

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO

CLÁUDIO TRINDADE SCHERER

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES VERTICAIS
INTERNAS: avaliação de conjuntos de portas e paredes separadas pelo hall de
entrada**

São Leopoldo

2017

CLÁUDIO TRINDADE SCHERER

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES VERTICAIS
INTERNAS: avaliação de conjuntos de portas e paredes separadas pelo hall de
entrada**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo

2017

S326d Scherer, Cláudio Trindade.
Desempenho acústico de sistemas de vedações verticais internas: avaliação de conjuntos de portas e paredes separadas pelo hall de entrada / Cláudio Trindade Scherer. – 2017.
109 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2017.
"Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Fernanda de Oliveira."

1. Acústica arquitetônica. 2. Portas. 3. Isolamento acústico. 4. Vedação (Tecnologia). I. Título.

CDU 72

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

Dedico este trabalho à minha querida esposa, Bruna, que foi minha maior incentivadora nos momentos em que pensei em desistir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa, Bruna, pelo apoio incondicional durante todo este período, pelos finais de semana e noites que tivemos que nos privar da companhia um do outro, e por todo o incentivo nas vezes que pensei em desistir. Muito obrigado!

Aos meus pais, Cláudio e Liane, que sempre me incentivaram a continuar estudando e crescendo profissionalmente, às minhas queridas irmãs, Clarissa e Carla. Esta etapa só está sendo concluída graças a vocês também.

À minha orientadora, professora Maria Fernanda, um agradecimento muito especial por toda a ajuda e disponibilidade sempre que precisei.

Aos professores do mestrado, em especial ao professor Marco Gonzalez.

Aos professores da banca examinadora de qualificação, Bernardo Tutikian e Daniel Medeiros, obrigado pelos comentários e conselhos, foram muito úteis para a finalização do trabalho.

Aos meus colegas de turma, em especial à querida amiga Talita Barreto, pelo incentivo de sempre.

À professora Priscila Quesada e ao amigo e sócio Marcus Daniel Santos, pela carta de recomendação ao programa do Mestrado.

Aos amigos e sócios Marcus Daniel Santos, Mauro Joel Santos e Marcio Muriel Santos, um agradecimento especial pelo incentivo em entrar no mestrado e pelo tempo que tive que me ausentar do escritório para a realização da dissertação.

À minhas amigas e colegas de trabalho Mariana Pires e Gabriela Martins, pelo incentivo e disponibilidade em ajudar sempre.

À acadêmica de arquitetura da Unisinos Daniela Baptista, pela ajuda na qualificação.

Às construtoras que abriram as portas para a realização deste estudo, muito obrigado.

A todas as outras pessoas que ajudaram de alguma forma, principalmente com palavras de incentivo.

E principalmente à Deus, pois sem ele não teria tido a sorte e o privilégio de ter sempre pessoas tão especiais comigo.

RESUMO

O conjunto de paredes e portas separadas pela circulação condominial em edifícios residenciais passou a ter seu desempenho acústico avaliado, a partir da entrada em vigor da norma brasileira NBR 15575, que trata do desempenho das edificações. Nesse contexto, esse trabalho propõe determinar a influência das características dos elementos construtivos – portas e circulações entre unidades habitacionais – no isolamento ao ruído aéreo do conjunto de paredes e portas separadas pelo hall de entrada. Primeiramente foi realizado um estudo piloto que envolveu ensaios em campo feitos em diversas obras. Com isso, foram escolhidos três prédios e executados uma série de ensaios de desempenho acústico em campo, abrangendo diversas situações. Também foram usados artifícios para a vedação das frestas das portas, a fim de verificar a melhora do desempenho do sistema. Os resultados obtidos apontam para a perda de desempenho acústico com o aumento das frestas entre a folha da porta e o piso. Foram encontradas também relações com tempo de reverberação dos ambientes de circulação e a distância entre as portas de entrada das unidades habitacionais.

Palavras-chave: Acústica arquitetônica. Desempenho acústico. Isolamento acústico de portas. Sistema de vedação vertical interna.

ABSTRACT

Sets of walls and doors separated by condominium corridors in residential buildings started having their acoustic performance evaluated when the Brazilian standard NBR 15575 came into effect, which concerns the performance of buildings. In this context, this study proposed to determine the influence of the characteristics of constructive elements – doors and corridors between residential units – on the airborne sound insulation of the set of walls and doors separated by the entrance hall. First, a pilot study was conducted based on tests performed on many buildings, but it was noted that a deeper study on the subject would be required. Thereby, three buildings were chosen and a series of acoustic performance tests was executed, covering several situations. Maneuvers for sealing door gaps were used as well, in order to assess the performance gains of the system. The results indicated loss of acoustic performance when there were more gaps between the door leaf and the floor. Moreover, relations were found regarding the reverberation time of the corridors and the distance between the entrance doors of residential units.

Keywords: Architectural acoustics. Acoustic performance. Sound insulation of doors. Entrance hall.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descritores de isolamento acústico ao som aéreo	21
Tabela 2 – Frequência crítica (f_c) de alguns materiais pela espessura (e).....	23
Tabela 3 – Isolamento acústico de uma parede composta	34
Tabela 4 – Relação entre altura da fresta e isolamento sonoro	35
Tabela 5 – Valores de R_w obtidos para a parede de alvenaria de tijolo de 11 cm ensaiada, e previsão com abertura com 36 cm ²	38
Tabela 6 – Valores de R_w obtidos para a parede de alvenaria de tijolo de 11 cm, ensaiada com aberturas de 6 cm x 6 cm, 18 cm x 2 cm e 36 cm x 1 cm	38
Tabela 7 – Tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio A	47
Tabela 8 – Frestas das portas do 4º pavimento do Prédio A	47
Tabela 9 – Frestas das portas do 5º pavimento do Prédio A	47
Tabela 10 – Tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio B	49
Tabela 11 – Frestas das portas do 2º pavimento do prédio B.....	50
Tabela 12 – Tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio C	52
Tabela 13 – Frestas das portas do 2º pavimento do Prédio C	52
Tabela 14 – Frestas das portas do 3º pavimento do Prédio C	52
Tabela 15 – Resultados do 4º pavimento do Prédio A.....	58
Tabela 16 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência e frestas médias das portas entre apartamentos e hall de entrada	61
Tabela 17 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência e frestas médias das portas entre apartamentos e hall de entrada	64
Tabela 18 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência de todas as situações no 2º pavimento	67
Tabela 19 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência de todas as situações no 3º pavimento	71
Tabela 20 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência e frestas médias das portas entre apartamentos e hall de entrada	73
Tabela 21 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência	76
Tabela 22 – Critérios de diferença padronizada de nível ponderada, $D'_{nT,w}$ quanto ao ruído aéreo entre apartamentos separados pelo hall de entrada.....	76
Tabela 23 – Valores obtidos em cada ensaio e respectiva classificação	77
Tabela 24 – Relação dos conjuntos porta/parede.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do som através de uma onda sonora.....	16
Figura 2 – Designação do som, nas faixas de frequências	17
Figura 3 – Propagação de ruído aéreo em uma edificação.....	18
Figura 4 – Propagação de ruído de impacto em uma edificação	19
Figura 5 – Diferentes contribuições na transmissão sonora total entre ambientes	20
Figura 6 – Curva típica do isolamento de uma parede simples homogênea.....	22
Figura 7 – Modelo teórico da transmissão de energia sonora através de uma parede	24
Figura 8 – Redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogêneos, simples, em função de sua massa superficial.....	25
Figura 9 – Transmissão do som em paredes duplas.....	26
Figura 10 – Contribuição do campo direto e reverberante	27
Figura 11 – Esquema teórico da propagação do som em corredores.....	28
Figura 12 – Isolamento acústico de alvenarias de blocos cerâmicos com revestimento de gesso acartonado.....	31
Figura 13 – Isolamento acústico de portas com tratamento das frestas	34
Figura 14 – Sistemas de vedação utilizados em portas	35
Figura 15 – Exemplos de sistemas de vedação de portas	36
Figura 16 – Sistema de vedação de uma porta acústica.....	36
Figura 17 – Problemas típicos de execução em portas acústicas.....	37
Figura 18 – Isolamento acústico entre a circulação e o interior de quarto de hotel	37
Figura 19 – Ilustração esquemática de uma separação composta	40
Figura 20 – Ilustração de duas salas ao longo de um corredor.....	41
Figura 21 – Equipamentos utilizados nas medições	43
Figura 22 – Medidas das frestas das portas, uma em cada lado da porta.....	44
Figura 23 – Esquema geral das situações consideradas nos ensaios em campo	44
Figura 24 – Planta baixa do pavimento tipo do Prédio A.....	45
Figura 25 – Apartamento do Prédio A: (a) vista interna e (b) detalhe da porta de entrada	46

Figura 26 – Hall de entrada do Prédio A: (a) circulação, (b) porta de entrada e (c) vedação da porta.....	46
Figura 27 – Planta baixa do pavimento tipo do Prédio B.....	48
Figura 28 – Apartamento do Prédio B: (a) vista interna da sala e (b) detalhe da porta de entrada	49
Figura 29 – Hall de entrada do Prédio B: (a) porta de entrada, (b) escada e (c) circulação	49
Figura 30 – Planta baixa do pavimento tipo do Prédio C	50
Figura 31 – Apartamento do Prédio C: (a) vista interna da sala e (b) detalhe da porta de entrada	51
Figura 32 – (a) Hall de entrada, (b) porta de entrada e (c) vedação da porta	51
Figura 33 – Veda Porta utilizado: (a) com a porta aberta, (b) com a porta fechada e (c) vista do hall	53
Figura 34 – Planta baixa do 4º pavimento do Prédio A	54
Figura 35 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A43-hall, A48-hall e A43-A48.....	55
Figura 36 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A43-A48, A43-A47 e A43-A49.....	56
Figura 37 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A48-A47, A48-A49 e A43-A47 e A43-A49	57
Figura 38 – Isolamento ao ruído aéreo de todas as situações no 4º pavimento do Prédio A.....	58
Figura 39 – Planta baixa do 5º pavimento do Prédio A	59
Figura 40 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A53-hall, A58-hall e A53-A58.....	60
Figura 41 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos e hall de entrada.....	61
Figura 42 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall	62
Figura 43 – Planta baixa do 2º pavimento do Prédio B	63
Figura 44 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: B21-hall, B22-hall e B22-B21	64
Figura 45 – Planta baixa do 2º pavimento do Prédio C	65
Figura 46 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: C23-hall C24-hall, C24-C23 e C23-C24.....	66

Figura 47 – Planta baixa do 3º pavimento do Prédio C.....	68
Figura 48 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: C33-hall C34-hall e C34-C33, com e sem o uso do Veda Porta.....	69
Figura 49 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: C34-C33, C34-C31 e C34-C32.....	70
Figura 50 – Isolamento ao ruído aéreo de todas as situações no 3º pavimento ..	70
Figura 51 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos e hall de entrada.....	72
Figura 52 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall	74
Figura 53 – Posições da fonte sonora no ambiente emissor.....	74
Figura 54 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos C23-C24, separados pelo hall, considerando posições diferentes de fonte sonora	75
Figura 55 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall	78
Figura 56 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall	80

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

$D'_{nT,w}$ – Diferença padronizada de nível ponderada para ensaios em campo

$D'_{2m,nT,w}$ – Diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros da fachada para ensaios em campo

dB – Decibel

EN – European Standard

Hz – Hertz

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO – International Organization for Standardization

kHz – Quilo Hertz

PT – Perda de transmissão

R_w – Índice de redução sonora ponderado

TR – Tempo de reverberação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 DEFINIÇÃO DO TEMA.....	15
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
2 ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS	16
2.1 SOM E RUÍDO	16
2.2 ISOLAMENTO ACÚSTICO AO RUÍDO AÉREO	19
2.2.1 Desempenho acústico de paredes e divisórias	28
2.2.2 Desempenho acústico de portas	32
2.3 ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO DE FECHAMENTOS COMPOSTOS.....	39
3 MÉTODO	42
3.1 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÕES.....	42
3.2 OBJETOS DE ESTUDO.....	44
3.2.1 Prédio A	45
3.2.2 Prédio B	47
3.2.3 Prédio C	50
4 RESULTADOS	54
4.1 PRÉDIO A	54
4.1.1 Ensaios realizados no 4º pavimento	54
4.1.2 Ensaios realizados no 5º pavimento	59
4.1.3 Ensaios realizados entre apartamentos e hall	60
4.1.4 Comparação de ensaios realizados entre apartamentos separados pelo hall de entrada	62
4.2 PRÉDIO B	62
4.2.1 Ensaios realizados no 2º Pavimento	62
4.3 PRÉDIO C	65
4.3.1 Ensaios realizados no 2º Pavimento	65
4.3.2 Ensaios realizados no 3º Pavimento	67
4.3.3 Comparação de ensaios realizados entre apartamentos e hall	71

4.3.4 Comparação de ensaios realizados entre apartamentos separados pelo hall de entrada.....	73
4.3.5 Análise da posição da fonte sonora em relação ao isolamento global	74
4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SEGUNDO A NBR 15575.....	76
4.5 COMPARAÇÕES ENTRE RESULTADOS DOS TRÊS PRÉDIOS	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – Estudo Piloto	86
ANEXO A – Certificados de calibração dos equipamentos	107

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor da construção civil no Brasil passa por uma importante etapa de adaptação para atendimento dos diferentes requisitos da NBR 15575 (ABNT, 2013a), mais conhecida como Norma de Desempenho. Os requisitos de desempenho acústico, especificamente, têm demandado vários estudos para a verificação da eficiência de materiais, elementos e sistemas construtivos que se encontram disponíveis no mercado.

1.1 JUSTIFICATIVA

O conforto acústico em edificações é importante por uma série de fatores, como garantir privacidade nos ambientes internos, permitir a inteligibilidade das palavras, além de manter a saúde dos ocupantes, já que a exposição ao ruído em níveis elevados causa uma série de problemas ao ser humano. Alguns problemas relacionados ao ruído incluem perda de audição, stress, hipertensão, perda do sono, falta de concentração, baixa produtividade, deterioração da qualidade de vida e redução de oportunidades de repouso.

Bistafa (2011) considera que os profissionais que atuam no Brasil, envolvidos em solucionar problemas de ruído, têm as mais diversas formações, com a necessidade de embasamento teórico para enfrentar problemas práticos. Ainda segundo o autor, as etapas para esse tipo de atuação profissional incluem o entendimento de normas e legislações, a especificação de materiais adequados, a escolha do tipo de instrumentação e dos parâmetros para medições e a capacidade técnica para entender os resultados dessas medições.

Segundo Asakura et al. (2007), para manter um ambiente sonoro confortável dentro da edificação, o desempenho do isolamento acústico é um dos fatores mais importantes. Nas cidades modernas, as edificações estão localizadas em locais vizinhos, muito próximas umas das outras, e com grande volume de tráfego, sendo necessário um adequado isolamento acústico. Em tal situação, como o desempenho acústico de portas e janelas pode ser relativamente baixo, esses elementos podem ser um gargalo para o enfraquecimento do isolamento acústico.

Além do ruído urbano, produzido externamente à edificação, existem os sons que são gerados pelo uso dos ambientes internos que, em edifícios residenciais, são

particularmente incômodos quando produzidos por vizinhos de unidades habitacionais distintas. Segundo Prato e Schiavi (2015) nota-se um crescente uso de fontes sonoras com equipamentos mais potentes de áudio e vídeo dentro das habitações, tanto do ponto de vista da quantidade de som emitido como, também, da componente tonal, com o aprimoramento da reprodução do áudio em baixas frequências. No entanto, os sistemas construtivos não alteraram para essa nova geração de som nas habitações.

No Brasil, a NBR 15575 trouxe para o setor da construção civil a necessidade de melhoria nos processos construtivos e maior conhecimento dos sistemas e materiais utilizados nas obras. A acústica de edifícios, em conjunto com os requisitos da NBR 15575, vêm contribuir para uma qualificação na qualidade de vida das pessoas, concebendo edifícios com níveis adequados de conforto acústico, a partir da classificação de sistemas construtivos.

A norma apresenta requisitos de desempenho acústico para os sistemas construtivos de pisos, coberturas e de vedações verticais, com as distinções entre o som aéreo e o som de impacto. Os sistemas de vedações verticais podem contemplar as vedações externas, ou fachadas, e as vedações internas. No caso, específico das vedações internas, a NBR 15575 (ABNT, 2013b) estabelece parâmetros para conjuntos de paredes e portas separadas pelo hall, ou seja, os sistemas que constituem as entradas das unidades habitacionais autônomas em edificações residenciais que estão separadas pela circulação horizontal. As entradas ou acessos principais das unidades habitacionais são os elementos de transição entre uma área de uso comum e uma área privativa de edifícios residenciais, para os quais a privacidade pode ficar comprometida em função de alguma fragilidade acústica desses sistemas. Além disso, identifica-se que esses sistemas de vedações, separados pela circulação, apresentam algumas variáveis que são determinantes do desempenho acústico geral como, por exemplo, o tipo e a forma de instalação das portas, o tipo e a forma de execução das alvenarias e a reverberação do hall.

Desta forma, considerando-se a atual necessidade de caracterização do desempenho acústico dos sistemas construtivos e as mudanças na geração dos sons em edificações habitacionais, esse trabalho se caracteriza por contribuir na discussão de uma questão contemporânea da cadeia produtiva da construção civil nacional.

1.2 DEFINIÇÃO DO TEMA

O tema deste trabalho está caracterizado dentro da área de conhecimento da Tecnologia de Arquitetura e Urbanismo, com o enfoque na acústica de edifícios. O isolamento acústico de elementos e sistemas construtivos é uma das partes que requerem maior atenção para se atingir o desempenho acústico adequado em edifícios residenciais e, a qualidade dos sistemas de vedações verticais internos, pode assegurar melhores condições de conforto para os usuários. Nesse sentido, o tema definido neste trabalho aborda o isolamento sonoro de sistemas de vedações verticais internas, considerando-se o conjunto de paredes e portas separadas pela circulação horizontal em edifícios residenciais.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é determinar a influência das características das portas e das circulações no isolamento sonoro entre duas unidades habitacionais distintas, separadas pelo hall de entrada. Em relação às portas foram levados em conta fatores como a composição das mesmas e as frestas junto ao piso, e quanto às circulações foram avaliadas a largura e o volume das mesmas.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Avaliar comparativamente a redução da eficiência do isolamento sonoro dos sistemas de vedações verticais internas constituídos por parede e porta, através de ensaios em campo;
- b) Avaliar a influência das frestas das portas de entrada no isolamento acústico do sistema vertical;
- c) Analisar a compatibilidade dos sistemas em relação ao desempenho acústico conforme a NBR 15575.

2 ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

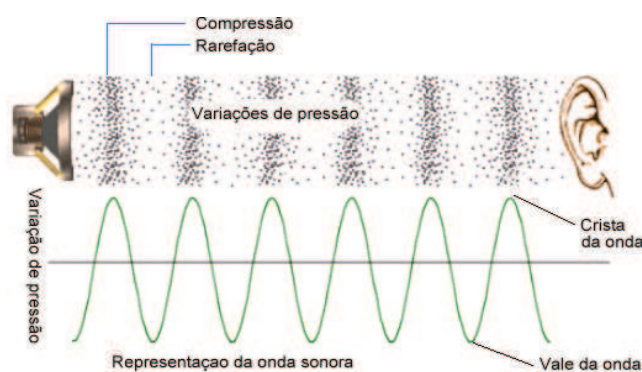
Neste capítulo foi feita uma revisão bibliográfica sobre alguns conceitos importantes de acústica, isolamento acústico, estimativas e desempenho acústico, bem como outras pesquisas desenvolvidas sobre o tema abordado neste trabalho.

2.1 SOM E RUÍDO

De acordo com a NBR 16313:2014 (ABNT, 2014) a definição de som é explicada como as flutuações de pressão em torno da pressão ambiente nas frequências compreendidas entre 20 Hz e 20 kHz. O conceito de som é associado, neste caso, à sensação auditiva humana. Som e ruído são da mesma natureza física, e, de acordo com a situação, um som pode ser designado como ruído.

O som é uma sensação auditiva desencadeada por uma onda acústica. Essa onda é resultado de uma vibração do ar, devido a uma série de compressões e rarefações. A propagação sonora se dá em todas as direções a partir da fonte, e a velocidade de propagação é uma característica do meio, sólido, líquido ou gasoso (MEISSER, 1973).

Figura 1 – Representação do som através de uma onda sonora



Fonte: Portal Ft.Pt apud RUSSEL (2002).

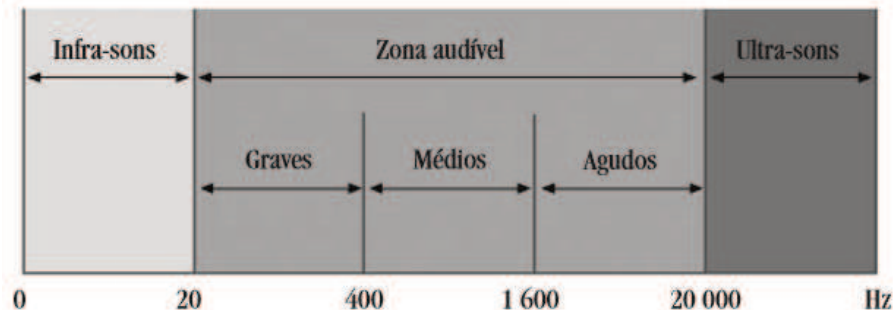
Segundo Gerges (2000), ruído é um som desagradável e indesejável. Já Meisser (1973) descreve o ruído como uma mescla complexa de sons de diferentes frequências. Os ruídos têm uma característica própria e bem marcada, podem ser uma voz humana ou o ruído de uma máquina. Quando estes ruídos são percebidos,

podem ser reconhecidos, eles têm uma fisionomia particular, em função das frequências que são compostos.

De acordo com a NBR 12179:1992 (ABNT, 1992) o ruído é definido como uma mistura de sons cujas frequências não seguem nenhuma lei precisa. Cabe lembrar que o ruído é uma sensação subjetiva, uma vez que sensações desagradáveis para algumas pessoas podem ser agradáveis para outros. Em resumo, o ruído é o som captado de forma excessiva ou indesejado pelo receptor. Já a NBR 16313:2014 (ABNT, 2014) define o termo ruído como os sons que podem causar incômodos, ser indesejáveis ou não inteligíveis.

A gama de frequências audíveis para o ser humano pode ser dividida em três zonas: baixas, médias e altas frequências (graves, médios e agudos, respectivamente). A audição humana tem maior sensibilidade na gama de frequências de 1000 a 4000 Hz, sendo que nesta faixa é necessária uma fração reduzida de energia sonora para manter a flutuação da pressão sonora (PATRÍCIO, 2010).

Figura 2 – Designação do som, nas faixas de frequências



Fonte: Patrício (2010, p. 17).

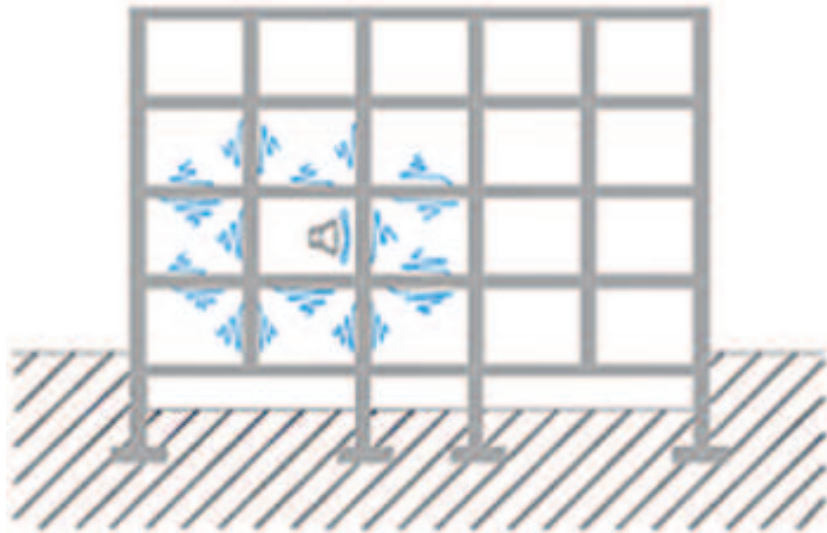
Desde a segunda metade do século passado a Organização Mundial da Saúde tem incentivado estudos sobre os efeitos de ruído sobre o homem. Alguns malefícios do ruído são a perda parcial da audição, problemas gastrointestinais e cardiovasculares, problemas respiratórios e de secreções hormonais, distúrbios do sistema nervoso, aumento da pressão arterial, entre outros (CARVALHO et al., 2006).

A área da acústica se divide em outras subáreas mais específicas, dentre as quais, a acústica de edifícios, que se caracteriza pelo estudo do comportamento do som e de especificações construtivas com a finalidade de qualificar os ambientes

construídos frente aos diferentes requisitos acústicos. Nesse sentido, pode-se definir dois tipos básicos de ruído em uma edificação a partir dos possíveis meios de transmissão: ruído aéreo e ruído de impacto.

Os ruídos aéreos são transmitidos pelo ar, e derivam da excitação direta do mesmo causado por uma fonte sonora, que pode ser, no caso de edificações, ruído de tráfego rodoviário ou aeronáutico, de equipamentos de caráter coletivo ou individual, ou mesmo pela própria atividade cotidiana dos moradores. Os campos sonoros formados no interior dos edifícios, a partir destas fontes sonoras, podem possuir características variadas em função do tipo da fonte e da sua composição espectral (BISTAFA, 2011). De acordo com a NBR 16313:2014 (ABNT, 2014) o ruído aéreo é o som que se propaga pelo ar.

Figura 3 – Propagação de ruído aéreo em uma edificação

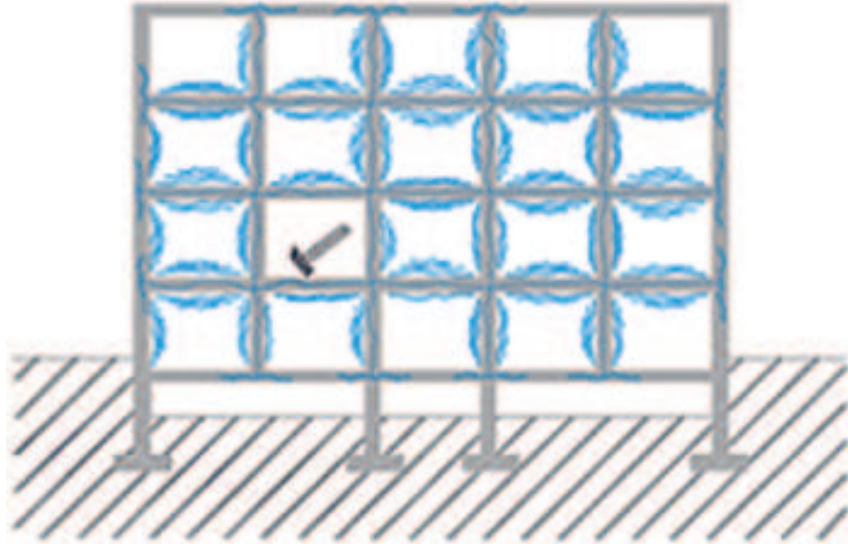


Fonte: Patrício (2010, p. 99).

Os ruídos de impacto se originam pelo choque mecânico exercido diretamente sobre um elemento construtivo da edificação, especialmente os sistemas de pisos. Os sons de impacto podem se propagar com muita facilidade entre todo o edifício, dependendo dos tipos de vínculo entre os elementos e sistemas construtivos. Como exemplos de ruído de impacto pode-se destacar a queda de objetos, o arrastar de móveis, o caminhar de pessoas sobre o piso. Estes choques produzem excitações sobre os elementos construtivos que se propagam por ondas elásticas a todo esse elemento e aos que se encontram ligados, transformando-o em uma fonte de radiação de energia (PATRÍCIO, 2010). De

acordo com a NBR 16313:2014 (ABNT, 2014) o som de impacto é o som resultante do impacto entre materiais.

Figura 4 – Propagação de ruído de impacto em uma edificação



Fonte: Patrício (2010, p. 99).

Apesar do ruído de impacto ser muito relevante para as análises do desempenho acústico de edificações, neste trabalho serão mais detalhadas as questões pertinentes ao som aéreo em função do tema proposto.

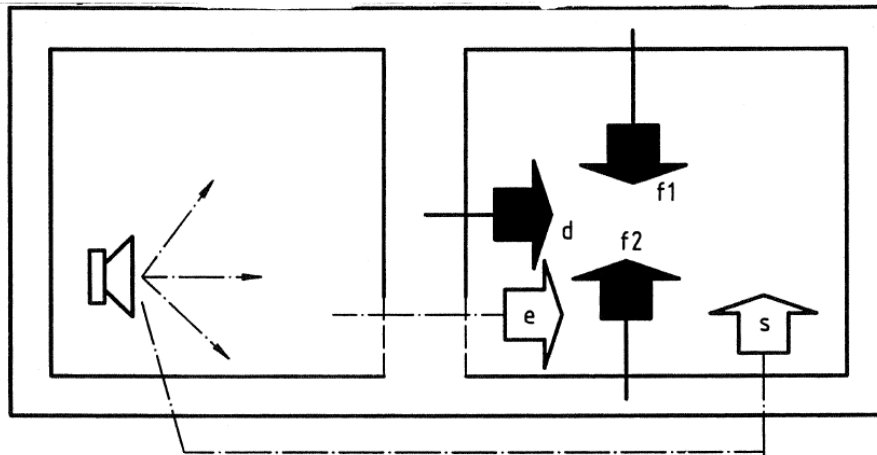
2.2 ISOLAMENTO ACÚSTICO AO RUÍDO AÉREO

O isolamento a sons aéreos é classificado como um aspecto significativo quando se trata de conforto acústico de habitações. Ele é assegurado por elementos como portas e paredes, que compõem os sistemas de compartimentação da edificação. Os sons produzidos no interior de edificações têm origens diversas e diferentes características de emissão, podendo variar no espaço e no tempo, na natureza da fonte emissora e em sua composição espectral, ou seja, distribuição dos valores de pressão sonora por valores de frequência (PATRÍCIO, 2010).

A transmissão de um som entre dois compartimentos pode ser feita de forma direta, quando há um elemento comum aos dois compartimentos, ou de forma secundária, quando existem elementos adjacentes ou espaços (MATEUS, 2012). A Figura 5 ilustra os diferentes meios de propagação do som: pela radiação direta “d”

através do elemento de separação; através dos flancos “f1” e “f2” por via estrutural; por elementos instalados na parede “e”; por transmissão indireta “s”.

Figura 5 – Diferentes contribuições na transmissão sonora total entre ambientes



Fonte: EN 12354 (2000).

Mateus e Pereira (2011) afirmam que a transmissão sonora entre dois compartimentos é um fenômeno complexo, que envolve diversos fatores, como as características elasto-dinâmicas dos elementos de separação, a heterogeneidade dos elementos, as características das ligações, bem como as características dos campos sonoros estabelecidos nos recintos emissor e receptor. A obtenção de um isolamento acústico eficiente depende da escolha de uma solução construtiva adequada, mas a correta execução em obra é decisiva no desempenho acústico.

Patrício (2010) esclarece que a transmissão do som, por sua vez, depende das características do meio por onde ele é transmitido. Dentre elas estão a inércia, a massa e as características elasto-dinâmicas do meio, como rigidez e amortecimento interno. O autor divide os métodos para caracterizar o isolamento aos sons aéreos em dois grandes grupos conforme o método de obtenção dos resultados: métodos de medição e métodos de estimativa.

Os métodos de medição podem ser realizados em campo ou em laboratório. As medições em campo fornecem a vantagem de tornar possível a avaliação de conformidade dos valores encontrados em situações construtivas reais com os padrões estabelecidos por norma. As medições em laboratório, por outro lado, permitem quantificar o isolamento assegurado por certo material ou elemento

construtivo, com a finalidade de caracterizações específicas e de estimativas de isolamento acústico.

De acordo com Pião et al. (2008), as principais variáveis que afetam o isolamento acústico são a massa do sistema construtivo analisado e a frequência predominante do som incidente. Em um elemento homogêneo de massa constante, ao aumento da frequência do som incidente, está associado um aumento do isolamento acústico, em função da redução da possibilidade de vibração do elemento e do conseqüente aumento da dissipação da energia. Da mesma maneira, com o aumento da massa do elemento, o isolamento sonoro também aumenta, em função do aumento das forças de inércia.

Existem outras variáveis que podem afetar o isolamento acústico de um sistema de vedação, como, por exemplo, a existência de pontos fracos em elementos construtivos como portas e janelas. Além disso, características relacionadas à rigidez do sistema, o ângulo de incidência das ondas sonoras, e, no caso do elemento ser constituído de várias camadas, deve-se levar em conta a quantidade delas, as suas características de impedância e a distância entre elas (HASSAN, 2009).

Existem diversos descritores de isolamento acústico para sons aéreos que variam em função dos ambientes separados por um determinado sistema construtivo e/ou do tipo de ensaio. Os mais utilizados no Brasil e citados na NBR 15575 (ABNT, 2013b) são o R_w , para ensaios de laboratório, o $D'_{nT,w}$, para ensaios de campo em vedações verticais internas, e o $D'_{2m,nT,w}$, para fachadas e coberturas em casas térreas e sobrados, conforme descrito na Tabela 1:

Tabela 1 – Descritores de isolamento acústico ao som aéreo

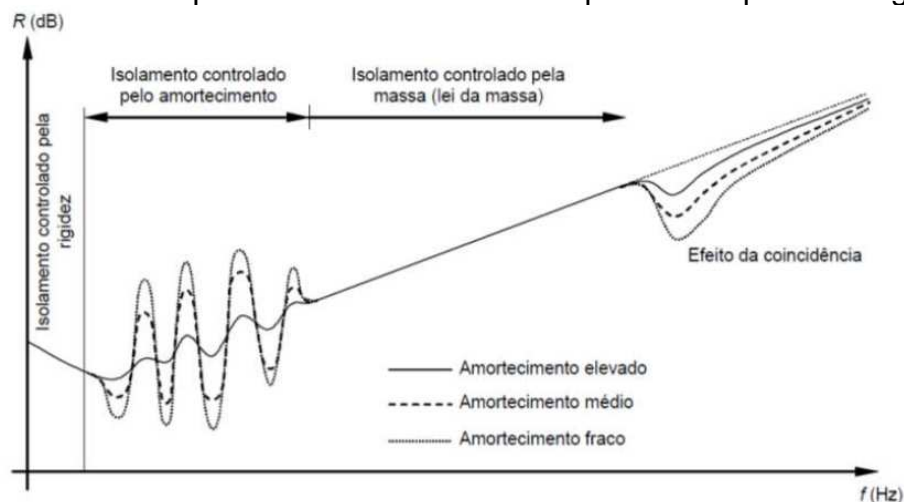
Símbolo	Descrição	Referências normativas	Aplicação
R_w	Índice de redução sonora ponderado	ISO 10140-2 ISO 717-1	Componentes em laboratório
$D'_{nT,w}$	Diferença padronizada de nível ponderada	ISO 16283-1 ISO 717-1	Vedações verticais e horizontais internas em edificações, em campo.
$D'_{2m,nT,w}$	Diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros de distância da fachada	ISO 16283-3 ISO 717-1	Fachadas e coberturas em edificações, em campo.

