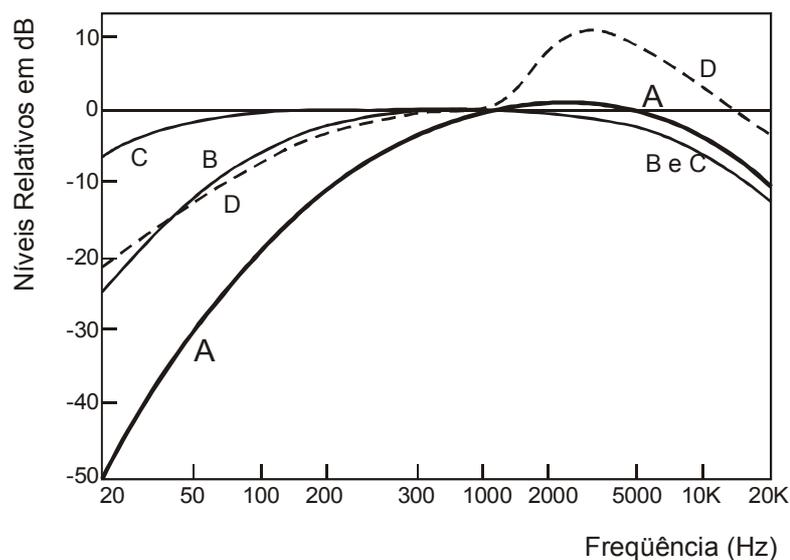


FIGURA 07: Curvas de compensação A, B, C e D (GERGES, 1992. p.55)

2.1.6 Tipos de ruído

Para a realização de medições acústicas em laboratório emite-se um espectro de ruído em todas as frequências consideradas. O tipo de ruído mais utilizado é o chamado “ruído rosa”, que tem por característica manter a mesma energia acústica ao longo de todo o espectro de frequências, conforme o gráfico da Figura 08 (PUJOLLE, 1978, p.32).

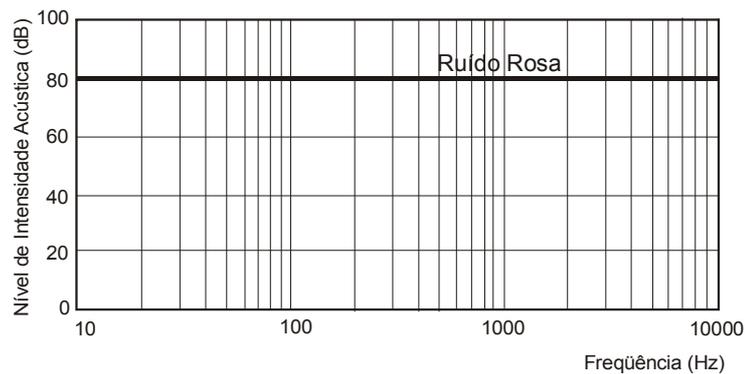


FIGURA 08: Espectro do ruído rosa (PUJOLLE, 1978. p.32. Adaptado)

Este tipo de ruído emitido em laboratório, no entanto, não caracteriza uma situação real de ruído de tráfego, como o que é gerado em uma via de circulação de veículos e que atinge diretamente as edificações.

Estudos do CSTB (1982, p.111), demonstram o comportamento do ruído emitido por veículos pesados e leves, conforme medições práticas:

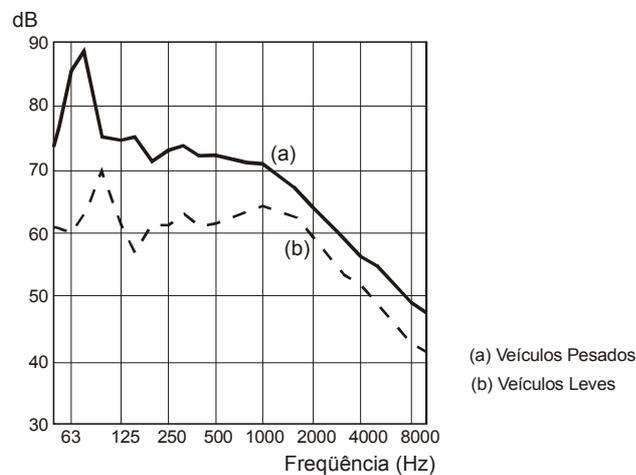


FIGURA 09: Ruído emitido por veículos pesados e leves (CSTB, 1982. p.111)

De acordo com a Figura 09, pode-se perceber que há uma maior concentração de energia nas baixas frequências do que nas frequências mais agudas.

Com base nesses estudos, chegou-se a um espectro de ruído de tráfego normalizado, relacionando as diferenças de nível de pressão sonora para cada banda de oitava, de acordo com uma pressão de referência, a 1.000 Hz. A Tabela 02 e a Figura 10, a seguir, demonstram esses valores e o resultado do espectro de ruído de tráfego.

TABELA 02 – Diferenças de nível de pressão sonora para o ruído de tráfego.

Frequência em banda de oitava (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Diferença do nível de pressão sonora em relação a uma pressão de referência a 1000 Hz (dB)	+ 6	+ 5	+ 1	0	- 2	- 8

Fonte: CSTB, 1982, p.114.

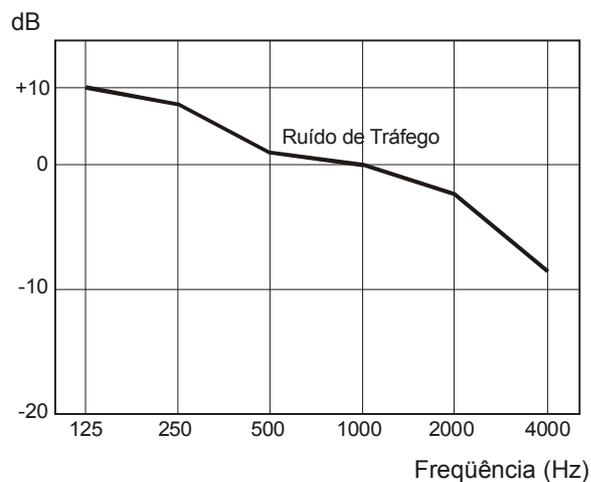


FIGURA 10: Espectro de ruído de tráfego (CSTB, 1982. p.115, adaptado)

2.2 Isolamento acústico

O isolamento acústico é um dos parâmetros mais importantes para o controle do ruído nas edificações. Realizar um isolamento acústico significa minimizar a passagem do som, criar uma barreira que reduza o nível de ruído transmitido de um ambiente para outro, separados por um elemento divisor qualquer (SILVA, 1997, p.88).

Segundo GERGES (1992, p.175), “a energia sonora pode ser transmitida via aérea (som carregado pelo ar) e/ou via sólido (som carregado pela estrutura)”, conforme ilustra a Figura 11.

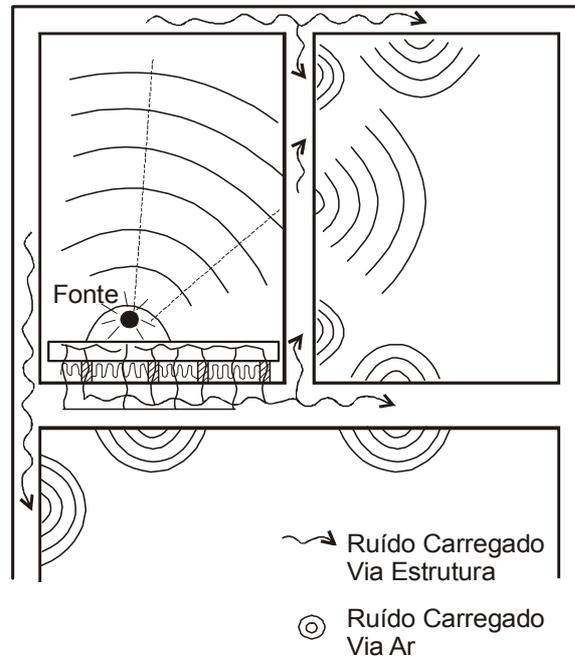


FIGURA 11: Ruído transmitido por ar e estrutura (GERGES, 1992. p.176)

De acordo com a forma de propagação podem ser considerados dois tipos de isolamento:

- Isolamento de ruídos aéreos: quando a fonte sonora atua diretamente sobre o ar e ocorre uma passagem direta do som via parede ou painel;
- Isolamento de ruídos de impacto: quando a fonte sonora é uma vibração que se transmite pela passagem indireta via estrutura, lajes, vigas e pilares, ou seja, em um meio sólido.

