



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Rafaella Brandão Estevão de Souza da Rocha

**A ACÚSTICA DO DETALHE:
O DESEMPENHO ACÚSTICO URBANO A PARTIR DOS
DETALHES DA FORMA DAS EDIFICAÇÕES**

CAMPINAS
2018

Rafaella Brandão Estevão de Souza da Rocha

**A ACÚSTICA DO DETALHE:
O DESEMPENHO ACÚSTICO URBANO A PARTIR DOS
DETALHES DA FORMA DAS EDIFICAÇÕES**

Tese de doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Stelamaris Rolla Bertoli

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA RAFAELLA BRANDÃO ESTEVÃO DE SOUZA DA ROCHA E ORIENTADA PELA PROF.^a DR.^a STELAMARIS ROLLA BERTOLI

CAMPINAS

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES, 1441342

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R582a Rocha, Rafaella Brandão Estevão de Souza da, 1980-
A acústica do detalhe : o desempenho acústico urbano a partir dos
detalhes da forma das edificações / Rafaella Brandão Estevão de Souza da
Rocha. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Acústica. 2. Simulação (computador). 3. Espaço urbano. 4. Projeto
arquitetônico. 5. Arquitetura - Detalhes. I. Bertoli, Stelamaris Rolla, 1958-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: The acoustics of the detail : urban acoustics performance from
building form details

Palavras-chave em inglês:

Acoustics

Computer simulation

Urban space

Architectural project

Architecture - Details

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Stelamaris Rolla Bertoli [Orientador]

Daniel de Carvalho Moreira

Maria Lygia Alves de Niemeyer

Erasmus Felipe Vergara Miranda

Gilda Collet Bruna

Data de defesa: 26-02-2018

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

**A ACÚSTICA DO DETALHE:
O DESEMPENHO ACÚSTICO URBANO A PARTIR DOS
DETALHES DA FORMA DAS EDIFICAÇÕES**

Rafaella Brandão Estevão de Souza da Rocha

Tese de doutorado aprovada pela
banca examinadora constituída por:

Prof.^a Dr.^a Stelamaris Rolla Bertoli
Presidente e orientadora/ FEC-UNICAMP

Prof. Dr. Daniel de Carvalho Moreira
FEC-UNICAMP

Prof.^a Dr.^a Maria Lygia Alves de Niemeyer
UFRJ

Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda
UFSC

Prof.^a Dr.^a Gilda Collet Bruna
UPM

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se
no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 26 de fevereiro de 2018

Dedicada às minhas avós Almerita e Cléa que durante minhas novas descobertas em Campinas, foram habitar novos céus. Ambas inspiradoras, uma com cravo e outra com jasmim, perfumaram minha vida, minhas lembranças e meu coração com alegria, amor e muito carinho...

Agradecimentos

Aos meus primeiros professores desta vida, meu pai **Alexandre Estevão** e minha mãe **Zenaide Estevão**, e aos meus “companheiros de sala aula”, minha irmã **Alessandra Estevão** e meu irmão **Mitchel Estevão**. Juntos, ensinaram-me, talvez sem nem perceber, a essência do que me move: amor, consciência e liberdade. O amor nos olhares carinhosos, a energia da torcida e os abraços de apoio estão registrados na eternidade do meu coração e continuarão a me acompanhar nestas trajetórias ainda andantes.

Ao companheiro de tantas aventuras, meu marido **Vítor Andrade**. O amor que uniu nossa aliança de vida nutriu plenamente de cumplicidade, paciência, risadas e lágrimas o desbravamento destas terras sudestinas.

Aos carinhosos sobrinhos **Giovanni Estevão** e **Lívia Estevão**. O amor incondicional dos meus chameguinhos, o carinho quentinho, as brincadeiras divertidas e as conversas inocentes iluminaram minhas voltas para casa, alimentando de afeto a alma de tita Fá.

À inspiradora **Stelamaris Rolla Bertoli**. Foi recompensador descobrir que a incrível força de seu conhecimento brota da delicadeza de seu carinho e dedicação por tudo que faz. Seus ensinamentos valiosos e seu amor pela acústica, sempre brilharão os olhos desta imensamente agradecida pupila.

Aos amigos **Alexandre Virginelli Maiorino** e **Italo Guedes Montalvão**. A paixão pela acústica, a parceria, a cumplicidade e o companheirismo inimaginável do nosso trio mosqueteiro estará infinitamente registrada no coração da já saudosa pernambucana.

A todos os amigos acústicos que me acolheram com carinho durante esta marcante etapa da minha vida no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada – LACAF/UNICAMP. Em especial a **Rodolfo Thomazelli** e **Gabriel Mello Silva**, que com boas energias, boas risadas e muita acústica enriqueceram meu caminho.

Às talentosas mulheres **Lorena Moreira**, **Paula Mota** e **Fernanda Almeida**, guardarei com carinho e saudade a sagacidade divertida de nossos encontros.

Aos excepcionais **Dick Botteldooren** e **Michael Vorländer**. Nunca esquecerei os momentos em que troquei as ideias e inspirações desta pesquisa com tão brilhantes e catedráticos pesquisadores. Os novos olhares lançados em 2014 reforçaram com naturalidade a minha essência arquitetônica ao dissertar sobre a acústica.

Aos estimados professores da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC/UNICAMP, em especial às inestimáveis **Núbia Bernardi**, **Regina Coeli Ruschel** e **Silvia Aparecida Mikami Gonçalves Pina** pelos ensinamentos, confiança e disposição nas aulas de Metodologia e no Programa de Estágio Docente - PED.

A todos do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura Tecnologia e Cidade da FEC/UNICAMP, em especial a **Eduardo Estevam** por suas infindáveis boas energias, sorrisos, gentileza e disposição que se irradiam por toda FEC.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, em especial ao Diretor do Centro Tecnológico de Ambiente Construído **Dr. Fúlvio Vittorino**, à Chefe do Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade de Edifícios **Dr^a Maria Akutsu**, a **Marcelo de Mello Aquilino** e **Cristina Yukari Kawakita Ikeda**, pela gentileza e atenção em me receber no IPT e colocar à disposição o *software* Odeon no início desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – **CAPES** pelo financiamento desta pesquisa.

Resumo

A acústica em espaços urbanos é comumente investigada em duas escalas dimensionais: a microescala e a macroescala. A macroescala está associada aos mapas acústicos, que se baseiam em diversas aproximações do fenômeno físico de propagação sonora em espaços abertos. Uma destas aproximações é a simplificação da forma das edificações: detalhes arquitetônicos são suprimidos das edificações existentes no espaço urbano, que passam a ser caracterizadas enquanto blocos monolíticos ou prismas puros. A exclusão destes detalhes aumenta a incerteza contida nos mapas acústicos, e assim sendo, aumenta a possibilidade de obtenção de parâmetros imprecisos. Hoje, a margem de erro admitida na produção dos mapas acústicos é da ordem de 5 dB, valor considerado alto para ser aceito como tolerável. Um dos avanços nesta questão que pode possibilitar a busca da redução destes erros é a comprovação de que a supressão do detalhe arquitetônico das edificações influencia no resultado final de seu desempenho acústico. Isto posto, o objetivo geral desta pesquisa é demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho da acústica urbana. Para isso, adotou-se o estudo do espaço urbano em microescala – e em específico a microescala da rua – a partir de simulações acústicas de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica. Foram utilizados modelos virtuais de cenários urbanos hipotéticos, para a manipulação controlada da variável independente – o detalhe. Foram pesquisados os parâmetros acústicos nível de pressão sonora (SPL), tempo de reverberação (T30) e tempo inicial de decaimento (EDT). Foram investigadas 12 condições experimentais. Duas pertencentes ao grupo de controle, caracterizadas por edificações de prismas puros, sem detalhes da forma das edificações. E dez condições pertencentes ao grupo experimental, com detalhes da forma das edificações, sendo eles: varandas, varandas alternadas, varandas com reentrâncias e saliências, *baywindow* e jardineiras. Os modelos virtuais do experimento foram simulados computacionalmente com uso do *software* Odeon v.13. Os resultados foram analisados comparativamente em termos objetivos, a partir dos valores absolutos e em termos subjetivos, a partir da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros, o JND (*just noticeable difference*). Foi identificado que a presença dos detalhes influencia o desempenho acústico do espaço urbano tanto aumentando os parâmetros investigados, quanto diminuindo-os. Identificou-se ainda que em termos subjetivos a influência do detalhe nos parâmetros acústicos investigados é extremamente percebida, tanto para os receptores próximos ao piso – os pedestres da rua – quanto para os receptores dos pavimentos mais elevados das edificações que compõem esta rua. Ou seja, foi demonstrado que o detalhe da forma das edificações não só influencia o desempenho acústico urbano, como influencia a percepção sonora de quem ocupa estes espaços. Ao demonstrar que os detalhes da forma das edificações influenciam o desempenho acústico urbano, a presente pesquisa confirma que as edificações consideradas como prismas puros ou blocos monolíticos, *sem* os detalhes arquitetônicos, *não* são suficientes para representar nem os níveis de pressão sonora existentes no espaço urbano, nem a sua percepção de “volume”.

Palavras-chave: acústica urbana; mapa acústico; forma arquitetônica; simulação acústica.