Fonte: adaptado de ABNT, 2013

Mendez (1994) afirma que o comportamento típico do isolamento de uma parede simples homogênea pode ser definido a partir da relação entre frequência do som incidente e isolamento acústico em quatro zonas bem definidas:

- 1) *Zona controlada pela rigidez*: ocorre nas frequências muito baixas, e nesta zona o isolamento depende principalmente da rigidez da parede, tendo a massa e o amortecimento papéis desprezíveis.
- 2) *Zona controlada pela ressonância*: é nesta zona que o sistema apresenta suas primeiras frequências de ressonância, produzindo vales e picos no isolamento. Essas ressonâncias dependem das dimensões, da rigidez e da massa por unidade de superfície da parede.
- 3) *Zona controlada pela massa*: ocorre nas frequências maiores que o dobro da primeira ressonância, e nesta zona o isolamento obedece a lei da massa, aumentando o isolamento em 6 dB com a duplicação da massa da parede e 6 dB a cada duplicação da frequência da onda incidente.
- 4) *Zona controlada pela coincidência*: ocorre a partir da frequência crítica do elemento, se produz uma perda importante do isolamento devido a um fenômeno de coincidência. Acima da frequência crítica o isolamento tende a ser determinado pela lei da massa novamente.

Figura 6 – Curva típica do isolamento de uma parede simples homogênea



Fonte: Hopkins (2012).

Além do aumento da massa, como estratégia para a qualificação do isolamento acústico ao som aéreo, o uso de sistemas compostos por camadas de

materiais sólidos separados por uma camada de amortecimento, constitui uma solução eficiente, a partir dos princípios de massa-mola-massa, para a atenuação da transmissão de vibrações. Esse sistema apresenta um comportamento no qual a mola, constituída por um material resiliente ou cavidade de ar, é um elemento que possa ser deformado sem perder suas características elásticas. Nesse sistema, a massa, dada pelas placas sólidas, deve apresentar rigidez suficiente para manter o sistema com baixa deformação. (HASSAN, 2009)

A relação entre rigidez de um painel e a frequência crítica está na velocidade de flexão nos painéis que depende da rigidez da flexão e da frequência, de modo que, em qualquer frequência dada, a velocidade da onda é maior para um painel mais rígido do que para uma com menor rigidez. Isso, por sua vez, significa que, para um painel mais rígido, a frequência em que as ondas do painel atingem a velocidade do som no ar é menor do que para um painel menos rígido, isto é, a frequência crítica diminui à medida que a rigidez do painel aumenta (PETERS et al., 2013). Essa relação pode ser verificada a partir das informações da Tabela 2 em que, por exemplo, a frequência crítica de uma placa de concreto com densidade de 2600 kg/m³ e 0,02 m de espessura seria de 950 Hz.

Tabela 2 – Frequência crítica (f_c) de alguns materiais pela espessura (e)

Material	$f_c \times e$	Densidade (kg/m³)
Vidro	12,7	2300
Concreto	19	2600
Aço	12,4	7700
Tijolo	22,1	1900
Madeira compensada	20	600
Madeira aglomerada	24,1	650

Fonte: Peters et al., 2013, p. 157.

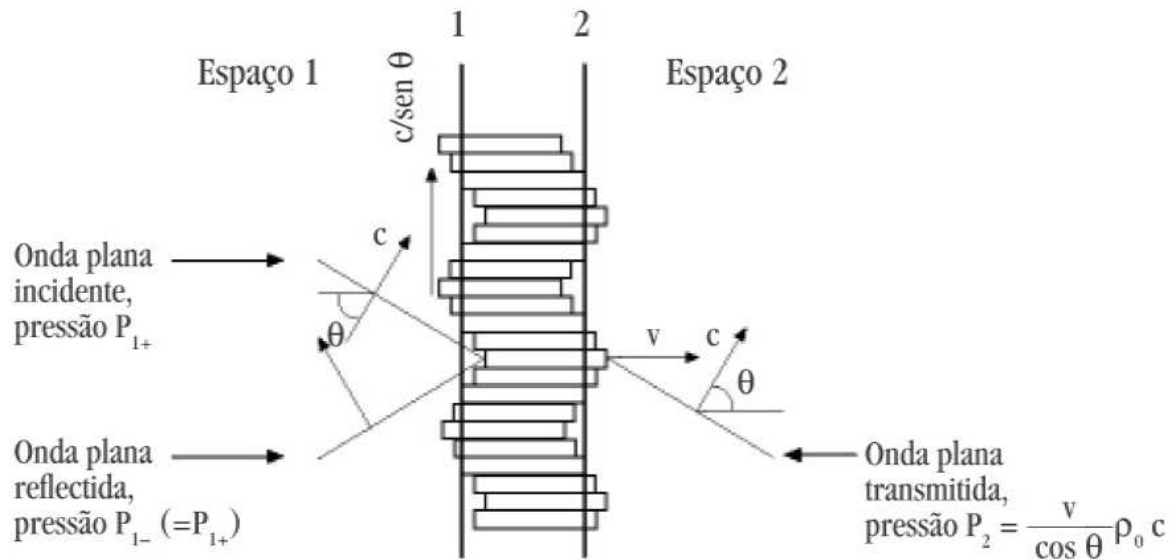
Esse comportamento é válido somente para fechamentos que não possuem frestas e/ou pequenas aberturas que possam comprometer a estanqueidade do sistema construtivo.

O isolamento acústico de um painel simples homogêneo é considerado de menor complexidade de previsão. Seu Índice de Redução Sonora (R_w) depende essencialmente da sua massa por superfície (SANTOS, 2012), nas situações em

que a massa (m') for maior ou igual a 50 kg/m^2 . Este tipo de previsão é conhecido como a “Lei da Massa”, que estima um aumento de isolamento de 6 dB cada vez que se duplica a massa por unidade de superfície do material com que está construída a parede. Da mesma maneira, o isolamento aumenta 6 dB cada vez que se duplica a frequência da onda sonora incidente (MENDEZ et al., 1994).

Outro método de estimativa para o comportamento acústico de um elemento de partição é o método elasto-dinâmico, o qual tem origem conceitual num modelo inercial, integrando o efeito da rigidez e o amortecimento interno. Para a formulação do modelo inercial considera-se uma placa plana, com espessura constante, desligada do seu contorno e indeformável. Numa concepção modelar, esta placa pode ser constituída por um conjunto de pequenos elementos prismáticos, sobrepostos e deslizando sem atrito entre si. Esta modelagem pode ser visualizada como uma parede de alvenaria de tijolos, em que se coloque no lugar da argamassa de assentamento um óleo com coeficiente de atrito quase nulo, permitindo que os tijolos deslizem uns sobre os outros, conforme ilustra a Figura 7 (PATRICIO, 2008).

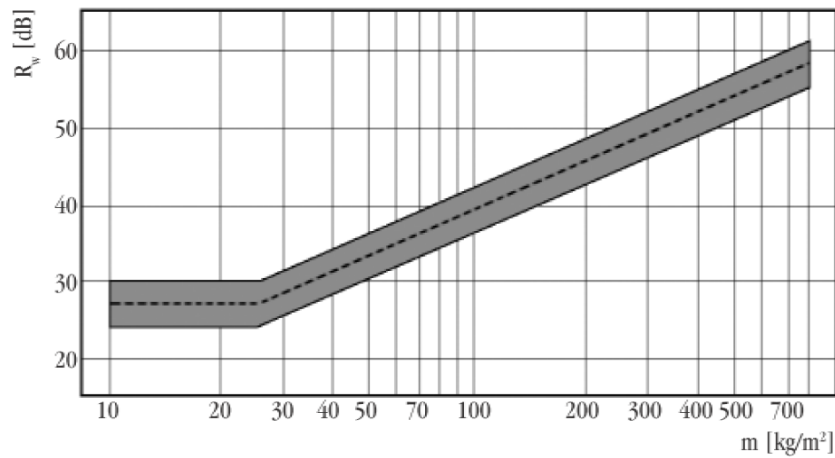
Figura 7 – Modelo teórico da transmissão de energia sonora através de uma parede



Fonte: Patrício (2010).

Para elementos homogêneos, a redução de transmissão sonora pode ser estimada através da sua massa superficial, conforme Figura 8.

Figura 8 – Redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogêneos, simples, em função de sua massa superficial



Fonte: Patrício (2010).

A Norma EN 12354-1 (EUROPEAN STANDARD, 2000) fornece cálculos simplificados para estimar a redução sonora de um elemento homogêneo, de acordo com três classes de massa superficial (m'):

- para $m' \geq 100 \text{ kg/m}^2$:

$$R_W = 32,4 \log \left(\frac{m'}{m'_0} \right) - 26,0 \quad \text{Eq. 1}$$

- para $m' \geq 150 \text{ kg/m}^2$:

$$R_W = 40,0 \log \left(\frac{m'}{m'_0} \right) - 45,0 \quad \text{Eq. 2}$$

- para $m' \geq 50 \text{ kg/m}^2$:

$$R_W = 21,65 \log \left(\frac{m'}{m'_0} \right) - 2,2 \pm 1 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

m' : massa por unidade de área (kg/m^2)

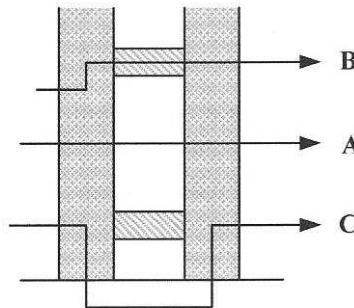
m'_0 : massa de referência por unidade de área, $m'_0 = 1 \text{ kg/m}^2$

Em sistemas de paredes ou placas duplas, nas situações em que o espaço entre as placas é de 30 cm ou mais, a perda de transmissão sonora ao som aéreo pode ser estimada em aproximadamente a soma da perda de transmissão para cada parede. Portanto, em determinadas situações em que se faz necessário um elevado isolamento acústico, o sistema de vedação vertical deve ser composto de várias camadas, em vez de uma camada única mais espessa (HASSAN, 2009).

Em geral, a propagação do som através de paredes duplas pode ocorrer pela irradiação entre as faces internas das placas e pela transmissão estrutural das conexões mecânicas. Logo os principais meios de transmissão são (HASSAN, 2009):

- a) Através da cavidade de ar em paredes totalmente separadas;
- b) Através das conexões em paredes com elementos que proporcionam o contato para sua estruturação e/ou instalação;
- c) Através de pontes acústicas ou transmissão por flancos.

Figura 9 – Transmissão do som em paredes duplas



Fonte: Hassan (2009, p. 378).

O índice de redução sonora de uma parede dupla pode ser obtido através da equação:

$$R = R_1 + R_2 + K \quad (f > f_0)$$
Eq. 4

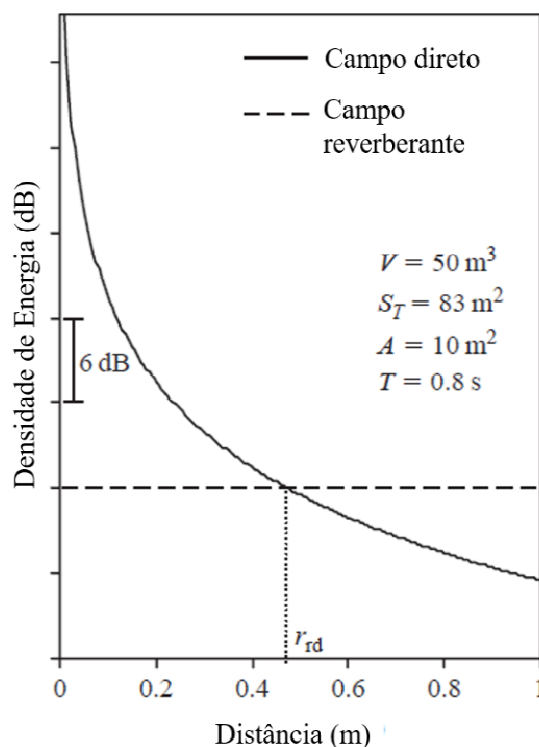
Sendo que: R_1 e R_2 são os índices de redução sonora das paredes, em dB; K é o fator de acoplamento, em dB; f_0 é a frequência de ressonância do sistema, em Hz.

Na Equação 4, o fator K depende, principalmente, das propriedades da cavidade de ar: espessura, absorção das superfícies internas e conexões mecânicas. O requisito é que deve haver uma conexão mecânica mínima entre as camadas, além do espaço aéreo.

Na presença de uma parede dupla, e estimativa do isolamento acústico torna-se mais complexa devido à vibração dinâmica de cada painel, juntamente com a vibração das ondas de pressão no ar, tanto dentro da cavidade entre os dois painéis, como no meio exterior do ar (ANTÓNIO et al., 2003).

Nesse contexto, para as paredes com grande distância entre si como, por exemplo, conjunto de paredes e portas separadas por hall que constituem o foco deste trabalho, a absorção do ambiente que as separa pode apresentar uma importante contribuição no resultado final da perda de transmissão sonora, principalmente na influência da distância da fonte sonora em relação ao receptor. A Figura 10 mostra a densidade de energia, em dB, devido aos campos direto e reverberante em uma sala de 50m^3 a distâncias de até 1m da fonte de som. A medida em que a distância da fonte aumenta, o campo reverberante assume maior importância na contribuição do campo sonoro total.

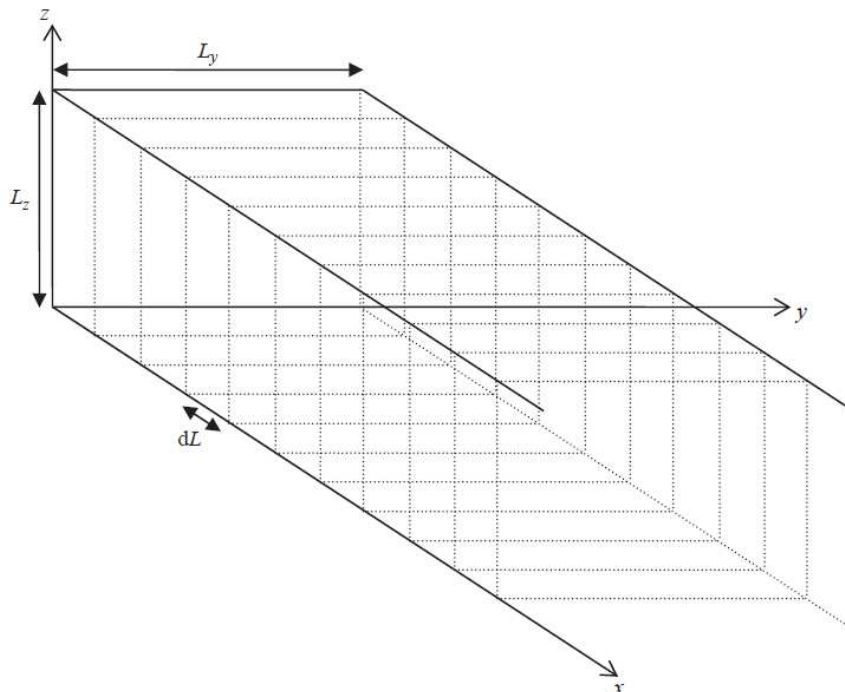
Figura 10 – Contribuição do campo direto e reverberante



Fonte: Hopkins (2012, p. 63).

As considerações teóricas sobre a propagação do som em ambientes estreitos como, por exemplo, corredores de circulações horizontais, se fundamentam em um modelo simples que pode ser baseado em um corredor de comprimento infinito que é dividido em uma série de seções em forma de caixa muito finas, dL (Figura 11). Efetivamente, nessa consideração teórica, existe uma grande quantidade de campos sonoros bidimensionais que são acoplados ao longo do comprimento desse corredor. Esse modelo aplica-se a um corredor infinitamente longo, ou seja, sem extremidades, com a propagação do som na direção positiva de X (HOPKINS, 2012). No entanto, na prática, o som será parcialmente refletido e parcialmente absorvido do final do corredor e a propagação do som pode não ocorrer no sentido estritamente longitudinal desse ambiente.

Figura 11 – Esquema teórico da propagação do som em corredores



Fonte: Hopkins (2012, p. 64).

2.2.1 Desempenho acústico de paredes e divisórias

As paredes mais usadas no Brasil são as de alvenaria, com o uso de blocos cerâmicos ou de concreto, com função estrutural ou de vedação, geralmente com reboco nas duas faces. Nos últimos anos, com a entrada da NBR 15575 (ABNT,

2013b) em vigor, os fabricantes de blocos realizaram uma série de ensaios em laboratório para conhecimento de seus produtos.

Nos materiais corriqueiramente empregados no mercado da construção civil brasileira para sistemas verticais de vedação, tanto internos quanto externos, tem-se utilizado de forma significativa blocos cerâmicos vazados, dada a produtividade, o conhecimento de suas propriedades e a familiaridade da mão-de-obra com o produto. As cavidades nos blocos fazem com que eles fiquem mais leves e fáceis de carregar, mas reduzem a densidade bruta do bloco, fazendo com que este tenha menor redução sonora quando comparado a blocos maciços (FRINGUELLINO; SMITH, 1999). A capacidade de isolamento acústico deste tipo de sistema está diretamente ligada com sua densidade superficial, geometria interna dos blocos, bem como sua capacidade de amortecimento, e, ainda, a capacidade física das partes que compõem o sistema (HOPKINS, 1997).

O isolamento acústico de uma parede de alvenaria pode ser aumentado por (BIRLIK, 2001):

- a) aplicação de revestimentos argamassados;
- b) instalação de revestimentos do tipo drywall;
- c) qualificação das características de isolamento acústico dos blocos.

Segundo Neto e Bertoli (2010) o desempenho acústico de paredes depende de fatores que vão além do bloco ou do reboco, entre eles está a colocação da argamassa para o preenchimento das juntas, a existência de aberturas para instalações e caixas de luz, a estrutura do edifício e, ainda, a rigidez da parede, o amortecimento interno, a frequência crítica, o efeito de coincidência e a ressonância. Cada material apresenta uma frequência crítica, a partir da qual outros fatores passam a ser responsáveis pelo desempenho, em detrimento da massa. A frequência crítica da alvenaria com o reboco de argamassa está, por exemplo, em torno de 200 Hz. No caso da alvenaria, em função de ser um material composto, suas propriedades dependem das características individuais dos elementos que a constituem.

Um estudo conduzido por Demirkale e Ascidi-Dincer (2017) comparou diferentes formas para o aumento do isolamento acústico em paredes de alvenaria existentes, para a qualificação de edifícios existentes. Foram analisados os efeitos do revestimento de argamassa de gesso e de placas de gesso acartonado com

diferentes espessuras da cavidade e preenchimentos com de lã mineral nos valores de índice de redução sonora em alvenarias de blocos cerâmicos. Os autores concluíram que a duplicação da profundidade da cavidade de ar, de 5 para 10 cm, pode aumentar os valores de R_w , especialmente na faixa de altas frequências, em 2 dB nas alvenarias com blocos de 14,5 e 19 cm, e em até 9 dB para paredes com blocos de 24 cm de espessura. Ainda nesse estudo, foi indicado que a argamassa de gesso até a espessura de 2 cm não aumenta o R_w (DEMIRKALE; ASCIGIL-DINCER, 2017).

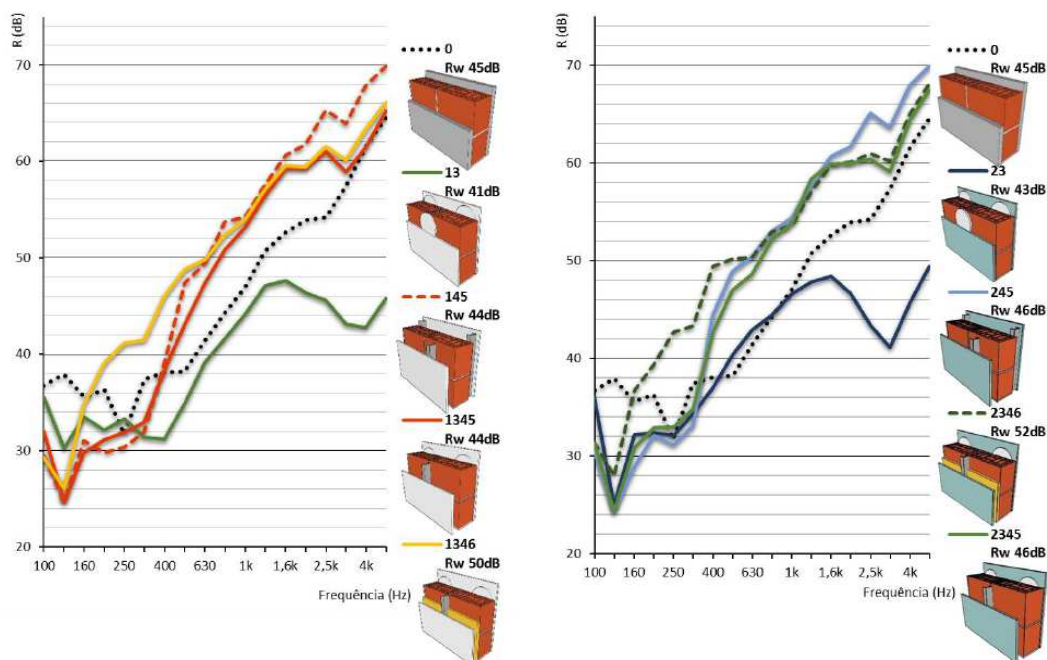
Klippel Filho et al. (2017) avaliaram a influência da espessura de revestimentos em argamassa estabilizada aplicados em sistemas de vedações verticais compostos por alvenarias de blocos cerâmicos de 14 cm de 7 e 10 MPa no isolamento acústico, a partir de ensaios em laboratório. Segundo os autores, o incremento gradativo da espessura do revestimento acarretou um aumento considerável no isolamento a sons aéreos, resultado que já era previsto, todavia, algumas das espessuras variáveis situaram-se na mesma faixa de classificação da NBR 15575. Na alvenaria com os blocos de 7 MPa o aumento em 1 cm de reboco correspondeu ao aumento de 1 dB no R_w na face interna, voltada para a câmara receptora, e de 3 dB na face externa, voltada para a câmara emissora. Na alvenaria com os blocos de 10 MPa, com maior massa, ocorreu um aumento de 2 dB no R_w com o aumento da espessura em 1 cm do reboco na face externa, voltada para a câmara emissora.

Birlik (2001) afirma que, embora os revestimentos argamassados tradicionais ainda estejam em uso, os revestimentos contendo perlita são mais indicados, especialmente em climas frios, devido às suas altas características de isolamento térmico. A autora realizou um estudo sobre a contribuição da perlita para a perda de transmissão sonora em paredes compostas por blocos de gesso, por meio de ensaios em laboratório com duas amostras. Na primeira, a perlita foi adicionada aos revestimentos preparados em laboratório, e na segunda a perlita foi incluída como um constituinte adicional na mistura para moldar blocos de gesso. Foi constatado que a perda média de transmissão da parede foi aumentada em aproximadamente 19 dB quando rebocada em ambos os lados por gesso contendo perlita. Nesse estudo, o uso da perlita incorporada à mistura de gesso dos blocos, resultou em um aumento no isolamento acústico de, aproximadamente, 1 dB.

A lei da massa pode resultar em simplificações que podem distorcer uma estimativa de isolamento acústico, por isso, não pode ser aplicada indiscriminadamente, quando se trabalha com materiais e sistemas construtivos na construção civil, pois são elementos com espessuras muito superiores às placas finas, utilizadas como base teórica para as estimativas da lei da massa (PAIXÃO, 2002).

Um estudo de Trevisan et al (2016) apresenta resultados de ensaios em laboratório de alvenarias de blocos cerâmicos de 14 cm de espessura com revestimento de diferentes sistemas em drywall com gesso acartonado. Os autores combinaram sistemas compostos por placas com diferentes densidades (8,5 kg/m² e 12 kg/m²), com sistemas de fixação das placas em montantes e com adesivo, num total de 10 sistemas ensaiados. Na composição com instalação com montantes metálicos os autores também avaliaram a influência do preenchimento com lã mineral na cavidade entre as placas e a parede. Os resultados (Figura 12) mostraram que o uso da lã mineral com as placas de maior densidade aumentou o isolamento acústico do sistema. Comparativamente, a alvenaria rebocada com R_w de 45 dB teve um aumento no isolamento acústico para um R_w de 52 dB com o uso de placas de maior densidade e preenchimento das cavidades com lã mineral.

Figura 12 – Isolamento acústico de alvenarias de blocos cerâmicos com revestimento de gesso acartonado



Fonte: Trevisan et al (2016).

Fausti et al. (2010) destacam que outra importante questão a considerar entre a diferença de resultados entre isolamento acústico obtido em laboratório e em campo é a forma como os elementos são construídos. Em laboratório a construção geralmente é feita por equipes qualificadas e orientadas pelos fabricantes, enquanto que na obra nem sempre isso ocorre. Um exemplo típico se dá na construção de uma parede de tijolos, onde em laboratório se obtém bons resultados, enquanto que na obra, frequentemente, se obtém resultados muito ruins.

2.2.2 Desempenho acústico de portas

Segundo Hopkins (2012), frequentemente, as portas são formadas a partir de placas homogêneas sólidas, mas, o mais usual, são placas sobrepostas, painéis do tipo sanduíche ou sistemas constituídos por placas sobre montantes estruturantes. Ainda segundo o autor, a eficácia dos selantes ao redor do perímetro da folha da porta é extremamente importante na determinação do isolamento do som. Nas portas sem quaisquer vedações, a transmissão sonora se dá através das aberturas ao redor do perímetro, significa que a previsão precisa da transmissão através da própria porta pode tornar-se menos importante do que prever a transmissão através das frestas.

As fendas causam uma diminuição significativa no índice de redução sonora nas faixas de frequências médias e altas, pois o isolamento acústico será comprometido a partir da banda de frequência, em Hz, relacionado ao comprimento de onda. Quanto menor a fresta, mais próximo às altas frequências ficará o início da perda de eficiência do elemento construtivo (HOPKINS, 2012; JONES, 2008).

Atingir a adequada eficiência acústica de uma porta pode ser considerada uma tarefa complexa, pois a qualidade de cada componente desse elemento é importante para o seu desempenho (JONES, 2008). Basicamente, existem duas partes a serem consideradas no projeto de portas acústicas. Existe a perda de transmissão sonora da folha, ou parte móvel, e existe a estanqueidade do sistema de vedação. O sistema de vedação, segundo Jones (2008) é o mais crítico dos dois. Seja qual for o sistema utilizado, deve resistir ao desgaste do uso ao longo da vida útil do elemento. As portas e seus sistemas de vedação requerem detalhes e

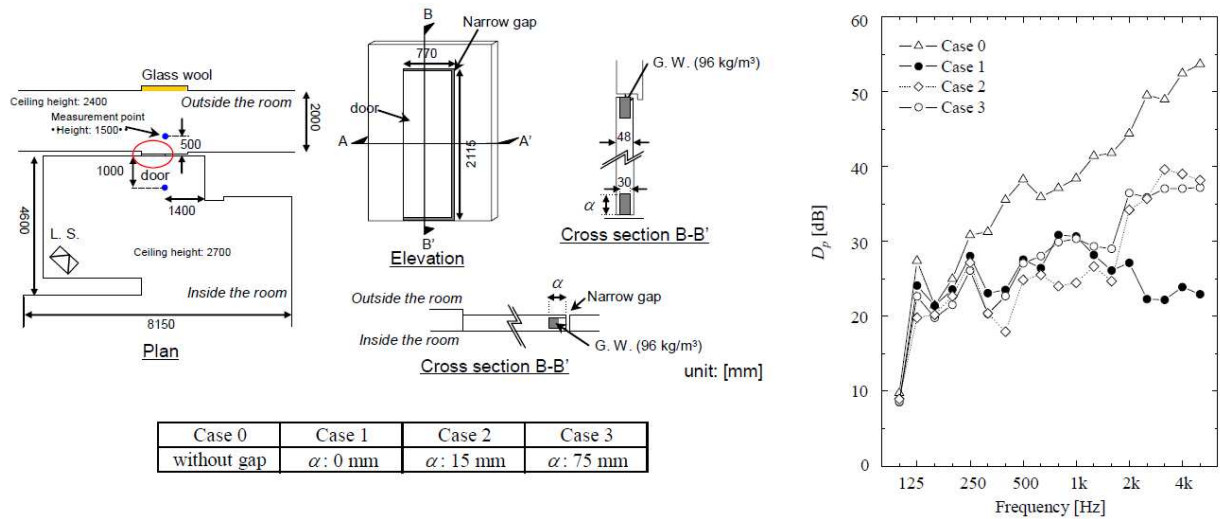
especificações para a sua construção e são muitas vezes o ponto fraco de um sistema de vedação vertical.

De acordo com Ginn (1978, apud Carvalho et al., 2006) o desempenho acústico das portas não segue as previsões da lei da massa, com os resultados de ensaios sempre inferiores ao esperado. Um ensaio em laboratório feito pelos autores de uma porta comum, sem tratamento acústico e nenhuma vedação no encontro da folha com o batente, obteve o resultado de R_w 18 dB.

Cunha (2014) fez um estudo sobre a influências de diferentes vedações das frestas em portas de salas de aula em Portugal. Dos materiais analisados, o que obteve o melhor resultado foi a colocação de borracha adesiva no aro da porta e colocação de rolo duplo na fresta inferior. Essa pequena alteração permitiu o aumento do índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos não normalizado (em função de ser apresentado com uma casa decimal) de 4,3 dB em relação a situação original. Não tratando a fresta inferior se obtém um ganho de 1,7 dB. O isolamento sonoro inicial da porta em questão era de 23 dB ($D'_{nT,w}$).

Segundo Asakura et al. (2007), que investigaram a inserção de material de absorção sonora em pequenas frestas de portas e janelas, foi verificado que a transmissão pode ser enfraquecida com a inserção destes materiais, principalmente nas bandas de médias e altas frequências. A melhoria do isolamento acústico de uma porta com o tratamento das frestas também foi confirmada por meio de um ensaio em campo, no qual foram testadas quatro situações: caso 0, onde a fresta foi totalmente vedada; caso 1, com a fresta de 3 a 5 mm sem tratamento e sem material de absorção; caso 2, com a mesma fresta, porém com o acréscimo de uma camada de 15 mm de lã de vidro com densidade de 96 Kg/m³ acima da fresta; caso 3, com uma camada de 75 mm da mesma lã de vidro acima da fresta da porta, conforme Figura 14. Percebe-se que no caso 1, com a fresta aberta, o isolamento está prejudicado, principalmente a partir dos 315 Hz. Nos resultados dos casos 2 e 3, é visto que o isolamento acústico foi melhorado em 7 a 15 dB na faixa de frequência entre 2000 Hz a 5000 Hz. Na faixa de frequência de 315 Hz a 1250 Hz, o isolamento também foi melhorado com o aumento da espessura da lã de vidro.

Figura 13 – Isolamento acústico de portas com tratamento das frestas



Fonte: Asakura et al. (2007).

Hongisto (2000) concluiu por meio de trabalho experimental que a simples vedação das frestas das portas resulta em melhoras de isolamento na ordem de 3 dB.

Meisser (1973) cita o exemplo de uma parede com 12 m² de superfície, na qual existe uma porta de 2 m². Na Tabela 3 se observa a diminuição do isolamento acústico do conjunto à medida que a abertura fica menos isolante.

Tabela 3 – Isolamento acústico de uma parede composta

R _w (dB) (parede)	R _w (dB) (porta)	R _w (dB) (total)
50	50	50
50	40	46
50	30	38
50	20	28
50	10	18
50	0	8

Fonte: Meisser (1973).

Segundo Santos (2012), o Índice de Redução Sonora (R_w) de uma porta ou janela de determinado tamanho depende da sua massa e principalmente de suas frestas. As portas usuais nos edifícios têm uma fresta em sua parte inferior, quanto maior for essa fresta, menor será o isolamento sonoro do sistema de vedação

vertical. Considerando uma porta de 2 m² de área, com frestas variando de 0,5 a 40 mm, tem-se o isolamento máximo observado na Tabela 4.

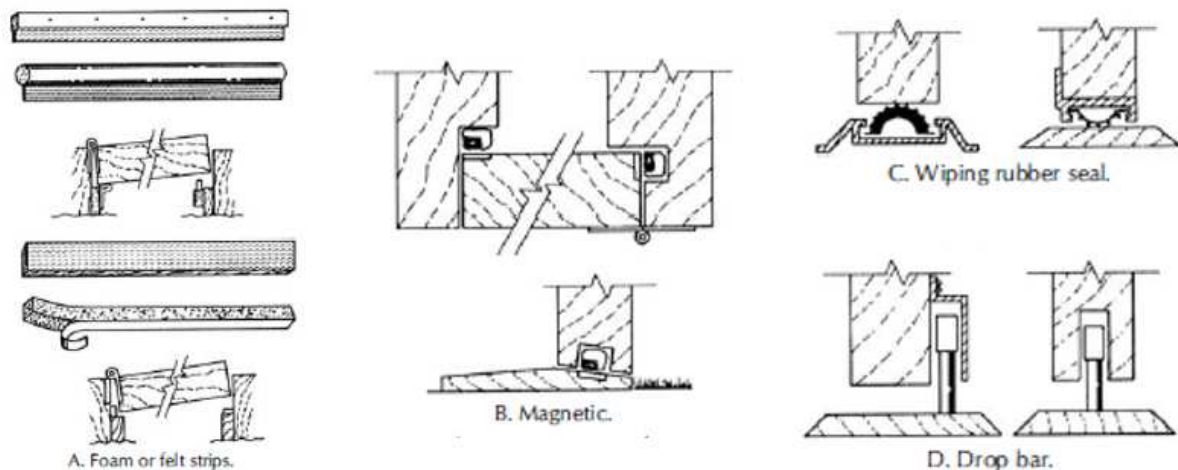
Tabela 4 – Relação entre altura da fresta e isolamento sonoro

Largura da fresta (mm)	0,5	1	5	10	20	30	40
Isolamento máximo R_w máximo (dB)	36	33	26	23	20	18	17

Fonte: Santos (2012).

A Figura 14 ilustra diferentes tipos de vedação para portas, sendo que, a manutenção constante e a substituição de peças desgastadas pelo uso devem ser frequentes. Além da vedação com espumas ou feltros (Figura 14a), um dos tipos mais satisfatórios é o selo magnético (Figura 14b), semelhante àqueles utilizados em geladeiras domésticas. Os elastômeros (Figura 14c) e os sistemas mecânicos do tipo guilhotina (Figura 14d) também são considerados como elementos de vedação para portas.

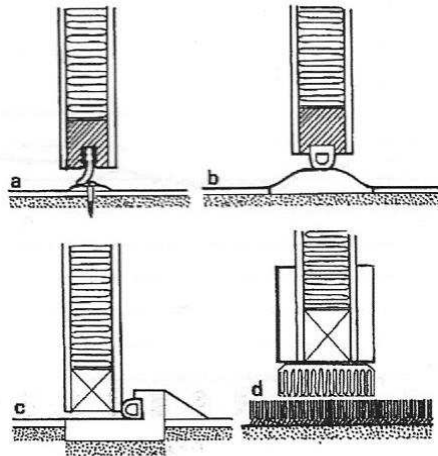
Figura 14 – Sistemas de vedação utilizados em portas



Fonte: Jones (2008, p. 84).

Ainda de acordo com Santos (2012), para as portas de habitações com frestas de 10 mm, tem-se um isolamento entre 20 a 25 dB, independente da massa superficial da porta. A supressão ou redução dessas frestas através de qualquer dispositivo trazem melhoras notáveis no isolamento acústico. Alguns artifícios podem ser adotados, como mostra a Figura 15.