2.3 Isolamento de ruídos aéreos

Uma onda sonora, ao incidir sobre uma superfície, produz uma vibração na mesma, e esta vibrando irradia energia para o outro lado, gerando um som no recinto. É como se o painel de fechamento atuasse como uma nova fonte sonora. O que ouvimos do outro lado, na

realidade, é o som gerado pelo próprio fechamento, que foi excitado pela fonte original no outro recinto.

Segundo MÉNDEZ et al. (1994, p.106), “quando uma onda sonora de energia E_i incide sobre uma superfície, divide-se em duas, uma energia refletida E_r e uma absorvia E_a . Esta última, por sua vez, se decompõe em energia dissipada no interior do fechamento E_d e uma energia transmitida E_t ”, conforme a Figura 12.

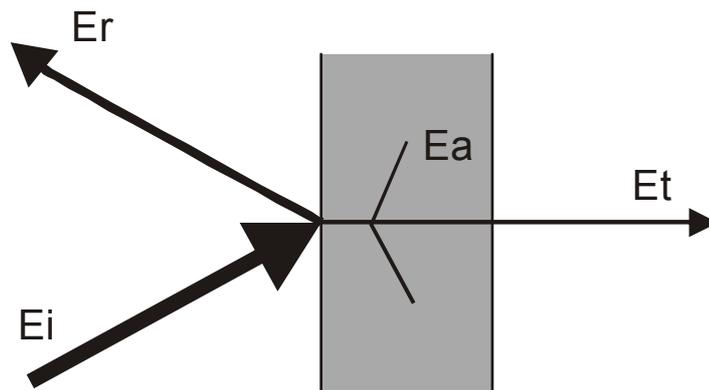


FIGURA 12: Reflexão, absorção e transmissão do som (MÉNDEZ et al, 1994, p.107)

A relação entre energia transmitida E_t e energia incidente E_i , chama-se coeficiente de transmissão τ , que expressa a capacidade do fechamento em transmitir o som:

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} \quad (4)$$

Para caracterizar a capacidade de isolamento acústico de um fechamento, usa-se a grandeza *Perda de Transmissão Sonora* – PT , também chamada *Índice de Redução Acústica* – R , expressa em dB, pela expressão:

$$R = 10 \log \frac{E_i}{E_t} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (5)$$

Assim, segundo GERGES (1992, p.178), “valores altos da perda de transmissão tem como significado físico uma baixa transmissão de energia acústica e vice-versa”.

No entanto, como afirma MÉNDEZ et al. (1994, p.107), na prática não se dispõe dos valores das energias incidentes e transmitidas, o que se mede são os níveis sonoros presentes em um e em outro recinto. Define-se então o isolamento acústico entre recintos (D), como a diferença entre o nível sonoro da sala emissora (N_1) e o nível sonoro da sala receptora (N_2), ambos medidos em dB:

$$D = N_1 - N_2 \quad (6)$$

Ainda segundo MÉNDEZ et al. (1994, p.107), quando a absorção sonora do recinto receptor é baixa, R e D estão relacionados por meio da expressão:

$$R = D + 10 \log \frac{S}{A_2} \quad (7)$$

Onde:

S : área da parede (m^2)

A_2 : Absorção do local receptor (m^2)

O valor da perda de transmissão para fechamentos homogêneos, sob condições normais, depende principalmente da massa superficial do material e da frequência incidente, fenômeno conhecido como lei da massa.

GOMEZ (1988) classificou o isolamento dos fechamentos segundo o comportamento de suas perdas de transmissão, conforme a Tabela 03, a seguir.

TABELA 03 – Qualificação do isolamento.

Qualificação do Isolamento	Perda de Transmissão (dB)	Condições de Audição
Pobre	< 30	Compreende-se a conversação normal facilmente através da parede.
Regular	30 a 35	Ouve-se a conversação em voz alta, mas não se entende bem a conversação norma.

Bom	35 a 40	Ouve-se a conversação em voz alta, mas não é facilmente inteligível.
Muito bom	40 a 45	A palavra normal é inaudível e, em voz alta, é muito acentuada, sem compreensão.
Excelente	> 45	Ouve-se muito fracamente os sons muito altos.

Fonte: GOMEZ, 1988.

2.3.1 Isolamento acústico de fechamentos simples

O isolamento sonoro de um fechamento simples varia de acordo com a densidade superficial do material e com a frequência do som incidente. Assim, para uma quantificação correta, devemos conhecer o índice de redução acústica de cada material em todas as frequências audíveis.

O esquema de variação da perda de transmissão (PT) para fechamentos simples e homogêneos, em função da frequência é conforme o apresentado na Figura 13, onde é possível observar quatro regiões bem definidas:

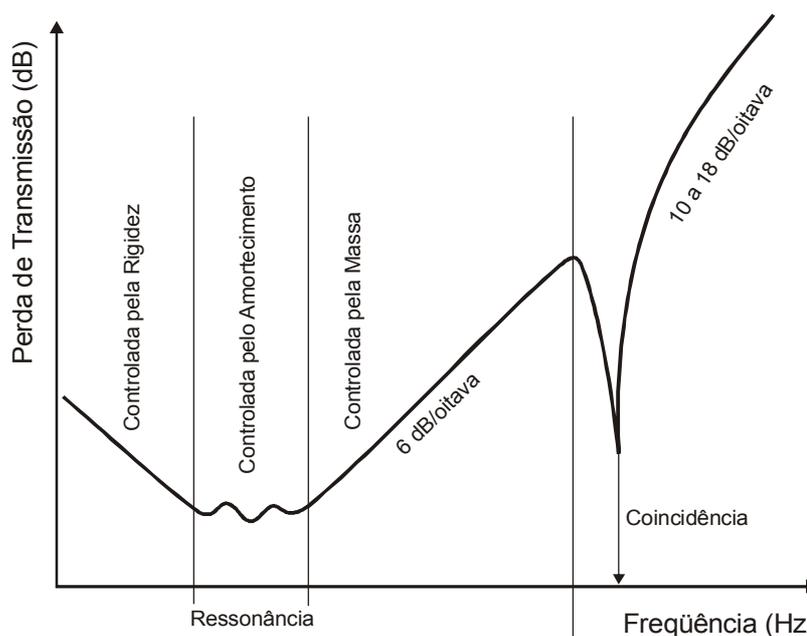


FIGURA 13: Curva típica da perda de transmissão para fechamentos simples (GERGES, 1992, p.197)

a) Região controlada pela rigidez:

Para frequências muito baixas, a perda de transmissão não segue a lei da massa, dependendo principalmente das características de rigidez do fechamento.

b) Região controlada pela ressonância:

É a região onde aparecem as primeiras frequências de ressonância do sistema. O fechamento se comporta como uma membrana, apresentando uma série de frequências naturais de ressonância, nas quais ocorrem quedas na perda de transmissão. Essas frequências dependem das dimensões, da rigidez e da massa do fechamento.

c) Região controlada pela massa:

Ocorre em frequências superiores ao dobro da frequência da primeira ressonância e a isolação acústica do fechamento depende da massa e da frequência incidente.

Nestas circunstâncias a perda de transmissão tende a apresentar um aumento de 6 dB para cada duplicação da massa ou a cada duplicação da frequência da onda incidente. Pode-se afirmar então, baseado na lei da massa, que para isolar um ruído, é necessário usar materiais de alta densidade superficial. Adicionalmente conclui-se que para as altas frequências a perda de transmissão é maior que para as baixas frequências (GERGES, 1992, p.190).

Isto ocorre porque, quanto maior a massa do fechamento e maior a frequência incidente, maior será a dificuldade de fazer o material vibrar, garantindo assim um isolamento mais eficiente.

Deve-se levar em consideração, no entanto, que qualquer imperfeição de construção que não garanta a estanqueidade ao ar do fechamento irá prejudicar o isolamento do conjunto. Isto se aplica também à utilização de materiais porosos ou à passagem de tubulações nas paredes.

Diversos autores em seus estudos equacionaram, através de pesquisas práticas, o índice de redução acústica R de uma forma global, em dB(A), relacionando a massa superficial da amostra.