Abstract

Urban acoustics is usually investigated in two-dimensional scales: microscale and macroscale. Macroscale is associated to noise maps which are grounded in several approximations of the sound propagation physical phenomena in open spaces. Building form simplification is one of such approximations: architectural details are suppressed from buildings in the urban space. In noise maps, buildings are modeled as monolithic blocs or pure prisms. The simplification of the model increases noise maps uncertainties, maximizing the chances to obtain inaccurate acoustics parameter's results. Nowadays, noise maps uncertainty is around 5 dB, a high value to be tolerated. Demonstrating that the lack of architectural detail has an influence in the acoustic performance result may be an advance to reduce noise maps uncertainty. This research aims to demonstrate the influence of architectural details in urban acoustics performance. Therefore, a microscale urban space of a street was studied with a computer model based on geometric acoustics simulation. Virtual models of a hypothetic urban scenario were used to the controlled manipulation of an independent variable, in this case, the building form detail. Acoustic parameters such as sound pressure level (SPL), reverberation time (T30) and early decay time (EDT) were investigated in twelve experimental scenarios. Two scenarios were part of the control group, characterized by pure prims buildings, without any building details. The other ten scenarios were part of the experimental group with the presence of building details, such as: balconies, alternated balconies, reentrant and protruding balconies, baywindows and window boxes. Virtual models were simulated with Odeon v.13 *software*. Results were analyzed objectively compared with absolute data values and subjectively compared with just noticeable difference – JND values. Results showed that the presence of building form details changes the urban space acoustic performance, both increasing and decreasing the values of the investigated parameters. Subjectively, the influence of the detail is extremely perceived for all receptors, from pedestrians in the street, close to the floor to receivers in an elevated pavement. Therefore, it was demonstrated that building form details have an influence both on urban acoustic performance and sound perception of people in the building and on the street. The presented results confirm that pure prism buildings or monolithic blocks used in noise maps, without architectural details cannot properly represent sound pressure level and loudness perception in urban spaces.

Keywords: urban acoustics; noise maps; architectural form; acoustic simulation.

Lista de figuras

Figura 1 – Aumento área da superfície em função do raio da esfera pulsante.	23
Figura 2 - Decaimento sonoro com a distância.....	25
Figura 3 – Novos raios e frente de onda a partir da reflexão em superfícies acusticamente rígidas.	26
Figura 4 - Refração sonora causada pela variação temperatura.	28
Figura 5 - Refração sonora causada pelo vento.....	29
Figura 6 - Proximidade típica em ruas urbanas entre o receptores (o pedestres no 1º plano da imagem), a fonte (o tráfego de veículos – 2º plano) e as edificações (3º plano).....	30
Figura 7 - Cânion geográfico.....	30
Figura 8 - Cânion urbano.....	30
Figura 9 - Rua parisiense.....	31
Figura 10 - Rua recifense.	31
Figura 11 - Rua londrina.	31
Figura 12 - Garagem colada no lote de edifício residencial em Recife-PE.	32
Figura 13 - Rua Joseph de Maistre em Paris, França, com perfil em L.	32
Figura 14 – O ciclo básico da Unicamp configura um espaço urbano aberto.....	32
Figura 15 - Barreira acústica.	33
Figura 16 - Mapa acústico em isolinhas da cidade de Göteborg na Suécia.	34
Figura 17 - Mapa acústico interpolado da cidade de Taiwan na China.....	34
Figura 18 - Mapa acústico calculado do centro de Manchester no Reino Unido.....	34
Figura 19 – Detalhes existentes em uma edificação real na cidade de Caruaru-PE.....	37
Figura 20 – Detalhes existentes em uma edificação real na cidade de Caruaru-PE.....	37
Figura 21 – Caracterização das edificações das imagens 19 e 20 no mapa acústico da cidade de Caruaru-PE.....	37

Figura 22 - Planta esquemática de estudo acústico em microescala de um pátio na Bélgica.....	39
Figura 23 – Planta esquemática de estudo acústico em microescala de uma praça na Inglaterra. .	39
Figura 24 - Planta esquemática de estudo acústico em microescala urbana de uma rua na França.	39
Figura 25 – Resposta impulsiva.	42
Figura 26 – Edificação com fachada de vidro comumente encontrada em espaços urbanos ocasionam reflexões especulares.	43
Figura 27 – Empenas ou fachadas de concreto, ocasionam reflexões especulares.....	43
Figura 28 – Fachadas com superfícies irregulares por adornos ou ornamentos históricos tendem a proporcionar reflexões difusas.	43
Figura 29 - Configuração de rua do cenário urbano hipotético.....	49
Figura 30 - Detalhe de uma das varandas investigadas pelos autores.	49
Figura 31 - Sendo S a fonte sonora e R o receptor, em laranja a área de sombra a partir da inclinação do parapeito.....	49
Figura 32 - Edificação do espaço urbano real da segunda praça investigada.	51
Figura 33 - Edificação da segunda praça nas primeiras simulações acústicas.....	51
Figura 34 - Edificação da segunda praça com a inserção dos detalhes arquitetônicos nas novas simulações.....	51
Figura 35 - Na resposta impulsiva simulada (acima) a hachura evidencia a ausência de reflexões importantes quando comparadas com as medições <i>in situ</i> (ao meio). Abaixo, a nova resposta impulsiva simulada com a inserção e presença dos detalhes arquitetônicos consegue caracterizar estas reflexões.	51
Figura 36 - Espaço urbano na escala da praça.....	52
Figura 37 - Detalhes arquitetônicos das edificações.	52
Figura 38 - Modelo virtual detalhado (acima) e simplificado (abaixo) utilizados nas simulações acústicas.	52

Figura 39 – Ilustração do princípio de traçado de raios. Fonte sonora: S; reflexão especular: s; reflexão difusa: d; o receptor que intersecta os raios: C.	54
Figura 40 – Construção de uma fonte-imagem por espelhamento.	55
Figura 41 – Reflexão de primeira ordem da fonte-imagem A', e, de segunda ordem da fonte-imagem A".....	55
Figura 42 – Princípio de um modelo híbrido de cálculo.....	56
Figura 43 - Fotografia da “Paris Haussmaniana”.....	62
Figura 44 - Um dos eixos estruturais de Curitiba.....	62
Figura 45 - Zoneamento curitibano.	62
Figura 46 - À esquerda, transformação da forma pura original por meio da adição de detalhes; à direita por meio da subtração de detalhes.....	65
Figura 47 – Semelhanças entre detalhes arquitetônicos investigados.....	67
Figura 48 - Representação esquemática das condições experimentais de pesquisa.	68
Figura 49 - Dimensionamento dos cenários urbanos hipotéticos.	69
Figura 50 – Dimensionamento dos detalhes arquitetônicos investigados.	70
Figura 51 - Etapas sucessivas das simulações acústicas.....	71
Figura 52 - Interface do Odeon com a visualização do modelo virtual do grupo de controle no modo de implantação lote.	73
Figura 53 – Posicionamento de fonte sonora, em azul, e pontos receptores em vermelho.	74
Figura 54 - Modo de apresentação dos parâmetros acústicos nos gráficos em relação aos pontos receptores, tomando como base a Figura 53 já apresentada.....	79
Figura 55 – LOTE - Nível de pressão sonora (SPL) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.	82
Figura 56 - Visualização da propagação sonora ao longo do tempo.....	83
Figura 57 – Curva tempo-energia do ponto R13. Em vermelho o grupo de controle e em azul o grupo experimental cenário varandas alternadas	84

Figura 58 - Distribuição de absorção m^2 Sabine por frequência em banda de oitava da condição	84
Figura 59 – CÂNION - Nível de Pressão Sonora (SPL) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.	86
Figura 60 – Níveis de pressão sonora do cânion são em geral maiores do que do lote, como se exemplifica pela quantidade de valores dos pontos receptores acima da linha pontilhada nos dois modos de implantação.....	87
Figura 61 - Sobreposição alinhada de trechos das RI do cenário varandas. Em magenta o modo de implantação cânion, e em azul escuro, o lote.....	87
Figura 62 – LOTE - Diferença em JND para o nível de pressão sonora do em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	89
Figura 63 - CÂNION - Diferença em JND para o nível de pressão sonora do em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	90
Figura 64 - Média percentual de todas as frequências para pontos acima de 1 JND para SPL. O gráfico “A” sendo do modo de implantação lote, e o gráfico “B” do cânion.....	91
Figura 65 – LOTE - Tempo de reverberação (T_{30}) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência	93
Figura 66 - LOTE - Tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.	94
Figura 67 - Curvas de decaimento em 500 Hz do ponto R13. Em vermelho o controle, em azul varandas alternadas.....	95
Figura 68 - À esquerda reflexões simples, à direita reflexões difusas posteriores.	96
Figura 69 - Traçado de raios sonoros do cenário varandas alternadas evidenciando a difusão posterior (setas em magenta) à fonte sonora que chega ao ponto receptor R10.	97
Figura 70 - CÂNION - Tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.	98