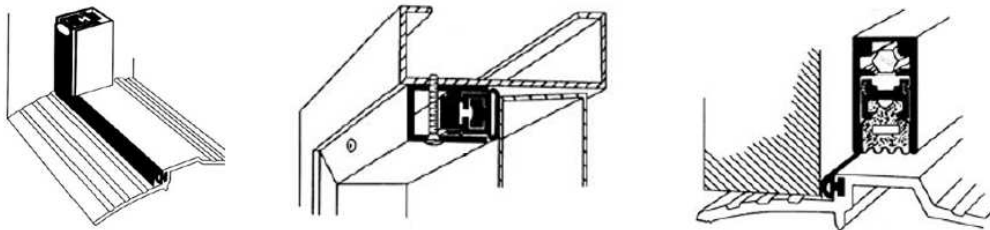
Figura 15 – Exemplos de sistemas de vedação de portas



Fonte: Santos (2012, p. 58).

Jones (2008) apresenta detalhes da vedação de uma porta acústica, com um sistema projetado visando elevada eficiência (Figura 16). Os fabricantes desses elementos com elevados requisitos de desempenho acústico, normalmente para atendimento de demandas específicas, produzem portas com R_w que varia de 43 dB a 64 dB. Essas demandas estão frequentemente vinculadas à estúdios de gravação, atividades industriais, câmaras para testes, entre outras.

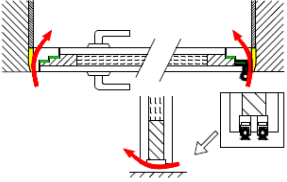
Figura 16 – Sistema de vedação de uma porta acústica



Fonte: Jones (2008, p. 84)

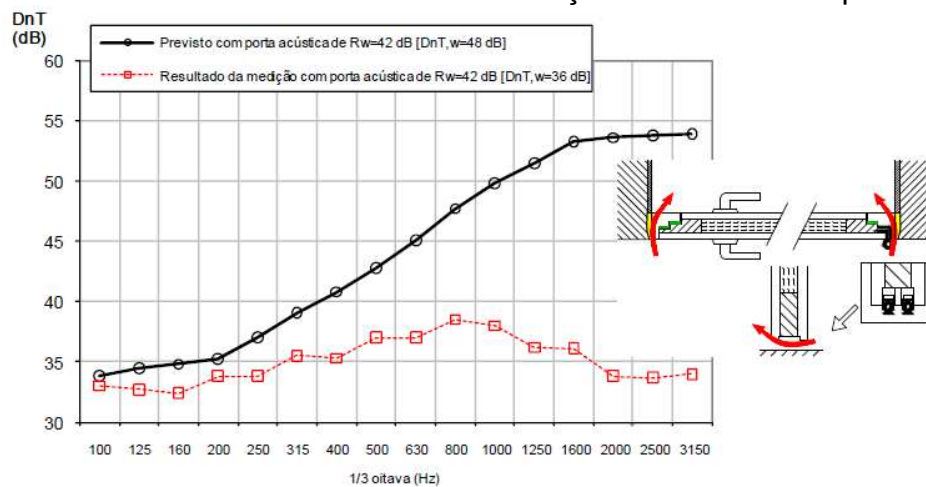
Mateus e Pereira (2011) citam como exemplo o caso das portas acústicas, onde se podem ver na Figura 17 os problemas típicos de execução e na Figura 18 o resultado de sua execução deficiente. Pode-se perceber que as deficiências na instalação de uma porta, com o conseqüente surgimento de frestas, resultam em um perfil gráfico sem a ascensão do isolamento nas bandas de médias e altas frequências. Essas frestas, mesmo com reduzidas dimensões, serão os pontos de fragilidade nos sistemas construtivos, podendo ser classificadas na transmissão por elementos instalados na parede, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 17 – Problemas típicos de execução em portas acústicas

Soluções construtivas	Problemas típicos de execução
<p>- Portas acústicas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicação do aro com selagem deficiente; - Não aplicação de dispositivo de vedação de soleira ou vedação insuficiente; - Aplicação de fechadura com ranhura aberta e contínua em toda a espessura da porta.

Fonte: Mateus e Pereira (2011, p. 4).

Figura 18 – Isolamento acústico entre a circulação e o interior de quarto de hotel



Fonte: Mateus e Pereira (2011, p. 6).

Herrera e Recuero (2010) realizaram ensaios em uma porta de elevador desempenho acústico com diferentes combinações e tipos de vedações. As variações nessas vedações incluíram a instalação, a geometria do vedante, o material, a pressão e o princípio de vedação. Além disso, os resultados experimentais foram comparados com uma combinação de modelos teóricos para estimativas de isolamento acústico. Os autores verificaram que os resultados obtidos em modelos teóricos e os resultados experimentais são semelhantes somente até a faixa de frequências de 100 Hz. Nesse estudo também foi verificado que a melhoria na vedação de uma porta acarreta aumentos no isolamento acústico a partir das bandas de frequências de 160 Hz, sendo assim, coerente com o comprimento de onda a ser transmitido por frestas e demais falhas de vedação do elemento construtivo.

Gerges (2000) afirma que uma abertura de 1% da área total do elemento construtivo acarreta em uma redução na perda de transmissão total (PT) de 30 para

19,6 dB. Segundo o autor, estas aberturas/frestas podem, inclusive, amplificar o ruído em algumas frequências, em função das ressonâncias acústicas.

Pião et al. (2008) estudaram o comportamento acústico de paredes de alvenaria com pequenas aberturas de 36 cm², caracterizadas como elementos que podem compor partes de instalações técnicas de água, esgoto ou eletricidade e, por causa de sua inserção na alvenaria, determinar uma heterogeneidade para a transmissão sonora no sistema de vedação. Conforme a Tabela 6 uma parede de alvenaria rebocada, com espessura final de 11 cm pode ter seu isolamento acústico comprometido.

Tabela 5 – Valores de R_w obtidos para a parede de alvenaria de tijolo de 11 cm ensaiada, e previsão com abertura com 36 cm²

<i>Solução ensaiada</i>	R_w (dB)
Parede em alvenaria de tijolo rebocada, com 11 cm de espessura	43
Parede em alvenaria de tijolo rebocada, com 11 cm de espessura com uma abertura com 36 cm ² - Previsão através de cálculo simplificado	33

Fonte: Pião et al. (2008).

Tabela 6 – Valores de R_w obtidos para a parede de alvenaria de tijolo de 11 cm, ensaiada com aberturas de 6 cm x 6 cm, 18 cm x 2 cm e 36 cm x 1 cm

<i>Solução ensaiada</i>	R_w (dB)
furo de 6 x 6 cm ² no centro parede	33
furo de 6 x 6 cm ² a 30 cm do chão	31
abertura com desenvolvimento horizontal de 18 x 2 cm ² a 30 cm do chão	30
abertura com desenvolvimento horizontal de 36 x 1 cm ² a 30 cm do chão	32

Fonte: Pião et al. (2008).

Ainda foi observado neste trabalho que as perdas de isolamento apresentam os valores mais elevados nas frequências mais altas, sendo que entre todas as amostras ensaiadas, com o aumento da frequência diminui o isolamento. Este comportamento indica que a existência de pontos fracos em uma parede se faz sentir principalmente para menores comprimentos de onda.

Silva (1994) afirma que a existência de uma fresta pode reduzir drasticamente o isolamento sonoro de uma divisória. Cita como exemplo uma parede de 10 m² de área (4 m x 2,5 m), que proporciona um isolamento acústico de 60 dB. Inserindo uma fresta de 1 mm de largura junto ao teto, o isolamento seria reduzido para 34 dB. Afirma ainda que o isolamento sonoro oferecido por uma fresta depende da sua

altura e sua profundidade. Em relação às frequências elevadas, com pequenos comprimentos de ondas, a transmissão ocorre facilmente. Em relação às baixas frequências, a que correspondem grandes comprimentos de onda, quase não há transmissão. Em princípio, quanto maior a profundidade da fresta, maior o isolamento sonoro nas altas frequências.

Atualmente, não existe um método específico para medição em campo do isolamento de ruído acústico de portas (LO VERDE; DONG, 2013). Frequentemente, são detectados problemas na definição das salas de emissão e de recepção, como corredores longos e estreitos, escadas ou, até mesmo, espaços ao ar livre, que muitas vezes não atendem aos requisitos de um ambiente típico para serem classificados como uma sala ou dormitório. Os campos de som raramente são totalmente difusos. Lo Verde e Dong (2013) desenvolveram um método alternativo, denominado NIL (*Normalized Insertion Loss*), a partir de ensaios em laboratório, com a comparação dos níveis de pressão sonora com portas abertas e fechadas. Os autores concluíram que o método proposto produz resultados compatíveis com os valores de R_w obtidos isoladamente para portas e paredes em laboratório, com diferenças inferiores a 1 dB. No entanto, algumas dúvidas indicam, ainda segundo os autores, que estudos mais aprofundados devem ser realizados para se definir o nível de abertura das portas (total ou parcial), análises das diferenças obtidas nas bandas de frequências de 80, 200 e 250 Hz, avaliações de repetibilidade e de reprodutibilidade e os ensaios em campo para a inclusão das variações geométricas dos espaços de circulações no novo método.

2.3 ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO DE FECHAMENTOS COMPOSTOS

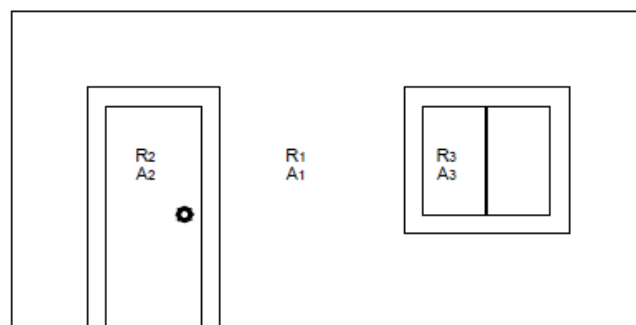
Os métodos para estimativa do desempenho acústico de sistemas construtivos utilizados na acústica de edifícios são aqueles que consideram o som transmitido pelo ar, por via estrutural e som transmitido por dutos. Essas previsões são, basicamente, fundamentadas em modelos analíticos, empíricos e numéricos, os quais fizeram significativas contribuições em pesquisas sobre acústica de edifícios nos últimos anos (MAK; WANG, 2015).

Os métodos baseados em estimativas são fundamentados em formulações teóricas que permitem determinar o comportamento vibracional dos elementos

analisados. Esses métodos têm maior importância na fase de projeto e de especificação de materiais e elementos construtivos de um empreendimento.

No isolamento sonoro de elementos compostos, como o caso de fachadas com janelas ou paredes com portas, o isolamento sonoro global depende do isolamento e da área de cada um dos elementos que compõem o sistema de vedação, sendo necessária uma ponderação por área de cada elemento construtivo (MATEUS, 2012).

Figura 19 – Ilustração esquemática de uma separação composta



Fonte: Mateus (2012, p. 38).

Ainda segundo Mateus (2012), no caso de uma separação composta por n elementos, cada um com um índice de isolamento R_{wi} e uma área S_i , o índice de isolamento global da separação (R_w) pode ser obtido através da seguinte equação da norma EN 12354-1 (EUROPEAN STANDARD, 2000):

$$R_w = 10 \log \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i S_i 10^{(-R_{wi}/10)}} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

Este procedimento de cálculo também pode ser usado separadamente para cada banda de frequências, entrando com valores de isolamento da curva R_i de cada elemento, de forma que assim pode-se obter a curva de isolamento global do sistema de vedação vertical. Para converter estes valores em valores de $D_{n,w}$, devem ser acrescidos aos valores obtidos na equação acima a parcela $10 \log(A_0/S)$, onde A_0 é a área de absorção sonora equivalente de referência e S é a área total do sistema de vedação.

Mateus (2012), ainda cita um cálculo para estimativa de desempenho acústico em campo ($D'_{nT,w}$), quando se conhecem os índices de isolamento global (R_w) dos materiais, através da seguinte equação:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{V}{6,25T_0S} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

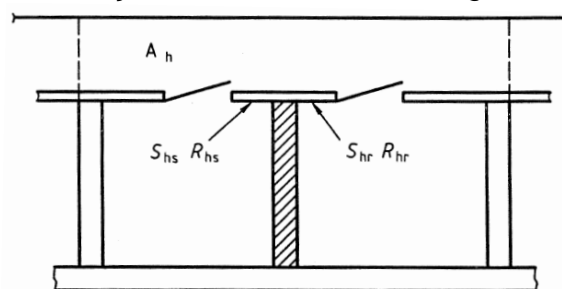
A Norma EN 12354-1 (EUROPEAN STANDARD, 2000) estabelece um cálculo para determinação da influência da transmissão aérea indireta em um sistema de vedação, para os casos de hall de entrada ou corredores em edificações. A diferença de nível normalizada $D_{n,s}$, para transmissão através das salas, pode ser estimada a partir da equação abaixo:

$$D_{n,s} = D_{n,h} = R_{hs} + R_{hr} + 10 \log \left(\frac{A_h A_0}{S_{hs} S_{hr}} \right) + C_{porta} \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo que: R_{hs} é o índice de redução sonora da parede entre o hall e a sala de emissão, em dB; R_{hr} é o índice de redução sonora da parede entre o hall e a sala de recepção, em dB; S_{hs} é a área da parede entre o hall e a sala de emissão, em m²; S_{hr} é a área da parede entre o hall e a sala de recepção, em m²; A_h é a área equivalente de absorção d hall, em m²; C_{porta} é o termo de correção que considera o efeito da posição das portas uma em relação à outra.

O valor do termo de correção C_{porta} pode ser estimado em -2 dB para portas a 90° uma da outra e menos de 1 m afastadas até 0 dB para distâncias maiores e/ou posições paralelas.

Figura 20 – Ilustração de duas salas ao longo de um corredor



Fonte: EN 12354-1 (2010, p. 53).

3 MÉTODO

Neste capítulo foi detalhado o método empregado para as análises que permitirão estabelecer relações entre as características dos sistemas de vedações verticais internos no desempenho acústico dos objetos de estudo selecionados para este trabalho.

Inicialmente, foi realizado um estudo piloto com a finalidade de uma abordagem inicial do problema. Esses ensaios foram realizados entre maio de 2015 e fevereiro de 2017, e estão apresentados no Apêndice A. A partir deste estudo piloto, pode-se avaliar e revisar os procedimentos gerais da pesquisa, antes da implementação da pesquisa propriamente dita. Desta forma, verificou-se que seriam necessárias informações mais detalhadas para a caracterização das paredes de alvenaria, das portas e das frestas decorrentes da instalação das portas. Para esse fim, foram selecionados três prédios residenciais, com disponibilidade de informações mais completas, que serão descritos a seguir.

Foram descritos os sistemas construtivos adotados, bem como todas as suas características quanto a áreas e volumes dos ambientes emissores, receptores, e do hall de entrada que está localizado entre eles.

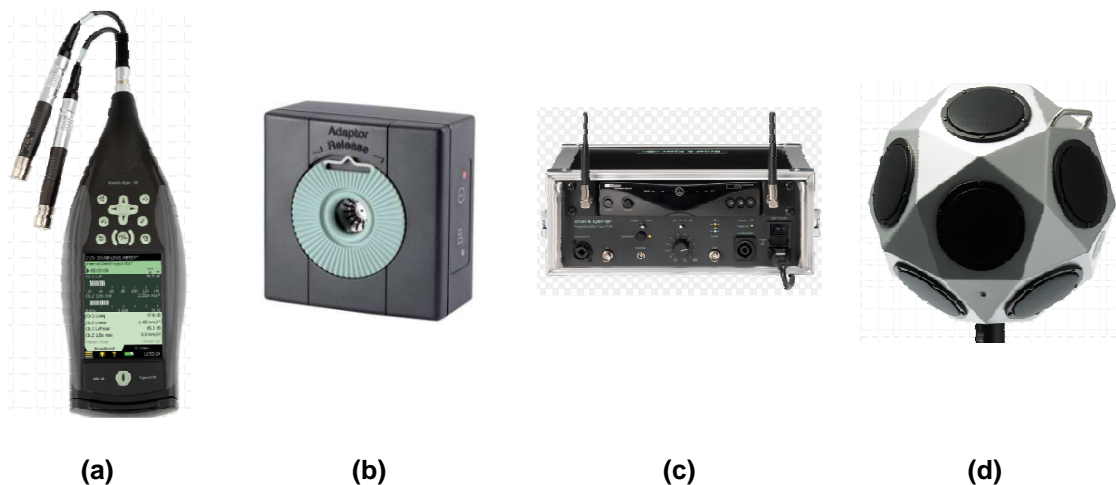
3.1 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÕES

A metodologia de medição especificada para o som aéreo em campo está descrita na norma ISO 16283-1 (2014) e é baseada na emissão de ruído branco ou rosa em um dos ambientes, por meio de uma fonte sonora omnidirecional, e medição dos níveis de pressão sonora em bandas de terço de oitava (de 100 Hz a 3150 Hz) no recinto onde a fonte está localizada (emissor) e no recinto adjacente (receptor). As medições no ambiente emissor e receptor foram realizadas simultaneamente, com dois canais. A diferença entre os níveis sonoros, com uma correção segundo as condições acústicas do recinto receptor (obtidas através do tempo de reverberação), resultam na diferença de níveis padronizada (D'_{nT}), que é convertida em um número único através da ISO 717-1 (2013), obtendo a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$).

Os equipamentos usados para as medições são da marca Brüel & Kjaer, conforme descrição abaixo e Figura 21.

- a) Medidor de nível de pressão sonora marca Brüel & Kjaer, modelo 2270, Classe 1, Número de série 3003751. Certificado de calibração nº: CBR1700302 e CBR1700303 (Figura 21a);
- b) Calibrador acústico marca Brüel & Kjaer, modelo 4231, Classe 1, Número de série 3006768. Certificado de calibração nº: CBR1700304 (Figura 21b);
- c) Microfone marca Brüel & Kjaer, modelo 4189, Número de série 2870457. Certificado de calibração nº: CBR1700302 (Figura 21a);
- d) Microfone marca Brüel & Kjaer, modelo 4189, Número de série 2876982. Certificado de calibração nº: CBR1700303 (Figura 21a);
- e) Amplificador de potência marca Brüel & Kjaer, modelo 2734, Número de série 033006 (Figura 21c);
- f) Fonte sonora omnidirecional marca Brüel & Kjaer, modelo 4292 (Figura 21d);
- g) Software Qualifier Type 7830 marca Brüel & Kjaer, versão 2.18.6.

Figura 21 – Equipamentos utilizados nas medições



Fonte: Brüel & Kjaer.

Também foram medidas as frestas com o auxílio de um paquímetro digital, em dois pontos, um em cada lado das portas na parte inferior das folhas, a 10 cm da extremidade (Figura 22). Foi feita uma média dos valores das duas medidas para considerar como a fresta média na análise dos resultados.

Figura 22 – Medidas das frestas das portas, uma em cada lado da porta



(a)

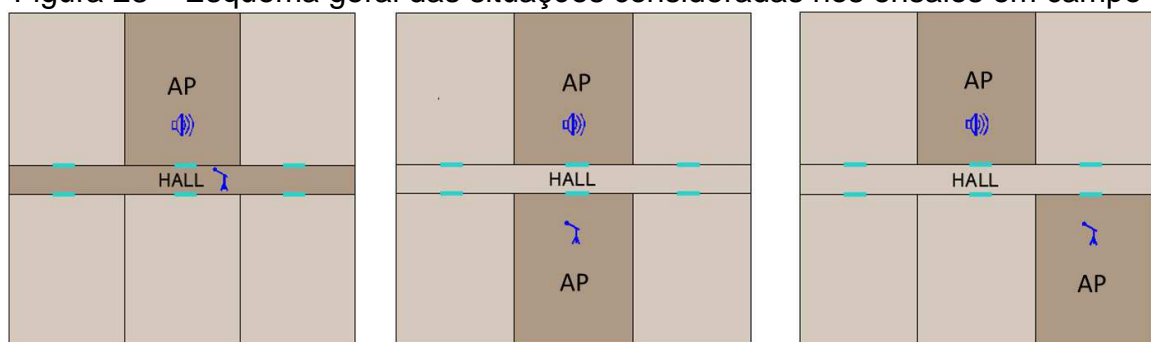
(b)

Fonte: Arquivo pessoal.

3.2 OBJETOS DE ESTUDO

Foram realizados diversos ensaios em 3 tipologias construtivas a fim de determinar a influência das frestas e da circulação entre as unidades no isolamento acústico do sistema de vedação vertical. Estes ensaios foram realizados em obras de três construtoras de Porto Alegre e região metropolitana. Foram coletados dados como o tamanho das frestas entre a porta e o piso, composição das portas, composição das paredes e características dos halls de entrada. Para facilitar o estudo os prédios foram chamados de A, B e C. As situações consideradas para este estudo foram para medições entre os apartamentos (AP) e o hall (Figura 23a), entre apartamentos com as portas alinhadas (Figura 23b) e entre apartamentos com as portas não alinhadas (Figura 23c).

Figura 23 – Esquema geral das situações consideradas nos ensaios em campo



(a)

(b)

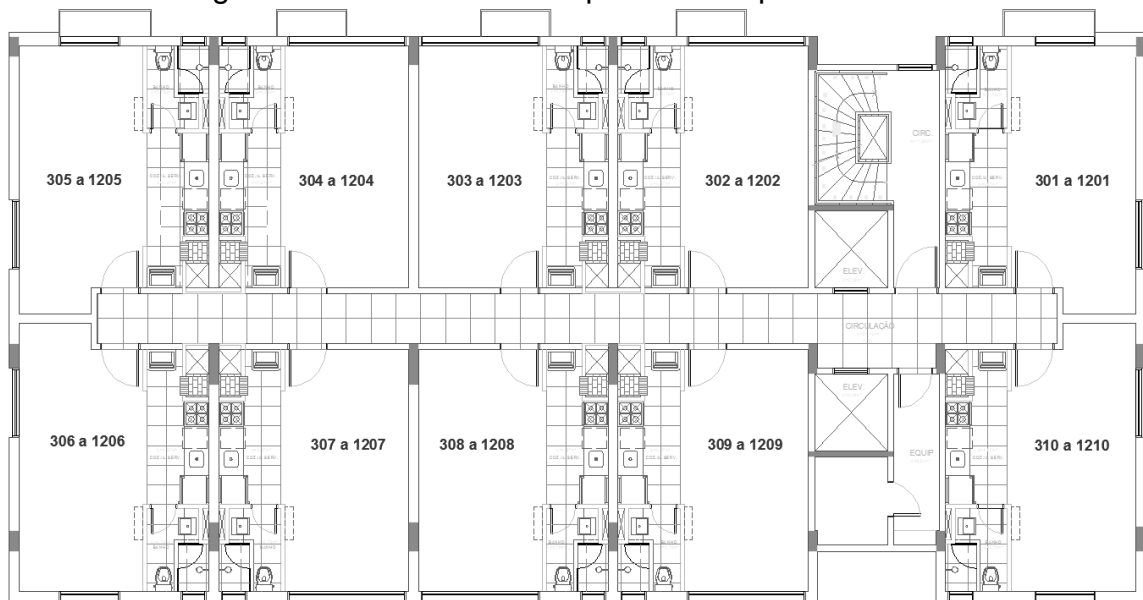
(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Prédio A

O prédio A está localizado em Porto Alegre/RS, e os ensaios foram realizados no dia 24/06/2017. Trata-se de um prédio residencial, composto por pavimento térreo, o 2º pavimento com garagens e área de uso comum e 10 pavimentos tipo. O sistema construtivo utilizado é concreto armado, com paredes de vedação com blocos cerâmicos. A Figura 24 apresenta uma planta baixa do pavimento tipo. Os ensaios foram realizados no 4º e 5º pavimentos, conforme será detalhado no capítulo de resultados.

Figura 24 – Planta baixa do pavimento tipo do Prédio A



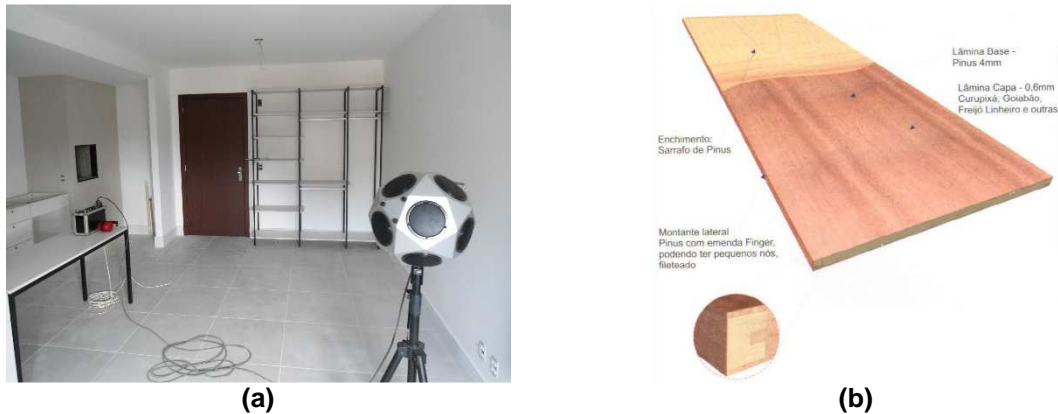
Fonte: Adaptado pelo Autor

As paredes que dividem os apartamentos do hall de entrada são compostas por blocos cerâmicos de vedação, com 14 cm de largura, com revestimento argamassado de aproximadamente 1 cm em cada face da parede. A largura total da parede é de aproximadamente 16 cm. Conforme relatório de ensaio nº 83660 do Laboratório de Construção Civil da UFSM, o Índice de Redução Sonora Ponderado (R_w) de uma parede utilizando o mesmo bloco, porém com espessura de revestimento de 2,5 cm em uma face e 1 cm na outra face é de 41 dB.

A porta de entrada é de madeira, com dimensão de 90 x 210 cm, com espessura total de 35 mm. Segundo especificações do fabricante, a porta é composta por lâmina base de Pinus 4mm, lâmina capa com 0,6mm e enchimento

maciço com sarrafos em Pinus, encabeçamento lateral com madeira dura (Figura 25). Nos pontos de contato da folha da porta com o batente foi utilizada borracha de amortecimento. A massa da folha da porta é de 30 Kg, conforme informação do fabricante.

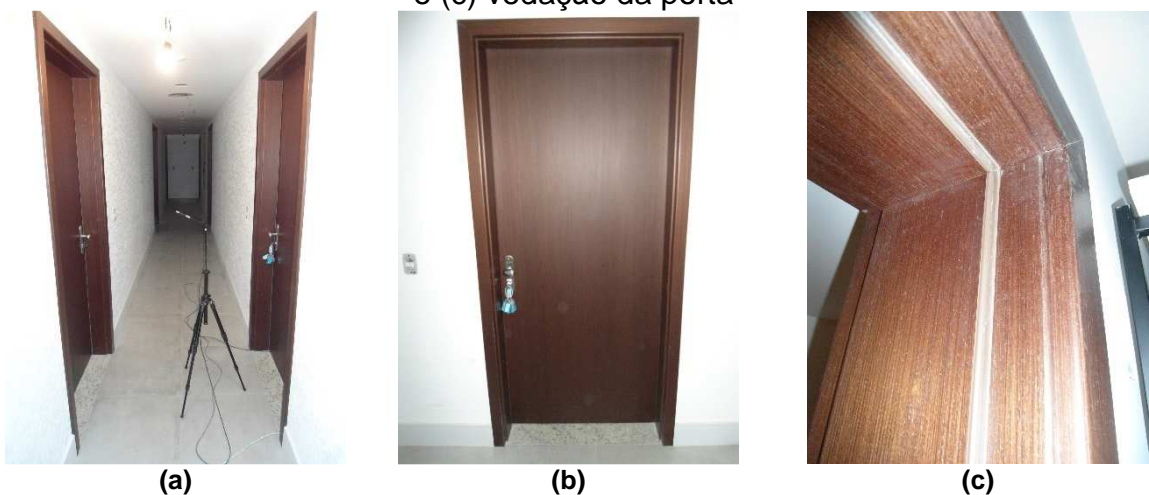
Figura 25 – Apartamento do Prédio A: (a) vista interna e (b) detalhe da porta de entrada



Fonte: Arquivo pessoal e Catálogo Sincol

O Hall de entrada possui uma largura de 1,2 metros, comprimento de 23,2 metros, e pé direito de 2,2 metros. O piso é cerâmico, nas paredes foi executada textura e o forro é rebaixado em gesso (Figura 26).

Figura 26 – Hall de entrada do Prédio A: (a) circulação, (b) porta de entrada e (c) vedação da porta



Fonte: Arquivo pessoal

O tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio A é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio A

Bandas de Frequências (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
TR (s)	1,4	1,7	1,6	1,3	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,2

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Tabela 8 estão identificados os valores das frestas medidas em cada lado da folha da porta e as médias das espessuras das portas do 4º pavimento e na Tabela 9, as informações das frestas das portas do 5º pavimento.

Tabela 8 – Frestas das portas do 4º pavimento do Prédio A

Apartamento	Espessura da fresta fechadura (mm)	Espessura da fresta dobradiça (mm)	Espessura média da fresta (mm)
A43	7,50	8,27	7,89
A47	7,46	7,86	7,66
A48	9,29	10,85	10,07
A49	8,36	7,53	7,95

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 9 – Frestas das portas do 5º pavimento do Prédio A

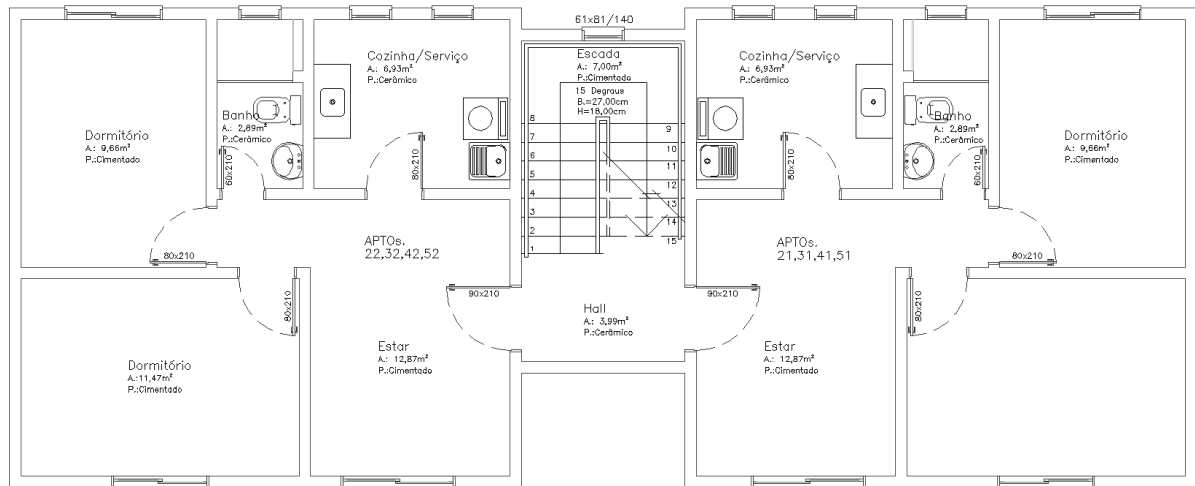
Apartamento	Espessura da fresta fechadura (mm)	Espessura da fresta dobradiça (mm)	Espessura média da fresta (mm)
A53	8,97	9,07	9,02
A58	10,49	11,07	10,78

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.2 Prédio B

O prédio B está localizado em Novo Hamburgo/RS, e os ensaios foram realizados no dia 14/06/2017. Trata-se de um prédio residencial, composto por pavimento térreo e 4 pavimentos tipo. O sistema construtivo utilizado é alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. A Figura 27 apresenta uma planta baixa do pavimento tipo. Os ensaios foram realizados no 2º pavimento, conforme será detalhado no capítulo de resultados.

Figura 27 – Planta baixa do pavimento tipo do Prédio B

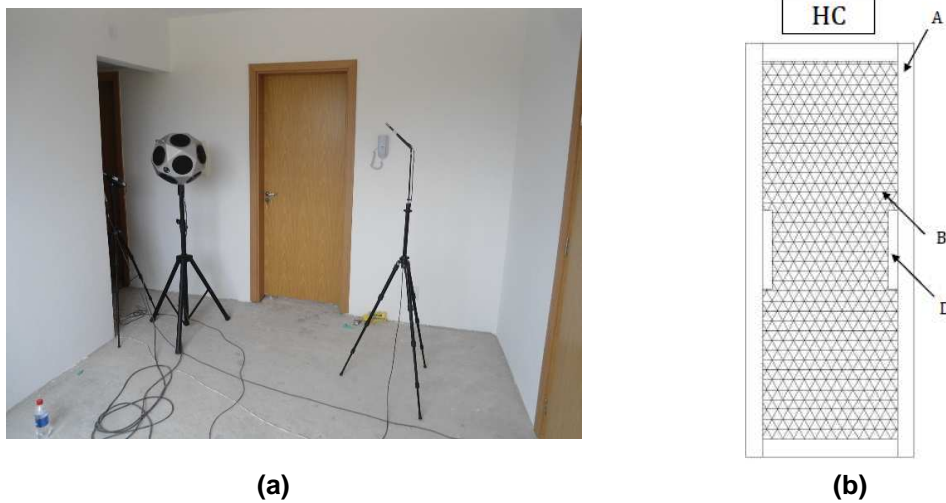


Fonte: Adaptado pelo Autor

As paredes que dividem os apartamentos do hall de entrada são compostas por blocos cerâmicos estruturais, com 14 cm de largura e 7 MPa de resistência, com revestimento argamassado de aproximadamente 1 cm em cada face da parede. A largura total da parede é de aproximadamente 16 cm. Conforme relatório de ensaio nº 83660 do Laboratório de Construção Civil da UFSM, o Índice de redução sonora ponderado de uma parede utilizando o mesmo bloco, porém com espessura de revestimento de 2,5 cm em uma face e 1 cm na outra face é de 41 dB

A porta de entrada é de madeira, com dimensões de 90 x 210 cm, com espessura total de 35 mm. A porta é semi oca, estruturada em madeira, contra capa de 3 mm, batente de 35 mm de espessura, guarnições (alizes) reguláveis em ambos os lados, todos componentes revestidos com SmartFoil, revestimento melamínico de alta tecnologia, sapata de PVC resistente a umidade, segundo informações do fabricante. Em toda a volta da porta foi utilizada borracha de amortecimento para os batentes. A massa da folha da porta é de 27 Kg, conforme informação do fabricante.

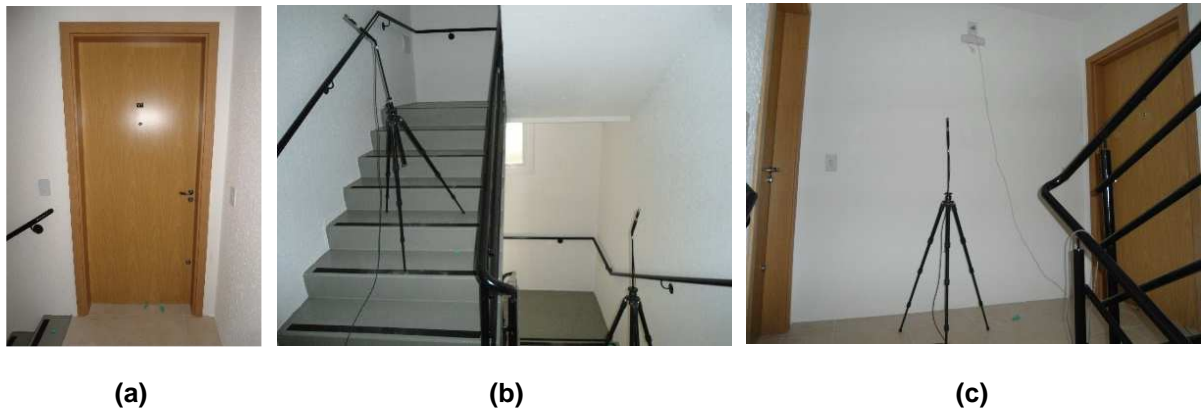
Figura 28 – Apartamento do Prédio B: (a) vista interna da sala e (b) detalhe da porta de entrada



(a) Fonte: Arquivo pessoal e Catálogo Talien

O Hall de entrada possui uma largura de 2,37 metros, comprimento de 4,64 metros, e pé direito de 2,6 metros. O piso é cerâmico, nas paredes e teto foi executado revestimento argamassado e pintura.