O CSTB (1982), de acordo com a Figura 14, mostra a lei que relaciona o índice de redução R e a massa do fechamento, para o modelo teórico e dois modelos experimentais com espectros de emissão usuais:

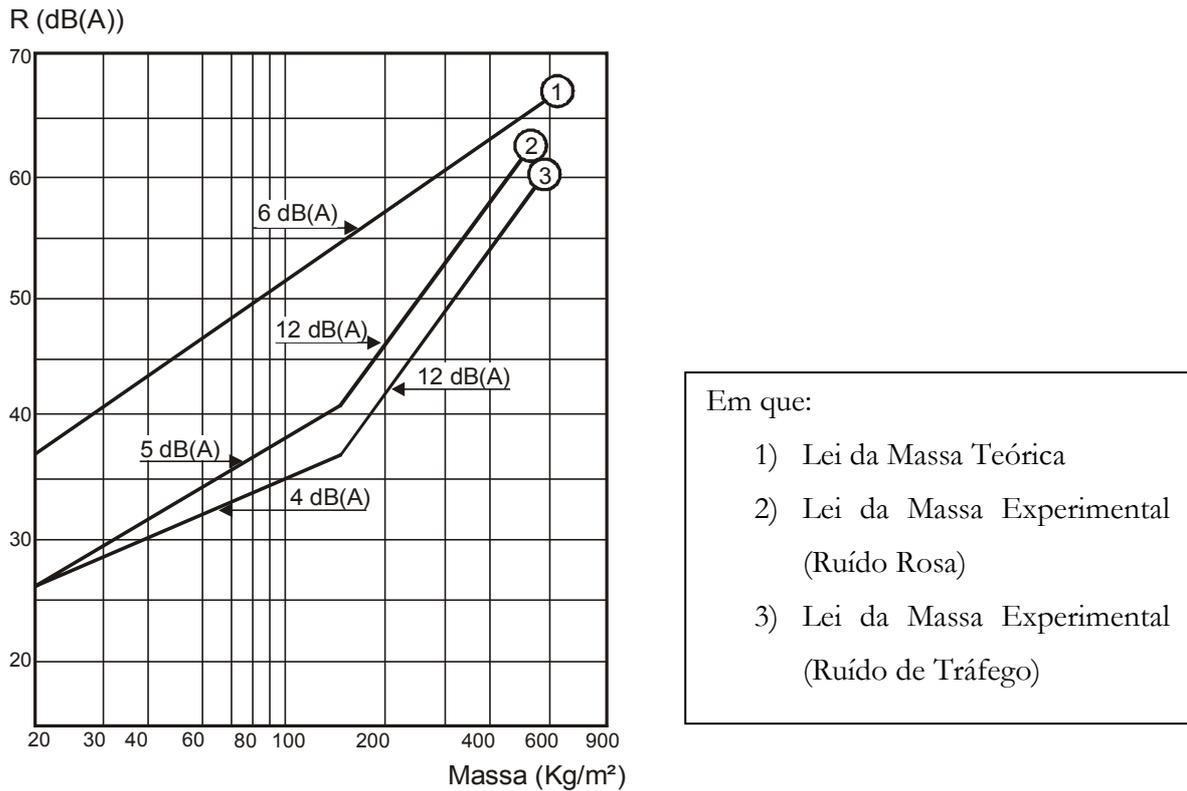


FIGURA 14: Lei da Massa (CSTB, 1982)

Observa-se que existe uma quebra nas retas experimentais, em 150 Kg/m^2 , o que reflete o estágio atual das técnicas construtivas, correlacionando a massa e a rigidez dos fechamentos. Assim, consideram-se dois grandes grupos: os chamados fechamentos leves, com massa inferior a 150 Kg/m^2 ; e os pesados, com mais de 150 Kg/m^2 .

SILVA (2000) realizou diversos ensaios laboratoriais com paredes de diferentes materiais e massas, a fim de avaliar os modelos previstos pela bibliografia e chegar a um equacionamento, com base em análises estatísticas, o mais próximo possível dos resultados obtidos na prática. Os modelos estudados foram os propostos pelo CSTB (1982) e por SANCHIDRIAN (1998).

Conforme o CSTB (1982), o valor único de isolamento, para 150 kg/m^2 é igual a 41 dB(A) . Acima desta massa, o índice R cresce à razão de 12 dB(A) a cada duplicação da massa. Abaixo desse valor, o crescimento é de 5 dB(A) por dobramento de massa para ruído rosa, e de 4 dB(A) , para um ruído de tráfego, segundo as expressões:

$$\text{Para } m < 150 \text{ kg/m}^2 \rightarrow R = 17 \log m + 4 \text{ dB(A)} \quad (8.a)$$

$$\text{Para } m > 150 \text{ kg/m}^2 \rightarrow R = 40 \log m - 46 \text{ dB(A)} \quad (8.b)$$

Para SANCHIDRIAN (1998), as expressões para determinação do valor único de isolamento são as seguintes:

$$\text{Para } m < 150 \text{ kg/m}^2 \rightarrow R = 16,6 \log m + 2 \text{ dB(A)} \quad (9.a)$$

$$\text{Para } m > 150 \text{ kg/m}^2 \rightarrow R = 36,5 \log m - 41,5 \text{ dB(A)} \quad (9.b)$$

Assim, SILVA (2000), elaborou gráficos que relacionam as duas leis acima estudadas; os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados e as equações propostas pelo autor, com base em análises estatísticas, e que apresentam desvio padrão relativo menor que os modelos de previsão anteriores.

As expressões resultantes do estudo de SILVA (2000) para cálculo do valor único de isolamento são as seguintes:

$$\text{Para } m < 150 \text{ kg/m}^2 \rightarrow R = 12,8 \log m + 13 \text{ dB(A)} \quad (10.a)$$

$$\text{Para } m > 150 \text{ kg/m}^2 \rightarrow R = 43,4 \log m - 55,3 \text{ dB(A)} \quad (10.b)$$

d) Região controlada pela coincidência:

A isolação sonora cresce de acordo com a lei da massa até uma certa frequência, onde se produz uma queda significativa no isolamento, devido ao fenômeno da coincidência. Esta é chamada frequência crítica **fc** do fechamento.

Conforme explica MÉNDEZ et al. (1994, p.111), esta frequência de coincidência acontece porque, no ar, o som se propaga por ondas longitudinais e sua velocidade é a mesma para todas as frequências. Nos sólidos, as ondas podem propagar-se de várias formas, sendo as ondas de flexão as mais importantes para fechamentos. Estas se propagam com velocidade proporcional à frequência. Dessa forma, haverá uma frequência crítica, na qual a projeção do comprimento de onda do som incidente será igual ao comprimento de onda livre à flexão, ao longo do fechamento, conforme a Figura 15.

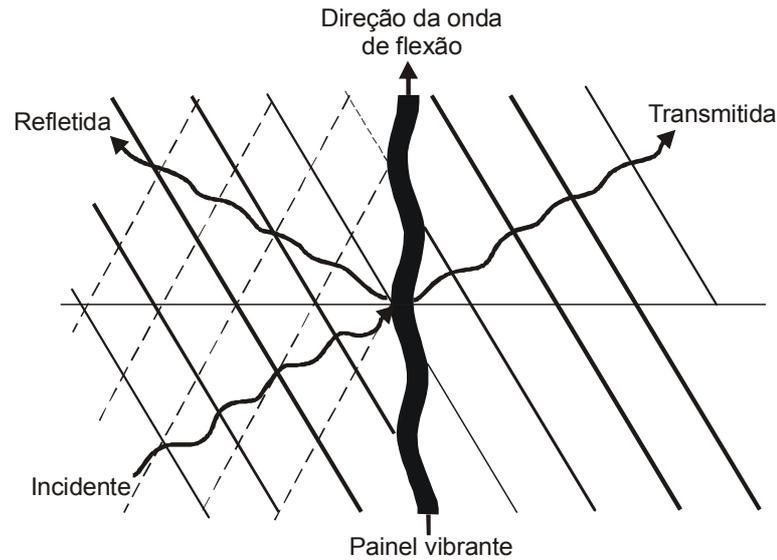


FIGURA 15: Efeito da coincidência (MÉNDEZ et al., 1994, Adaptado)

De acordo com MÉNDEZ et al. (1994, p.112), a frequência crítica f_c de um material pode ser calculada pela expressão:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \left(\frac{m}{B} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Onde:

c : velocidade do som

B : rigidez dinâmica à flexão

m : massa superficial

Sendo que a rigidez dinâmica à flexão é calculada por GERGES (1992, p.199), envolvendo as propriedades mecânicas de elasticidade dos materiais:

$$B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (12)$$

Onde:

E : módulo de Young

h : espessura da parede

ν : coeficiente de Poisson

Segundo o CSTB (1982), o valor da queda de isolamento na frequência crítica depende das perdas internas, da capacidade de gerar calor do material. Assim, para materiais de baixas perdas internas (aço, alumínio, vidro), a queda de isolamento é da ordem de 10 dB. Para materiais com perdas internas médias (concreto, madeira), a diminuição é de 6 a 8 dB. Já para materiais com altas perdas internas (borracha, cortiça), a diminuição é da ordem de 3 a 4 dB.

Para os materiais usualmente utilizados na construção civil para fechamentos, verifica-se que existem três regiões distintas quanto ao isolamento: a região controlada pela lei da massa, a região de coincidência onde temos a frequência crítica e a região acima da coincidência, onde o material volta a comportar-se seguindo a lei da massa.