Figura 71 - Curvas de decaimento em 500Hz do ponto R20. Em rosa o cenário varandas, em lilás o cenário jardineira.....	100
Figura 72 - CÂNION - Tempo de reverberação (T30) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	101
Figura 73 - LOTE – Diferença em JND para tempo de reverberação (T30) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	104
Figura 74 - CÂNION – Diferença em JND para tempo de reverberação (T30) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	105
Figura 75 - LOTE – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	106
Figura 76 - CÂNION – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	107
Figura 77 – Média percentual de todas as frequências para pontos acima de 1 JND para T30. O gráfico “A” sendo do modo de implantação lote, e o gráfico “B” do cânion.....	108
Figura 78 - Média percentual de todas as frequências para pontos acima de 1 JND para EDT. O gráfico “A” sendo do modo de implantação lote, e o gráfico “B” do cânion.....	109
Figura 79 – LOTE – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	110
Figura 80 – CÂNION – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.....	110
Figura 81 – CÂNION – T30 - Percentual de pontos acima de 1 JND em função da frequência.....	132

Sumário

1. Introdução	16
2. A propagação sonora em espaços abertos.....	22
3. A acústica e a microescala urbana	39
4. Método da pesquisa	58
4.1. A operacionalização das variáveis de pesquisa.....	58
4.2. A delimitação das condições experimentais de pesquisa.....	61
4.3. Os cenários urbanos hipotéticos.....	69
4.4. As simulações acústicas	71
4.5. Forma de análise de dados.....	75
5. Apresentação e discussão dos resultados	79
5.1. Nível de Pressão Sonora (SPL)	80
5.2. Tempo de Reverberação (T30) e Tempo Inicial de Decaimento (EDT).....	92
5.3. Síntese dos resultados.....	112
6. Conclusões	113
Referências.....	119
Apêndice A	130
Apêndice B	132
Apêndice C	133

1. Introdução

A propagação sonora é compreendida em termos de suas componentes *fonte-trajetória-receptor*. Tendo-se o espaço urbano como referência de propagação existe uma diversidade de fontes sonoras sendo elas tipicamente agrupadas em fontes lineares, como o tráfego de veículos, e, pontuais, como buzinas e apitos. Já os receptores da energia sonora produzidas por estas fontes são usualmente àqueles que percorrem e utilizam os espaços urbanos e àqueles diretamente expostos à energia sonora nele produzida: os pedestres e as edificações.

Apesar da acústica urbana considerar as edificações como receptores, o que ocorre no interior destas mesmas edificações – como sua eficiência em proporcionar proteção para o receptor em seu interior – é comumente investigada pelo *desempenho acústico de edificações*, e não pela *acústica urbana*, mesmo que a fonte de energia sonora esteja no espaço urbano.

Destaca-se então o primeiro delineamento desta pesquisa: investiga-se o *desempenho acústico urbano* na concepção do pedestre e da rua associada às suas edificações enquanto receptores, admitindo uma fonte sonora pontual. Em outras palavras, considera-se a energia sonora produzida no espaço urbano, sendo recebida também neste mesmo espaço urbano.

Sobre a trajetória, na propagação do som em espaços abertos há interferência derivada da diversidade de trajetos possíveis desde os primeiros avanços da onda sonora. No espaço urbano estas interferências ocorrem principalmente a partir de fenômenos acústicos vinculados às fontes sonoras, ao solo, às condições atmosféricas e à forma urbana, sendo comumente investigadas em duas escalas dimensionais: a microescala e a macroescala (KANG, 2007).

A microescala abrange investigações em pequenas dimensões do espaço urbano, como numa praça, uma rua, ou um jardim urbano. A macroescala abrange grandes dimensões urbanas, como cidades, bairros inteiros, ou longos percursos lineares tais como vias expressas e grandes avenidas estruturais.

Por sua abrangência geográfica a macroescala é comumente associada à execução de mapas acústicos – também chamados de mapa de ruído e de carta acústica. Estes mapas se baseiam em simplificações algorítmicas e aproximações do fenômeno físico de propagação sonora em

espaços abertos para calcular a distribuição sonora em um espaço urbano apresentando níveis de pressão sonora em imagens com gradação de cor (ATTENBOROUGH; LI; HOROSHENKOV, 2007; PROBST, 2013).

Uma destas aproximações refere-se à simplificação da geometria da forma das edificações: detalhes arquitetônicos são suprimidos e as edificações do espaço urbano passam a ser caracterizadas enquanto blocos monolíticos ou prismas puros, sem qualquer variação plástica mais expressiva. Ao retratar e calcular as edificações do espaço urbano com morfologia que muitas vezes pouco se assemelha a real, os mapas acústicos em macroescala cerceiam a consideração de um dos modos da arquitetura expressar os aspectos criativos da concepção projetual: a experimentação plástica dos detalhes arquitetônicos de uma edificação.

Delineados nesta pesquisa como elementos ou detalhes arquitetônicos¹ que transformam a forma volumétrica pura e original das edificações, os *detalhes da forma das edificações* podem ser constituídos por varandas, *baywindows*, sacadas, jardineiras, septos verticais, septos horizontais, beirais, *brise-soleils*, molduras de janelas, ou a própria estrutura de pilares e vigas da edificação, entre outros. Assim, adornos e irregularidades das superfícies das fachadas das edificações – como as texturas obtidas com os materiais que as compõe ou a sobreposição de ornamentos históricos – *não* são nesta pesquisa considerados detalhes arquitetônicos.

A expressividade plástica derivada dos detalhes da forma das edificações é facilmente percebida no espaço urbano onde estas edificações estão inseridas. A exclusão destes detalhes dos mapas acústicos em macroescala impede não somente uma identificação morfológica mais realística do espaço urbano, como também, por influenciar na trajetória de propagação sonora, inviabiliza uma boa caracterização de seu desempenho acústico, aumentando a margem de erro, e assim sendo, aumentando a possibilidade de obtenção de parâmetros acústicos imprecisos (EUROPEAN COMMISSION, 2006; ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015; ROCHA; MAIORINO; BERTOLI, 2017). Hoje, a margem de erro admitida na produção dos mapas acústicos é da ordem de 5 dB, valor considerado alto para ser tolerável, uma vez que a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano na variação de nível de pressão sonora é de

¹ O termo *detalhes arquitetônicos* vêm imbuído de múltiplos significados mesmo dentro da própria arquitetura e urbanismo. Podem referir-se às características da composição volumétrica de uma edificação, aos pormenores construtivos, às especificidades de execução de um mobiliário, aos ornamentos e adornos de superfícies, entre outros. Na presente pesquisa tanto o termo *detalhes arquitetônicos* quanto *detalhes da forma das edificações* se referem exclusivamente a elementos que transformam a forma volumétrica pura e original (sólidos primários) das edificações.

apenas 1 dB (EUROPEAN COMISSION, 2006; FASTL; ZWICKER, 2007; LICITRA; MEMOLI, 2008).

A produção de mapas acústicos é regulamentada nos países europeus há quase 15 anos por meio da Diretiva Europeia 2002/49/CE (PARLAMENTO EUROPEU, 2002), também conhecida como *Environmental Noise Directive* (END). No Brasil, foi recentemente aprovada a primeira lei que regulamenta a execução de mapas acústicos: a *Lei 16.499/2016 Mapa do Ruído Urbano* do município de São Paulo. Esta lei é exclusiva do âmbito municipal, não havendo outra legislação, seja ela estadual ou federal, que legisle sobre a produção de mapas acústicos no Brasil.

Apesar desta ser a primeira legislação a implementar a produção de mapas acústicos, a primeira cidade brasileira a ser inteiramente mapeada foi a cidade de Fortaleza em 2012. Sua produção não seguiu uma legislação específica, mas a iniciativa da *Secretaria do Meio Ambiente - Equipe de Controle da Poluição Sonora* da prefeitura de Fortaleza para apoio ao cumprimento de outras legislações vigentes acerca da acústica urbana.

Tanto as existentes legislações europeias, quanto as recentes legislações brasileiras, foram impulsionadas pela demanda de atuação no desempenho acústico do espaço urbano e demonstram a relevância da aplicação dos mapas acústicos, sendo utilizados principalmente como referência e instrumento para decisões de gestão e planejamento urbano facilitando o desenvolvimento de políticas para prevenção, controle e monitoramento do ruído urbano.

Logo, seria esperado que os resultados apresentados pelos mapas acústicos possuísem o menor intervalo de incerteza possível ao contrário de erros cinco vezes maiores do que a percepção da menor variação do nível de pressão sonora detectada pelo sistema auditivo humano. Um dos modos de possibilitar a busca da redução destes erros é através da comprovação de que a supressão do detalhe arquitetônico das edificações influencia no resultado final de seu desempenho acústico.

Isto posto, a presente pesquisa formula a **hipótese** de que se existem espaços urbanos delineados por edificações com presença profusa de detalhes em sua forma – *e.g.* varandas, reentrâncias e saliências, jardineiras, *baywindows* – então há modificação no *desempenho acústico* desse mesmo espaço.

A comprovação desta hipótese pode ser uma centelha incentivadora de futuras pesquisas para possibilitar a inserção da influência dos detalhes arquitetônicos da forma das edificações nos cálculos de propagação sonora que fundamentam o mapeamento acústico. Seja essa inserção nos algoritmos matemáticos através de índices gerais de correção, seja na caracterização acústica individual de cada edificação.