Figura 29 – Hall de entrada do Prédio B: (a) porta de entrada, (b) escada e (c) circulação



(a) (b) (c) Fonte: Arquivo pessoal

O tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio B é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio B

Bandas de Frequências (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
TR (s)	3,2	3,2	3,2	2,6	2,5	2,7	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,8	2,7	2,5	2,3	2,0

Fonte: Elaborado pelo Autor

As espessuras das frestas entre a porta e o piso estão demonstradas na Tabela 11.

Tabela 11 – Frestas das portas do 2º pavimento do prédio B

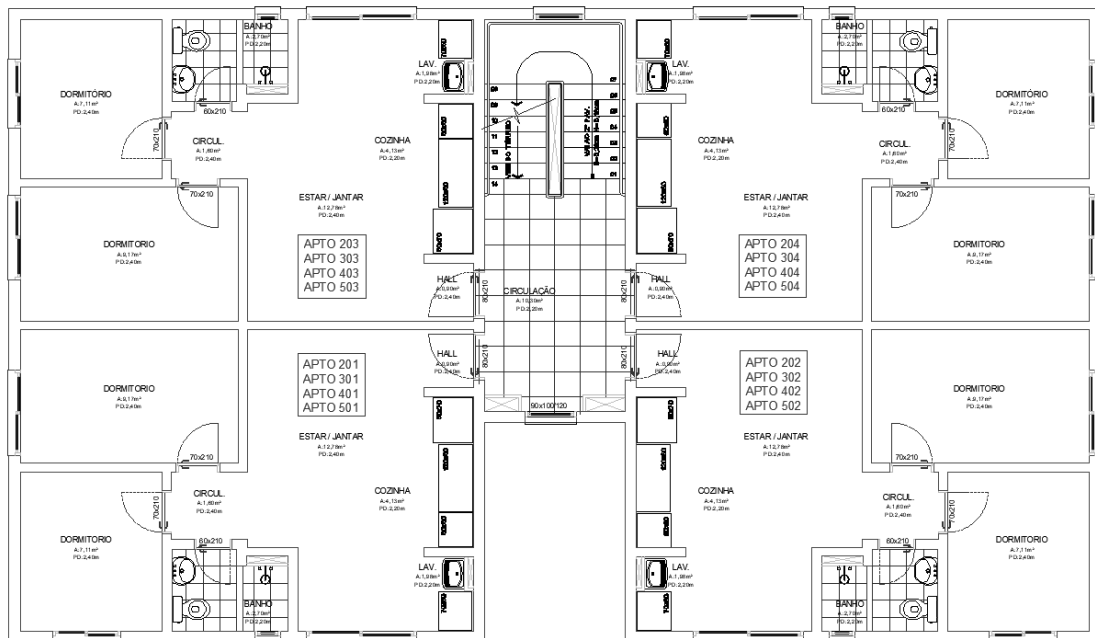
Apartamento	Espessura da fresta fechadura (mm)	Espessura da fresta dobradiça (mm)	Espessura média da fresta (mm)
B21	6,79	7,75	7,27
B22	8,50	9,14	8,82

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.3 Prédio C

O prédio C está localizado em Canoas/RS, e os ensaios foram realizados no dia 21/06/2017. Trata-se de um prédio residencial, composto por pavimento térreo e 4 pavimentos tipo. O sistema construtivo utilizado é de alvenaria estrutural com blocos de concreto. A Figura 30 apresenta uma planta baixa do pavimento tipo. Os ensaios foram realizados no 2º e 3º pavimentos.

Figura 30 – Planta baixa do pavimento tipo do Prédio C



Fonte: Adaptado pelo Autor

As paredes que dividem os apartamentos do hall de entrada são compostas por blocos estruturais de concreto, com 14 cm de largura e 4 MPa de resistência, com revestimento argamassado de aproximadamente 2 cm em cada face da parede.

A largura total da parede é de aproximadamente 18 cm. Conforme relatório de ensaio nº 94024 do Laboratório de Construção Civil da UFSM, o R_w de uma parede utilizando o mesmo bloco, porém com espessura de revestimento de 2,5 cm nas duas faces é de 50 dB. A porta de madeira, com dimensão de 80 x 210 cm, tem espessura total de 35 mm. A porta é semi oca, com quadro na espessura de 29,5 mm, preenchimento sarrafeado e recoberta com chapas de HDF de 3 mm. Em toda a volta da porta foi utilizada borracha de amortecimento para os batentes. A massa da folha da porta é de 13,65 Kg, conforme informação do fabricante.

Figura 31 – Apartamento do Prédio C: (a) vista interna da sala e (b) detalhe da porta de entrada



(a) (b)
Fonte: Arquivo pessoal e Catálogo Famossul

O Hall de entrada possui uma largura de 2,5 metros, comprimento de 6,96 metros, e pé direito de 2,3 metros. O piso é cerâmico, nas paredes foi executada textura e o forro é rebaixado em gesso (Figura 32).

Figura 32 – (a) Hall de entrada, (b) porta de entrada e (c) vedação da porta



(a) (b) (c)

Fonte: Arquivo pessoal

O tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio C é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Tempo de reverberação do Hall de entrada do Prédio C

Bandas de Frequências (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
TR (s)	1,8	1,8	1,9	2,1	1,9	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,4

Fonte: Elaborado pelo Autor

Foram medidas as frestas entre a porta e o piso, conforme demonstrado na Tabela 13 para o 2º pavimento e na Tabela 14 para o 3º pavimento.

Tabela 13 – Frestas das portas do 2º pavimento do Prédio C

Apartamento	Espessura da fresta fechadura (mm)	Espessura da fresta dobradiça (mm)	Espessura média da fresta (mm)
C23	7,74	9,52	8,63
C24	11,64	8,58	10,11

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 14 – Frestas das portas do 3º pavimento do Prédio C

Apartamento	Espessura da fresta fechadura (mm)	Espessura da fresta dobradiça (mm)	Espessura média da fresta (mm)
C31	8,87	8,43	8,65
C32	9,62	12,80	11,21
C33	7,50	9,24	8,37
C34	9,82	9,83	9,83

Fonte: Elaborado pelo Autor

No 3º pavimento foram realizados ensaios para verificar a melhora do isolamento ao ruído aéreo com a utilização de um Veda Porta, conforme Figura 33, adquirido em uma loja de materiais de construção civil. O Veda Porta foi posicionado abaixo da porta, e depois que a mesma era fechada, o dispositivo era puxado e pressionado contra a folha da porta, para vedar o máximo possível as frestas.

Figura 33 – Veda Porta utilizado: (a) com a porta aberta, (b) com a porta fechada e (c) vista do hall



(a)



(b)



(c)

Fonte: Arquivo pessoal

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios feitos nos três prédios objetos de estudo.

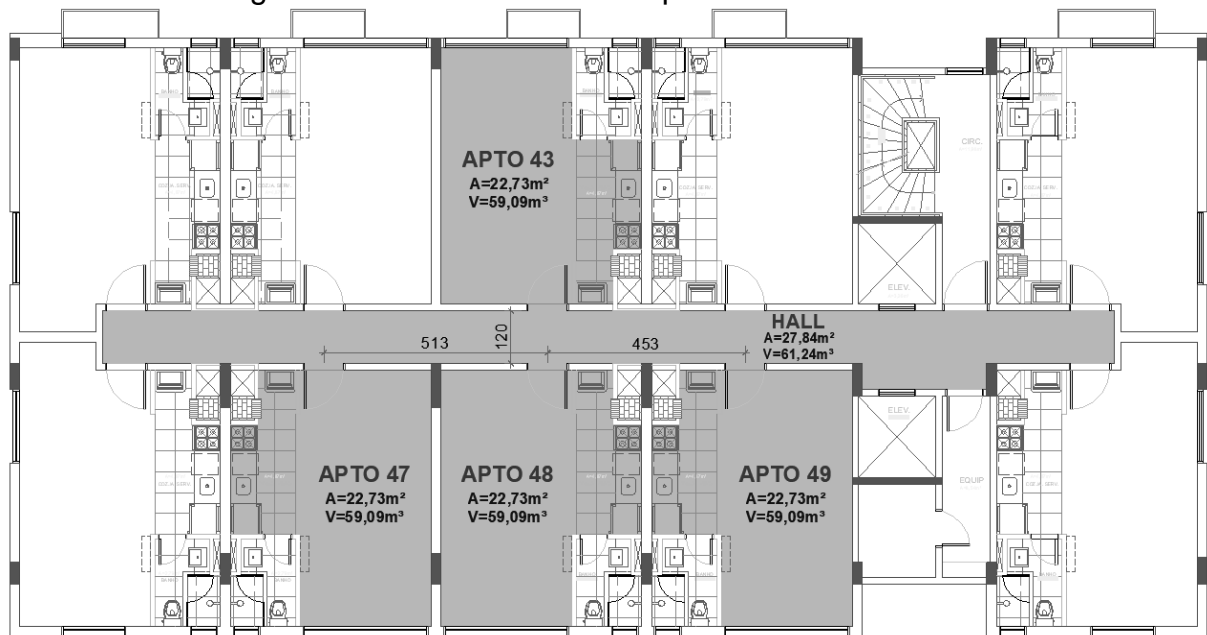
4.1 PRÉDIO A

Os ensaios no Prédio A foram realizados em dois pavimentos, contemplando uma série de combinações possíveis, conforme será detalhado a seguir.

4.1.1 Ensaios realizados no 4º pavimento

No 4º pavimento foram realizados ensaios entre as unidades e o hall de entrada e entre as unidades separadas pelo hall de entrada. A Figura 34 mostra os apartamentos do pavimento, com destaque para aqueles que foram usados nos ensaios, bem como áreas e volumes de ambientes e as distâncias entre os eixos das portas.

Figura 34 – Planta baixa do 4º pavimento do Prédio A

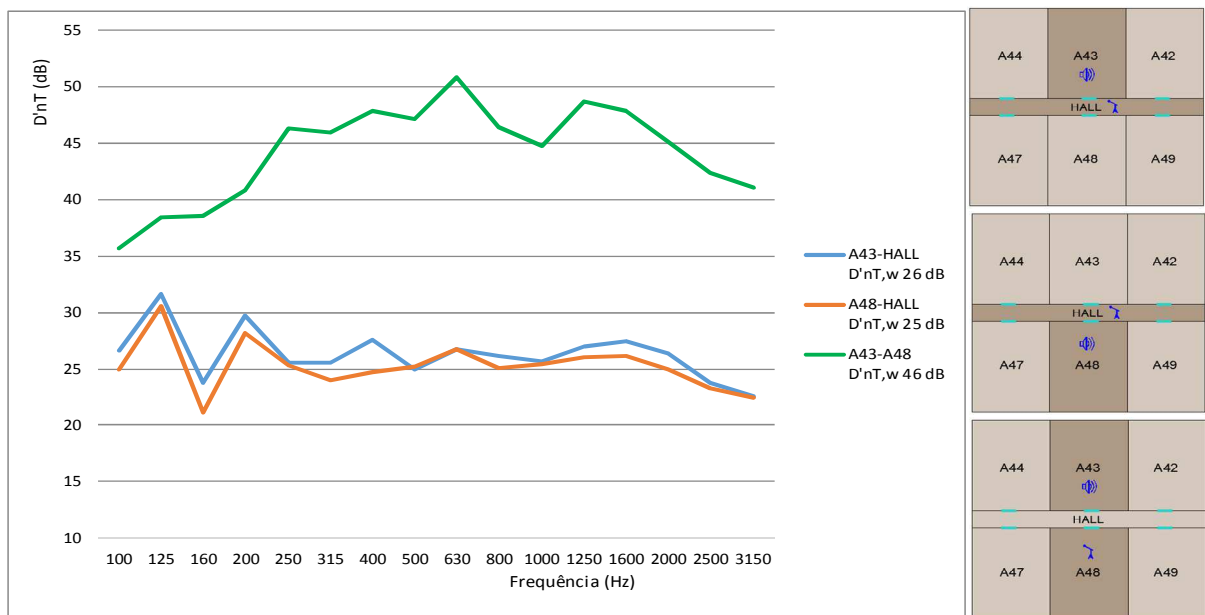


Fonte: Elaborado pelo autor

O isolamento ao ruído aéreo entre o apartamento A43 e o hall e entre o apartamento A48 e o hall mostra um comportamento muito semelhante, com uma frequência de ressonância bem definida nos 160 Hz, conforme demonstrado na Figura 35. Observa-se que essa ressonância não ocorre quando o ensaio é feito entre as unidades separadas pelo hall de entrada, que apresenta um isolamento crescente até os 630 Hz e depois dessa frequência começa a cair, em função das frestas das portas.

O isolamento entre A43-hall foi 1 dB superior ao isolamento de A48-hall, o que pode ser explicado pelo som transmitido através das frestas abaixo das portas, no primeiro caso de 7,89 mm e no segundo caso 10,07 mm.

Figura 35 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A43-hall, A48-hall e A43-A48

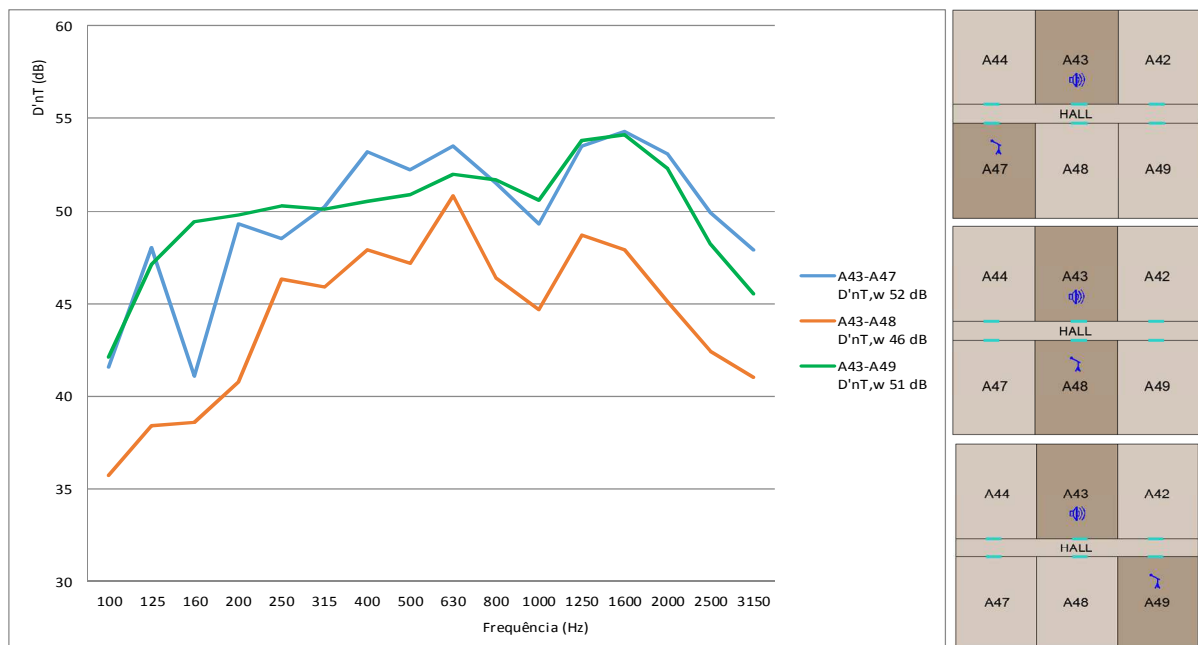


Fonte: Elaborado pelo autor

Também foi realizado o ensaio de isolamento ao ruído aéreo entre os apartamentos A43-A48, A43-A47 e A43-A49, separados pelo hall de entrada, conforme demonstrado na Figura 36. Nos três casos se observa a perda de isolamento a partir dos 630 Hz, comportamento acentuado nos 1600 Hz, em que a perda é maior. No caso dos apartamentos A-43 e A-48, no qual as portas estão de frente uma para a outra, o resultado foi de 46 dB, com valor menor que os outros dois casos, em que as portas estão desalinhadas. Entre A43-A47, a distância entre os eixos das portas é de 5,13 m, o isolamento foi de 52 dB, enquanto que entre A43-

A49, a distância entre portas é de 4,53 m, o resultado foi de 51 dB. Essa diferença pode ser explicada pelo aumento da distância de 60 cm entre os eixos de portas nas duas situações, e é esperada, porém não é contemplada na estimativa teórica da norma EN 12354 (Equação 7). Segundo o método de cálculo da referida norma, não constam valores que fazem referência à deslocamentos paralelos de portas em circulações horizontais, somente para portas localizadas a 90° uma da outra. Desta forma, pode-se afirmar que o não alinhamento das portas de entrada das unidades habitacionais pode contribuir para a qualificação do desempenho acústico desses sistemas construtivos.

Figura 36 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A43-A48, A43-A47 e A43-A49

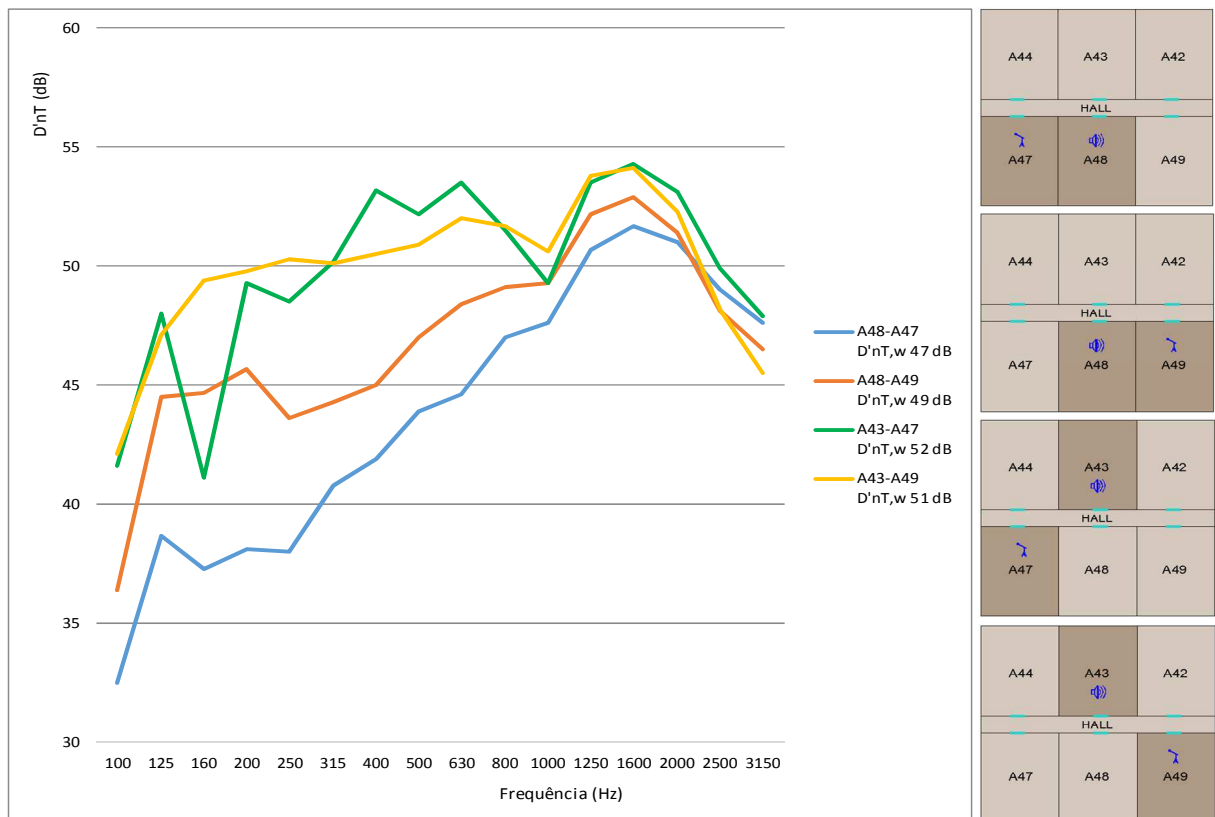


Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir é apresentado o isolamento ao ruído aéreo entre os apartamentos A48-A47 e A48-A49, separados pelo hall de entrada. Nessa situação, além do hall de entrada, os apartamentos ainda possuem em comum a parede de geminação. Para efeitos de comparação, foram inseridos no gráfico também os resultados entre A43-A47 e A43-A49, conforme mostra a Figura 37. Comparando o isolamento de A48-A47 e A48-A49, observa-se o melhor resultado entre A48-A49, em função da parede de geminação ser menor e a distância entre portas também ser menor em relação a A48-A47. Ao comparar A48-A47 com A43-A47, para a qual a distância entre as portas é a mesma, porém em lados opostos do corredor, tem-se a perda de

5 dB de isolamento no caso de apartamentos adjacentes, o que indica que, além das frestas das portas, o isolamento está sendo prejudicado também pela própria parede de geminação. Ao comparar A48-A49 com A43-A49, observa-se a perda de 2 dB de isolamento, valor bem menor que na comparação anterior, isso sugere que não há tanta perda de isolamento pela parede de geminação, e mais pelas frestas em si. Em todos os casos se observa uma perda significativa de eficiência a partir dos 1600 Hz. Nesse caso, a opção por portas em lados opostos do corredor e não alinhadas se mostrou mais eficiente que a localização das portas na mesma parede do corredor.

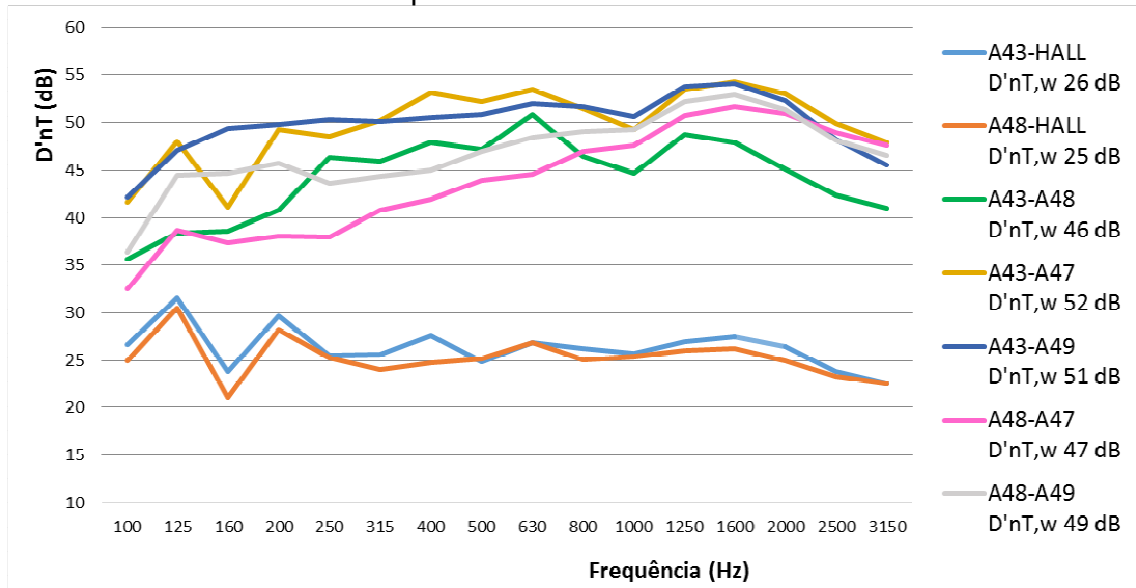
Figura 37 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A48-A47, A48-A49 e A43-A47 e A43-A49



Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir é apresentado um gráfico com a compilação de todos os resultados de isolamento ao ruído aéreo do 4º pavimento (Figura 38), e a tabela com valores de isolamento por frequência (Tabela 15).

Figura 38 – Isolamento ao ruído aéreo de todas as situações no 4º pavimento do Prédio A



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 – Resultados do 4º pavimento do Prédio A

Situações	A43-A47	A43-A48	A43-A49	A48-A47	A48-A49	A53-A58
Bandas de Frequências (Hz)	D'nT (dB)	D'nT (dB)	D'nT (dB)	D'nT (dB)	D'nT (dB)	D'nT (dB)
100	41,6	35,7	42,1	32,5	36,4	36,0
125	48,0	38,4	47,1	38,7	44,5	40,4
160	41,1	38,6	49,4	37,3	44,7	37,9
200	49,3	40,8	49,8	38,1	45,7	42,5
250	48,5	46,3	50,3	38,0	43,6	44,5
315	50,2	45,9	50,1	40,8	44,3	45,4
400	53,2	47,9	50,5	41,9	45,0	47,2
500	52,2	47,2	50,9	43,9	47,0	46,0
630	53,5	50,8	52,0	44,6	48,4	45,7
800	51,5	46,4	51,7	47,0	49,1	44,6
1000	49,3	44,7	50,6	47,6	49,3	46,4
1250	53,5	48,7	53,8	50,7	52,2	48,2
1600	54,3	47,9	54,1	51,7	52,9	47,8
2000	53,1	45,1	52,3	51,0	51,4	44,7
2500	49,9	42,4	48,2	49,0	48,1	41,5
3150	47,9	41,0	45,5	47,6	46,5	40,3
D'nT,w (dB)	52	46	51	47	49	45

Fonte: Elaborado pelo autor

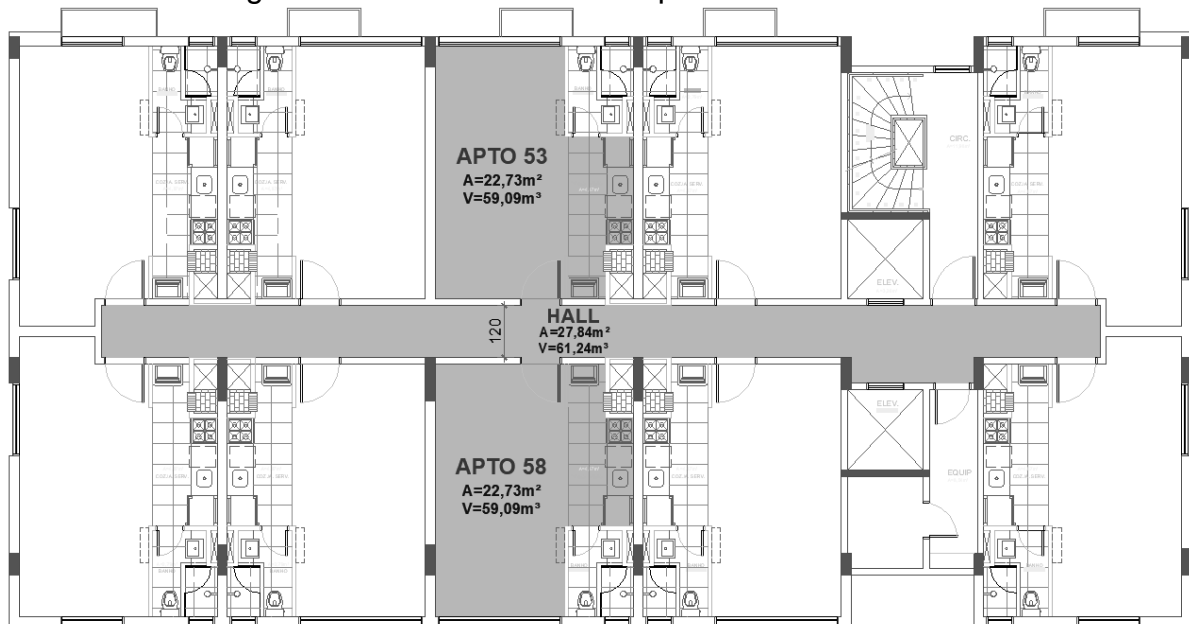
A parede de alvenaria do Prédio A é composta por blocos cerâmicos de 14 cm com, aproximadamente, 1 cm de revestimento argamassado em cada face.

Ensaio em laboratório com uma parede composta do mesmo bloco, porém com espessura de revestimento de 2,5 cm em uma face e 1 cm na outra face, resultaram em um R_w de 41 dB. Com base no estudo de Klippel Filho et al. (2017), que observou o incremento médio de 1 dB de isolamento a sons aéreos com o aumento de 1 cm de revestimento, pode-se considerar uma estimativa de 40 dB como referência para esta parede do Prédio A, considerando como uma parede cega, sem a porta de entrada.

4.1.2 Ensaio realizados no 5º pavimento

No 5º pavimento foram realizados ensaios entre as unidades e o hall de entrada e entre as unidades separadas pelo hall de entrada, conforme resultados apresentados a seguir. A Figura 39 mostra os apartamentos do pavimento, com destaque para aqueles que foram usados nos ensaios, bem como áreas e volumes de ambientes e as distâncias entre os eixos das portas.

Figura 39 – Planta baixa do 5º pavimento do Prédio A

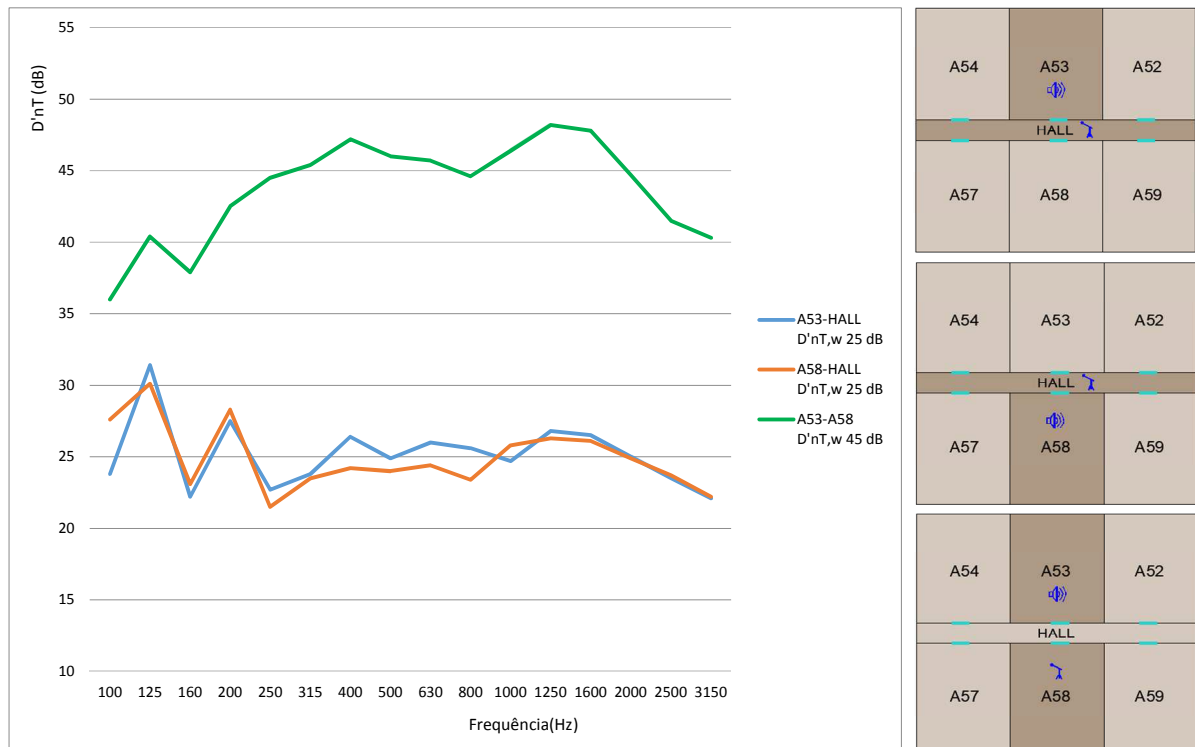


Fonte: Elaborado pelo autor

O isolamento ao ruído aéreo entre o apartamento A53 e o hall e entre o apartamento A58 e o hall mostra um comportamento muito semelhante, conforme demonstrado na Figura 40. O isolamento entre A53-hall e A58-hall obteve o mesmo resultado, 25 dB, com frestas de 9,02 mm e 10,78 mm, respectivamente. O valor do

isolamento entre as unidades separadas pelo hall de entrada foi de 45 dB, resultado 1 dB inferior ao 4º pavimento, onde os isolamentos entre unidades e hall foram de 25 e 26 dB.

Figura 40 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: A53-hall, A58-hall e A53-A58



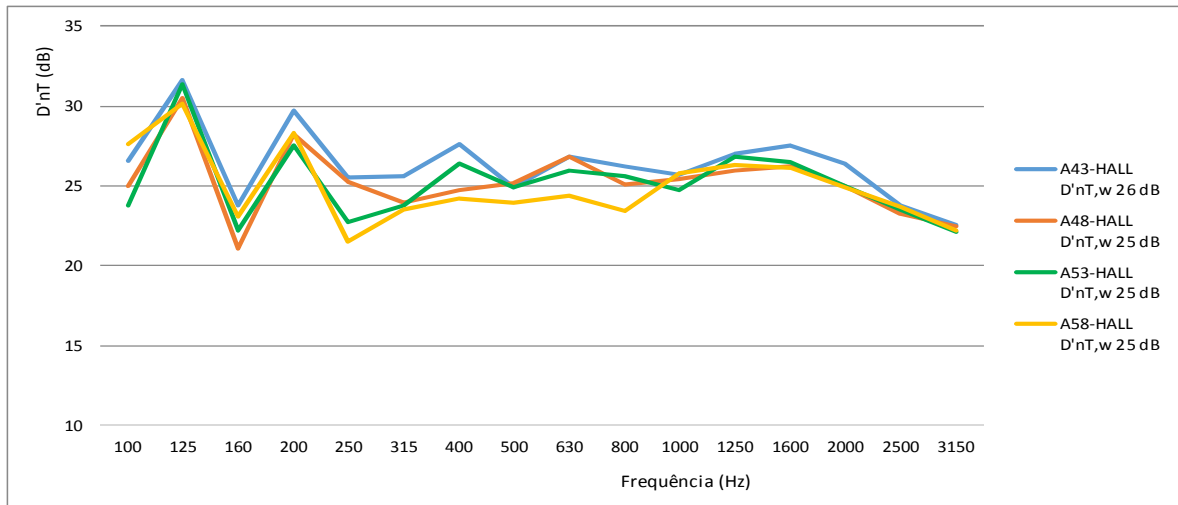
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3 Ensaios realizados entre apartamentos e hall

Ao comparar os gráficos de isolamento dos ensaios realizados entre os apartamentos e o hall de entrada, percebe-se uma frequência de ressonância aos 160 Hz nos quatro casos. A partir dos 1600 Hz o isolamento começa a cair em função dos comprimentos de onda menores face às frestas das portas. Em relação às frestas, a situação A43-hall obteve 1 dB de melhora em relação às demais, visto que a fresta é inferior a 8 mm, sendo que as demais são maiores que 9 mm.