Por isso da importância na identificação da frequência crítica de um fechamento, pois é nesta região que ocorrerá um empobrecimento do isolamento, criando uma imprecisão na previsão da isolação sonora. Como regra geral, procura-se utilizar um material com frequência crítica situada em uma zona pouco sensível ao ouvido humano, como nas frequências muito baixas ou muito altas, a fim de não comprometer o isolamento.

2.3.2 Isolamento acústico de fechamentos duplos

Como visto anteriormente, em casos normais, o isolamento a ruído aéreo de um fechamento simples segue a lei da massa, ou seja, quanto mais pesado for o material, maior será o isolamento. Além disso, para garantir a eficiência na isolação, devemos ter um material com frequência crítica adequada. No entanto, o uso generalizado da lei da massa não é suficiente para resolver todos os casos de isolamento sonoro, pois teríamos que aumentar significativamente a massa do fechamento, o que na maioria das vezes é inviável, por razões funcionais, de espaço, estruturais e econômicas.

Assim, conforme sugere GERGES (1992, p.205), “uma melhor solução para projetos de alta perda de transmissão, sem o emprego de grandes massas, é o uso de paredes duplas (ou triplas)”.

A combinação de fechamentos paralelos, afastados entre si, formando espaço preenchido pelo ar ou por algum material absorvente acústico, garante um isolamento maior que o efeito produzido pela lei da massa, para uma mesma espessura. É o chamado “efeito sanduíche” (SILVA, 1997, p. 89). Os componentes individuais do fechamento simples podem

ser constituídos pelo mesmo material ou por materiais diferentes, de espessuras iguais ou assimétricas.

O isolamento acústico proporcionado por uma parede dupla é diferente da soma dos isolamentos de cada parede. Segundo GERGES (1992, p.207), “a incorporação de um espaço de ar de 15 a 200 mm fornece um aumento na perda de transmissão de aproximadamente 6 dB acima da soma aritmética das perdas de transmissão de cada uma das duas paredes”. Com a utilização de um material absorvente no interior da cavidade de ar, o isolamento tende a aumentar ainda mais, já que parte da energia sonora é dissipada pelo material.

Assim, conforme MÉNDEZ et al. (1994, p.115), os elementos de um fechamento duplo estão acoplados entre si, de maneira elástica, por meio de uma camada de ar. A energia acústica transmitida pelo primeiro painel incide sobre o segundo, que por sua vez transmite parte dessa energia ao ar que o rodeia e reflete outra grande parte. Ocorre uma sucessão de reflexões na camada de ar e, em cada uma dessas reflexões, parte da energia é dissipada, conforme a Figura 16.

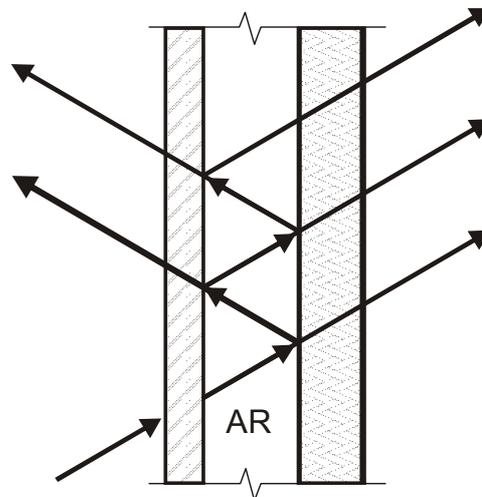


FIGURA 16: Reflexão e transmissão em um fechamento duplo (MÉNDEZ et al., 1994, p.115)

A eficiência do fechamento duplo depende da ligação entre os painéis, se esta união for muito rígida, o conjunto passa a funcionar como um único painel. A camada de ar situada entre os dois elementos rígidos cria um acoplamento elástico entre eles, sendo que o conjunto pode ser comparado a um sistema de duas massas separadas por uma mola, ou seja, um sistema massa-mola-massa.

Da mesma forma que para painéis simples, o isolamento de um fechamento duplo varia em função da frequência de incidência do som, motivo pelo qual podem ocorrer falhas no isolamento, segundo MÉNDEZ et al. (1994, p.116):

- a) Cada fechamento componente do sistema tem uma frequência crítica, onde ocorre perda de isolamento. Se os dois elementos têm frequências críticas diferentes, a curva de isolamento apresenta dois defeitos, já que quando um dos elementos não isola, o outro isola (Figura 17a). Já se os dois painéis têm a mesma frequência crítica, acontece uma só falha muito acentuada de isolamento (Figura 17b). Assim, é recomendado a escolha de elementos com diferentes frequências críticas, seja pela natureza ou espessura do fechamento, evitando uma queda maior de eficiência.

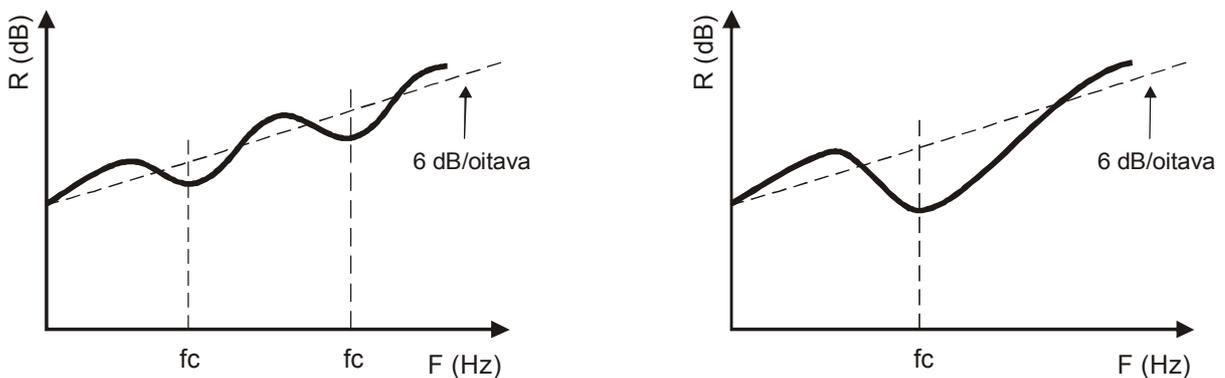


FIGURA 17: a) Diferentes frequências críticas

b) Frequências críticas coincidentes (MÉNDEZ et al, 1994, p. 116)

- b) A camada de ar situada entre os elementos da parede dupla cria um acoplamento elástico entre eles. É como se o sistema funcionasse ligado por uma mola. Esta ligação elástica pode possibilitar uma ressonância no sistema massa-mola-massa, em uma frequência onde o isolamento diminuirá, conforme a expressão (MÉNDEZ et al., 1994, p.117):

$$f_0 = 840 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (13)$$

Onde:

f_0 : frequência de ressonância massa-mola-massa

d : espessura da camada de ar (cm)

m_1 e m_2 : massa superficial das paredes (kg/m^2)

A partir desta expressão, conclui-se que quanto maior o afastamento entre os painéis, e quando mais pesados eles forem, mais baixa será a frequência de ressonância. Abaixo da frequência de ressonância, a “mola” não tem eficácia, e o isolamento é praticamente o mesmo da parede simples de mesma massa. Já acima desta frequência, o isolamento da parede dupla é muito superior à simples, já que a “mola” transmite muito pouco a vibração para o outro painel (Figura 18).

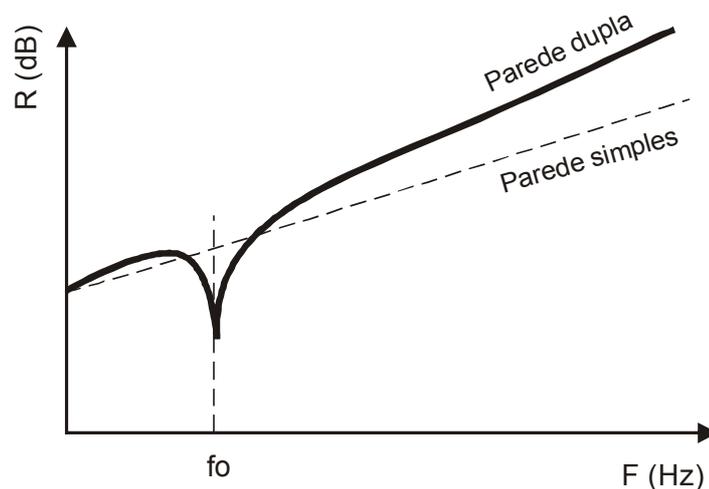


FIGURA 18: Diferença entre o isolamento de uma partição simples e uma dupla (MÉNDEZ et al., 1994, p.117)

- c) A camada de ar situada entre os painéis pode dar origem a ressonâncias (ondas estacionárias), de acordo com a relação existente entre sua espessura e o comprimento de onda do som incidente. Quando as ondas incidentes são paralelas ao fechamento, haverá ressonâncias se a frequência do som for igual a (MÉNDEZ et al., 1994, p.117):

$$f = n \frac{17000}{d} \quad (14)$$

Onde:

n: 1,2,3,...

d: espessura da camada de ar (cm)

Nestas frequências ocorre uma queda de isolamento da parede dupla (Figura 19). Para as distâncias mais usuais de fechamentos duplos (de 2 cm a 10 cm), as frequências de ressonância caem na região das altas frequências. Assim, é conveniente adotar um afastamento de maneira que as ressonâncias ocorram fora das zonas mais audíveis do ouvido humano.