Atualmente, por recomendação da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2006) a grande maioria das normas que regulamentam os cálculos dos mapas acústicos adotam diferentes coeficientes de absorção para caracterizar as reflexões que incidem sobre os materiais compositivos das edificações. Esta correção abrange a variação entre superfícies extremamente lisas, como vidro, e superfícies com irregularidades, como adornos históricos. A inclusão dessas correções é derivada de estudos específicos acerca da influência no desempenho acústico urbano que a variação das superfícies das edificações, lisas ou irregulares, podem causar. Entretanto, a influência dos detalhes da forma das edificações permanece uma lacuna.

Assim, com a intenção de comprovar a hipótese apresentada sob a égide de um olhar arquitetônico para a acústica, o **objetivo geral** da presente pesquisa é o de demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho da acústica urbana.

Apesar da motivação desta pesquisa relacionar-se com mapas acústicos, a comprovação da hipótese e alcance do objetivo geral não podem ser conduzidos utilizando-se dos mesmos procedimentos metodológicos e ferramentas da macroescala. Os programas² para elaboração de mapas acústicos são fundamentados na aplicação computacional da teoria da acústica geométrica e especificamente do método traçado de raios (*ray tracing*). Mas devido às suas simplificações algorítmicas e limitações na entrada de dados que caracterizam o espaço urbano, sequer permitem a inserção de quaisquer variações arquitetônicas mais elaboradas nas edificações.

Também fundamentados na aplicação computacional da teoria da acústica geométrica, programas³ utilizados em investigações de microescala urbana – que abrangem pequenas dimensões do espaço urbano, como uma praça, uma rua, ou um jardim urbano – costumam combinar a atuação de mais de um método, abarcando com maior precisão o fenômeno

² Tais como os *softwares* CadnaA (DataKustic), SoundPlan (Brauntein + Berndt GmbH) e Predictor (Brüel & Kjær).

³ Tais como os *softwares* Odeon (Odeon S/A), CadnaR (DataKustic) e Ease (AFMG).

acústico da propagação em espaços abertos. Essa combinação de métodos é nomeada de métodos de cálculo híbridos como, por exemplo, a associação do método fonte-imagem ao método traçado de raios. Além disso, estes programas também permitem a inserção de quaisquer variações arquitetônicas mais elaboradas nas edificações. Portanto, tanto por sua precisão na caracterização acústica de espaços abertos, quanto pela possibilidade de inclusão de detalhes arquitetônicos, programas de métodos híbridos fundamentados na teoria da acústica geométrica provêm as ferramentas e as bases teóricas de um percurso metodológico adequado para investigar o desempenho acústico urbano a partir dos detalhes da forma das edificações.

Mundialmente, a teoria da acústica geométrica e seus respectivos métodos são empregados em espaços abertos e em espaços fechados, em acústica urbana e em acústica de salas. Mas no Brasil é comum que a utilização prática destes métodos através da simulação acústica de modelos virtuais em programas computacionais seja associada apenas à acústica de salas. Isto se deve em grande parte pela escassez de estudos em microescala urbana que demandam maiores níveis de detalhamento e menores graus de erro. Ou ainda pela dificuldade de traçar paralelos entre simulações acústicas de modelos virtuais e pesquisas experimentais de campo em ambientes com múltiplas variáveis e de difícil controle, como são essencialmente os espaços urbanos. Assim, apesar de escassas, as simulações acústicas de modelos virtuais fundamentados na teoria da acústica geométrica *fazem parte* do repertório experimental e ferramental da acústica urbana, *não* sendo exclusiva para uso no domínio da acústica de salas.

Delineia-se então que para atingir seu objetivo, a presente pesquisa admite o estudo do espaço urbano em microescala a partir de simulações acústicas de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica. Delineia-se ainda, que por abranger pequenas dimensões mais facilmente controladas ou manipuladas, por sua maior representatividade no tecido urbano e por seu vínculo com a maior fonte sonora de ruído ambiental, o tráfego de veículos, a escala do espaço urbano investigada nesta pesquisa é a escala da *rua*.

Até aqui, os delineamentos discutidos apontam pistas para que a presente pesquisa alcance do objetivo geral. Estes apontamentos são sistematizados nos seguintes **objetivos específicos**: (i) definir a escala urbana de investigação; (ii) identificar a teoria acústica e o método de abordagem que se adequem à escala de investigação previamente definida; (iii) identificar os parâmetros acústicos comumente encontrados na literatura para avaliar o desempenho acústico

urbano na escala de investigação proposta; (iv) definir os detalhes arquitetônicos e os cenários de inserção nos espaços urbanos a serem investigados; (v) desenvolver e simular os cenários de inserção no espaço urbano contendo os detalhes arquitetônicos anteriormente definidos.

Para apresentar o processo teórico e experimental percorrido para o atendimento dos objetivos propostos, o texto desta pesquisa segue a seguinte **estrutura**:

- O primeiro capítulo (**1 – Introdução**), apresenta o contexto que leva ao estabelecimento da hipótese e do objetivo da pesquisa, antecipa e introduz os principais delineamentos deste estudo, bem como sua estrutura de texto.
- O segundo capítulo (**2 - A propagação sonora em espaços abertos**) discorre sobre os diversificados fenômenos acústicos que acontecem em espaços abertos e em específico no espaço urbano; trata da acústica urbana em macroescala, abordando particularmente o mapeamento acústico.
- O terceiro capítulo (**3 - A acústica e a microescala urbana**) apresenta e discorre sobre os conceitos e as pesquisas envolvidas na investigação de espaços urbanos de pequenas dimensões, seus respectivos métodos e parâmetros comumente investigados.
- O quarto capítulo, (**4 - Método da pesquisa**) delinea as relações das variáveis de pesquisa e das condições experimentais; descreve o processo de definição dos cenários urbanos de rua e das simulações acústicas computacionais; e apresenta a forma de análise de dados.
- O quinto capítulo (**5 – Apresentação e discussão dos resultados**) apresenta as discussões acerca dos dados acústicos obtidos com as simulações computacionais para os parâmetros investigados;
- O sexto capítulo (**6 - Conclusões**) apresenta um panorama geral dos resultados da pesquisa, indicando possibilidades de futuras investigações.

2. A propagação sonora em espaços abertos

A propagação sonora em espaços abertos pode ser apreendida enquanto um sistema composto por três componentes essenciais: a fonte, a trajetória e o receptor (ANDERSON; KURZE, 1992; LANG; BERANEK, 1992). Em condições acústicas idealizadas, onde a propagação ocorre sem a presença de quaisquer obstáculos ou fenômenos físicos externos interferentes, existe a situação de campo livre (PALAZZUOLI; LICITRA, 2013).

Sound in a free field is unreflected, unabsorbed, undeflected, undiffracted, unrefracted, undiffused, and not subjected to resonance effects. In most practical applications, these are all factors that could (and do) affect sound leaving a source (EVEREST; POHLMANN, 2009, p. 33).

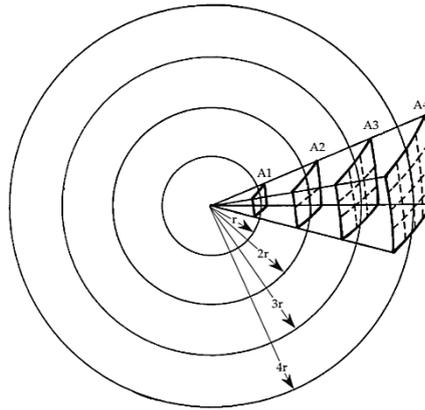
Na prática, a aproximação destas condições existe exclusivamente em câmaras anecóicas. Chamadas na década de 1950 de *free-field sound room*, estas câmaras são salas projetadas e construídas com máxima absorção sonora de modo a tornar a contribuição das reflexões do fechamento insignificantes ou desprezíveis (OLSON, 1957). Daí deriva-se o termo campo livre, implicando um espaço “livre de reflexões”, onde todo o som relevante é apenas o som direto e não há, de modo algum, sons provenientes de reflexões (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

No entanto, o campo livre é uma referência de propósito bem mais teórico do que empírico, sendo pouco encontrada tais condições em espaços abertos: na prática, a interferência na propagação acontece desde os primeiros avanços da onda sonora na multiplicidade de trajetos possíveis. Essa influência ocorre principalmente através das relações com a fonte sonora (i), o solo (ii), as condições atmosféricas (iii) e a forma urbana (iv).

As fontes sonoras (i) tipicamente encontradas em espaços abertos são as fontes pontuais e as lineares. Uma fonte pode ser considerada pontual quando suas dimensões são pequenas em relação às distâncias em que são analisadas (LONG, 2006). Então, quanto mais distante o receptor está da fonte sonora, mais ela se comporta como uma fonte pontual, independentemente de seu tamanho (EVEREST; POHLMANN, 2009; MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). A fonte pontual irradia energia sonora uniformemente em

todas as direções, e é habitualmente associada a uma esfera pulsante (HANSEN, 2005). Essa associação à esfera pulsante consiste em uma analogia essencial para o entendimento de seu modo de propagação sonora: se a área da superfície de uma esfera é $4\pi r^2$, qualquer porção de área de sua superfície varia em função do quadrado do seu raio (Figura 1).

Figura 1 – Aumento área da superfície em função do raio da esfera pulsante.



Fonte: EVEREST; POHLMANN, 2009, p. 34.

Assim, na fonte pontual, a intensidade sonora (I), entendida como potência sonora por unidade de área, irá diminuir com o quadrado de seu raio, caracterizando a lei do inverso do quadrado (Equação 1) (EVEREST; POHLMANN, 2009).