Abaixo é apresentado um gráfico com os resultados de ensaios realizados entre apartamentos e o hall de entrada, e a tabela com valores de isolamento por frequência e frestas médias das portas, conforme Figura 41 e Tabela 16.

Figura 41 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos e hall de entrada



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência e frestas médias das portas entre apartamentos e hall de entrada

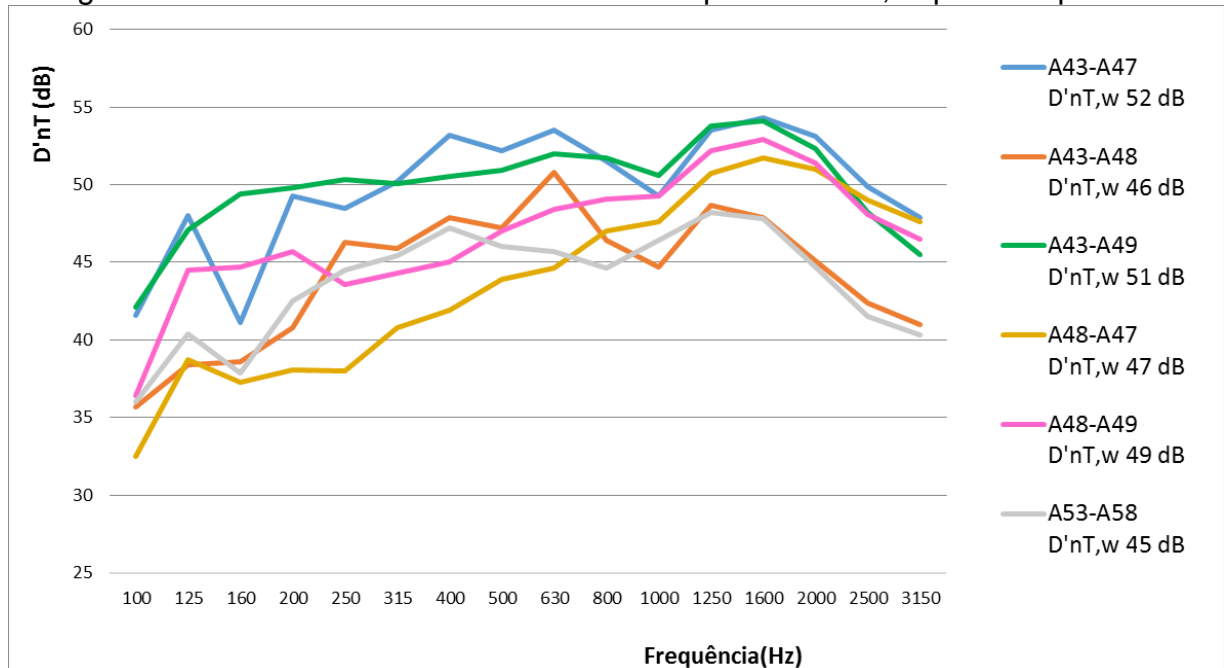
Situações	A43-HALL	A48-HALL	A53-HALL	A58-HALL
Bandas de Frequências (Hz)	D'nT (dB)	D'nT (dB)	D'nT (dB)	D'nT (dB)
100	26,6	25,0	23,8	27,6
125	31,6	30,5	31,4	30,1
160	23,8	21,1	22,2	23,1
200	29,7	28,2	27,5	28,3
250	25,5	25,3	22,7	21,5
315	25,6	24,0	23,8	23,5
400	27,6	24,7	26,4	24,2
500	24,9	25,2	24,9	24,0
630	26,8	26,8	26,0	24,4
800	26,2	25,1	25,6	23,4
1000	25,7	25,4	24,7	25,8
1250	27,0	26,0	26,8	26,3
1600	27,5	26,2	26,5	26,1
2000	26,4	25,0	25,0	24,9
2500	23,8	23,3	23,5	23,7
3150	22,6	22,5	22,1	22,2
D'nT,w (dB)	26	25	25	25
Espessura média das frestas (mm)	7,89	10,07	9,02	10,78

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.4 Comparação de ensaios realizados entre apartamentos separados pelo hall de entrada

Abaixo é apresentado um gráfico comparativo entre todos os ensaios realizados entre os apartamentos separados hall de entrada, conforme Figura 42.

Figura 42 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 PRÉDIO B

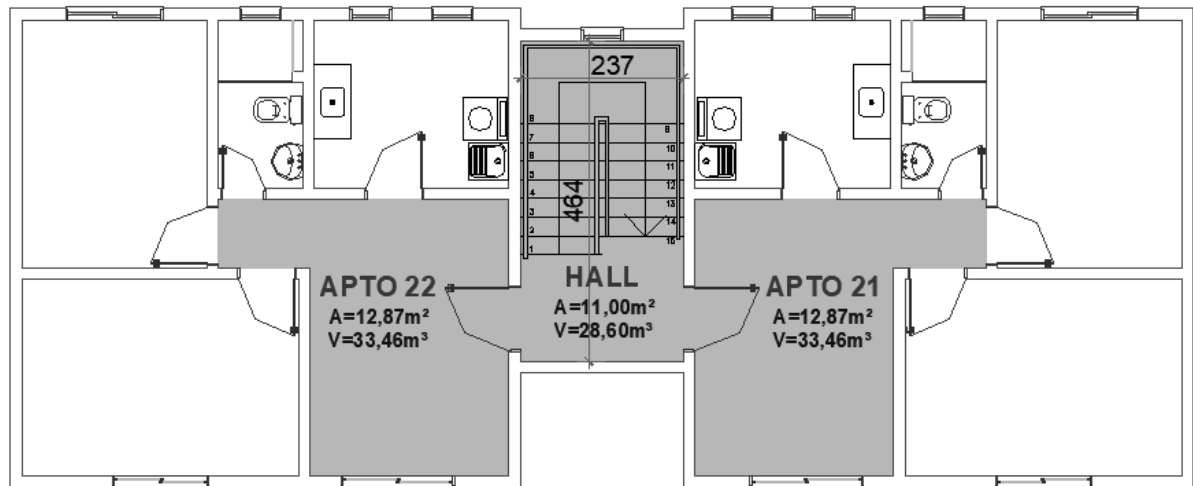
Os ensaios no Prédio B foram realizados somente em um pavimento, contemplando três situações, conforme será detalhado a seguir.

4.2.1 Ensaio realizados no 2º Pavimento

No 2º pavimento foram realizados ensaios entre as unidades e o hall de entrada e entre as unidades separadas pelo hall de entrada, conforme resultados abaixo.

A Figura 43 mostra os apartamentos do pavimento, com destaque para aqueles que foram usados nos ensaios, bem como áreas e volumes de ambientes.

Figura 43 – Planta baixa do 2º pavimento do Prédio B



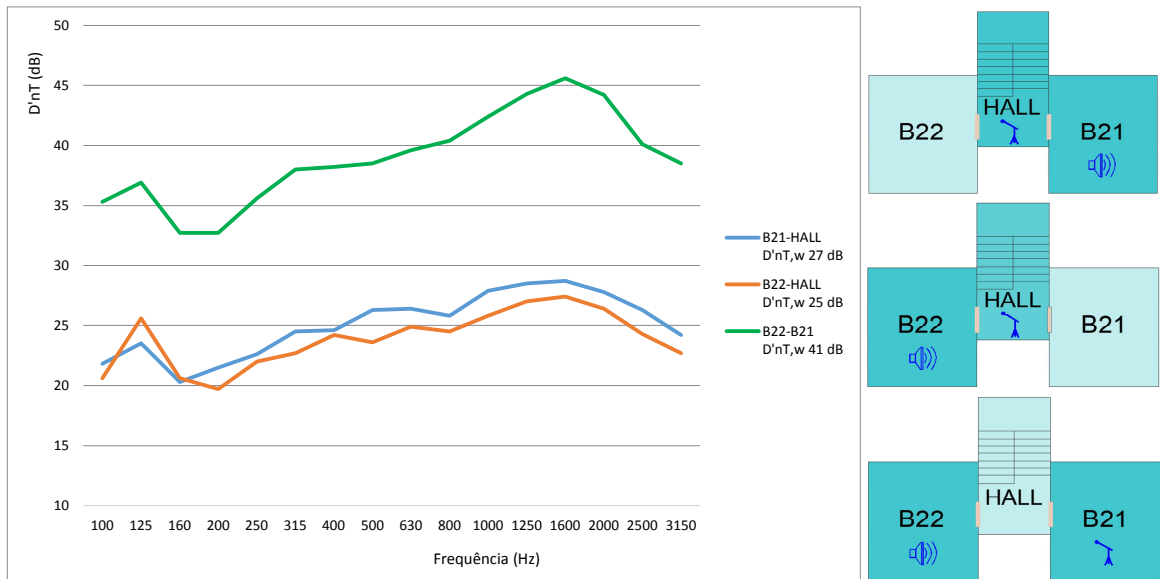
Fonte: Elaborado pelo autor

Abaixo é apresentado o isolamento ao ruído aéreo entre o apartamento B21 e o hall de entrada, entre o apartamento B22 e o hall de entrada, e entre os apartamentos B22 e B21, separados pelo hall de entrada, conforme demonstrado na Figura 44, e também a Tabela 17, com valores de isolamento por frequência e frestas médias das portas.

Comparando o isolamento de B21-hall com B22-hall, observa-se uma melhora de 2 dB no valor global, em função da fresta de 7,27 mm, menor que no outro caso, onde a fresta é de 8,82 mm. Estes valores de isolamento entre B21-hall e B22-hall, 27 e 25 dB respectivamente, não garantiram o mesmo desempenho que no caso do Prédio A para as unidades separadas pelo hall de entrada, onde resultados de 25 e 26 dB de isolamento entre apartamentos e hall resultaram num isolamento de 46 dB entre unidades separadas pelo hall. No caso do Prédio B, o isolamento entre unidades separadas pelo hall de entrada foi de 41 dB. Isso pode ser explicado pelo tempo de reverberação do hall do Prédio B, bem maior que o Prédio A, e pela geometria do mesmo.

A curva do isolamento entre B22-B21 segue o mesmo padrão das curvas de B21-hall e B22-hall, com a perda acentuada de isolamento a partir dos 1600 Hz em função das frestas das portas.

Figura 44 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: B21-hall, B22-hall e B22-B21



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência e frestas médias das portas entre apartamentos e hall de entrada

Situações	B21-HALL	B22-HALL	B22-B21
Bandas de Frequências (Hz)	D'_{nT} (dB)	D'_{nT} (dB)	D'_{nT} (dB)
100	21,8	20,6	35,3
125	23,5	25,6	36,9
160	20,3	20,6	32,7
200	21,5	19,7	32,7
250	22,6	22,0	35,6
315	24,5	22,7	38,0
400	24,6	24,2	38,2
500	26,3	23,6	38,5
630	26,4	24,9	39,6
800	25,8	24,5	40,4
1000	27,9	25,8	42,4
1250	28,5	27,0	44,3
1600	28,7	27,4	45,6
2000	27,8	26,4	44,2
2500	26,3	24,3	40,1
3150	24,2	22,7	38,5
$D'_{nT,w}$ (dB)	27	25	41
Espessura média das frestas (mm)	7,27	8,82	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A parede de alvenaria do Prédio B é composta por blocos cerâmicos de 14 cm com, aproximadamente, 1 cm de revestimento argamassado em cada face.

Ensaio em laboratório com uma parede composta do mesmo bloco, porém com espessura de revestimento de 2,5 cm em uma face e 1 cm na outra face, resultaram em um R_w de 41 dB. Com base no estudo de Klippel Filho et al. (2017), que observou o incremento médio de 1 dB de isolamento a sons aéreos com o aumento de 1 cm de revestimento, pode-se considerar uma estimativa de 40 dB como referência para esta parede do Prédio B, considerando como uma parede cega, sem a porta de entrada.

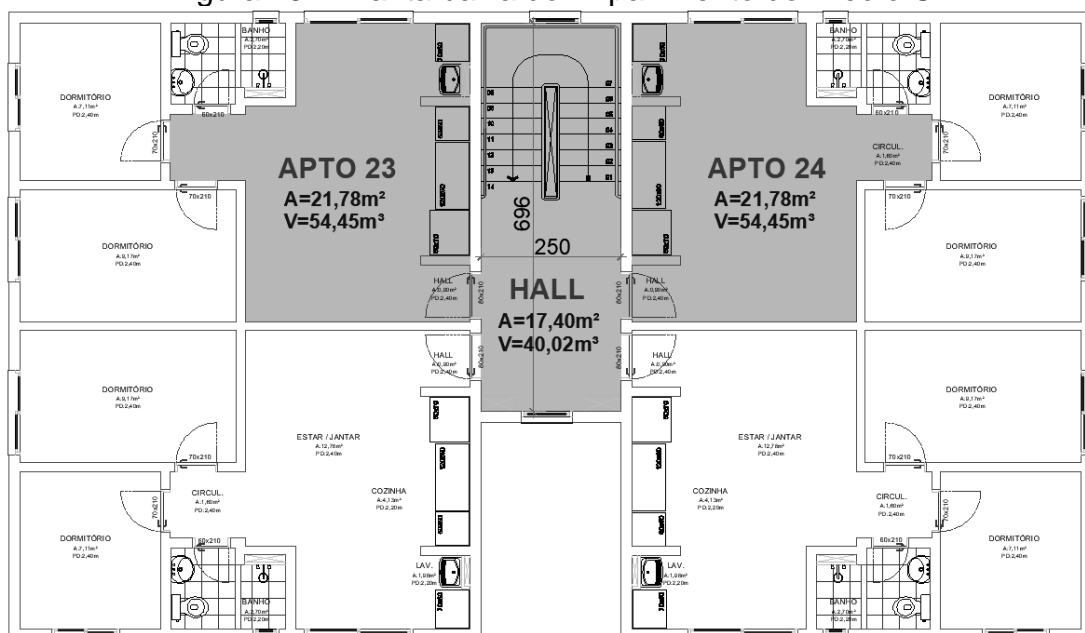
4.3 PRÉDIO C

Os ensaios no Prédio C foram realizados em dois pavimentos, contemplando uma série de combinações possíveis, conforme será detalhado a seguir. Neste prédio também foram feitos ensaios usando um Veda Porta na fresta das portas.

4.3.1 Ensaio realizados no 2º Pavimento

No 2º pavimento foram realizados ensaios entre as unidades e o hall de entrada e entre as unidades separadas pelo hall de entrada. A Figura 45 mostra os apartamentos do pavimento, com destaque para aqueles que foram usados nos ensaios, bem como áreas e volumes de ambientes e as distâncias entre os eixos das portas.

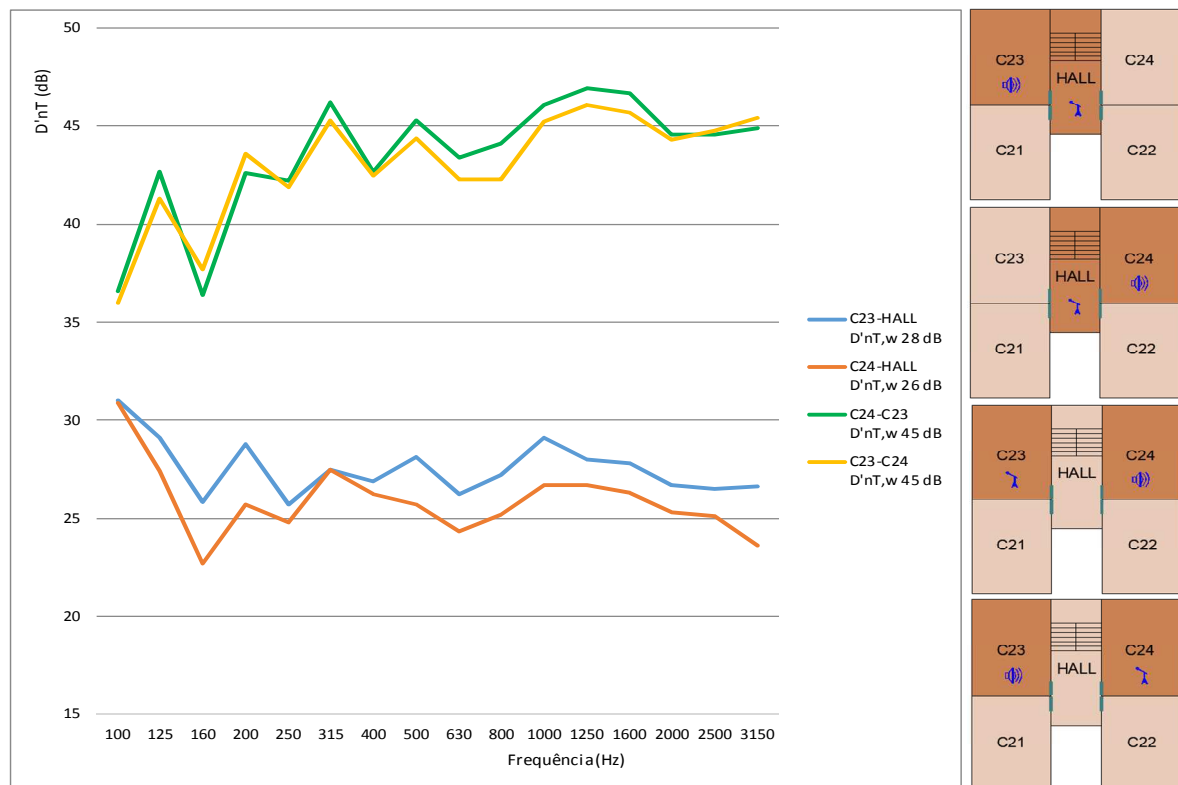
Figura 45 – Planta baixa do 2º pavimento do Prédio C



Fonte: Elaborado pelo autor

O isolamento ao ruído aéreo entre o apartamento C23 e o hall e entre o apartamento C24 e o hall mostra um comportamento muito semelhante, com uma frequência de ressonância nos 160 Hz, o que também acontece quando o isolamento é medido entre as unidades separadas pelo hall de entrada. O isolamento entre C23-hall foi 2 dB superior ao isolamento de C24-hall, o que é explicado através das frestas abaixo das portas, no primeiro caso de 8,63 mm e no segundo caso 10,11 mm. Também foi realizado o ensaio entre C23-C24 e C24-C23, alternando a posição do ambiente emissor e receptor, a fim de verificar se haveria diferença significativa nos resultados. As diferenças por frequência foram em geral de 1 dB, chegando a 1,8 dB em 800 Hz, porém o valor do isolamento global não se alterou, com o resultado de 45 dB. Nos ensaios entre apartamentos e hall se observa um queda no isolamento a partir dos 1000 Hz, enquanto que nas situações entre apartamentos separados pelo hall essa queda ocorre mais acentuada nos 1600 Hz e depois estabiliza até os 3150 Hz. A Figura 46 ilustra os resultados dos ensaios no 2º pavimento, e logo em seguida são apresentados os valores de isolamento por frequência, conforme Tabela 18.

Figura 46 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes:
C23-hall C24-hall, C24-C23 e C23-C24



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 18 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência de todas as situações no 2º pavimento

Situações	C23-HALL	C24-HALL	C24-C23	C23-C24
Bandas de Frequências (Hz)	D'_{nT} (dB)	D'_{nT} (dB)	D'_{nT} (dB)	D'_{nT} (dB)
100	31,0	30,9	36,6	36,0
125	29,1	27,4	42,7	41,3
160	25,8	22,7	36,4	37,7
200	28,8	25,7	42,6	43,6
250	25,7	24,8	42,2	41,9
315	27,5	27,5	46,2	45,3
400	26,9	26,2	42,7	42,5
500	28,1	25,7	45,3	44,4
630	26,2	24,3	43,4	42,3
800	27,2	25,2	44,1	42,3
1000	29,1	26,7	46,1	45,2
1250	28,0	26,7	46,9	46,1
1600	27,8	26,3	46,7	45,7
2000	26,7	25,3	44,6	44,3
2500	26,5	25,1	44,6	44,8
3150	26,6	23,6	44,9	45,4
D'_{nT,w} (dB)	28	26	45	45
Espessura média das frestas (mm)	8,63	10,11	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

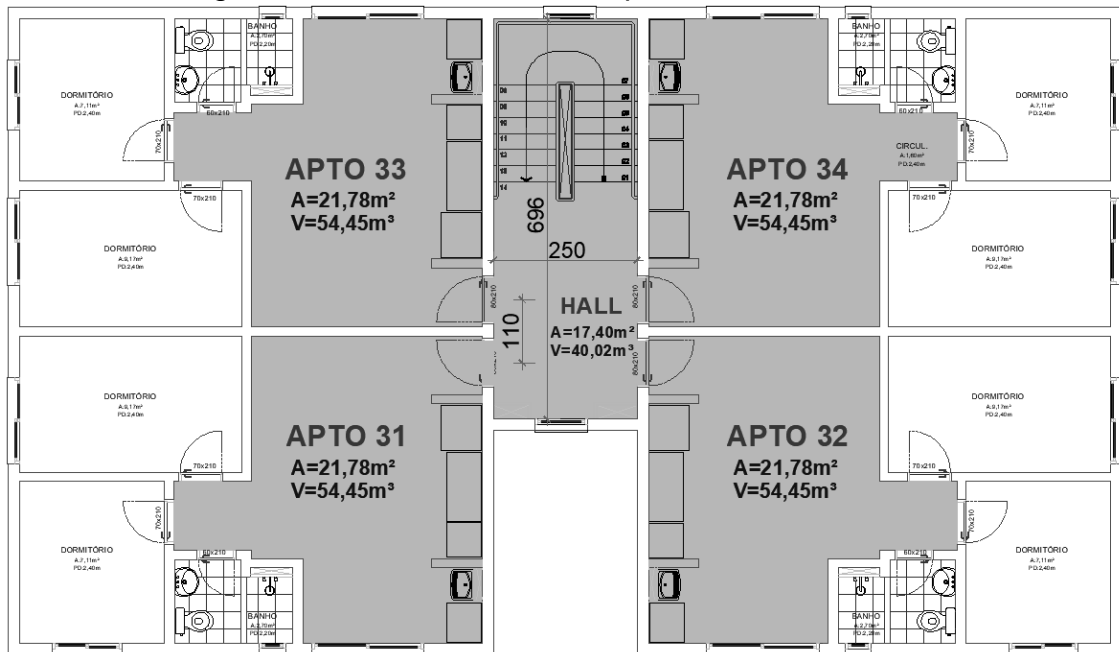
A parede de alvenaria do Prédio C é composta por blocos de concreto de 14 cm com, aproximadamente, 2 cm de revestimento argamassado em cada face. Ensaios em laboratório com uma parede composta do mesmo bloco, porém com espessura de revestimento de 2,5 cm em ambas as faces, resultaram em um R_w de 50 dB. Com base no estudo de Klippel Filho et al. (2017), que observou o incremento médio de 1 dB de isolamento a sons aéreos com o aumento de 1 cm de revestimento, pode-se considerar uma estimativa de 49 dB como referência para esta parede do Prédio C, considerando como uma parede cega, sem a porta de entrada.

4.3.2 Ensaios realizados no 3º Pavimento

No 3º pavimento foram realizados ensaios entre as unidades e o hall de entrada e entre as unidades separadas pelo hall de entrada, com e sem o uso do Veda Porta nas frestas. A Figura 47 mostra os apartamentos do pavimento, com

destaque para aqueles que foram usados nos ensaios, bem como áreas e volumes de ambientes e as distâncias entre os eixos das portas.

Figura 47 – Planta baixa do 3º pavimento do Prédio C

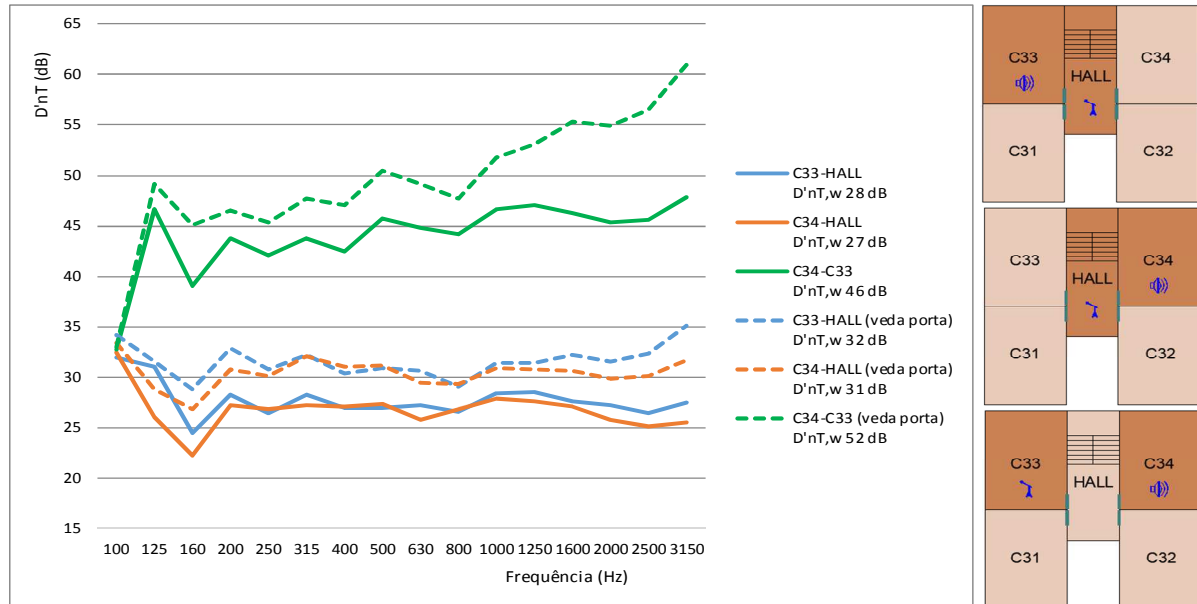


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 48 pode-se observar a melhora no isolamento com o uso do Veda Porta nas frestas, o que garantiu um acréscimo no valor global do isolamento de 4 dB para a situação entre apartamentos e hall, e 6 dB para o isolamento entre apartamentos separados pelo hall. Comparando as curvas de isolamento entre apartamento e hall com e sem o Veda Porta, observa-se que o comportamento delas segue o mesmo padrão até os 1250 Hz, a partir desse ponto as curvas das portas sem o tratamento passam a cair e as curvas das portas com o Veda Porta tem uma leve melhora, situação explicada pela vedação das frestas. No valor do isolamento considerando os apartamentos separados pelo hall, este comportamento é mais acentuado, o isolamento é crescente a partir dos 800 Hz com o uso do Veda Porta. Em todos os casos se observa a ressonância do sistema em 160 Hz. Quanto à diferença de 1 dB no isolamento entre C33-hall e C34-hall, nas duas situações, com e sem o uso do Veda Porta, pode ser explicada pela fresta da porta, 8,37 mm no primeiro caso e 9,83 mm no segundo caso. Ao comparar o isolamento entre as unidades separadas pelo hall, percebe-se um ganho significativo no isolamento a

partir de 800 Hz, nas médias e altas frequências, com diferenças superiores a 10 dB nas frequências de 2500 e 3150 Hz.

Figura 48 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: C33-hall C34-hall e C34-C33, com e sem o uso do Veda Porta

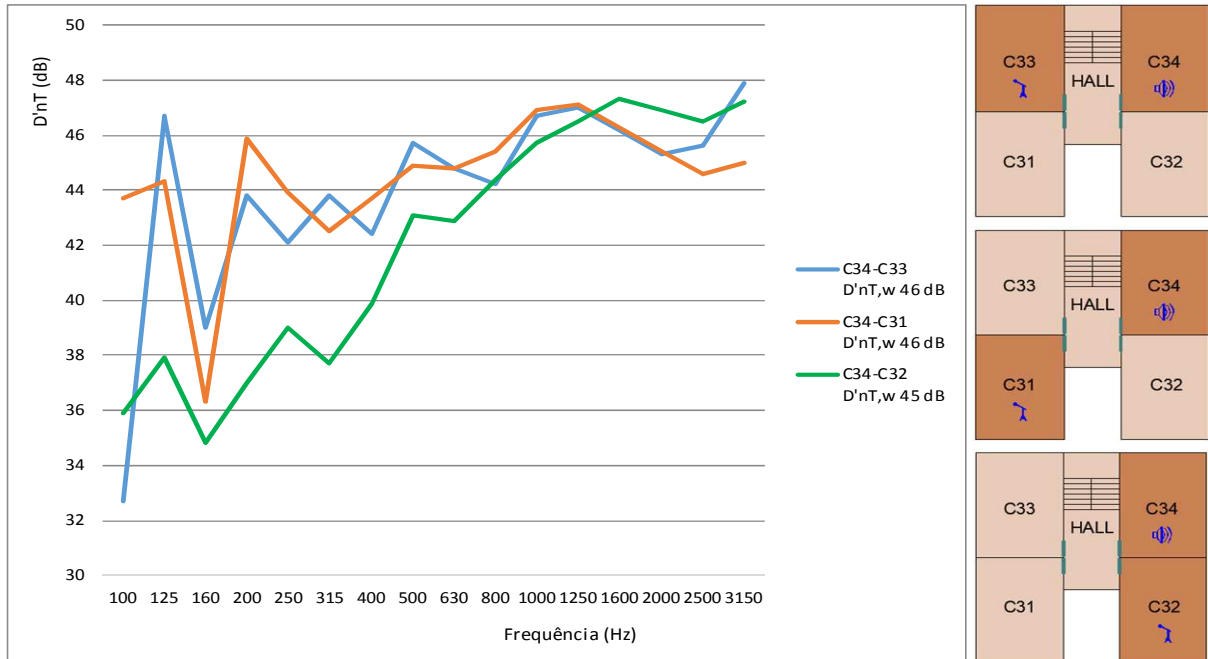


Fonte: Elaborado pelo autor

Também foi realizado o ensaio de isolamento ao ruído aéreo entre os apartamentos C34-C33, C34-C31 e C34-C32, separados pelo hall de entrada, conforme demonstrado na Figura 49. Na situação entre os apartamentos C34-C32 existe a parede de geminação comum aos dois apartamentos. Os resultados de isolamento global dos apartamentos C34-C33 e C34-C31, que não possuem parede de geminação foram de 46 dB, com um comportamento muito similar, com a frequência crítica bem destacada em 160 Hz. Já no caso de C34-C32, com o valor global de isolamento global de 45 dB, se observa que até os 800 Hz o isolamento é inferior aos outros casos, nessa faixa de frequências a própria parede está sendo determinante para o isolamento. A partir dos 800 Hz o comportamento das três curvas segue o mesmo padrão, a partir deste ponto o que está determinando o isolamento são as frestas.

Ao contrário do que ocorreu com os resultados do Prédio A (Figura 37), o não alinhamento das portas não acarretou uma diferença significativa nos resultados de $D'_{nT,w}$, sendo essa diferença observada somente nos resultados por bandas de frequências.

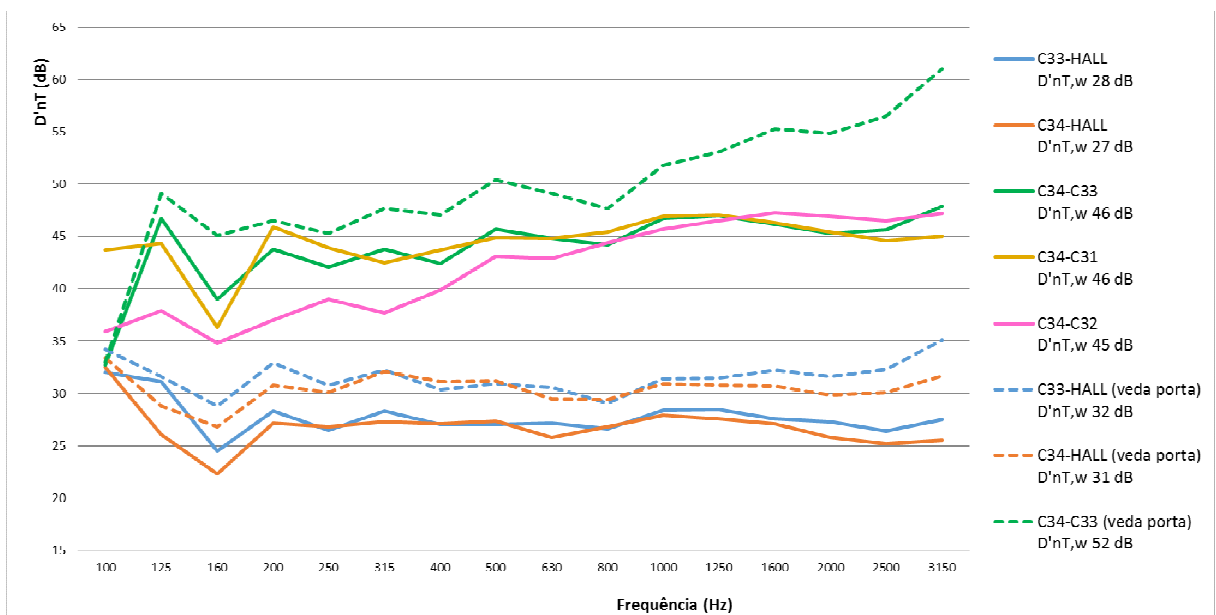
Figura 49 – Isolamento ao ruído aéreo entre ambientes: C34-C33, C34-C31 e C34-C32



Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir é apresentado um gráfico com a compilação de todos os resultados de isolamento ao ruído aéreo do 4º pavimento, e a tabela com valores de isolamento por frequência.