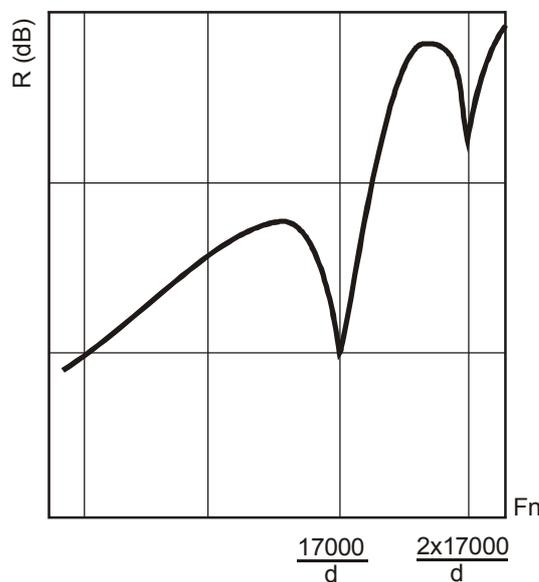


FIGURA 19: Diminuição do isolamento por ressonâncias da camada de ar (MENDÉZ et al., 1994, p.118)

2.3.3 Perda de transmissão em superfícies compostas

Para a determinação da perda de transmissão total de um fechamento composto por um conjunto de elementos de diferentes materiais e espessuras, deve-se conhecer a área de cada elemento e o seu respectivo coeficiente de transmissão τ . Desta forma, determina-se o índice R de uma parede homogênea acusticamente equivalente, conforme a expressão (MÉNDEZ et al., 1994, p.122):

$$R = 10 \log \frac{S}{S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2 + \dots + S_n \tau_n} \quad (15)$$

Onde:

S: área total do fechamento (m²)

S₁, S₂,..., S_n: áreas dos componentes individuais (m²)

τ₁, τ₂,..., τ_n: coeficientes de transmissão dos componentes individuais

2.4 Número único para avaliação do isolamento acústico

Para a realização de qualquer estudo sobre isolamento acústico, deve-se verificar a perda de transmissão do fechamento para cada frequência do som incidente, em todo o espectro de frequências audíveis.

Na prática, no entanto, é importante a avaliação e a expressão da perda de transmissão por meio de um número único, representativo global da capacidade de isolamento de um fechamento. A determinação deste número único tem o objetivo de facilitar a comparação inicial do desempenho e restringir a escolha dos componentes entre uma quantidade menor de possibilidades. Mas deve-se levar em conta que este procedimento é uma simplificação do problema, já que a performance final de isolamento depende de todo o espectro de frequências.

2.4.1 Índice de Redução Acústica *R_w* (ISO 717)

A Norma Internacional ISO 717 indica um método para quantificar, mediante um valor único, o isolamento a ruído aéreo dos elementos construtivos que compõem um fechamento, tais como paredes, pisos, portas e janelas. O método consiste em comparar os níveis de isolação sonora oferecidos por um elemento, medidos em bandas de 1/3 de oitava, com uma curva de referência, conforme a Figura 20.

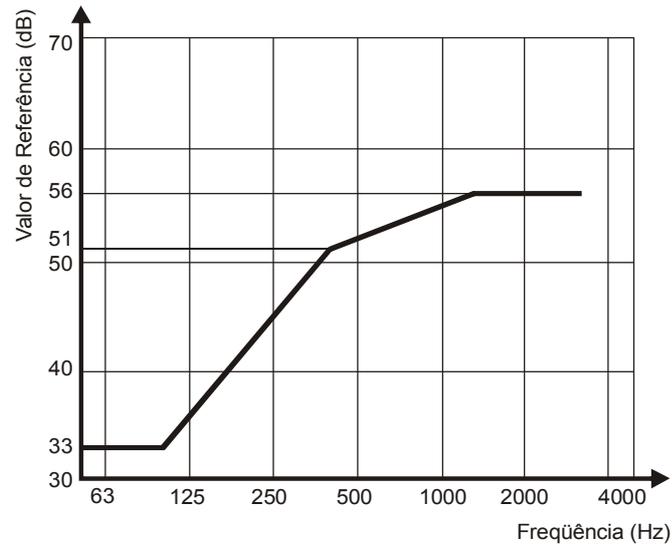


FIGURA 20: Curva de referência da perda de transmissão (ISO 717, 1996, p. 03)

Os valores medidos obtidos de acordo com a norma ISO 140/III são comparados com os valores de referência tabelados, conforme a Tabela 04, na frequência de medição, no intervalo de 100 Hz a 3.150 Hz para bandas de 1/3 de oitava.

TABELA 04 – Valores de referência.

Frequência Hz	Valores de referência (dB) Bandas de 1/3 de oitava	Valores de referência (dB) Bandas de 1/3 de oitava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1.000	55	55
1.250	56	

1.600	56	
2.000	56	56
2.500	56	
3.150	56	

Fonte: ISO 717, 1996, p. 04.

Para se realizar tal comparação, deve-se plotar a curva de referência, variando de 1 em 1 dB em direção à curva medida, até que a soma dos desvios desfavoráveis seja a maior possível, mas não excedendo a 32 dB, para bandas de 1/3 de oitava. O desvio desfavorável, em uma dada frequência ocorre quando o resultado da medição é menor que o valor de referência. Somente tais desvios desfavoráveis devem ser levados em conta.

O número único para o índice de redução sonora é o valor, em dB, da curva de referência a 500 Hz, após a plotagem acima ser realizada.

Para a determinação do R_w de cada ensaio realizado, foi desenvolvida uma planilha de cálculo utilizando o programa Excel, de acordo com os procedimentos descritos na norma.

2.4.2 Isolamento Global em dB(A)

É um procedimento realizado para determinar o nível de pressão sonora da sala receptora, expresso de modo global em dB(A), com base nos valores do isolamento medidos em cada banda de frequência. Este valor é obtido pela diferença dos níveis de pressão sonora na sala de emissão e na sala de recepção, ambos ponderados na curva (A), considerando o ruído de emissão como um ruído rosa.

O procedimento de cálculo, adotado neste trabalho, utiliza o programa ISOULT, que foi desenvolvido pelo LaTA na linguagem Pascal, baseado em um artifício de cálculo, com a finalidade de automatizar a execução do somatório ponderado em dB(A) e obter-se um valor único representativo do isolamento.

A avaliação em dB(A) é um procedimento importante, na medida em que representa de forma mais próxima o comportamento do ouvido humano. Além disso, o Isolamento Global é expresso com casa decimal, o que não ocorre com o R_w , onde os valores são inteiros. Isto possibilita um maior detalhamento e uma classificação mais precisa das amostras testadas, principalmente quando se tratam de pequenas variações de espessura ou massa.

2.5 O vidro

Em sua publicação de título Manual do Vidro (2000), a empresa Saint-Gobain Glass, líder mundial na indústria vidreira, descreve as características históricas, funcionais e físicas do vidro. Esta publicação foi base para as informações aqui apresentadas sobre os diferentes tipos de vidro estudados, quanto à utilização, fabricação e propriedades mecânicas. Também nesta seção são apresentados alguns estudos sobre isolamento acústico de vidros simples e duplos, da empresa mencionada e de outras bibliografias.

2.5.1 A utilização do vidro

Material nobre por excelência, a história do vidro teve a sua origem há 4.000 anos antes de Jesus Cristo.

A atração pelo vidro deu-se tanto pelas suas funções naturais como pela sua beleza, que o levou a fazer parte do mundo da arquitetura e da arte.

Tanto nas construções do passado como nas de hoje, o vidro é utilizado primeiro pela sua transparência, sinônimo de luz e de comunicação, das quais o homem tem necessidade. Símbolo de modernidade arquitetônica desde o século XIX, o vidro é igualmente um material ‘tecnologicamente avançado’, funcional e refinado, podendo-se tirar partido de suas qualidades de transparência de forma plena ou discreta.

Graças à investigação e aos esforços beneficiados nestas últimas décadas, o vidro contribuiu também de forma acentuada para a melhoria do conforto do lar. A diversidade dos vidros e das suas funções, a sua vertente em crescimento de aplicações interiores, proporcionam hoje ao projetista uma grande liberdade para por em prática uma verdadeira arquitetura de luz, que satisfaz plenamente as exigências de conforto moderno (SAINT-GOBAIN GLASS, 2000, p.02).