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Onde:

I = intensidade sonora em watt/m²

W = potência sonora em watt

r = distância da fonte em m

O que determina a capacidade de uma fonte produzir som é a sua potência sonora (W) que consiste na quantidade de energia acústica que é transferida de uma fonte vibrante para um meio material por unidade de tempo (BISTAFA, 2006; KANG, 2007). Mas assim como outros descritores acústicos, a potência sonora varia enormemente, e o *nível* de potência (L_w) (Equação 2) é utilizado para reduzir a extensão dos valores, utilizando 10^{-12} W como valor de referência (LONG, 2006). Logo, o nível de potência é o descritor preferencial para a medida da potência sonora total irradiada por uma fonte em todas as direções e é normalmente dado em função da frequência, como por exemplo, em bandas de oitava (LANG; BERANEK, 1992).

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (2)$$

Onde:

L_w = nível de potência sonora em dB

W = potência sonora em watt

W_{ref} = potência sonora de referência (10^{-12} w)

Mas o descritor ideal para relacionar a percepção humana à energia sonora produzida por uma fonte não é o nível de potência sonora tampouco sua intensidade, e sim o nível de pressão sonora (L_p), igualmente representado pela notação *sound pressure level* (SPL) (Equação 3). Fortemente relacionada à sensação subjetiva de “volume” do som (BISTAFA, 2006), a pressão sonora representa a mudança da pressão estática num dado instante causada pela presença de uma onda sonora (KANG, 2007). O nível de pressão sonora é a sua representação logarítmica, que além de melhor se adaptar às respostas não lineares da percepção do sistema auditivo humano, é de fácil medição e possibilita comparações entre fontes diversificadas através da compressão logarítmica de valores (HANSEN, 2005; KANG, 2007; MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

$$SPL = 10 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 \quad (3)$$

Onde:

SPL = nível de pressão sonora em dB

P = pressão sonora em Pascal (Pa)

P_{ref} = pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa)

Estas grandezas - potência, intensidade e pressão sonora - são as três bases fundamentais para o estudo da acústica em espaços abertos e para o entendimento do sistema *fonte-trajetória-receptor*, que em síntese representam as características intrínsecas da fonte sonora – potência; seu modo de transportar energia – intensidade; e a maneira como o receptor percebe essa fonte – pressão sonora. Matematicamente, para uma fonte puntiforme em campo livre, essas grandezas se inter-relacionam a partir da Equação 4:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p_{eficaz}^2}{\rho c} \quad (4)$$

Onde:

I = intensidade sonora em watt/m²

W = potência sonora em watt

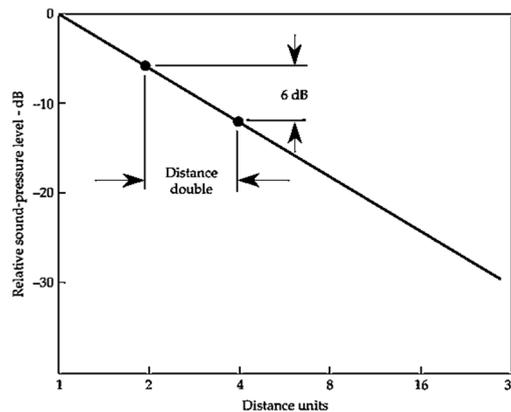
r = distância da fonte em m

ρ = densidade do meio em kg/m³

c = velocidade de propagação do som no meio em m/s

Como a intensidade sonora é proporcional ao quadrado da pressão sonora, a lei do inverso do quadrado passa a atuar como a lei do inverso da distância para a pressão sonora, ou seja, sendo o raio “r” a distância entre a fonte e o receptor, quanto maior a distância da fonte, menor sua pressão sonora (EVEREST; POHLMANN, 2009). Portanto, em condições ideais de campo livre, o nível de pressão sonora de uma fonte pontual decai 6 dB para cada dobro de sua distância a fonte (Figura 2), (LANG; BERANEK, 1992). Ainda que em uma situação real de propagação sonora em espaços abertos a influência de outros elementos impossibilite a constância de 6 dB no decaimento sonoro, essa lei fornece o princípio prático para entendimento e estudo de diversas situações de propagação sonora em espaços abertos. Tornando assim, o SPL relacionado à distância um importante descritor de estudos em acústica urbana.

Figura 2 - Decaimento sonoro com a distância.



Fonte: EVEREST; POHLMANN, 2009, p. 35.

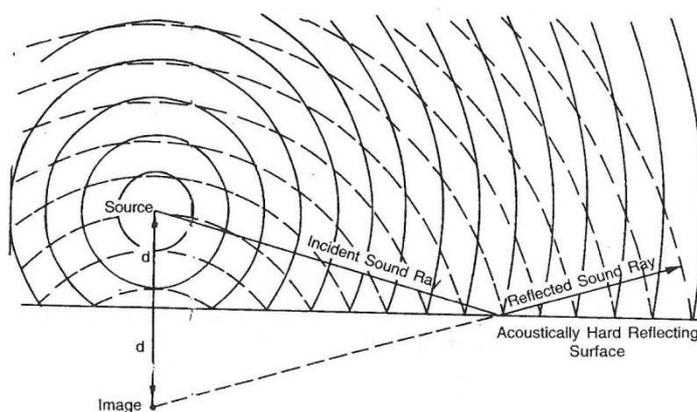
O decaimento do nível sonoro com a distância também se aplica a fontes *não*-pontuais. Fontes *não*-pontuais ocorrem quando suas dimensões são extensas em relação às distâncias em que são analisadas, e assim, passam a ser consideradas fontes lineares, como as vias de tráfego (LONG, 2006). Enquanto a propagação sonora de uma fonte pontual pode ser associada à esfera

pulsante, na mesma linha de analogia, a propagação sonora de uma fonte linear pode ser associada a um cilindro pulsante. Como a área da superfície de um cilindro é dada por $2\pi rl$ - sendo o raio “r” a distância da fonte ao receptor, e “l” o comprimento da fonte - a relação de decaimento de nível de pressão sonora com a distância passa a ser de 3 dB a cada dobro da distância (EVEREST; POHLMANN, 2009).

As relações da diminuição do nível de pressão sonora a uma mesma distância de uma fonte pontual (6 dB) e de uma fonte linear (3 dB) evidenciam que o decaimento da fonte linear é mais lento do que um de uma fonte pontual, mas não necessariamente subjetivamente mais perceptível ao receptor.

Fora do campo livre, esses valores de decaimento sonoro podem variar bastante e um dos primeiros elementos a interferir nessa propagação é o solo (ii). Em uma situação real de propagação em espaços abertos, onde comumente a fonte e o receptor estão em planos próximos, a onda sonora alcança o receptor tanto diretamente quanto através de reflexões do solo (BRAMBILLA, 2001). Em superfícies de solo acusticamente rígidas grande parte do som incidente será refletido suscitando a consideração de uma nova projeção de fonte sonora de onde se originam novos raios sonoros e nova frente de onda (Figura 3), (SINGAL, 2005).

Figura 3 – Novos raios e frente de onda a partir da reflexão em superfícies acusticamente rígidas.



Fonte: SINGAL, 2005, p. 3.

A geração dessa nova frente de onda dependerá do tipo de superfície do solo e de sua capacidade de reflexão ou absorção. Em acústica urbana costuma-se assumir grama, terra arada, solo rachado ou coberto com outros tipos de vegetação, incluindo árvores e elementos vegetais soltos, como superfícies acusticamente macias e, portanto, absorventes; enquanto

concreto, asfalto, terra batida, solo encharcado, água, e, quaisquer outras superfícies com baixa porosidade, são admitidas como superfícies acusticamente rígidas e, portanto, reflexivas (ANDERSON; KURZE, 1992; BRAMBILLA, 2001; ISO, 1996).

O solo, ou o piso⁴, atuando enquanto plano reflexivo possui a capacidade de transformar a direção de propagação sonora de uma fonte pontual (HANSEN, 2005): a presença da superfície do piso impede que a energia se propague uniformemente, fazendo com que a onda sonora procure a direção não obstruída, aumentando cumulativamente os seus níveis sonoros (ANDERSON; KURZE, 1992).

Essa variação de nível de pressão a partir da direção de propagação de uma fonte sonora é chamada de diretividade (LONG, 2006). Seu termo acústico é o fator de diretividade (Q_θ) que expressa a relação entre a intensidade sonora irradiada por uma fonte direcional e a intensidade sonora dessa mesma fonte se ela fosse omnidirecional (ORTEGA, 2009).

De modo análogo, por relacionar a fonte sonora e a proximidade a múltiplos planos, o fator de diretividade refere-se ao número de vezes que uma esfera pode ser “dividida”. Assim sendo, na presença do solo têm-se 1 plano dividindo a esfera e sua direção não obstruída para propagação sonora refere-se a $\frac{1}{2}$ da esfera; na presença do solo e de uma edificação têm-se 2 planos dividindo a esfera e sua direção não obstruída refere-se a $\frac{1}{4}$ da esfera.