Figura 50 – Isolamento ao ruído aéreo de todas as situações no 3º pavimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência de todas as situações no 3º pavimento

Situações	C33-HALL	C34-HALL	C34-C33	C34-C31	C34-C32	C33-HALL (VP)	C34-HALL (VP)	C34-C33 (VP)
Bandas de Frequências (Hz)	D'nt (dB)	D'nt (dB)	D'nt (dB)	D'nt (dB)	D'nt (dB)	D'nt (dB)	D'nt (dB)	D'nt (dB)
100	32,0	32,5	32,7	43,7	35,9	34,2	33,4	33,0
125	31,1	26,1	46,7	44,3	37,9	31,6	28,8	49,1
160	24,5	22,3	39,0	36,3	34,8	28,8	26,8	45,1
200	28,3	27,2	43,8	45,9	37,0	32,9	30,8	46,5
250	26,5	26,8	42,1	43,9	39,0	30,8	30,1	45,3
315	28,3	27,3	43,8	42,5	37,7	32,2	32,1	47,7
400	27,0	27,1	42,4	43,7	39,9	30,4	31,1	47,1
500	27,0	27,4	45,7	44,9	43,1	30,9	31,2	50,4
630	27,2	25,8	44,8	44,8	42,9	30,6	29,5	49,1
800	26,6	26,8	44,2	45,4	44,4	29,1	29,4	47,7
1000	28,4	27,9	46,7	46,9	45,7	31,4	30,9	51,8
1250	28,5	27,6	47,0	47,1	46,5	31,5	30,8	53,1
1600	27,6	27,1	46,2	46,3	47,3	32,2	30,7	55,3
2000	27,3	25,8	45,3	45,4	46,9	31,6	29,8	54,9
2500	26,4	25,2	45,6	44,6	46,5	32,3	30,1	56,5
3150	27,5	25,5	47,9	45,0	47,2	35,1	31,7	61,0
D'nt,w (dB)	28	27	46	46	45	32	31	52
Espessura média das frestas (mm)	8,37	9,83	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

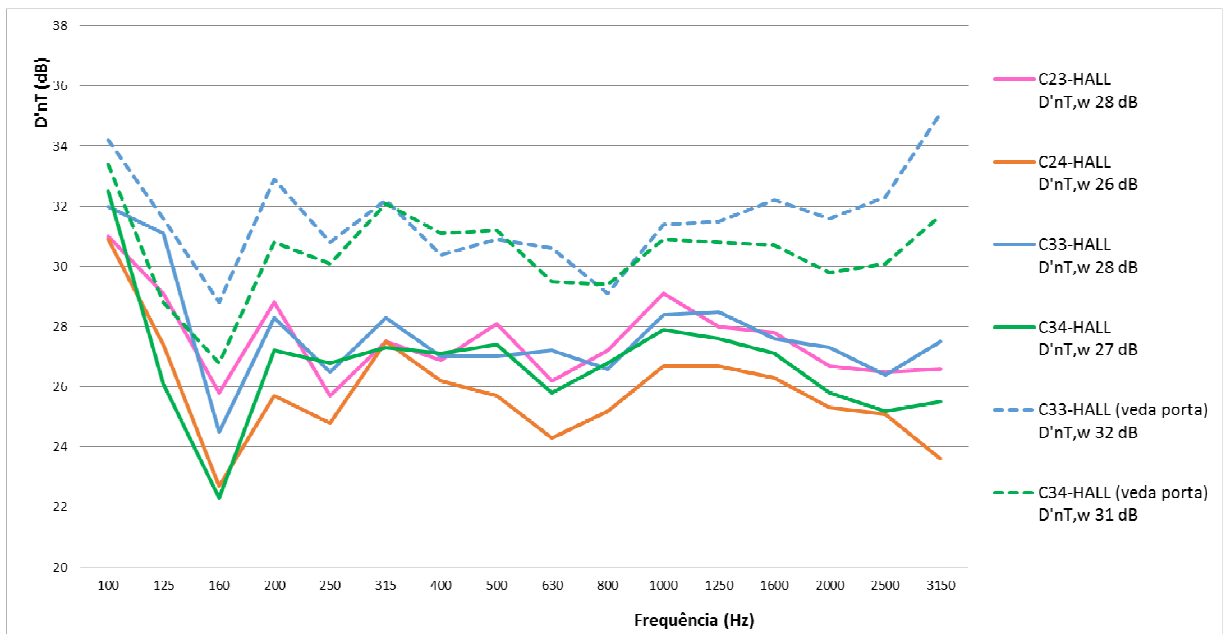
4.3.3 Comparação de ensaios realizados entre apartamentos e hall

Ao comparar os gráficos de isolamento dos ensaios realizados entre os apartamentos e o hall de entrada, percebe-se uma frequência de ressonância aos 160 Hz nos quatro casos. A partir dos 1000 Hz o isolamento começa a cair em função dos comprimentos de onda menores face às frestas das portas. Porém, nas situações que foram usados os Veda Portas, a partir desta frequência o isolamento permaneceu estável e até apresentou um crescimento a partir dos 2000 Hz. Em relação às frestas, as situações com frestas na faixa dos 8 mm apresentaram

resultado global de 28 dB, a situação com fresta de 9,83 mm apresentou resultado de 27 dB e a porta com fresta de 10,11 mm resultou em um isolamento de 26 dB. As situações com o uso do Veda Porta obtiveram um ganho de 4 dB em relação ao original, com isolamentos de 32 e 31 dB.

Abaixo é apresentado um gráfico com os resultados de ensaios realizados entre apartamentos e o hall de entrada, e a tabela com valores de isolamento por frequência e frestas médias das portas, conforme Figura 51 e Tabela 20.

Figura 51 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos e hall de entrada



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 20 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência e frestas médias das portas entre apartamentos e hall de entrada

Situações	C23-HALL	C24-HALL	C33-HALL	C34-HALL	C33-HALL (VP)	C34-HALL (VP)
Bandas de Frequências (Hz)	D' nT (dB)	D' nT (dB)	D' nT (dB)	D' nT (dB)	D' nT (dB)	D' nT (dB)
100	31,0	30,9	32,0	32,5	34,2	33,4
125	29,1	27,4	31,1	26,1	31,6	28,8
160	25,8	22,7	24,5	22,3	28,8	26,8
200	28,8	25,7	28,3	27,2	32,9	30,8
250	25,7	24,8	26,5	26,8	30,8	30,1
315	27,5	27,5	28,3	27,3	32,2	32,1
400	26,9	26,2	27,0	27,1	30,4	31,1
500	28,1	25,7	27,0	27,4	30,9	31,2
630	26,2	24,3	27,2	25,8	30,6	29,5
800	27,2	25,2	26,6	26,8	29,1	29,4
1000	29,1	26,7	28,4	27,9	31,4	30,9
1250	28,0	26,7	28,5	27,6	31,5	30,8
1600	27,8	26,3	27,6	27,1	32,2	30,7
2000	26,7	25,3	27,3	25,8	31,6	29,8
2500	26,5	25,1	26,4	25,2	32,3	30,1
3150	26,6	23,6	27,5	25,5	35,1	31,7
D' nT,w (dB)	28	26	28	27	32	31
Espessura média das frestas (mm)	8,63	10,11	8,37	9,83	8,37	9,83

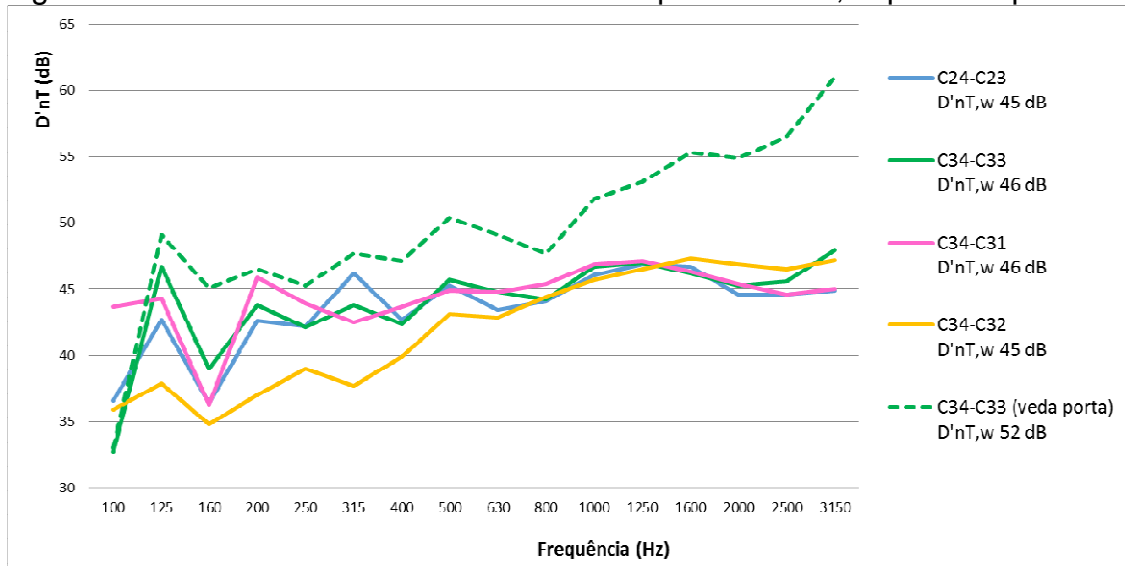
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.4 Comparação de ensaios realizados entre apartamentos separados pelo hall de entrada

Ao comparar as curvas de isolamento de todas as situações entre apartamentos separados pelo hall pode-se observar um comportamento similar quando não existe parede de geminação entre as unidades, como é o caso de C34-C32. Comparando a mesma situação C24-C23 e C34-C33, em pavimentos diferentes, temos 1 dB de melhora no resultado do segundo caso, o que pode ser explicado pelos isolamentos obtidos entre as unidades e o hall, 28 e 26 dB no primeiro caso e 28 e 27 dB no segundo.

Abaixo é apresentado um gráfico comparativo entre todos os ensaios realizados entre os apartamentos separados hall de entrada, conforme Figura 52.

Figura 52 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall

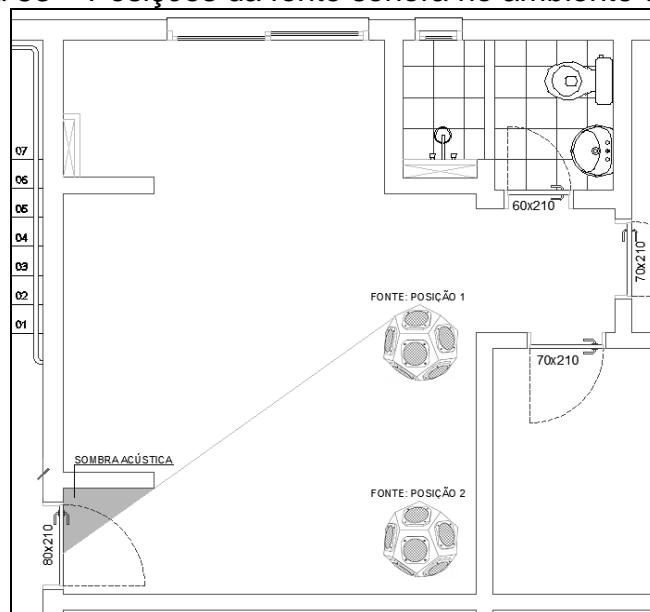


Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.5 Análise da posição da fonte sonora em relação ao isolamento global

Conforme a ISO 16283-1 (2014), devem ser usadas no mínimo duas posições de fonte sonora no ambiente emissor. A Figura 53 mostra a localização das posições, pode-se considerar que a posição 1 tem uma sombra acústica em função da parede que divide a cozinha da entrada do apartamento. A posição 2 não possui essa sombra, o campo sonoro está incidindo diretamente sobre a porta, além de estar mais próxima também.

Figura 53 – Posições da fonte sonora no ambiente emissor

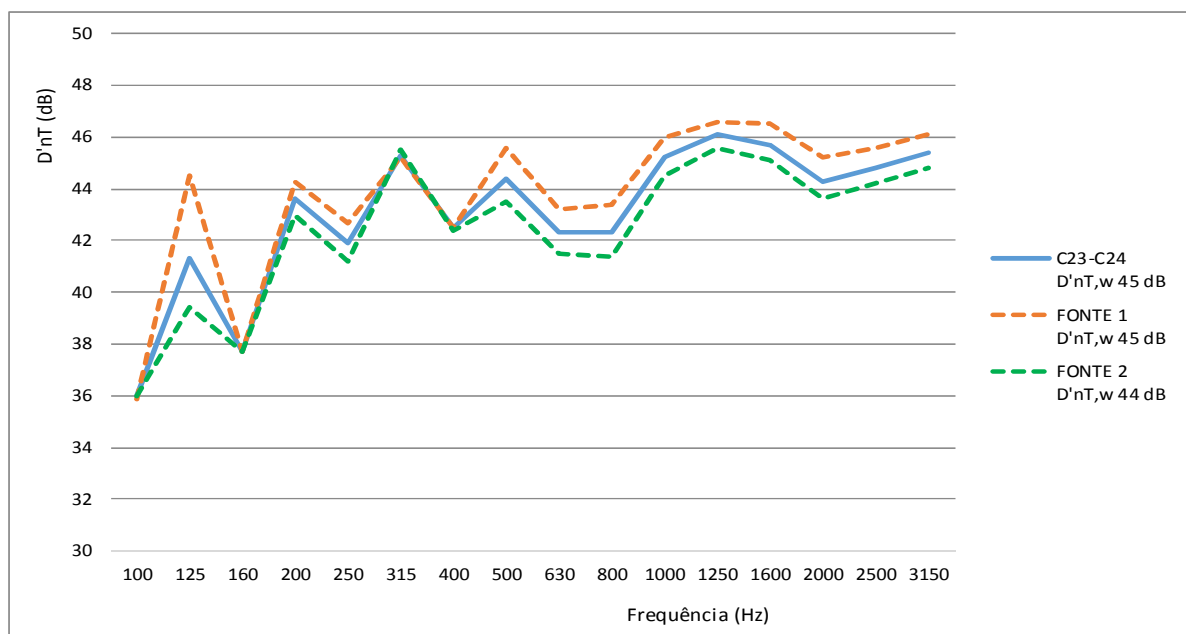


Fonte: Elaborado pelo autor

Como resultados, podemos observar que considerando somente as 5 posições de microfone da posição de Fonte 1, onde existe a sombra acústica e a distância da Fonte até a porta é maior, o resultado foi melhor que a posição de Fonte 2 e que o resultado geral considerando as duas posições. Percebe-se um ganho de isolamento em praticamente todas as frequências, o que é mais visível a partir dos 400 Hz. Considerando somente a posição de Fonte 2, em que a fonte sonora está de frente para a porta de entrada, observa-se uma perda de isolamento nas médias e altas frequências, e o resultado global do isolamento 1 dB menor que as outras duas situações (Figura 54).

Apesar de considerar que o campo sonoro no ambiente emissor deveria ser difuso, essa parede localizada na entrada influi no resultado final do isolamento entre as unidades separadas pelo hall de entrada. A Tabela 21 mostra os valores de diferença de nível ponderada por frequência.

Figura 54 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos C23-C24, separados pelo hall, considerando posições diferentes de fonte sonora



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 21 – Valores de diferença de nível ponderada por frequência

Situações	C23-C24	FONTE 1	FONTE 2
Bandas de Frequências (Hz)	D'_{nT} (dB)	D'_{nT} (dB)	D'_{nT} (dB)
100	36,0	35,9	36,0
125	41,3	44,5	39,4
160	37,7	37,7	37,7
200	43,6	44,3	43,0
250	41,9	42,7	41,2
315	45,3	45,2	45,5
400	42,5	42,5	42,4
500	44,4	45,6	43,5
630	42,3	43,2	41,5
800	42,3	43,4	41,4
1000	45,2	46,0	44,5
1250	46,1	46,6	45,6
1600	45,7	46,5	45,1
2000	44,3	45,2	43,6
2500	44,8	45,6	44,2
3150	45,4	46,1	44,8
D'_{nT,w} (dB)	45	45	44

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SEGUNDO A NBR 15575

A NBR 15575-4 estabelece os seguintes valores de referência para os desempenhos de conjuntos de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo hall (Tabela 22):

Tabela 22 – Critérios de diferença padronizada de nível ponderada, D'_{nT,w} quanto ao ruído aéreo entre apartamentos separados pelo hall de entrada

Elemento	D'_{nT,w} dB	Nível de desempenho
Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo <i>hall</i> (D_{nT,w} obtida entre as unidades)	40 a 44	Mínimo
	45 a 49	Intermediário
	≥ 50	Superior

Fonte: adaptado de NBR 15575-4

Na Tabela 23 são apresentados os valores obtidos em cada conjunto e a sua classificação de desempenho segundo a NBR 15575-4.

Tabela 23 – Valores obtidos em cada ensaio e respectiva classificação

Prédio/Apto	D'_{nT,w} (dB)	Nível de desempenho (NBR 15575)
A43-A47	52	Superior (S)
A43-A48	46	Intermediário (I)
A43-A49	51	Superior (S)
A48-A47	47	Intermediário (I)
A48-A49	49	Intermediário (I)
A53-A58	45	Intermediário (I)
B22-B21	41	Mínimo (M)
C24-C23	45	Intermediário (I)
C34-C31	46	Intermediário (I)
C34-C32	45	Intermediário (I)
C34-C33	46	Intermediário (I)
C34-C33 (VP)	52	Superior (S)

Fonte: elaborado pelo autor

4.5 COMPARAÇÕES ENTRE RESULTADOS DOS TRÊS PRÉDIOS

Ao analisar o isolamento entre unidades separadas pelo hall de entrada dos três prédios (Figura 55), podem-se tirar algumas conclusões:

- a) O Prédio B tem o maior tempo de reverberação do hall de entrada, bem superior aos outros dois prédios, e também o menor volume, o que pode explicar o desempenho inferior aos demais. Também se observa que o Prédio B tem a menor área total do conjunto porta+parede, onde a relação porta/parede é de 31%, conforme Tabela 24.
- b) O Prédio A tem a circulação mais estreita, o que a princípio seria um motivo para o isolamento entre as unidades ser inferior ao Prédio C, onde as portas estão bem mais afastadas. Nos dois casos o isolamento entre unidades e hall foi similar, porém esperava-se um resultado pior no Prédio A, o que não ocorreu, fato que pode ser explicado pelo tempo de reverberação do Hall, menor que do prédio B, e maior volume também.

- c) Todos os sistemas utilizados para este estudo apresentam frequências de ressonância entre 160 e 200 Hz.
- d) A parede do prédio C, com R_w estimado de 49 dB, frente a do prédio A, com R_w estimado de 40 dB, não apresentou melhoras no isolamento, o mesmo foi influenciado pelas frestas das portas e pela massa da folha.
- e) No Prédio C se observa um crescimento do isolamento a partir de 2500 Hz, enquanto nos outros sistemas acontece um decréscimo. Isso pode ser influenciado pela largura da circulação, tempo de reverberação e volume do hall.

Figura 55 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall

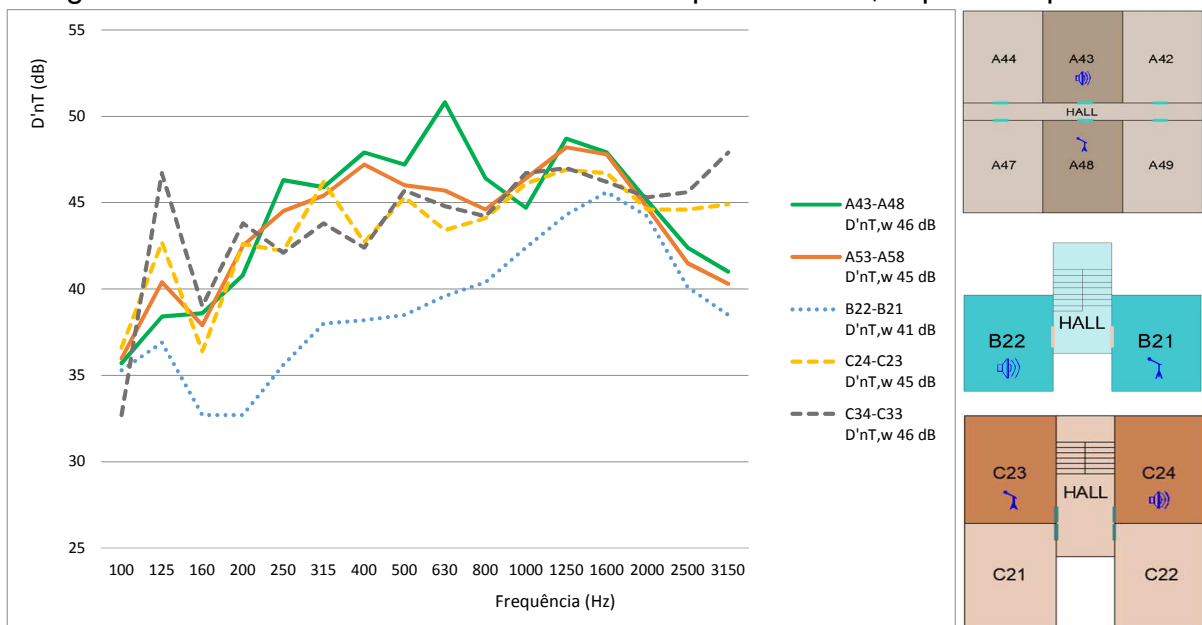


Tabela 24 – Relação dos conjuntos porta/parede

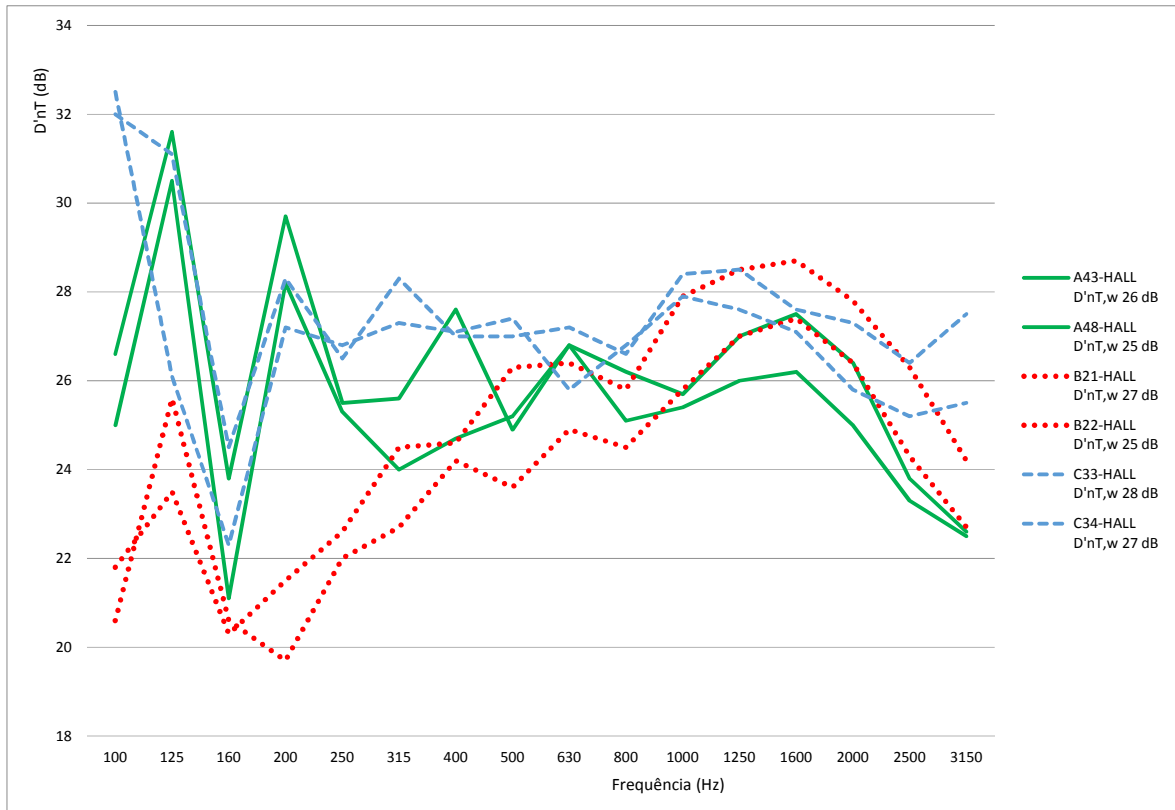
Prédio	Área total do conjunto parede+porta (m ²)	Largura da circulação (m)	Volume da circulação (m ³)	Área da parede (m ²)	Área da porta (m ²)	Relação Porta/Parede
A	10,27	1,20	61,24	8,38	1,89	18%
B	6,08	2,37	28,60	4,19	1,89	31%
C	13,37	2,50	40,02	11,69	1,68	12%

Fonte: elaborado pelo autor

Ao analisar o isolamento entre unidades e o hall de entrada de um pavimento dos três prédios (Figura 56), pode-se concluir o seguinte:

- a) O isolamento do Prédio A é muito parecido com o Prédio C, porém no Prédio C se obteve um resultado melhor em 100 Hz, talvez em função do R_w estimado da parede, de 49 dB maior que do Prédio A. Nas frequências compreendidas entre 250 e 630 Hz também se obteve resultado melhor em C, o que pode estar relacionado com o R_w da parede e com a distância entre as portas.
- b) No isolamento do Prédio B se percebe uma perda de eficiência em relação aos demais entre 160 e 800 Hz.
- c) Nas altas frequências o comportamento é muito similar, porém no prédio C se observa uma leve melhora no isolamento a partir dos 2500 Hz, enquanto que nos outros casos, o isolamento por banda de frequências é decrescente. Isso pode estar relacionado com a distância maior entre as portas.
- d) Os dois sistemas com blocos cerâmicos, com R_w estimado igual, possuem o começo da curva de isolamento parecido, com um valor mais baixo em 100 Hz e um pico em 125 Hz, para depois cair novamente. O sistema com o bloco de concreto apresenta comportamento diferente, com o valor mais alto de isolamento aos 100 Hz.

Figura 56 – Isolamento ao ruído aéreo entre apartamentos, separados pelo hall



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios em campo para a verificação do desempenho de sistemas construtivos assumem cada vez mais a relevância para avaliações do comportamento de diferentes elementos construtivos combinados entre si, com diferentes tipos de instalações. Neste trabalho, o desempenho acústico de conjuntos de paredes e portas de unidades habitacionais distintas separadas pelo hall, foi avaliado a partir de ensaios em campo, para os quais pode-se analisar as diferenças obtidas com as composições estudadas.

Após a série de ensaios realizados nos três prédios residenciais, ficou evidenciado que as frestas têm uma influência determinante no isolamento aéreo do conjunto, tanto entre as unidades habitacionais e o hall de entrada como entre duas unidades habitacionais separadas pelo hall.

No caso do Prédio A, com uma circulação mais estreita que as demais, esperava-se um resultado pior em função disso, com uma relação mais próxima com o comportamento de paredes duplas, para as quais a maior espessura da cavidade de ar contribui para o desempenho acústico. Essa situação não foi confirmada, talvez em função do tempo de reverberação do hall, bem inferior aos outros dois casos, e também do volume total da circulação, maior que as demais. Outra constatação nos resultados foi que o afastamento das portas e o não alinhamento entre elas melhora o resultado. A pior situação foi verificada quando as portas estão alinhadas, de frente uma para a outra. Quando se faz o ensaio entre dois apartamentos localizados um ao lado do outro, o resultado é comparativamente inferior, em função da influência do isolamento acústico da parede de geminação.

O isolamento a ruído aéreo entre unidades do Prédio B apresentou o pior resultado, o que pode estar relacionado a diversos fatores, como o maior tempo de reverberação do hall de entrada entre os três casos, menor volume do hall, maior relação entre área de porta e conjunto de porta e parede. Mesmo considerando-se que os resultados entre apartamento e hall de entrada foram similares aos dos outros prédios, o isolamento sonoro só foi prejudicado quando se considerou o ensaio entre unidades, fato a ser investigado com estudos mais aprofundados.

Já o Prédio C, que tem a maior largura da circulação, com o tempo de reverberação um pouco maior que o Prédio A, obteve resultados similares aos obtidos no Prédio A. Porém o Prédio C tem o maior R_w estimado da parede.

Analisando o isolamento das unidades habitacionais para o hall de entrada, obtiveram-se valores muito parecidos, variando entre 25 e 28 dB nos três casos, todos com frestas próximas a 10 mm. Os melhores resultados foram obtidos no prédio C, entre 26 e 28 dB, sendo este o prédio que tem o maior R_w estimado da parede cega, 49 dB. Também possui a porta com menor massa da folha, considerando estes dois fatores pode-se inferir que a parede com melhor isolamento acústico tenha ajudado no resultado dos ensaios para o Prédio C.

Sobre o uso dos Veda Portas, foi verificado um ganho de 4 dB no $D'_{nT,w}$ entre a unidade habitacional e a circulação, nos dois casos ensaiados, e um ganho de 6 dB entre as unidades separadas pelo hall. Pode-se verificar, que esse aumento possibilitou o nível de desempenho passar de intermediário para superior.

Comparando os resultados do Prédio A com o Prédio B, onde o R_w estimado das paredes sem a porta é o mesmo, 40 dB, as portas tem frestas similares, a massa da folha da porta é praticamente a mesma, o isolamento entre unidades e hall foi similar (inclusive melhor no Prédio B), e a largura da circulação é maior no Prédio B, esperava-se um resultado de isolamento entre as unidades separadas pelo hall similar ou até melhor no Prédio B. Fato que não ocorreu, sendo que o resultado do Prédio B foi bem inferior ao Prédio A.

Por fim, ao analisar todos os ensaios do estudo piloto e dos objetos de estudo, verifica-se que todos os resultados atendem o nível mínimo da NBR 15575, sendo que muitos deles atingem nível intermediário e até superior.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179**: Tratamento acústico em recintos fechados - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 16313**: Acústica - Terminologia. Rio de Janeiro, 2014.
- ANTÓNIO, J; TADEU, A; GODINHO, L. Analytical evaluation of the acoustic insulation provided by double infinite walls. **Journal of Sound and Vibration** v. 263, p. 113–129, 2003.
- ASAKURA, Takumi; SAKIMOTO, Yuu; SATOH, Fumiaki. **Improvement of sound insulation of doors/windows by absorption treatment inside the peripheral gaps** Turquia: Inter-Noise, 2007.
- BIRLIK, Gülin. The contribution of perlite to the sound transmission loss of solid masonry walls. **Building Acoustics** v. 8, n. 3, p. 237–244, 2001.
- BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- CARVALHO, Maria Luiza de Ulhôa; MACIEL, Cândida de Almeida; CALIXTO, Rodrigo Junqueira. **Avaliação do isolamento acústico de portas de alta densidade com melhorias na vedação das frestas**. Florianópolis: ENTAC, 2006.
- CUNHA, Natália Cristina Martins da. Isolamento sonoro em salas de aula. **O caso particular do efeito da colmatação de frinchas em portas**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2014.
- DEMIRKALE, Sevtap Yilmaz; ASCIGIL-DINCER, Mine. Retrofitting masonry and cavity brick façades for different noise zones using laboratory measurements. **Building Acoustics** v. 24, n. 2, p. 77–100, 2017.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 12354-1:2000**: Building acoustics: Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms, 2000.
- FAUSTI, P; INGELAERE, B; SMITH, R. S.; STEEL, C. Common errors during construction of new buildings and effect of workmanship. **Proceedings of European Symposium of EAA TC-RBA and COST Action TU0901**, Firenze, 2010.

FRINGUELLINO, M; SMITH, Sean. Sound transmission through hollow brick walls. **Building Acoustics** 1999, v.1, p. 211-224.

GERGES, Samir N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2. ed. Florianópolis: S.N.Y. Gerges, 2000.

HASSAN, O. A. B. **Building Acoustics and Vibration: Theory and Practice**. London: World Scientific Publishing Company, Incorporated, 2009. 947 p.

HERRERA, J.M.; RECUERO, M. Influence of seal installation to predict sound insulation of double panel steel doors. **Building and Environment**. Spain: Elsevier, 2010.

HONGISTO, Valtteri. Sound Insulation of doors – Part 1: Prediction models for structural and leak transmission. **Journal of sound and vibration**, 2000.

HOPKINS, Carl. **Sound Insulation**. Burlington: Elsevier Ltd., 2012. 648 p.

_____. Sound Transmission across a Separating and Flanking Cavity Wall Construction. **Applied Acoustics**. v. 52, n. 314, p. 259-272, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16283-1:2014**: Acoustics: Field measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements. Part 1: Airborne sound insulation, 2014.

_____. **ISO 717-1:2013**: Acoustics: Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. 2013

JONES, Doug. Acoustical noise control. In: BALLOU, G (Org.). **Handbook for sound engineers**. Oxford: Taylor & Francis, 2008. p. 65-94.

KLIPPEL FILHO, S.; LABRES, H. S.; OLIVEIRA, M. F.; TUTIKIAN, B. F. Verificação da influência de diferentes espessuras de revestimento em argamassa no desempenho acústico de sistemas de vedações verticais. XII SBTA. **Anais...**, 2017 São Paulo: ANTAC.

LO VERDE, John; DONG, Wayland. Evaluation of proposed ASTM standard to measure the normalized insertion loss of doors. **Acoustical Society of America** v. 19, n. 40147, 2013.

MAK, Cheuk Ming; WANG, Zhen. Recent advances in building acoustics: An overview of prediction methods and their applications. **Building and Environment** v. 91, p. 118–126, 2015.

MARCO, Conrado Silva de. **Elementos de Acústica Arquitetônica**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1982.

MATEUS, Diogo M. R. **Acústica de edifícios e controle de ruído**. Faculdade de ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra. Portugal, 2012.

MATEUS, Diogo M. R.; PEREIRA, Andreia S. C. **Influência de pequenos erros de execução em obra no desempenho acústico de edifícios: Exemplos típicos.** Cáceres: TecniAcustica, 2011.

MEISSER, Mathias. **Acústica de los Edificios.** Barcelona: Editores técnicos asociados S.A., 1973.

MÉNDEZ A. M. et. al. **Acústica Arquitectonica.** 1. ed. Buenos Aires: UMSA, 1994.

NETO, Maria de Fatima Ferreira; BERTOLI, Stelamaris Rolla. Desempenho acústico de paredes de blocos e tijolos cerâmico: uma comparação entre Brasil e Portugal. *Ambiente Construído*. **Ambiente Construído (online)**, 2010, vol.10, n.4, p.169-180.

PAIXÃO, Dinara Xavier. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando Análise Estatística de Energia (SEA).** UFSC, Florianópolis, 2002. 167 p.

PATRÍCIO, Jorge. **Acústica nos edifícios.** 6. ed. Lisboa: Verlag Dashöfer, 2010.

_____. **Isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão.** 5. ed. Lisboa: LNEC, 2008.

PETERS, R J; SMITH, B. J.; HOLLINS, Margaret. **Acoustics and Noise Control.** 3. ed. New Jersey: Taylor & Francis, 2013. 386 p.

PIÃO, Adriano; GODINHO, Luís; TADEU, Antônio. Comportamento acústico de paredes de alvenaria na presença de pequenas aberturas e diferentes inclusões. *TecniAcústica 2008. Anais...*, 2008. Coimbra: SPA.

PRATO, A.; SCHIAVI, A. Sound insulation of building elements at low frequency: a modal approach. **Energy Procedia**, v. 0, 2015.

SANTOS, Jorge Luiz Pizzutti dos. **Isolamento sonoro de partições arquitetônicas.** 1. ed. Santa Maria: UFSM, 2012.

SILVA, José Julio Braga Correia da. **Desenvolvimento de modelo de previsão do comportamento de uma parede em relação ao isolamento aos sons aéreos.** Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 1994.

TREVISAN, R.; KLIPPEL, S.; RESCHKE, J.; OLIVEIRA, M. F. DE. Sound insulation comparative study on ceramic masonry with mortar or plasterboard coating. *ICA 2016. Anais...*, 2016. Buenos Aires: Asociación de Acústicos Argentinos.

APÊNDICE A – Estudo Piloto

Foi realizado um estudo piloto com a finalidade de uma abordagem inicial do problema. Esses ensaios foram realizados entre maio de 2015 e fevereiro de 2017. A partir deles se verificou que seriam necessárias informações mais detalhadas.

Foram analisados nove conjuntos de paredes e portas separados por circulação horizontal, conforme especificado da Tabela 1 e detalhados nas próximas seções.