2.5.2 Composição do vidro

Os vidros sílico-sodo-cálcicos, utilizados na construção, são compostos de:

- Um vitrificante, a sílica, introduzida sob a forma de areia (70 a 72%);
- Um fundente, a soda, sob a forma de carbonato e sulfato (cerca de 14%);
- Um estabilizante, o óxido de cálcio, sob a forma de calcário (cerca de 10%);

- Vários outros óxidos, tais como o alumínio e o magnésio, que melhoram as propriedades físicas dos vidros, especificamente a resistência à ação dos agentes atmosféricos;
- Para determinados tipos de vidro, a incorporação de diversos óxidos metálicos permitem a coloração da massa.

2.5.3 Propriedades mecânicas

- Massa superficial: a densidade do vidro é de 2,5. Isto indica uma massa de 2,5 kg por cada m² e por cada mm de espessura para os vidros planos;
- Resistência à compressão: a resistência do vidro à compressão é muito elevada, na ordem de 1.000 N/mm² ou 1.000 MPa. Isto significa que para quebrar um cubo de vidro de 1 cm de lado, a carga necessária será na ordem de 10 toneladas.
- Resistência à flexão: um vidro submetido à flexão tem uma face em compressão e uma face em tração. A resistência à ruptura à flexão é na ordem dos 40 MPa para um vidro polido recozido, e de 120 a 200 MPa para um vidro temperado.
- Elasticidade: o vidro é um material perfeitamente elástico, nunca apresenta deformação permanente. No entanto é frágil, ou seja, submetido a uma flexão crescente, parte sem apresentar sinais precursores;
- Módulo de Young, E: este módulo exprime a força de tração que teoricamente será necessária aplicar a um provete de vidro para lhe provocar um alongamento igual ao seu comprimento inicial. É expresso em força pela unidade de área. Para o vidro, é $E = 7 \times 10^{10} \text{ Pa} = 70 \text{ GPa}$;
- Coefficiente de Poisson, μ : quando um provete sofre um alongamento sob a influência de uma tensão mecânica, constata-se um estreitamento de sua seção. O coeficiente de Poisson é a razão entre o estreitamento unitário sobre uma direção perpendicular, no sentido do esforço e o alongamento unitário na direção do esforço. Para os vidros de construção, o valor do coeficiente μ é de 0,22;

- Dilatação linear: a dilatação linear é expressa por um coeficiente que mede o alongamento em unidade de comprimento por variação de 1°C. Para o vidro, o coeficiente de dilatação linear é $9 \times 10^{-6} \text{ mm/}^\circ\text{C}$.

2.6 O vidro e o isolamento acústico

O comportamento do vidro quanto ao isolamento a ruídos aéreos varia de acordo com sua espessura e composição, sendo que cada um possui uma determinada frequência crítica, para a qual o material vibra mais facilmente e há uma queda de isolamento. Essa frequência crítica situa-se nas mais altas frequências quanto menor for a espessura do vidro.

Para o tratamento acústico de superfícies envidraçadas, deve-se levar em conta a questão da frequência crítica, procurando a garantia de uma performance mais homogênea em todas as frequências. Para tanto, a melhoria acústica acontece com o aumento da espessura do vidro e, principalmente, pela composição de vitrages duplas ou triplas assimétricas, ou seja, com vidros de espessuras ou tipos diferentes. Com esse tipo de combinação, as frequências críticas não são coincidentes, e a capacidade de isolamento aumenta. Outro fator importante nas vitrages duplas ou triplas é a espessura da camada de ar entre os vidros, que influenciará no isolamento do conjunto.

Atualmente existem vidros laminados especiais acústicos, onde o efeito da frequência crítica é minimizado. Em média, é possível ganhar de 1 a 3 dB para composições vidreiras similares e sobretudo assegurar uma homogeneidade de performance em todas as frequências.

2.6.1 Vidro monolítico comum

O vidro monolítico comum, liso, incolor, possui duas faces paralelas em vidro recozido, obtido pelo processo de imersão em um banho de estanho. A Tabela 05 apresenta as espessuras de vidros monolíticos, com seu respectivo peso e índice de redução acústica R_w , segundo testes realizados no laboratório do Centro de Desenvolvimento Industrial da Saint-Gobain Glass conforme ISO 717.

TABELA 05 – Vidros monolíticos comuns.

Espessura (mm)	Massa Superficial (Kg/m²)	Rw (dB)
3	7,5	29
4	10,0	30
5	12,5	30
6	15,0	31
8	20,0	32
10	25,0	33
12	30,0	34
15	37,5	36
19	47,5	37

Fonte: SAINT-GOBAIN GLASS, 2000, p.538.

De acordo com estes mesmos testes, o gráfico a seguir demonstra o comportamento acústico de vidros monolíticos comuns de 4 mm e 8 mm, ao longo de todo o espectro de frequências. A queda de isolamento na frequência crítica varia de 8 a 10 dB.

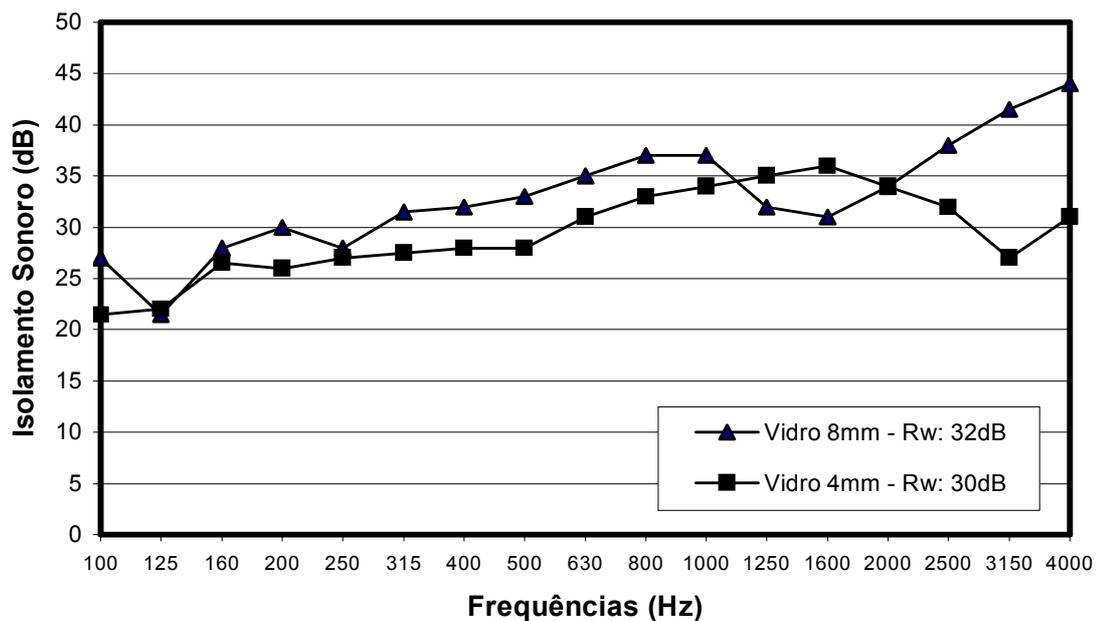


FIGURA 21: Isolamento de vidros simples (SAINT-GOBAIN GLASS, 2000, p.31)

Já TADEU (2001, p.321), que realizou experimentos com vidros simples, duplos e triplos, chegou a índices de redução acústica com valores um pouco menores e mais próximos para vidros com 4 mm e 8 mm de espessura ($R_w = 29$ dB e $R_w = 30$ dB, respectivamente).

Os resultados apresentados nos gráficos seguintes se referem aos estudos com vidros monolíticos comuns, em todo o espectro de freqüências medidas, realizados por PUJOLLE (1978). Salienta-se que o cálculo do isolamento global é dado em dB(A), o que difere em relação ao tratamento de dados proposto pela norma ISO 717.