Outra importante variável vinculada à diretividade da fonte é o índice de diretividade (DI_θ) que consiste na diferença em decibels entre o nível de pressão sonora de uma fonte em uma determinada direção e o nível de pressão sonora de uma fonte omnidirecional (LONG, 2006). Na prática, o índice de diretividade representa o ganho que uma fonte sonora terá em relação às propriedades do seu contexto de emissão sonora ou, em outras palavras, o acréscimo que a “divisão da esfera” proporcionará.

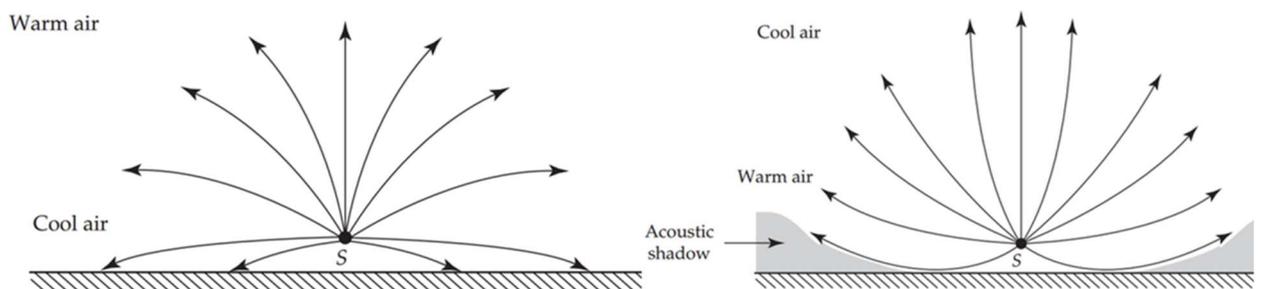
Outros fatores de interferência na propagação sonora em espaços abertos – além das relações com a fonte sonora, com a distância percorrida até o receptor, e com o solo – são as condições atmosféricas (iii), que incluem efeitos acústicos associados à temperatura, o vento e a umidade.

⁴ Ambos os termos *solo* ou *piso* serão utilizados por esta pesquisa para designar a superfície que "pode ser pisada pelos homens e pelos animais e pode servir de base ou apoio para as coisas" (HOUAISS; VILLAR, 2001) independentemente da sua composição material, a não ser quando o material venha especificado juntamente com respectivos termos: *e.g.* solo arenoso, piso de concreto.

A temperatura e o vento influenciam a propagação através da mudança de direção da onda sonora. Já a temperatura e a umidade influenciam a propagação sonora através da absorção atmosférica, interferindo mais fortemente nas altas frequências.

Quando a temperatura e o vento alteram as características da natureza do meio de propagação alterando a velocidade da onda sonora, sua direção também é modificada. Esse fenômeno acústico é denominado refração que em espaços abertos é associado ao solo enquanto superfície de referência: a onda sonora pode ser refratada afastando-se do solo ou aproximando-se dele (ANDERSON; KURZE, 1992; EVEREST; POHLMANN, 2009; OLSON, 1957). Assim, um gradiente de temperatura positivo, quando a temperatura é menor nas proximidades do solo – como no caso da inversão térmica noturna – refrata a onda sonora na direção ao solo, propiciando aumento dos níveis de pressão sonora. O inverso ocorre quando o gradiente é negativo, reduzindo os níveis sonoros próximos ao solo (Figura 4) (PALAZZUOLI; LICITRA, 2013; SINGAL, 2005).

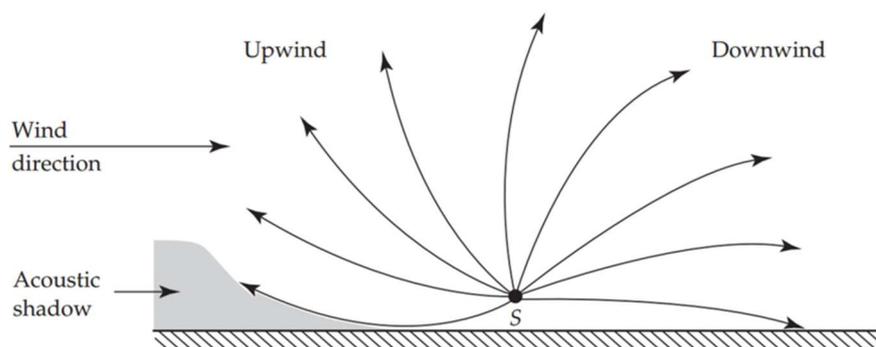
Figura 4 - Refração sonora causada pela variação temperatura.



Fonte: EVEREST; POHLMANN, 2009, p. 121.

No caso do vento, sua velocidade aumenta à medida que a altitude também aumenta, fazendo com que a onda sonora seja refratada em direção ao solo caso ela esteja a favor do vento, aumentando seus os níveis sonoros. Já contra o vento, a onda sonora tende a se afastar do solo propiciando a formação de sombras acústicas que, dependendo da velocidade e altitude, chegam a atenuações de até 30 dB (Figura 5) (SINGAL, 2005).

Figura 5 - Refração sonora causada pelo vento.



Fonte: EVEREST; POHLMANN, 2009, p. 121.

Outro efeito derivado das condições atmosféricas é a absorção, que consiste na atenuação do som durante sua propagação através do ar (ANDERSON; KURZE, 1992). Essa atenuação acontece quando a energia sonora é dissipada em forma de calor e é fortemente dependente da temperatura e da umidade (KANG, 2007; PALAZZUOLI; LICITRA, 2013). A atenuação proporcionada pela absorção do ar varia em função da frequência. Nas baixas frequências a atenuação é pequena, menor do que 1 dB/km. Já nas altas frequências acontece uma progressiva e grande atenuação, chegando a quase 14 dB/km na frequência de 2000Hz, 40 dB/km na frequência de 4000Hz, e aproximadamente 100 dB/km na frequência de 8000Hz (LARSSON, 1997; PALAZZUOLI; LICITRA, 2013).

Ainda assim, a atenuação proporcionada pela absorção atmosférica é geralmente pequena comparada com atenuações causadas pelos outros fatores de interferência na propagação sonora em espaços abertos (ANDERSON; KURZE, 1992). Seguida pela influência do solo, nenhuma outra relação de interferência na propagação da onda sonora é maior em espaços abertos, e especificamente urbanos, do que a influência da forma urbana (iv), que diversifica de modo determinante os avanços da onda sonora na multiplicidade de trajetórias possíveis.

Se a propagação sonora em espaços abertos é compreendida em termos de suas componentes *fonte-trajetória-receptor* então em espaços urbanos os elementos que compõem a forma urbana fazem parte dessa trajetória, portanto, a influência nessa propagação dependerá da escala dimensional desses espaços e sua relação topológica com a fonte e o receptor. Em acústica urbana duas escalas são bastante importantes nos estudos de propagação sonora: a escala da quadra e a escala da rua.

A escala da rua está vinculada ao traçado urbano e às edificações lindeiras a ela. Essa escala possibilita alta percepção às variações das fontes sonoras urbanas para o receptor que transita na própria rua – o pedestre. Uma vez que estão tipicamente próximos – as fontes sonoras urbanas e os receptores pedestres – o trajeto da onda sonora alcança o receptor tanto diretamente quanto através de múltiplas reflexões nos planos próximos que constituem essa rua, dando às edificações um importante e definitivo papel de interferência na trajetória do som (Figura 6). Assim, no espaço urbano a propagação sonora dependerá fortemente das características das edificações que constituem a rua, das propriedades da superfície das fachadas dessas edificações e de sua forma (MINISTERE DES TRANSPORTS, 1980; NGUYEN, 2007; SANTOS; MARTINS, 2005).

De modo geral, duas configurações de seção transversal de ruas são usuais na consideração acústica de ambientes urbanos, o perfil em “U” e o perfil em “L” (MINISTERE DES TRANSPORTS, 1980; NGUYEN, 2007; NIEMEYER; SLAMA, 1998). Nomeada pelos franceses de *rue en U* e costumeiramente chamada de *street canyon*, esse tipo de seção ganhou a denominação de cânion por sua semelhança com o elemento geográfico natural. Deste modo, a rua em cânion é caracterizada por uma grande densidade de construções, com edificações coladas umas às outras, com uma distância muito pequena entre edificações de cada lado da via; são ruas estreitas, com configurações quase contínuas, com fachadas de alturas elevadas, mas constantes e homogêneas (Figura 7 e Figura 8).

Figura 6 - Proximidade típica em ruas urbanas entre o receptores (o pedestres no 1º plano da imagem), a fonte (o tráfego de veículos – 2º plano) e as edificações (3º plano).



Fonte: <http://www.danasoki.top/new-york-city-busy-streets/>. Acesso em 11/05/2016.

Figura 7 - Cânion geográfico.



Fonte: <http://www.canyoneeringusa.com/utah/zion/off-trail/zion-narrows/>. Acesso em 11/05/2016.

Figura 8 - Cânion urbano.



Fonte: <http://www.joeyblsphotography.com/slideshow/chicago-financial-district-lasalle-canyon/>. Acesso em 11/05/2016.

Essas características morfológicas das ruas em cânion possibilitam múltiplas reflexões sonoras entre as fachadas, com reverberação bastante significativa, tornando a rua um campo sonoro reverberante, possibilitando o aumento dos níveis de pressão sonora (MINISTÈRE DES TRANSPORTS, 1980).