Tabela 1 – Relação dos conjuntos porta/parede do estudo piloto

Denominação do conjunto	Área total do conjunto (m ²)	Largura da circulação (m)	Área da parede (m ²)	Área da porta (m ²)	Relação Porta/Parede
D	8,12	1,10	6,23	1,89	23%
E	7,83	1,18	5,94	1,89	24%
F	8,32	1,18	6,43	1,89	22%
G	2,88	1,41	0,99	1,89	65%
H	9,33	1,51	7,40	1,93	20%
I	9,17	1,57	7,28	1,89	20%
J	3,72	2,39	2,04	1,68	45%
K	13,10	2,39	11,21	1,89	14%
L	13,25	2,49	11,55	1,70	13%

Fonte: elaborado pelo autor

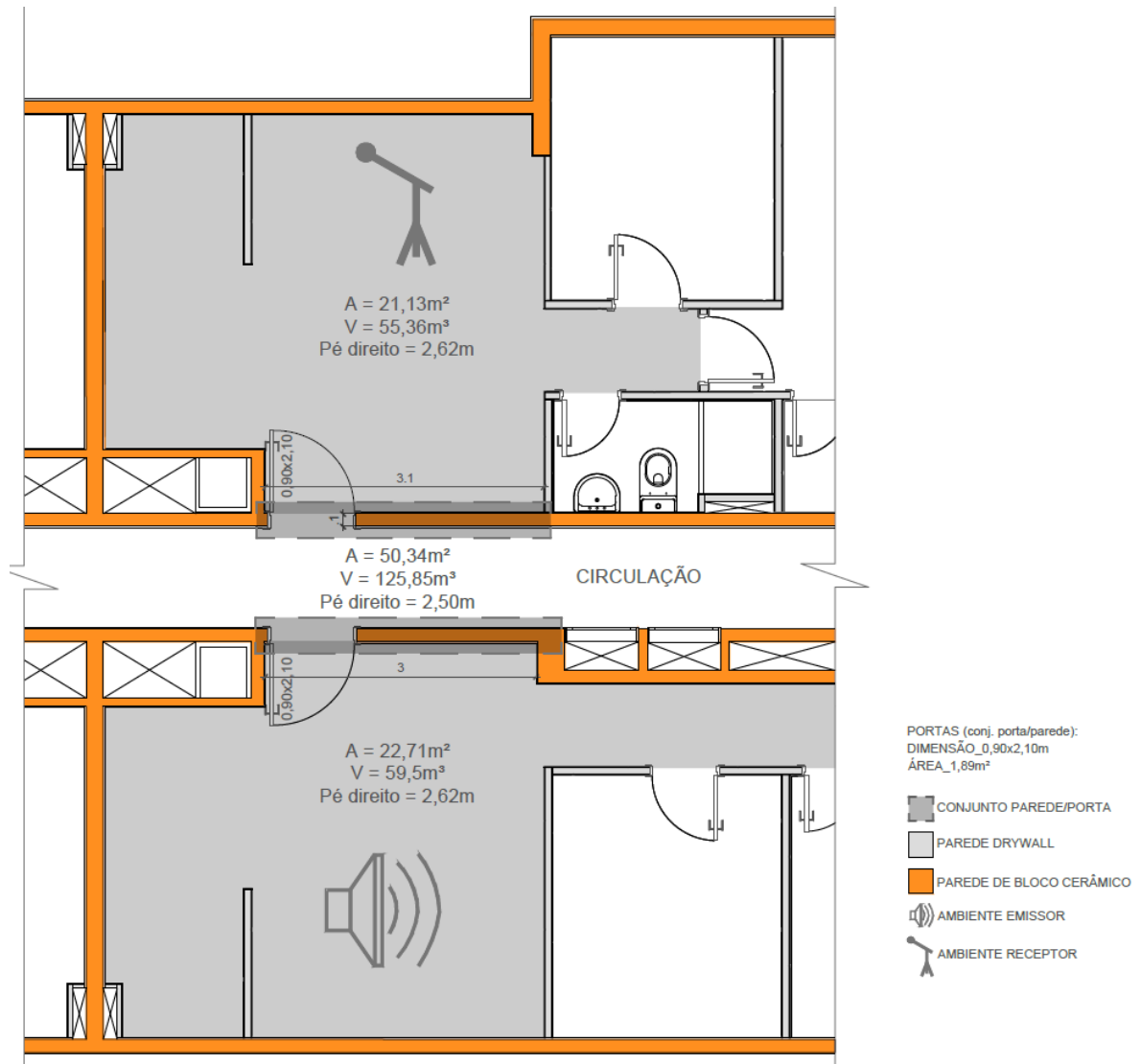
Sistema D

PAREDES: alvenaria de vedação com blocos cerâmicos de 19 cm de largura, revestimento argamassado de 1,5 cm em cada face.

PORTAS: sólida de uso interno, com requadro e miolo maciço em Pinus, seco em estufa, com finger joint, 2 capas de HDF 3 mm, com revestimento melamínico branco e bordas com fita melaminica.

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: Concreto armado com paredes externas e divisas de apartamentos de vedação com blocos cerâmicos e paredes internas do apartamento de dry-wall.

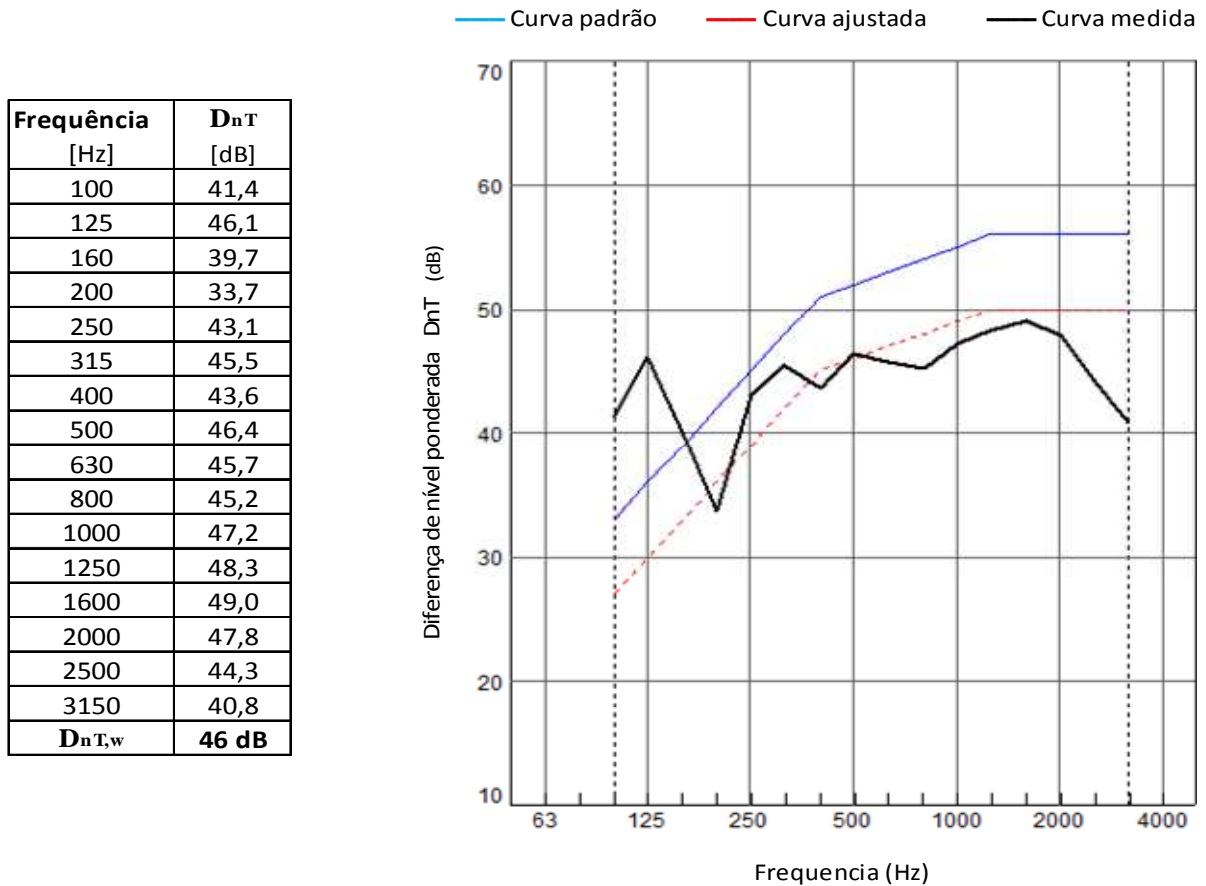
Figura 1 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 2 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)



Fonte: Elaborada pelo autor

Sistema E

PAREDES: alvenaria de vedação com blocos cerâmicos de 14 cm de largura, revestimento argamassado de 1 cm em cada face.

PORTAS: porta de Pinus, proveniente de reflorestamento, mais capa de HDF.

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: Concreto armado com paredes externas e divisas de apartamentos de vedação com blocos cerâmicos e paredes internas do apartamento de dry-wall.

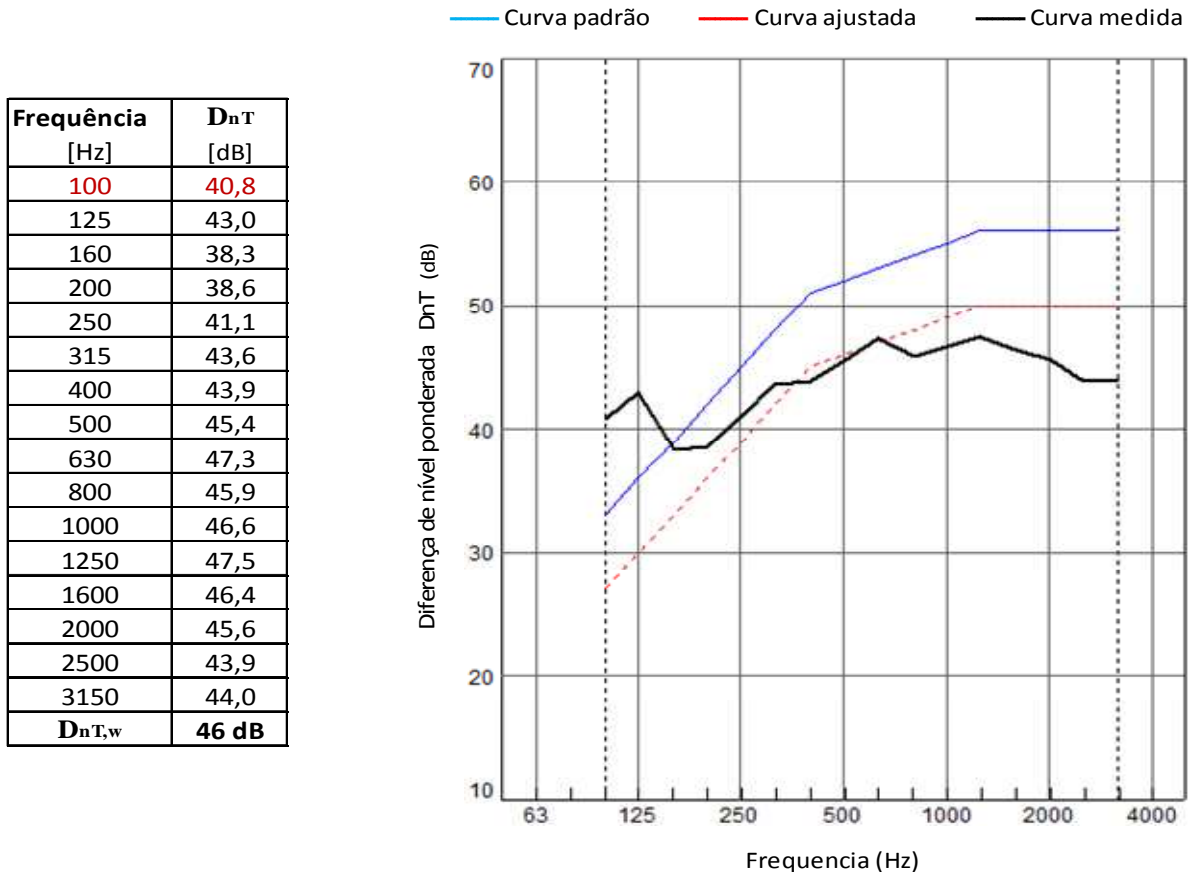
Figura 3 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 4 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)



OBS: Foi utilizada correção para ruído de fundo na frequência de 100 Hz

Fonte: Elaborada pelo autor

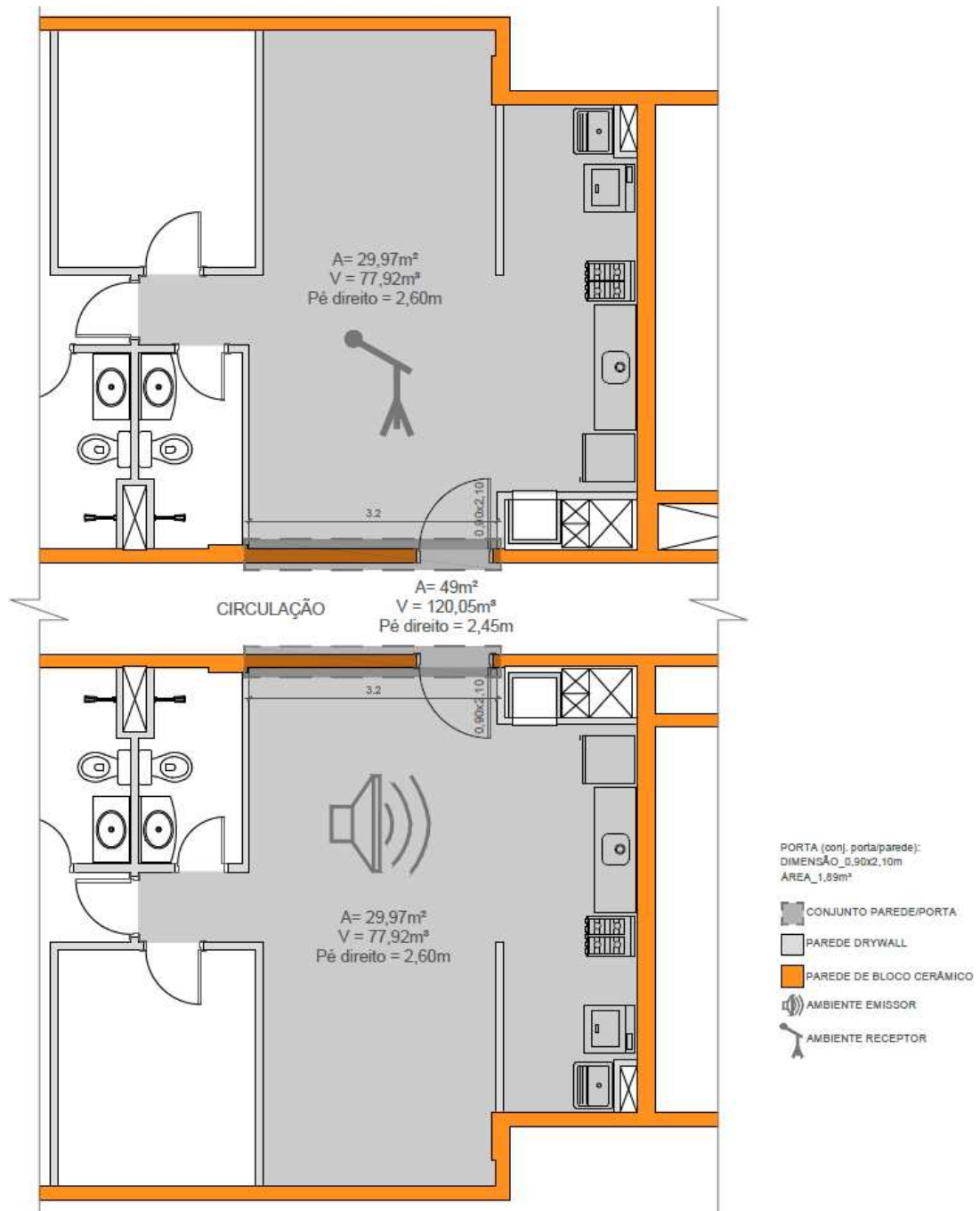
Sistema F

PAREDES: alvenaria de vedação com blocos cerâmicos de 14 cm de largura, revestimento argamassado de 1,5 cm em cada face.

PORTAS: porta de madeira com espessura de 3,5 cm, com acabamento em HDF, e foi fixada com espuma expansiva (1,5 cm).

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: Concreto armado com paredes externas e divisas de apartamentos de vedação com blocos cerâmicos e paredes internas do apartamento de dry-wall.

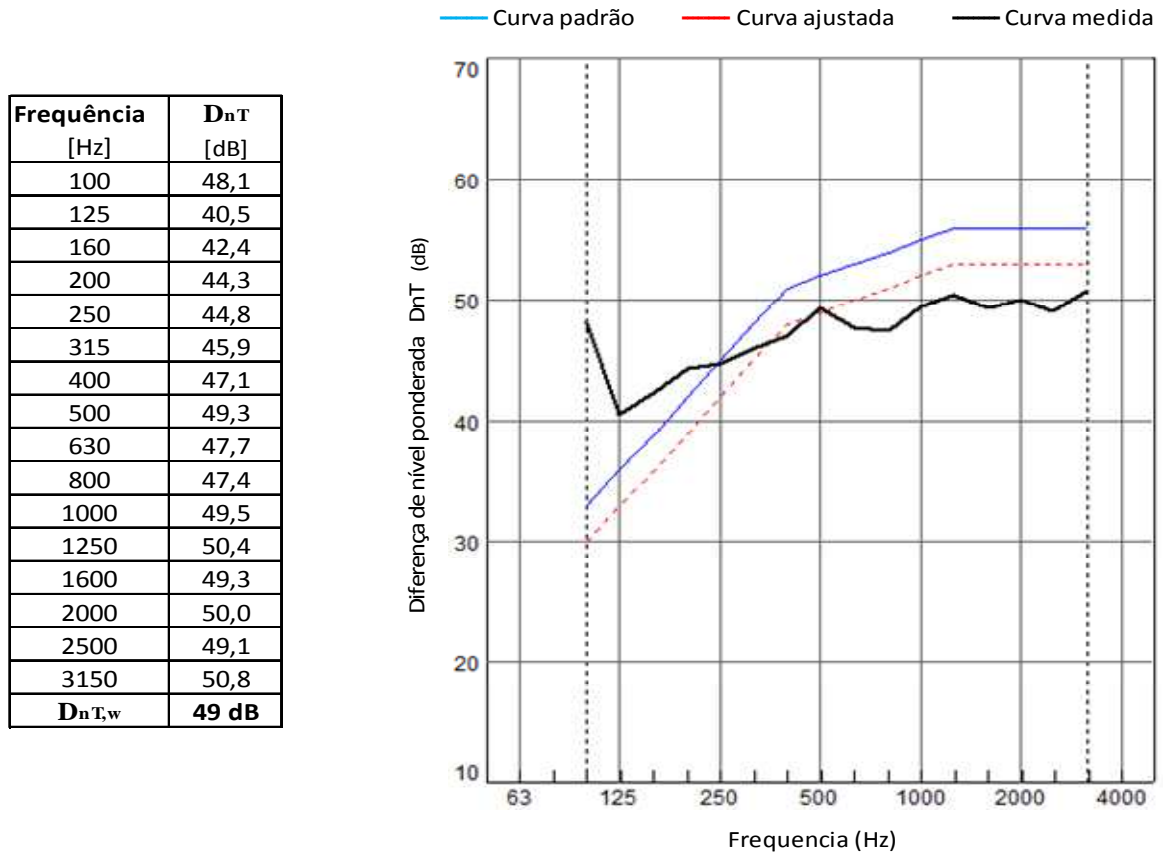
Figura 5 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 6 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)



Fonte: Imagem do autor

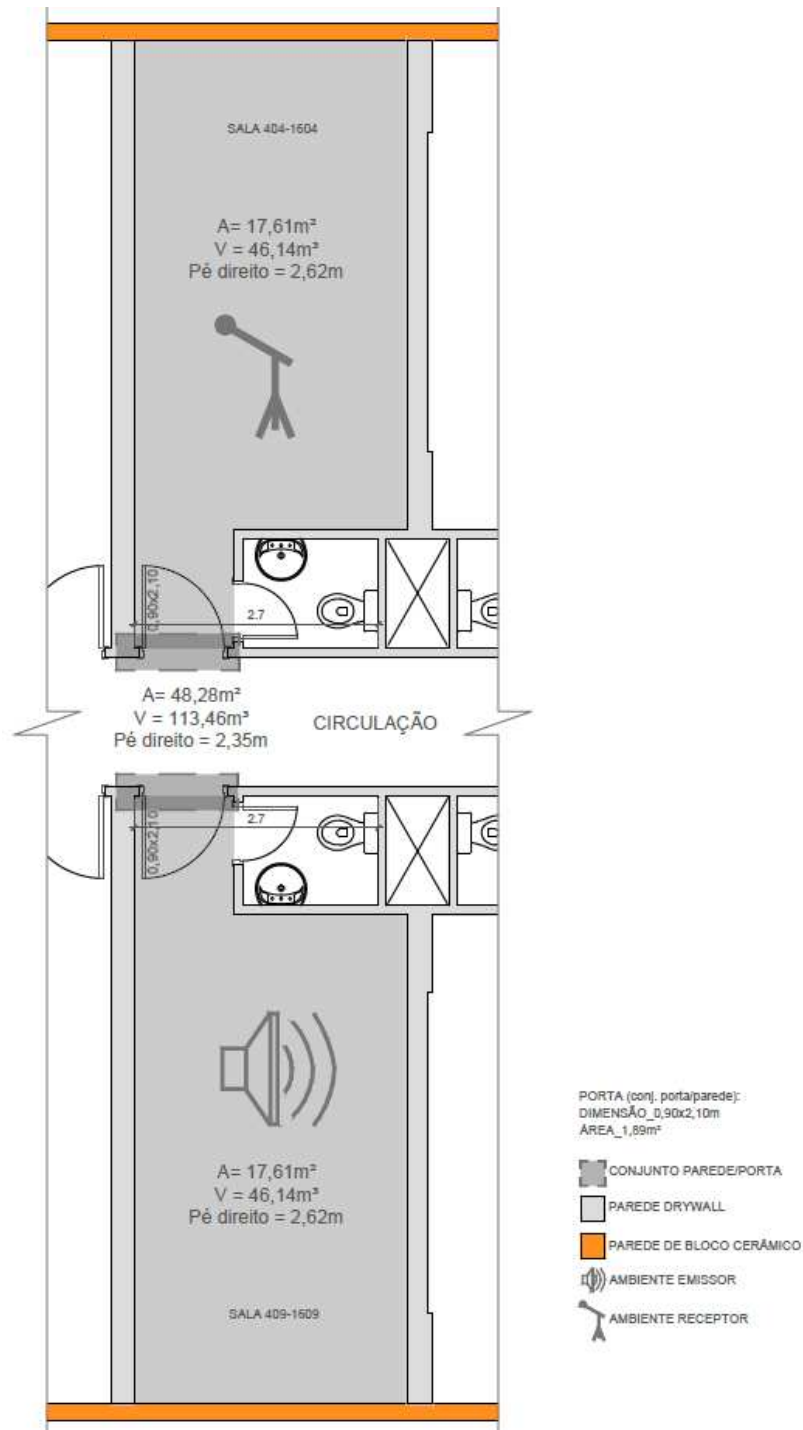
Sistema G

PAREDES: parede de gesso acartonado (duas placas em uma face e uma placa na outra face), totalizando aproximadamente 10 centímetros de largura.

PORTAS: porta de madeira com espessura de 3,5 cm, com acabamento em HDF, e foi fixada com espuma expansiva (1,5 cm).

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: Concreto armado com paredes externas de vedação com blocos cerâmicos e paredes internas de dry-wall.

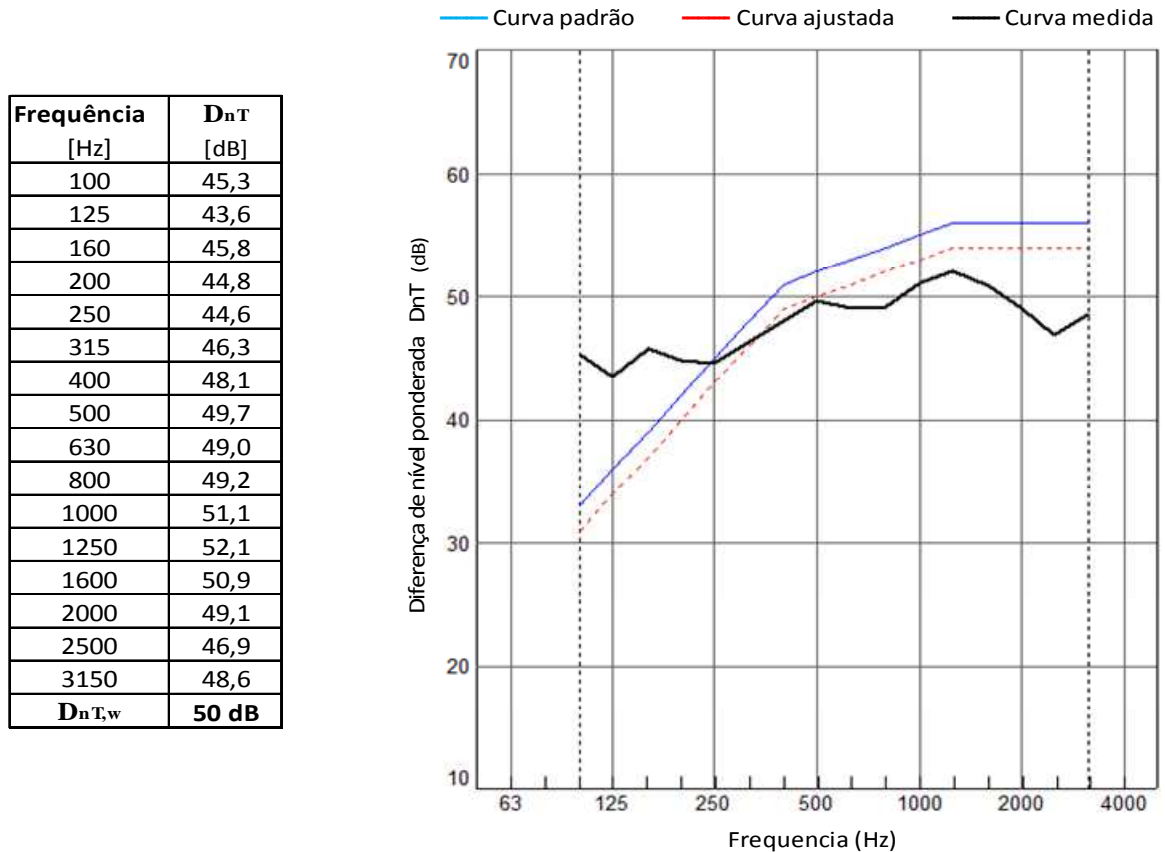
Figura 7 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 8 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)



Fonte: Imagem do autor

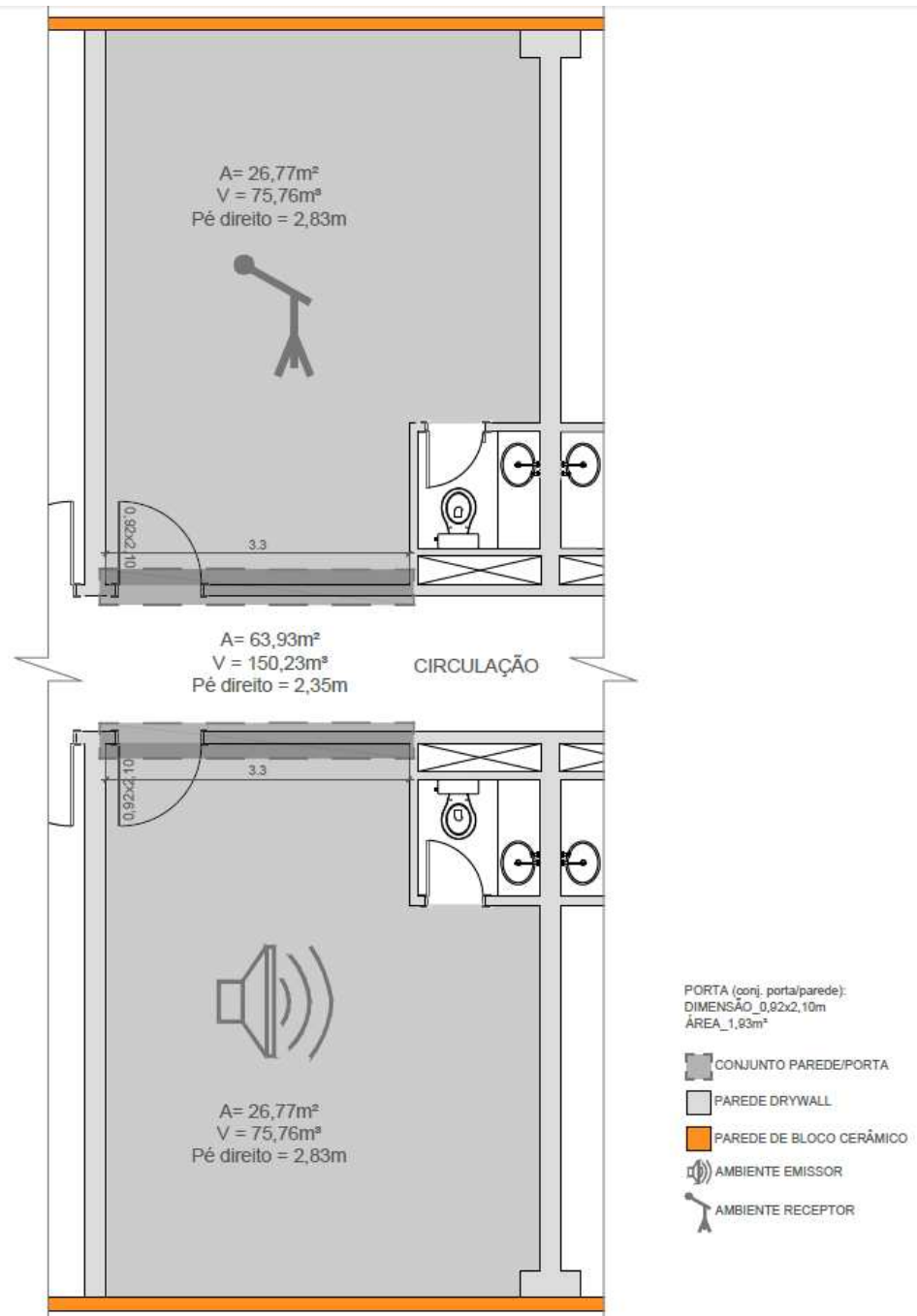
Sistema H

PAREDES: parede de gesso acartonado (duas placas em uma face e uma placa na outra face), com lã de vidro no seu interior, totalizando aproximadamente 13 centímetros de largura.

PORTAS: porta de madeira maciça de 3 cm, com acabamento em laca, e foi fixada com espuma expansiva (2,5 cm).

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: Concreto armado com paredes externas em pele de vidro e paredes internas de dry-wall.

Figura 9 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições

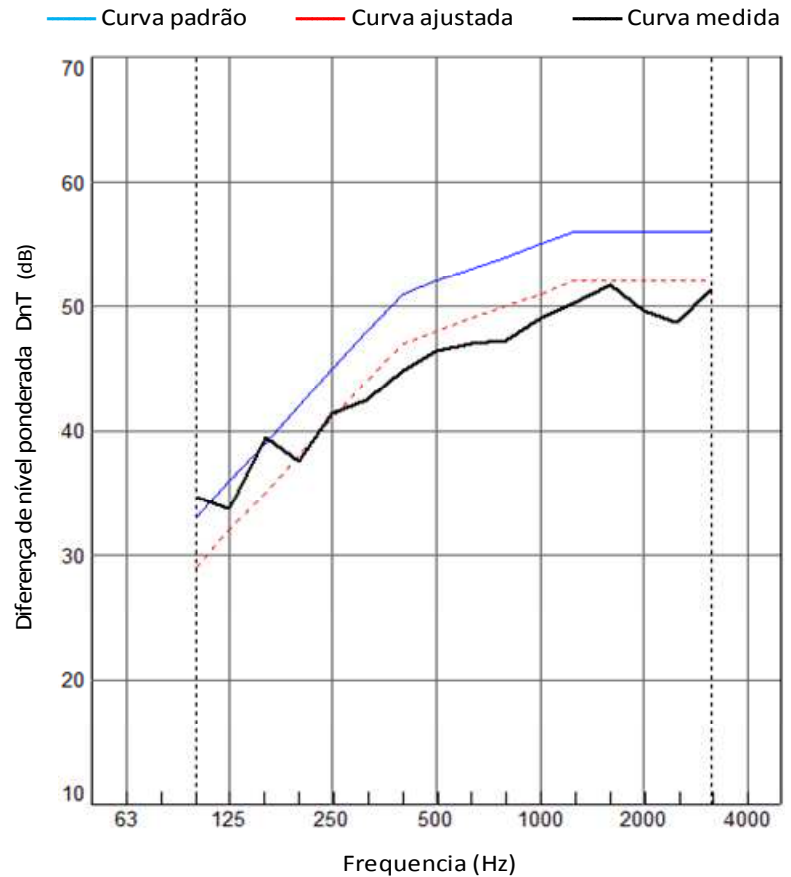


Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 10 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)

Frequência [Hz]	D_{nT} [dB]
100	34,7
125	33,7
160	39,5
200	37,6
250	41,4
315	42,5
400	44,9
500	46,4
630	47,0
800	47,2
1000	49,0
1250	50,3
1600	51,7
2000	49,7
2500	48,7
3150	51,4
$D_{nT,w}$	48 dB



Fonte: Imagem do autor

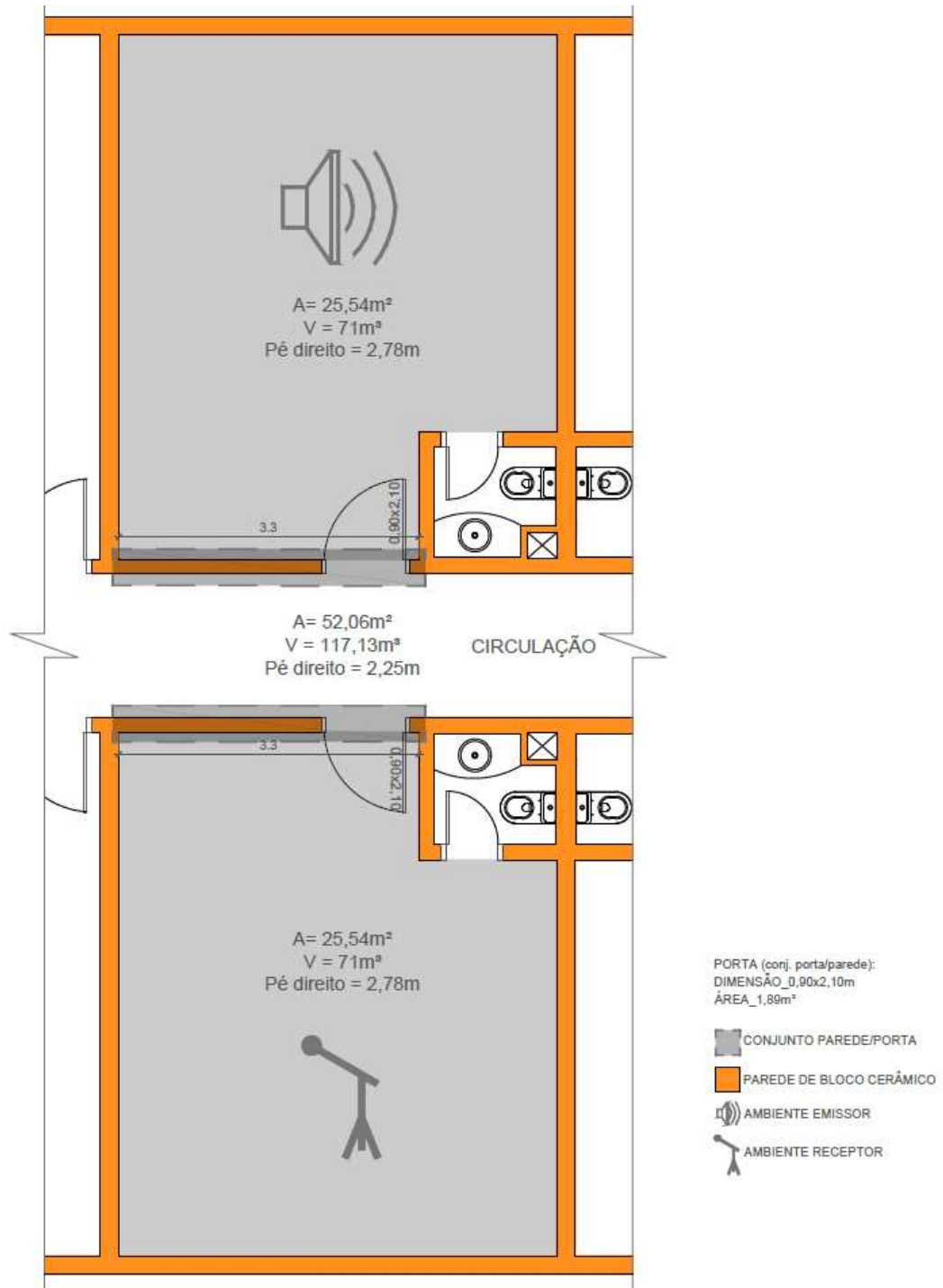
Sistema I

PAREDES: alvenaria de vedação com blocos cerâmicos de 14 cm de largura, revestimento argamassado de 1 cm em cada face.