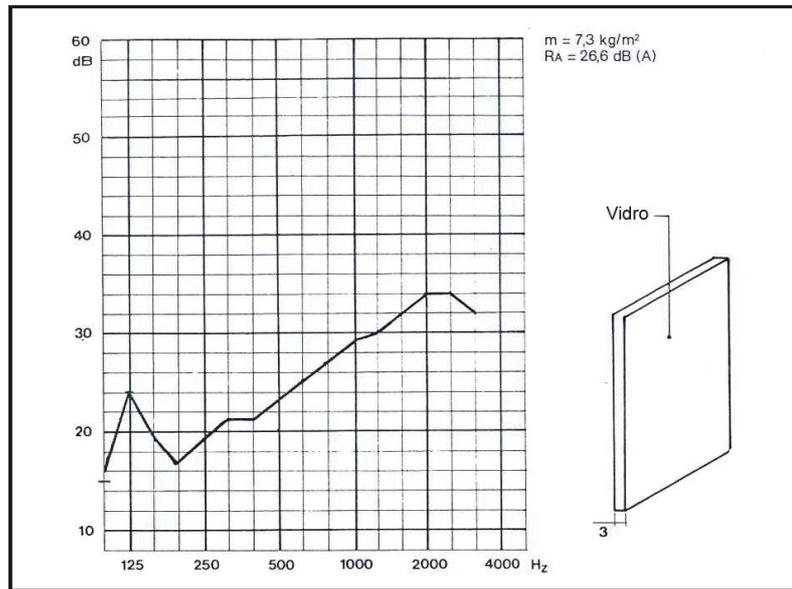


FIGURA 22: Isolamento de vidro comum 3 mm (PUJOLLE, 1978, p.533)

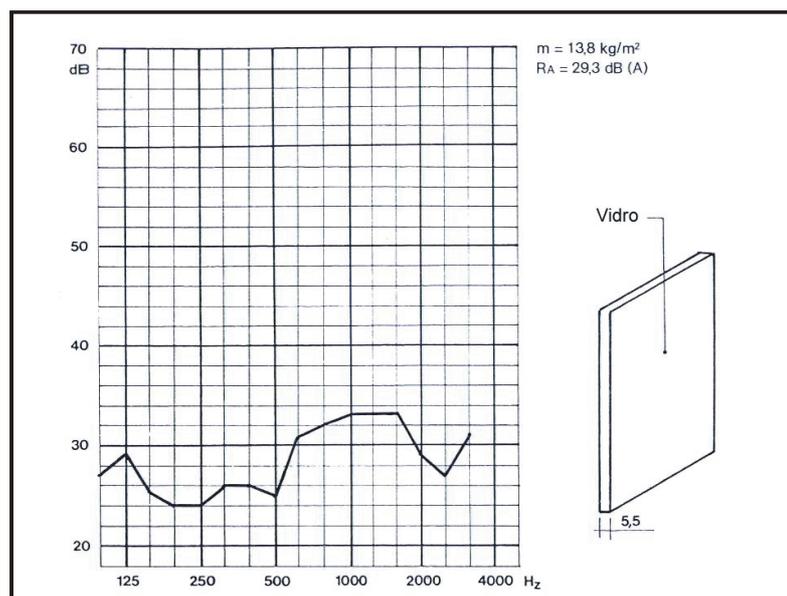


FIGURA 23: Isolamento de vidro comum 5,5 mm (PUJOLLE, 1978, p.531)

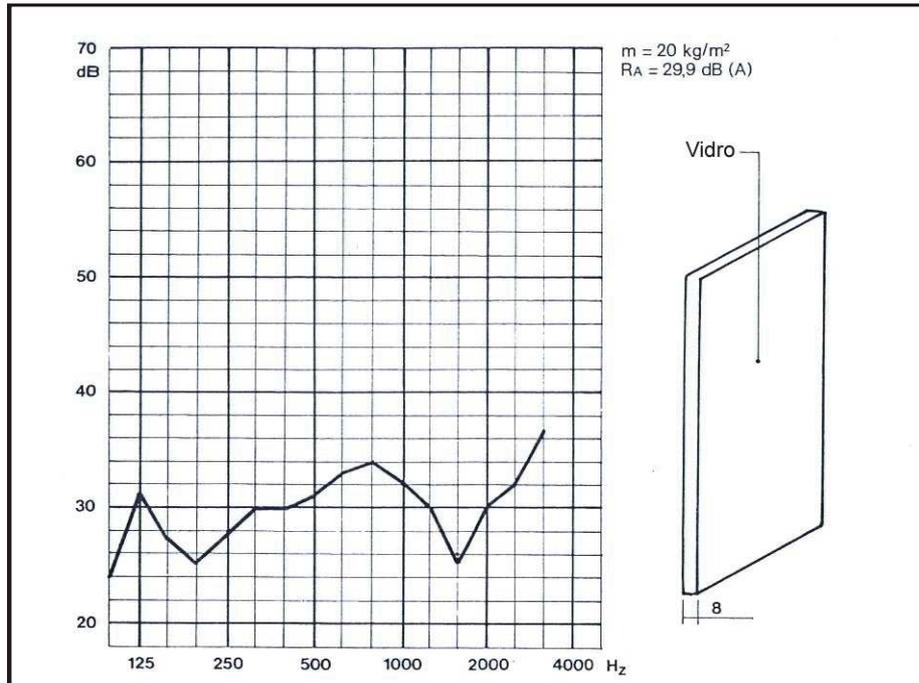


FIGURA 24: Isolamento de vidro comum 8 mm (PUJOLLE, 1978, p.530)

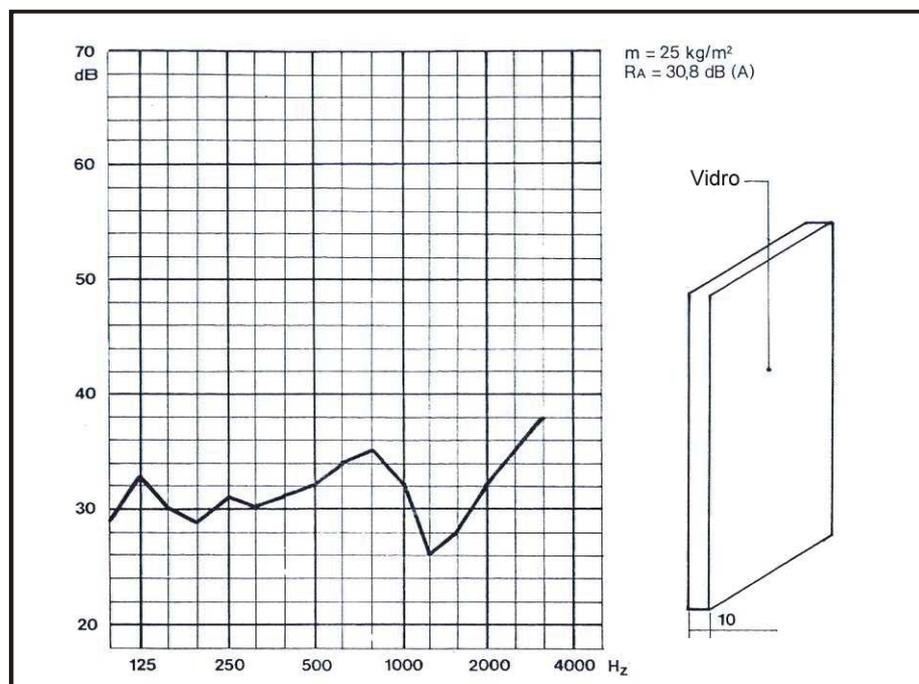


FIGURA 25: Isolamento de vidro comum 10 mm (PUJOLLE, 1978, p.529)

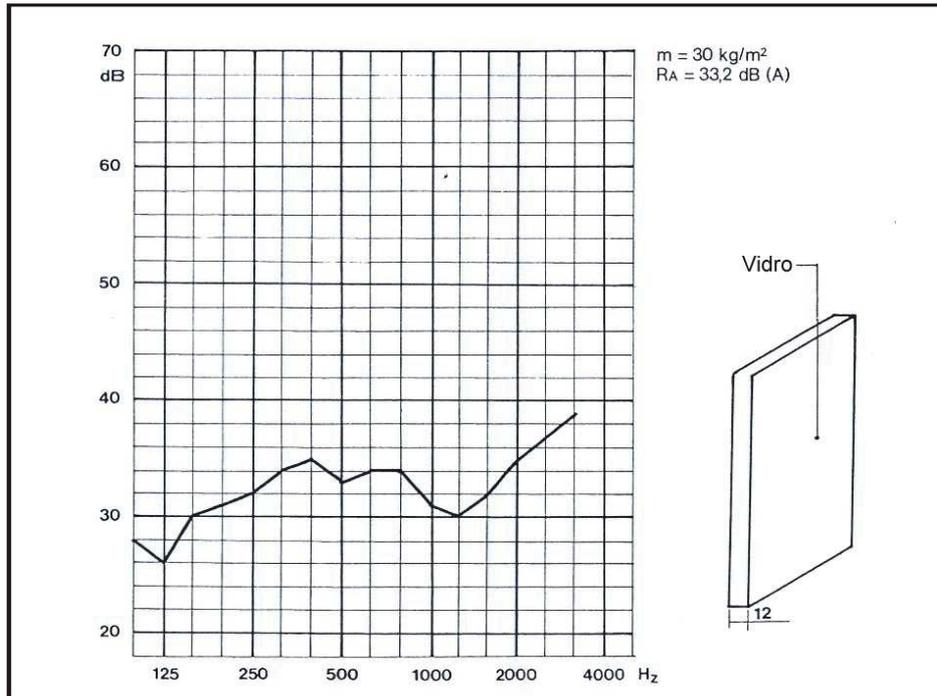


FIGURA 26: Isolamento de vidro comum 12 mm (PUJOLLE, 1978, p.526)