Por seu caráter histórico no modo de ocupação urbana as ruas em cânion estão profundamente vinculadas a grande parte dos sítios históricos e antigos centros urbanos das grandes cidades mundiais (Figura 9, Figura 10 e Figura 11). Por isso, suas relações acústicas costumam ser bastante pesquisadas⁵.

Figura 9 - Rua parisiense.



Fonte: <http://www.hberlioz.com/Paris/BP4Calais.htm>. Acesso em 11/05/2016.

Figura 10 - Rua recifense.



Fonte: <https://viagemcafeeprosa.wordpress.com/tag/vida-noturna-recife/>. Acesso em 11/05/2016.

Figura 11 - Rua londrina.



Fonte: <http://www.thebillywilson.com/2014/08/urbanizational-trends.html>. Acesso em 11/05/2016.

Nos tecidos urbanos mais recentes o modo de implantação da edificação tende a privilegiar principalmente relações de conforto ambiental e salubridade, a regulamentação com espaçamento entre uma edificação e outra, e, a admitir edificações com alturas bem maiores. Também é corriqueira a inserção de um embasamento, ou plataforma, que abrange os primeiros pavimentos da edificação onde é habitual a permissão de junção aos lotes laterais, destinados a garagens em edifícios residenciais ou serviços em edifícios comerciais e de múltiplo uso⁶ (Figura 12). Assim, ainda que exista grande parte dos tecidos urbanos com espaçamento entre edificações, em ambientes densamente urbanizados a influência acústica ao

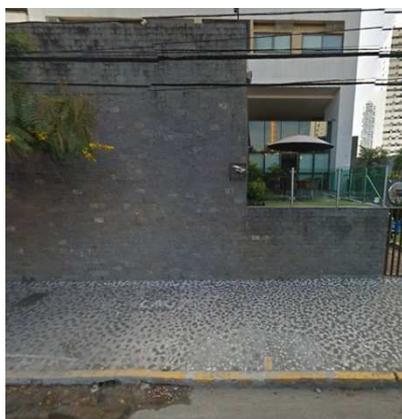
⁵ Entre outras pesquisas destacam-se as seguintes referências: CAN; FORTIN; PICAUT, 2015; GUILLAUME; GAUVREAU; L'HERMITE, 2015; HOROSHENKOV; HOTHERSALL; MERCY, 1999; KANG, 2000; PELAT *et al.*, 2008; RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2010; VAN RENTERGHEM; SALOMONS; BOTTELDOOREN, 2006.

⁶ Outras discussões acerca das edificações, legislação e parâmetros urbanísticos serão tecidas no item 4.2 – *A delimitação das condições experimentais* do Capítulo 4.

nível do pedestre tende a ser de cânion: foi demonstrado que até 2 m de espaçamento lateral entre edificações a onda sonora tende a desprezar esse espaço, propagando-se como se estivesse em um cânion urbano (KANG, 2007).

Quando um espaço urbano não abarca as relações de altura e largura que a caracterizariam como um cânion urbano, quando não há reverberação significativa, e quando predomina o som direto e as primeiras reflexões derivadas da superfície do solo e das edificações, este espaço pode estar relacionado tanto às ruas com perfil em L quanto à espaços urbanos abertos – sem um perfil necessariamente definido. A rua com perfil L é caracterizada pela presença de edificações quase contínuas com fachadas altas e homogêneas em apenas um dos lados da via (Figura 13). Já o espaço urbano aberto, sem um perfil definido, possui edificações espaçadas, distantes uma da outra e frequentemente apresenta baixa densidade construtiva e a presença de espaços livres como praças, jardins e estacionamentos (Figura 14), (MINISTERE DES TRANSPORTS, 1980).

Figura 12 - Garagem colada no lote de edifício residencial em Recife-PE.



Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@-8.0520449,-34.9049463,3a,75y,264.77h,87.26t/data=!3m6!1e1!3m4!1seezDZqVA2Ik1PJeFaRvMHQ!2e0!7i13312!8i6656>. Acesso em 11/05/2016.

Figura 13 - Rua Joseph de Maistre em Paris, França, com perfil em L.



Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@48.8873,2.3322788,3a,60y,9.07h,90t/data=!3m6!1e1!3m4!1sP7VJki5s7F-g8dr2C1HoyA!2e0!7i13312!8i6656>. Acesso em 02/05/2017.

Figura 14 - O ciclo básico da Unicamp configura um espaço urbano aberto.



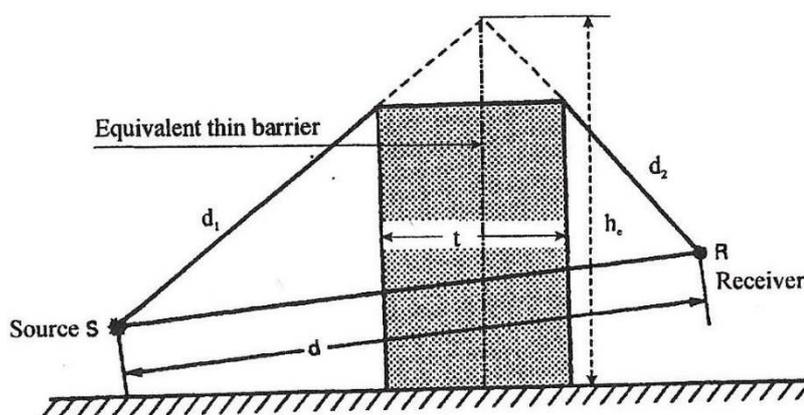
Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@-22.8163921,-47.0701448,3a,75y,309.43h,95.09t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipPZ8I7DhPFN7xr8EJLeQouc87qj-7LU37atFELg!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Fih5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipPZ8I7DhPFN7xr8EJLeQouc87qj-7LU37atFELg%3Dw203-h100-k-no-pi-0-ya99.611435-ro-0-fo100!7i8704!8i4352>. Acesso em 02/05/2017.

Estas diferentes características da escala da rua, se em L, cânion ou espaço aberto, delineiam a interface que a rua terá com a escala da quadra: o perfil de caracterização de uma rua indicará

se uma quadra ou quarteirão tenderá a ser mais ou menos permeável acusticamente. Quadras com configurações tipicamente fechadas, envoltas em ruas com perfil cânion, são menos permeáveis à exposição de ondas sonoras em seu interior. Já as quadras com configurações abertas, com espaços livres entre as edificações, permitem um maior avanço da onda sonora em seu interior (MINISTÈRE DES TRANSPORTS, 1980; NIEMEYER; SANTOS, 2001; NIEMEYER; SLAMA, 1998; SANTOS; MARTINS, 2005).

Quando protegem o interior de uma quadra, tornando-a menos permeável acusticamente, as edificações atuam enquanto barreiras acústicas, que se constituem por quaisquer obstáculos que impeça a linha de visão entre uma fonte e um receptor propiciando a criação de uma sombra acústica a partir da difração da onda sonora (Figura 15) (KANG, 2007). O espaço urbano aberto possui uma diversidade de elementos e arranjos que podem atuar enquanto barreiras acústicas – muros, taludes naturais ou artificiais, edificações, entre outros.

Figura 15 - Barreira acústica.



Fonte: BRAMBILLA, 2001, p. 27.

As dimensões e abrangência da escala da rua e da quadra são bastante vinculadas a maneira como as pessoas – os receptores – percebem o espaço e os sons nele produzidos. Essa interação entre o ambiente, as pessoas que o ocupam e sua caracterização sonora é nomeada de paisagem sonora conceito proposto por R. Murray Schafer em *The tuning of the world* de 1977⁷ (KANG; ZHANG, 2010; MARRY; DEFRANCE, 2013).

A formação da paisagem sonora urbana acontece espontaneamente como o resultado das atividades típicas que ocorrem em espaços urbanos abertos. Por envolver a percepção, sua

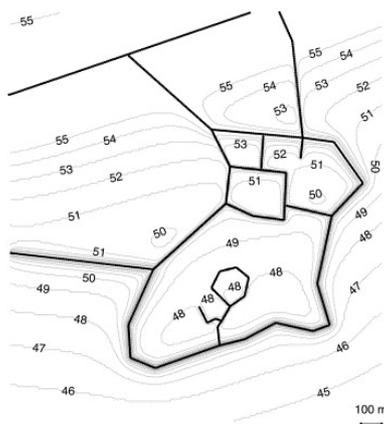
⁷ Republicado em 1994 como *The soundscape: our sonic environment and the tuning of the world*.

avaliação tende a ser subjetiva. Apesar disso, o parâmetro objetivo nível de pressão sonora equivalente (L_{Aeq}) tem demonstrado boa correlação com a audibilidade e incômodo, constituindo em uma boa escolha para estudos de paisagens sonoras (BOTTELDOOREN; DE COENSEL; DE MUER, 2006).

Assim como nos estudos de paisagem sonora, quando outras investigações em acústica urbana costumam abranger o alcance espacial da rua ou da quadra, são nomeadas de acústica em microescala urbana. Quando essa delimitação é ampliada, abrangendo bairros inteiros, cidades ou longos percursos lineares, tais como vias expressas e grandes avenidas estruturais, as investigações passam a ser qualificadas como acústica urbana em macroescala.