PORTAS: porta de madeira modelo Portaro da marca Vicaima (isolamento acústico de 32 dB segundo o fabricante).

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: Concreto armado com paredes internas e externas de vedação com blocos cerâmicos.

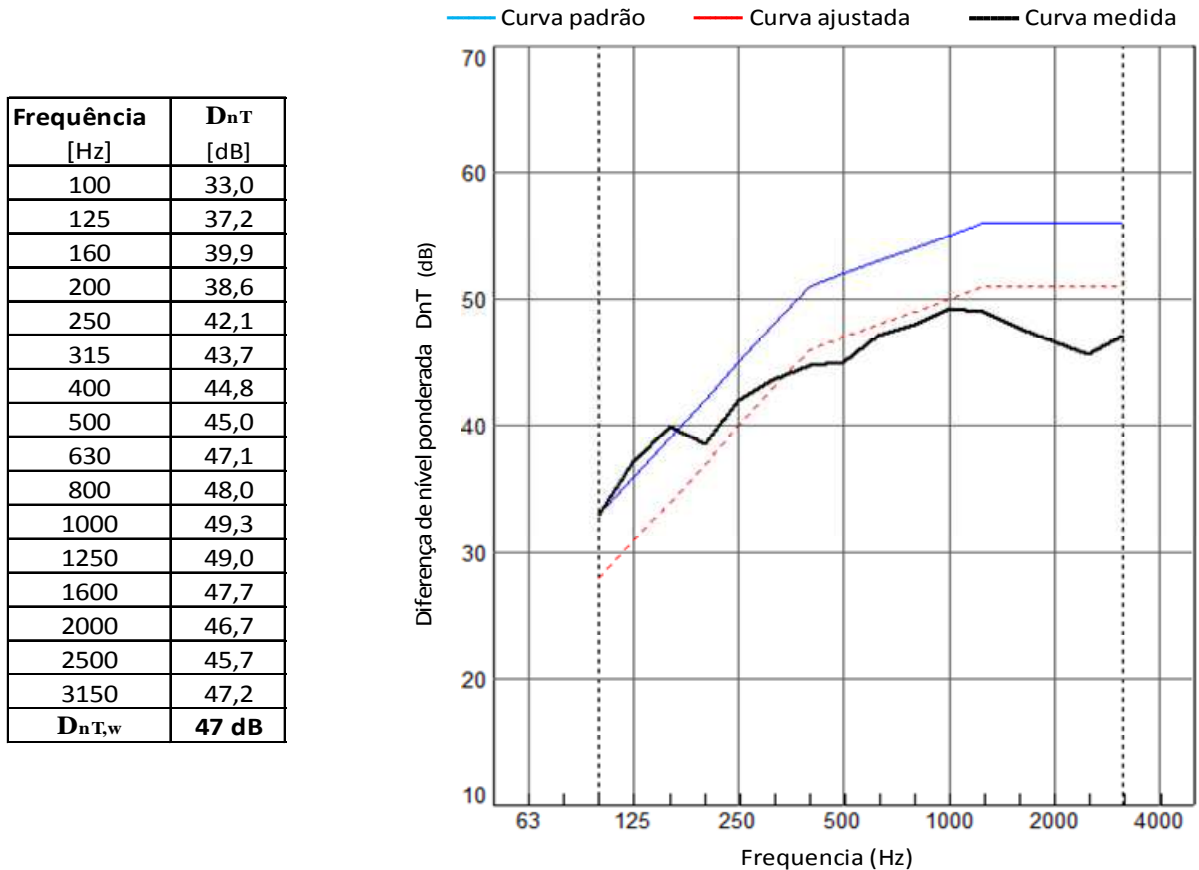
Figura 11 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 12 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)



Fonte: Imagem do autor

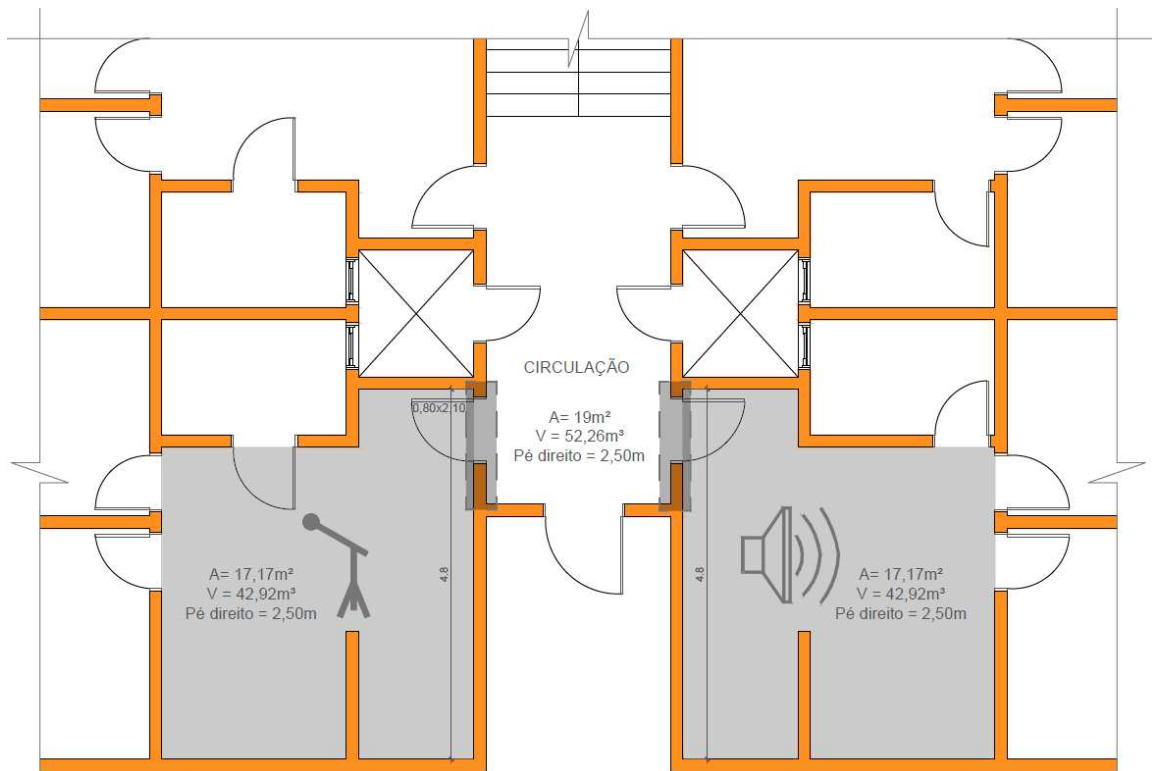
Sistema J

PAREDES: blocos estruturais cerâmicos com 14 cm de largura, revestimento argamassado de 1 cm em cada face.

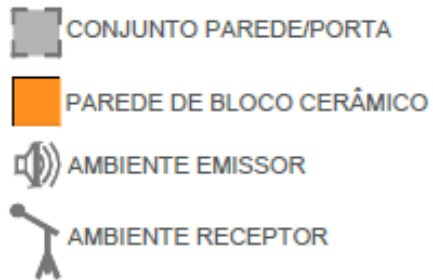
PORTAS: porta semi-oca com chapa de MDF pintada.

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: alvenaria estrutural com blocos cerâmicos.

Figura 13 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



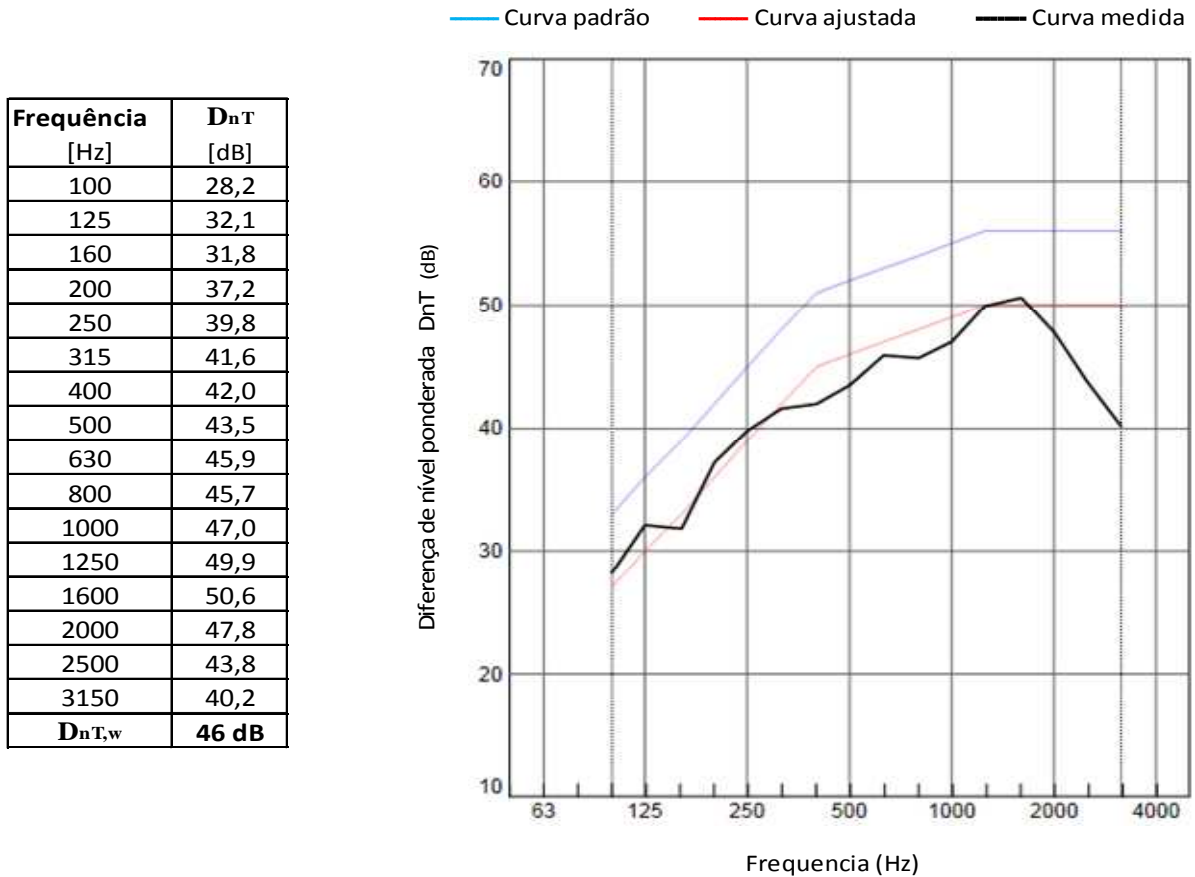
PORTA (conj. porta/parede):
DIMENSÃO_0,80x2,10m
ÁREA_1,68m²



Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 14 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)



Fonte: Imagem do autor

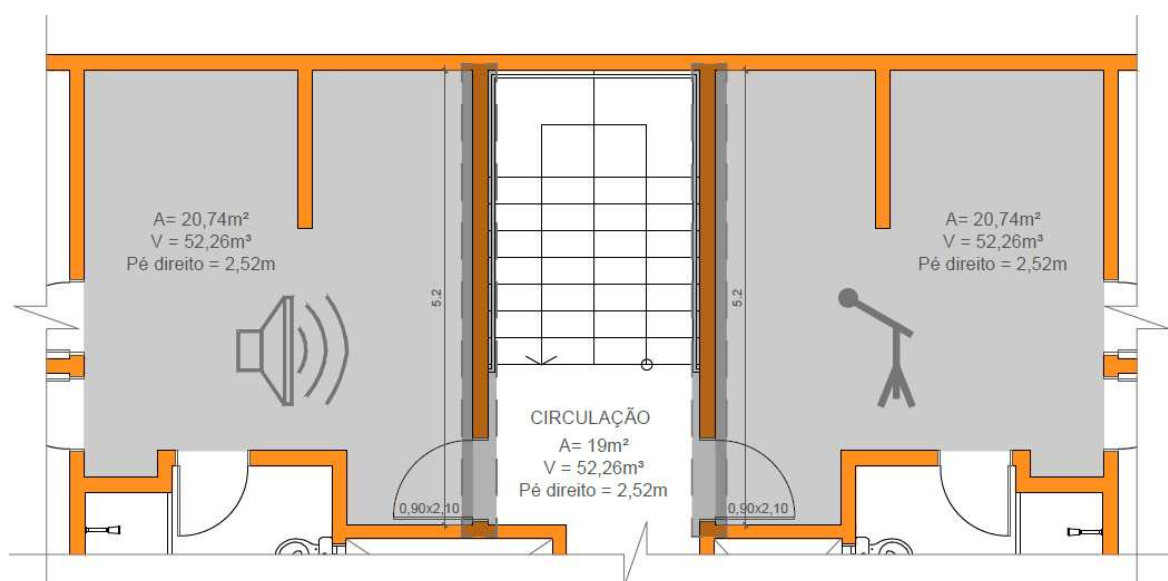
Sistema K

PAREDES: blocos estruturais cerâmicos com 14 cm de largura, revestimento argamassado de 1 cm em cada face.

PORTAS: porta semi-oca com chapa de MDF pintada.

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: alvenaria estrutural com blocos cerâmicos.

Figura 15 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



PORTA (conj. porta/parede):

DIMENSÃO_0,90x2,10m

ÁREA_1,89m²



CONJUNTO PAREDE/PORTA



PAREDE DE BLOCO CERÂMICO



AMBIENTE EMISSOR

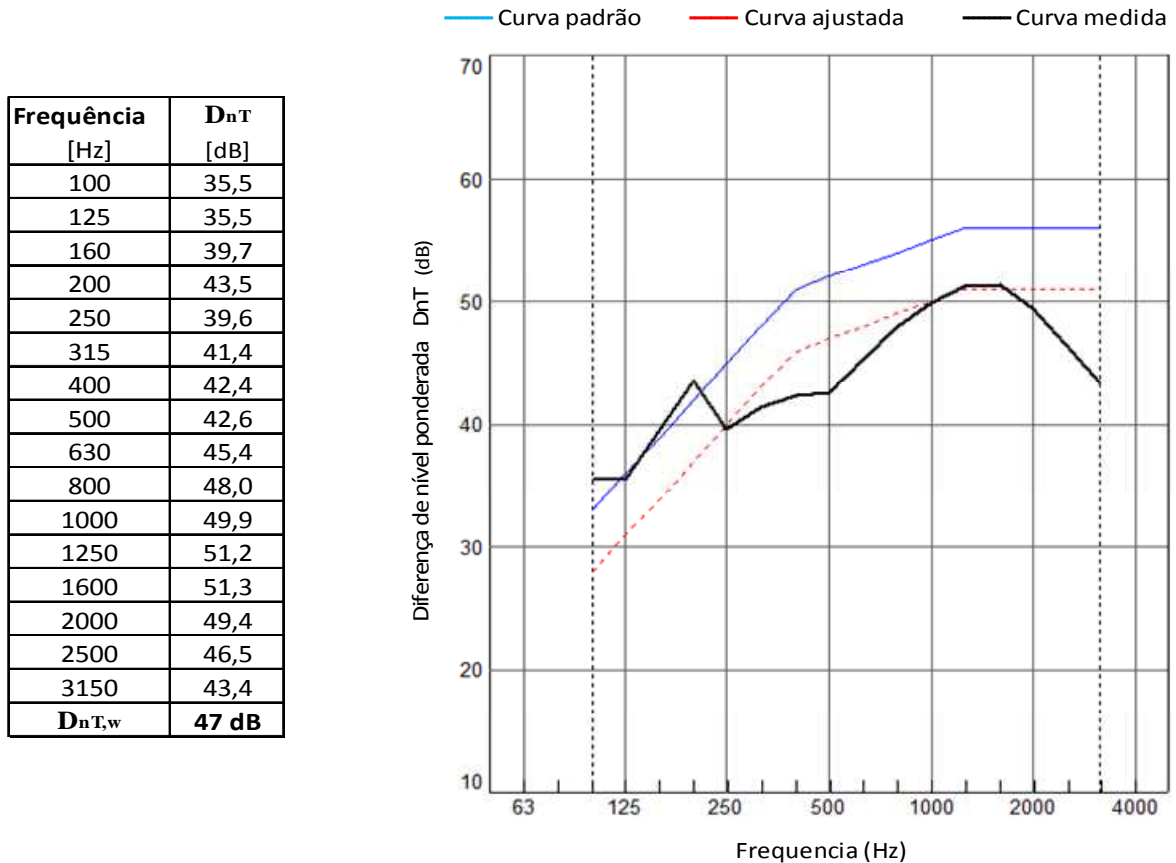


AMBIENTE RECEPTOR

Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 16 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)



Fonte: Imagem do autor

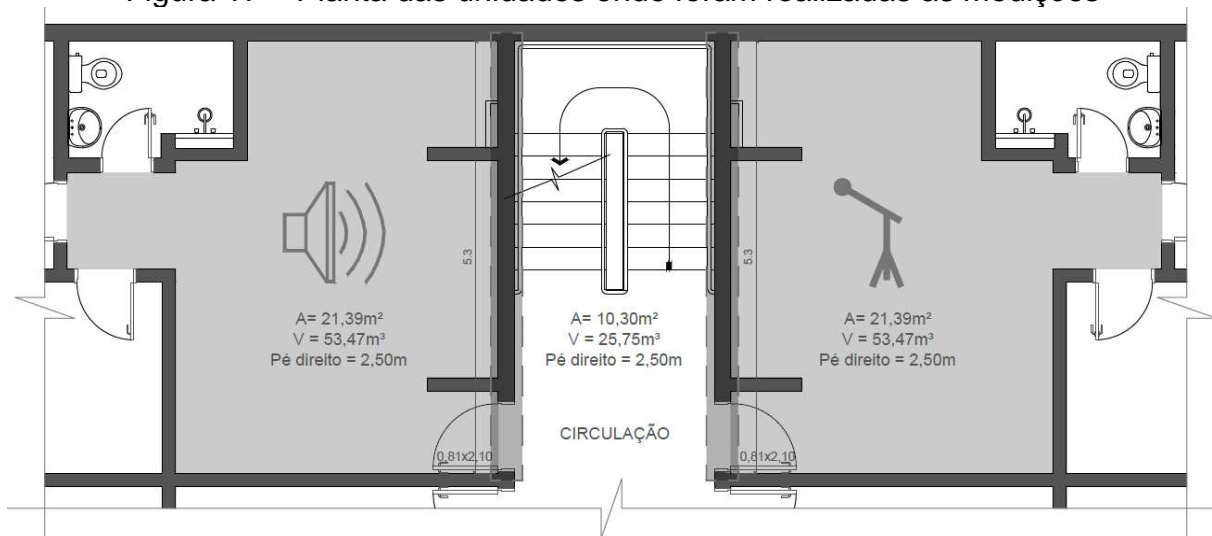
Sistema L

PAREDES: blocos estruturais de concreto com 14 cm de largura, revestimento argamassado de 2 cm em cada face.

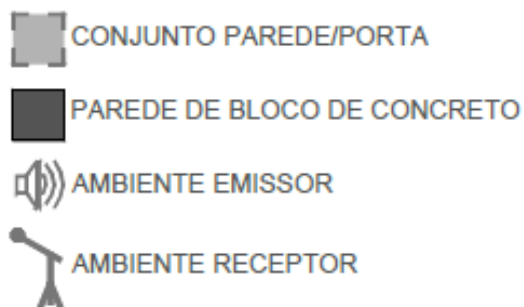
PORTAS: a porta utilizada é semissólida, com espessura de 35 mm: porta com quadro na espessura de 29,5 mm, preenchimento sarrafeado e recoberta com chapas de HDF de 3 mm. A porta tem a dimensão de 81cm x 210 cm, sendo que sobre ela foi feito um enchimento com sarrafo de madeira e espuma até a altura de 220 cm.

SISTEMA CONSTRUTIVO DO PRÉDIO: alvenaria estrutural com blocos de concreto.

Figura 17 – Planta das unidades onde foram realizadas as medições



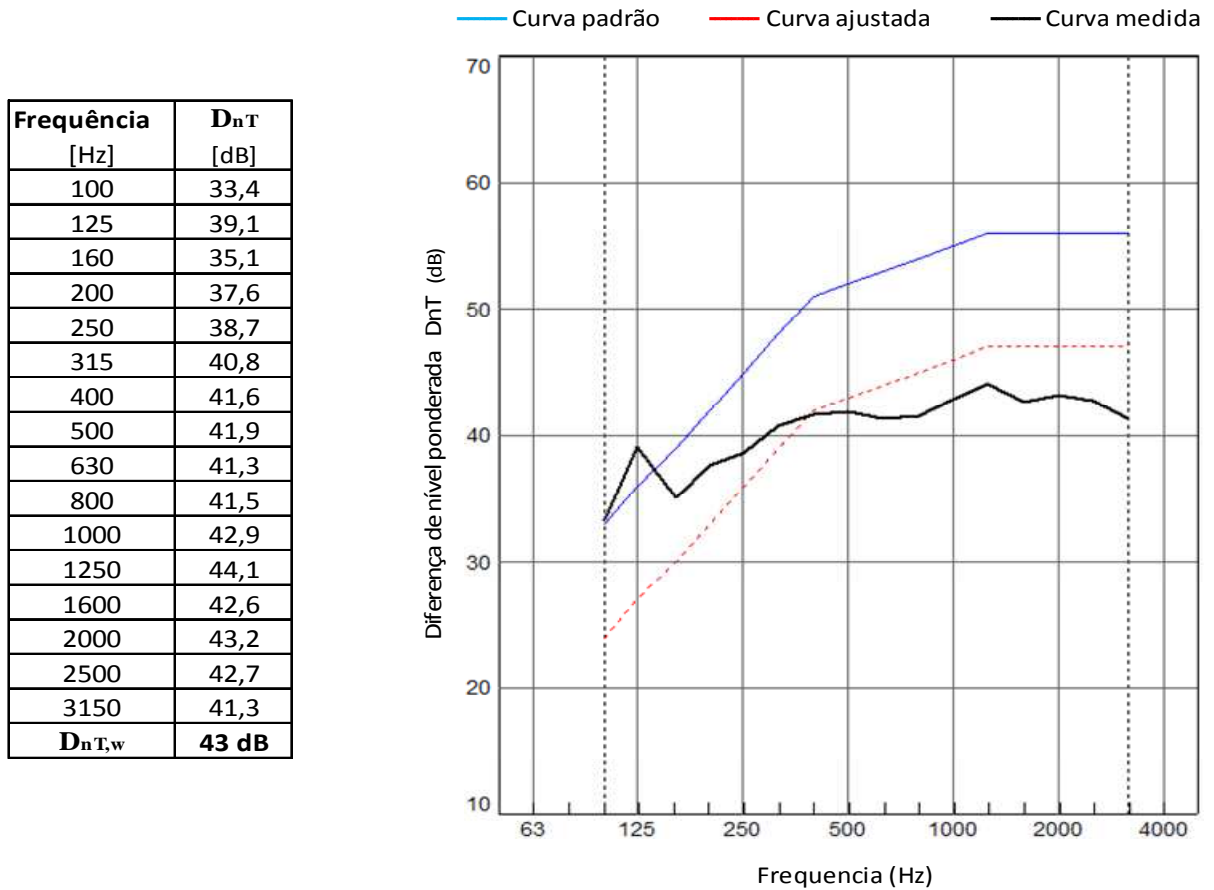
PORTA (conj. porta/parede):
 DIMENSÃO_0,81x2,10m
 ÁREA_1,70m²



Fonte: Adaptado pelo autor

A seguir são apresentados os resultados do ensaio, com os valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) por frequência, na gama de 100 a 3150 Hz, e a diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$), que é o valor global do isolamento do sistema.

Figura 18 – valores de diferença de nível ponderada (D'_{nT}) e diferença padronizada de nível ponderada ($D'_{nT,w}$)

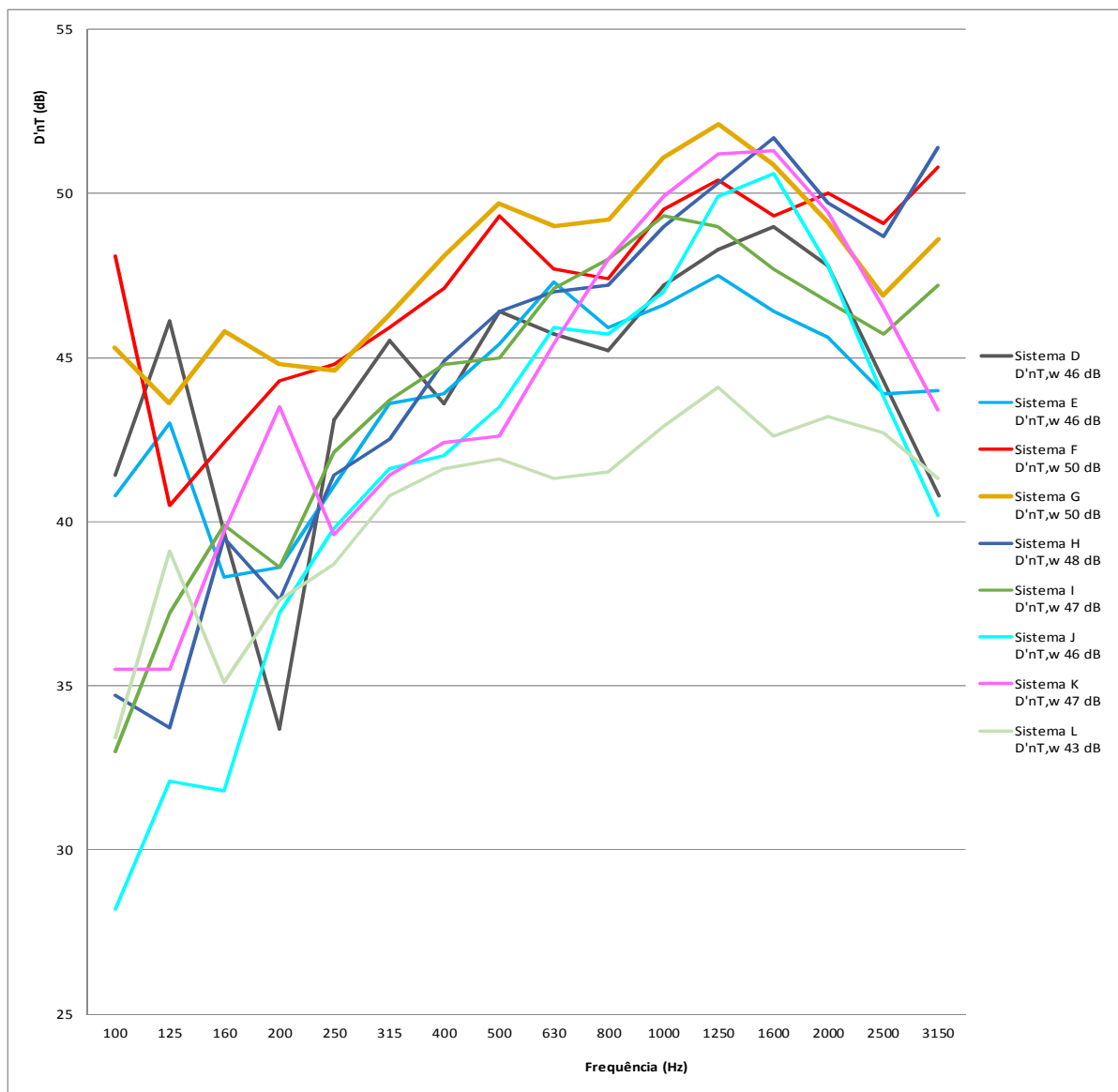


Fonte: Imagem do autor

Gráfico de Isolamento ao ruído aéreo dos Sistemas

A seguir é apresentado o gráfico de isolamento ao ruído aéreo de todos os sistemas do estudo piloto, conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Isolamento ao ruído aéreo dos Sistemas do estudo piloto



Fonte: Elaborado pelo autor

Classificação de acordo com a NBR 15575

A NBR 15575-4 estabelece os seguintes valores de referência para os desempenhos de conjuntos de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo hall (Tabela 2):

Tabela 2 – Critérios de diferença padronizada de nível ponderada, $D'_{nT,w}$ quanto ao ruído aéreo entre apartamentos separados pelo hall de entrada

Elemento	$D'_{nT,w}$ dB	Nível de desempenho
Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo <i>hall</i> ($D_{nT,w}$ obtida entre as unidades)	40 a 44	Mínimo
	45 a 49	Intermediário
	≥ 50	Superior

Fonte: adaptado de NBR 15575-4

Na Tabela 3 serão apresentados os valores obtidos em cada conjunto e a sua classificação de desempenho segundo a NBR 15575-4.

Tabela 3 – Valores obtidos em cada ensaio e respectiva classificação de desempenho

Conjunto	$D'_{nT,w}$ (dB)	Classificação de desempenho (NBR 15575)
D	46	Intermediário (I)
E	46	Intermediário (I)
F	49	Intermediário (I)
G	50	Superior (S)
H	48	Intermediário (I)
I	47	Intermediário (I)
J	46	Intermediário (I)
K	47	Intermediário (I)
L	43	Mínimo (M)

Fonte: elaborado pelo autor

ANEXO A – Certificados de calibração dos equipamentos



LACEL B&K - Laboratório de Acústica
Spectris do Brasil Instrumentos Eletrônicos Ltda
Rua Laguna, 276 Jardim Caravelas - São Paulo / SP
CEP: 04728-000
Telefone: (11) 5188-8165
e-mail: sac@bksv.com

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Certificado N°: CBR1700302

página 1 de 8

CALIBRAÇÃO DO CONJUNTO:

Medidor de Nível Sonoro:	Brüel & Kjær	2270	N° série: 3003751	Identificação: —
Microfone:	Brüel & Kjær	4189	N° série: 2870457	
Pré-amplificador:	Brüel & Kjær	ZC-0032	N° série: 19611	

CLIENTE:

MMC Lab Controle Tecnológico Ltda
Avenida do Forte, 557 sala 204 bairro Cristo Redentor
Porto Alegre / RS
91360-000



Processo LACEL B&K: 081/17

CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO:

Pré-condicionamento: 4 horas em (23 ± 2) °C

Condições ambientais estão descritas nas páginas seguintes e dentro das tolerâncias mencionadas abaixo:

Temperatura ambiente: ± 3 °C

Pressão atmosférica: ± 1 kPa

Umidade relativa: ± 20 %

PROCEDIMENTO:

O Medidor de Nível Sonoro foi calibrado de acordo com os requisitos especificados na IEC 61672-3:2006 para Tipo 1.

DOCUMENTAÇÃO UTILIZADA:

Procedimento de calibração BPC 12r08 para Medidor de Nível Sonoro, utilizando o Sistema de Calibração B&K 3630.
Formulário padronizado - BFC SLM 02r01

INFORMAÇÕES:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre, que avaliou a competência do laboratório.

Este certificado é válido apenas para o objeto calibrado e não pode ser reproduzido parcialmente sem autorização prévia.

Data da calibração: 05/04/2017

Data de emissão: 05/04/2017

Marcos Allegretti
Responsável pela Calibração

Marcos Allegretti
Signatário Autorizado

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Certificado N°: CBR1700303

página 1 de 8

CALIBRAÇÃO DO CONJUNTO:

Medidor de Nível Sonoro:	Brüel & Kjær	2270	N° série: 3003751	Identificação: —
Microfone:	Brüel & Kjær	4189	N° série: 2876982	
Pré-amplificador:	Brüel & Kjær	ZC-0032	N° série: 19345	

CLIENTE:

MMC Lab Controle Tecnológico Ltda
Avenida do Forte, 557 sala 204 bairro Cristo Redentor
Porto Alegre / RS
91360-000



Processo LACEL B&K: 081/17

CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO:

Pré-condicionamento: 4 horas em (23 ± 2) °C

Condições ambientais estão descritas nas páginas seguintes e dentro das tolerâncias mencionadas abaixo:

Temperatura ambiente: ± 3 °C

Pressão atmosférica: ± 1 kPa

Umidade relativa: ± 20 %

PROCEDIMENTO:

O Medidor de Nível Sonoro foi calibrado de acordo com os requisitos especificados na IEC 61672-3:2006 para Tipo 1.

DOCUMENTAÇÃO UTILIZADA:

Procedimento de calibração BPC 12r08 para Medidor de Nível Sonoro, utilizando o Sistema de Calibração B&K 3630.
Formulário padronizado - BFC SLM 02r01

INFORMAÇÕES:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre, que avaliou a competência do laboratório.

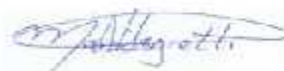
Este certificado é válido apenas para o objeto calibrado e não pode ser reproduzido parcialmente sem autorização prévia.

Data da calibração: 05/04/2017

Data de emissão: 05/04/2017



Marcos Allegretti
Responsável pela Calibração



Marcos Allegretti
Signatário Autorizado

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Certificado Nº: CBR1700304

CALIBRAÇÃO DE:

Modelo:	4231	Código de Identificação:	—
Descrição:	Calibrador Acústico	Classe aplicada:	1
Número de série:	3006768	Normas aplicadas:	IEC 60942:2003
Fabricante:	Brüel & Kjær		

CLIENTE:

MMC Lab Controle Tecnológico Ltda
Avenida do Forte, 557 sala 204
Bairro Cristo Redentor - Porto Alegre / RS
91360-000



Processo LACEL B&K nº: 081/17

CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO:

Condições ambientais:	Temperatura ambiente:	(21,3 ± 3) °C
	Pressão atmosférica:	(93,34 ± 1) kPa
	Umidade relativa do ar:	(54,1 ± 10) %

DOCUMENTAÇÃO UTILIZADA:

Procedimento de calibração BPC 22r04 para Calibrador Acústico, utilizando o Sistema de Calibração B&K 7794.
Código da calibração utilizado no programa de controle: 4231-BR.
Formulário padronizado – BFC CNS 04r02

RESULTADO:

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Calibração inicial | <input type="checkbox"/> Calibração antes do ajuste |
| <input checked="" type="checkbox"/> Calibração sem ajuste | <input type="checkbox"/> Calibração após ajuste |

INFORMAÇÕES:

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

Declaramos que o ajuste não faz parte do escopo da acreditação do laboratório junto a Cgcre.

Este certificado é válido apenas para o objeto calibrado e não pode ser reproduzido parcialmente sem autorização prévia.

Cgcre is a signatory of the ILAC and IAAC to Mutual Recognition Arrangement and the Bilateral Agreement on Mutual Recognition with EA.

Data da calibração: 06/04/2017

Data de emissão: 06/04/2017



Felipe Pereira
Responsável pela Calibração



Marcos Allegretti
Signatário Autorizado