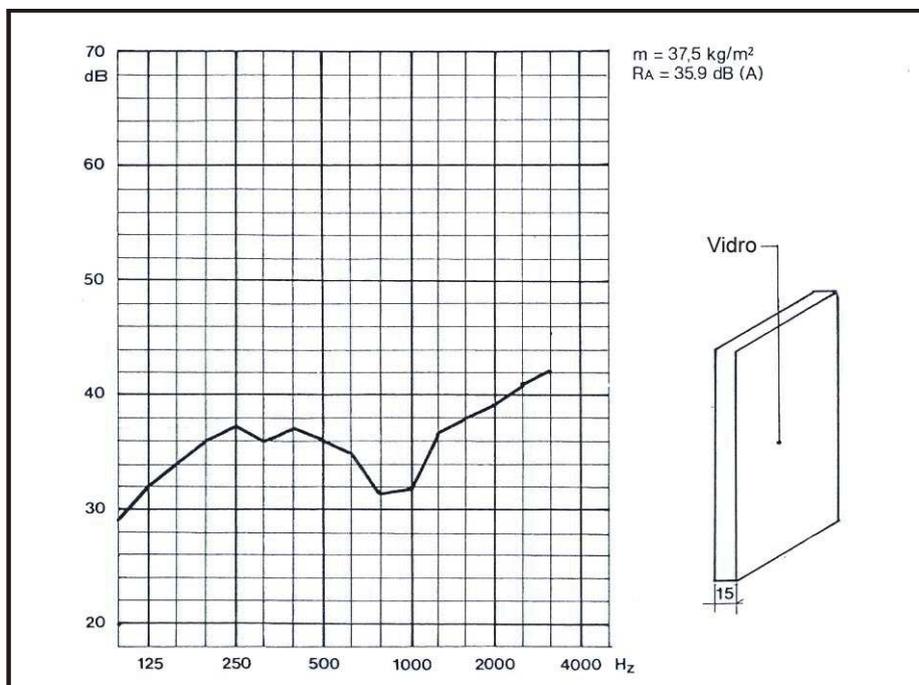


FIGURA 27: Isolamento de vidro comum 15 mm (PUJOLLE, 1978, p.522)

2.6.2 Vidro laminado

Os vidros laminados são compostos de dois ou mais vidros monolíticos, colados entre si através de um ou mais filmes de butiral de polivinil (PVB). Após a colocação do PVB, é obtida a aderência perfeita por tratamento térmico sob pressão. Em caso de quebra do vidro, os filmes de PVB retêm os fragmentos do vidro, por isso são muito utilizados como vidros de segurança. Os filmes de PVB podem ser incolores, opacos ou, em determinadas aplicações, coloridos. A Tabela 06 apresenta algumas composições de vidros laminados, com seu respectivo peso e índice de redução acústica R_w , segundo testes realizados no laboratório do Centro de Desenvolvimento Industrial da Saint-Gobain Glass, conforme ISO 717.

TABELA 06 – Vidros laminados.

Produto	Espessura (mm)	Massa Superficial (Kg/m²)	R_w (dB)
(3 + 3 .1)*	6	15,5	32
(4 + 4 .1)*	8	20,5	33
(5 + 5 .1)*	10	25,5	35
(6 + 6 .1)*	12	30,5	35
(3 + 3 .2)*	7	16,0	33
(4 + 4 .2)*	9	21,0	34
(5 + 5 .2)*	11	26,0	35
(6 + 6 .2)*	13	31,0	35
(4 + 4 .4)*	10	21,5	34

* (espessura 1º vidro comum + espessura 2º vidro comum . nº de filmes de PVB entre os vidros)

Fonte: SAINT-GOBAIN GLASS, 2000, p.562.

Os gráficos a seguir demonstram o desempenho acústico de diferentes composições de vidros laminados, ao longo de todo o espectro de frequências, segundo ensaios realizados por PUJOLLE (1978), com os respectivos isolamentos globais em dB(A):

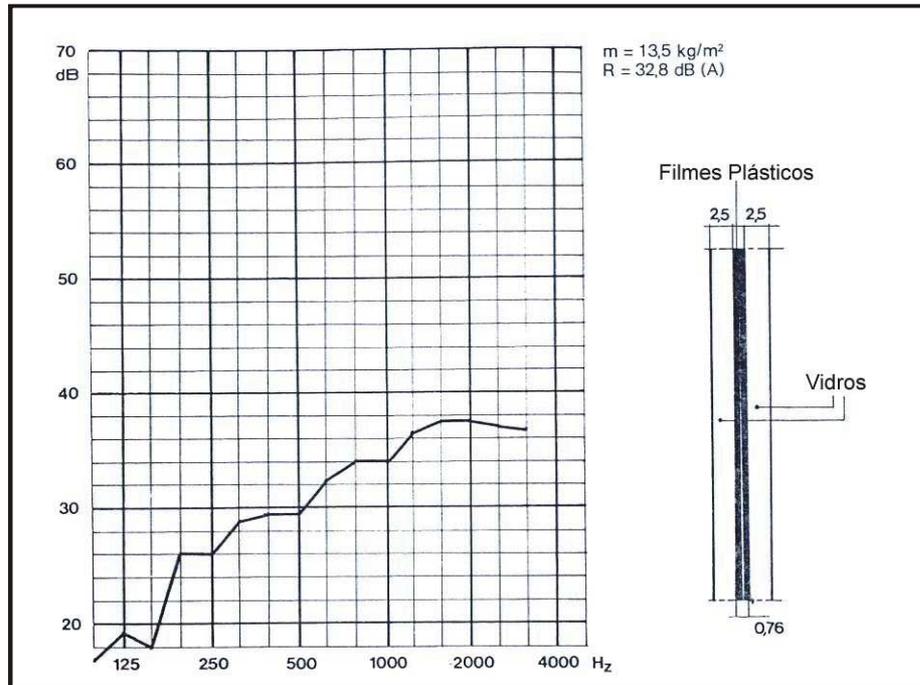


FIGURA 28: Isolamento de vidro laminado duplo; espessura total de 6 mm (PUJOLLE, 1978, p.527)

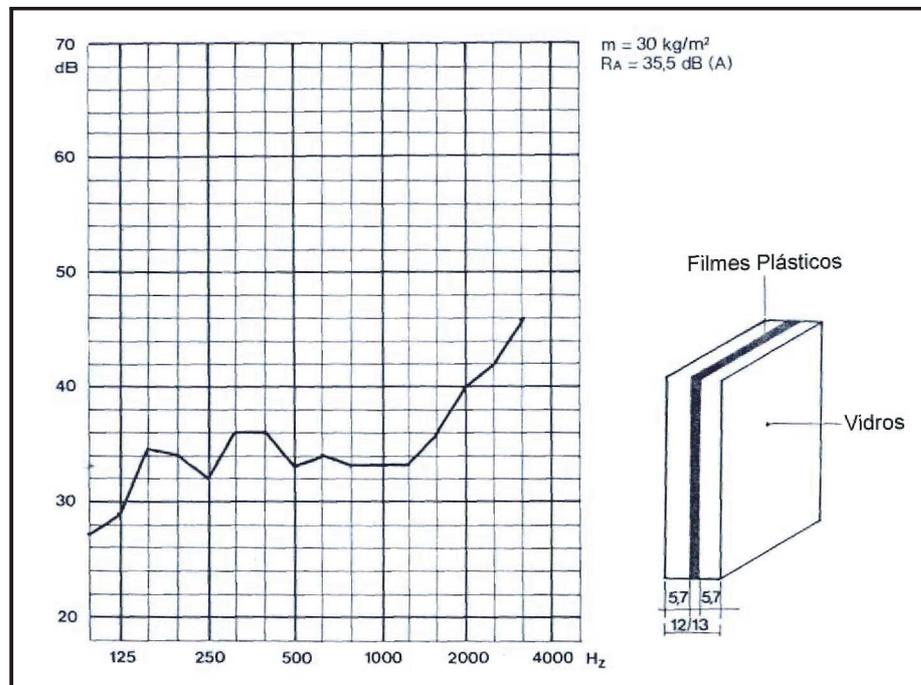


FIGURA 29: Isolamento de vidro laminado duplo; espessura total de 12/13 mm (PUJOLLE, 1978, p.524)