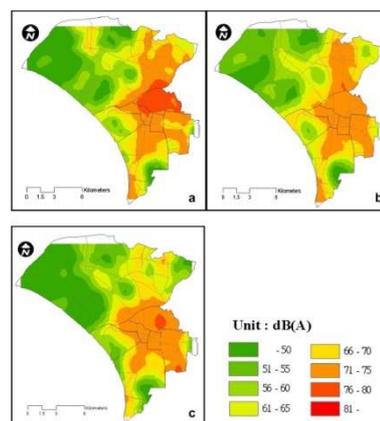
Os estudos em macroescala são habitualmente associados ao mapa acústico, uma maneira de apresentar a distribuição geográfica de níveis sonoros, em termos de parâmetros objetivos medidos ou calculados (KANG, 2007). Também nomeado de mapa de ruído e carta acústica, o conceito de associar um mapa à distribuição acústica não é recente: já foram utilizadas representações geográficas de níveis medidos por pontos, linhas, hachuras e interpolação em graduação de cor (Figura 16 e Figura 17). Hoje, a representação mais comum de mapas acústicos baseia-se em diferentes métodos – e *softwares* – de cálculo, que produzem como resultado final imagens que permitem a rápida visualização de níveis sonoros em diferentes graduações de cor (Figura 18).

Figura 16 - Mapa acústico em isolinhas da cidade de Göteborg na Suécia.



Fonte: (THORSSON; ÖGREN; KROPP, 2004, p. 319).

Figura 17 - Mapa acústico interpolado da cidade de Taiwan na China.



Fonte: (TSAI; LIN; CHEN, 2008, p. 4).

Figura 18 - Mapa acústico calculado do centro de Manchester no Reino Unido.



Fonte: (WANG, BO; KANG, 2011, p. 566).

Contudo, a produção desses mapas acústicos é uma questão bem mais complexa do que a objetiva e rápida visualização do seu produto final, especialmente em ambientes com múltiplas variáveis, como são essencialmente os centros urbanos (LICITRA, 2013).

Essa complexidade do mapa acústico reside na determinação e uso de uma série de algoritmos matemáticos responsáveis por abarcar as interfaces e atenuações acústicas segundo os princípios da propagação sonora ao ar livre relacionada à determinação da fonte sonora, da geometria do meio de propagação, e do efeito do solo e das condições atmosféricas. A Equação 5 representa matematicamente a base da propagação sonora ao ar livre para uma fonte pontual⁸ (ANDERSON; KURZE, 1992).

$$L_p(r) = L_w - 20 \log \frac{r}{1m} + DI_{revr} - 10 \log \frac{\Omega}{4\pi} - 11 - A_{combined,revr} \quad (5)$$

Onde:

L_p = nível de pressão sonora em dB

L_w = nível de potência sonora em dB

r = distância da fonte em m

DI_{revr} = índice de diretividade da fonte sonora em dB

Ω = ângulo sólido em rad

$A_{combined,revr}$ = atenuação combinada⁹ em dB

Desse entendimento básico de propagação sonora ao ar livre, deriva-se uma série de métodos de cálculo utilizado na execução dos mapas. Algoritmicamente simplificados, empíricos ou semiempíricos, os métodos são customizados para situações diversas atendendo desde normas legislativas específicas como a legislação nórdica NMT ou inglesa BS 5228, até tipos particulares de fonte sonora - ruído de tráfego, industrial, aéreo e ferroviário. Os métodos ISO 9613, CONCAWE, Calculation of Road Traffic Noise (CRTN), Calculation of Railway Noise (CRN), NORD2000 e HARMONOISE são os mais empregados na execução de mapas acústicos (ATTENBOROUGH; LI; HOROSHENKOV, 2007). Todos esses métodos atendem à Diretiva Europeia 2002/49/CE (PARLAMENTO EUROPEU, 2002), também conhecida

⁸ Esta é uma equação básica de propagação ao ar livre que contém efeitos de divergência da onda, diretividade da fonte sonora, e efeitos de grandes superfícies (ANDERSON; KURZE, 1992). Simulações acústicas computacionais fundamentadas em acústica geométrica utilizam outros métodos para consideração da propagação sonora, como será visto no Capítulo 3 - *A acústica e a microescala urbana*.

⁹ Inclui: atenuação entre barreiras e a relação com a atenuação do solo; atenuação entre a relação de gradientes de vento, temperatura e o solo; atenuação entre gradientes de vento temperatura e a presença de barreiras (ANDERSON; KURZE, 1992).

como *Environmental Noise Directive* (END), que regula a produção de mapas acústicos em toda União Europeia (UE).

A execução prática desses mapas acontece através da aplicação dos métodos de cálculo em diferentes *softwares* comerciais, tais como CadnaA (DataKustic), SoundPlan (Brauntein + Berndt GmbH) e Predictor (Brüel & Kjør). Deste modo, devido à vanguarda normativa da UE, à ampla participação governamental de seus países membros, e ao investimento de empresas privadas em aperfeiçoamento de *softwares* nas últimas décadas, o mapeamento acústico possui como referências mais avançadas nesse campo de pesquisa os países europeus.

Nesses países, além de serem conduzidas investigações empírico-aplicadas para análise e aperfeiçoamento das teorias de acústica urbana, por sua riqueza de dados e versatilidade de uso, o mapeamento acústico vêm sendo utilizado como referência e instrumento para decisões de gestão e planejamento urbano facilitando o desenvolvimento de políticas para prevenção, controle e monitoramento do ruído urbano (KLÆBOE; ENGELIEN; STEINNES, 2006; TSAI; LIN; CHEN, 2008).

No Brasil, o desenvolvimento e abrangência do mapeamento acústico ainda está em lento processo de evolução: apenas recentemente foi sancionada a primeira legislação que regulamenta a execução de mapas acústicos, mas somente para a cidade de São Paulo – a *Lei municipal 16.499/2016 Mapa do Ruído Urbano*. Apesar disso, existem há algum tempo investigações científicas brasileiras fundamentadas em mapeamento acústico em diferentes escalas e graus de aprofundamento nas cidades de Minas Gerais (LOURA; VALADARES, 2003), Aracaju (GUEDES; BERTOLI; ZANNIN, 2011), Recife (SOUZA, 2010), Rio de Janeiro (MARDONES, 2009), Belém (MORAES; LARA, 2005), Maringá (VENTURA *et al.*, 2008), Fortaleza (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2013) e Florianópolis (SAPATA *et al.*, 2010).

Apesar da importância de sua aplicabilidade, muitas simplificações são incluídas nos métodos de cálculo dos mapas, tanto para descrever a emissão sonora quanto sua propagação, tornando a precisão dos resultados um dos maiores desafios do mapeamento acústico de um espaço urbano (KANG, 2007; PROBST, 2013). Algumas das aproximações acontecem por discrepâncias entre o real fenômeno físico e suas simplificações dos métodos, outras por

inviabilidade tecnológica de processamento dos *softwares* onde são normalmente executados os mapas (PROBST, 2013).

Tais aproximações, associadas aos dados de inserção, permitem o aumento da margem de erro e incerteza dos mapas, e assim sendo, aumentam tanto a possibilidade de obtenção de parâmetros imprecisos quanto de comprometer a confiabilidade dos resultados (ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015). Hoje, a margem de erro na produção dos mapas acústicos é da ordem de 5 dB, valor considerado alto para ser o máximo de incerteza admitido pelo Guia de Boas Práticas para Mapas Estratégicos de Ruído da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2006; LICITRA; MEMOLI, 2008).

Parte do erro existente nos mapas acústicos deriva-se da desconsideração em sua elaboração da presença de detalhes arquitetônicos nas edificações constituintes do espaço urbano: no contexto de grande escala de execução e das simplificações algorítmicas, a forma das edificações acaba sendo derivada dos perímetros encontrados nas plantas geográficas cadastrais, ou dos sistemas georeferenciados utilizados como base para a produção destes mapas, sem a consideração dos detalhes em sua forma, tais como varandas, sacadas, jardineiras, marquises, *baywindows*, septos verticais, septos horizontais, beirais, *brise-soleils*, entre outros (Figura 19, Figura 20 e Figura 21).

Figura 19 – Detalhes existentes em uma edificação real na cidade de Caruaru-PE.



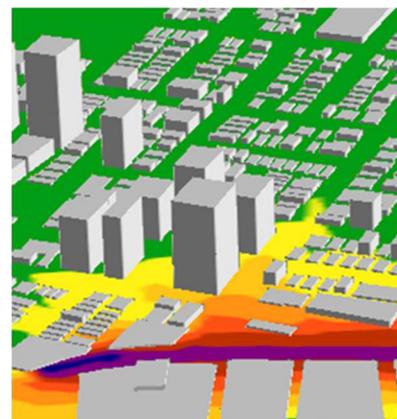
Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@-8.2718425,-35.9735574,3a,87.8y,245.77h,126.29t/data=!3m6!1e1!3m4!1sHdOJBq4NUgU0X6TPLzOC-Q!2e0!7i13312!8i6656!6m1!1e1>. Acesso em 11/05/2016.

Figura 20 – Detalhes existentes em uma edificação real na cidade de Caruaru-PE.



Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@-8.2712392,-35.9738213,3a,75y,301.23h,111.51t/data=!3m6!1e1!3m4!1sKupEKv5exK7ku6cK47y34Q!2e0!7i13312!8i6656!6m1!1e1>. Acesso em 11/05/2016.

Figura 21 – Caracterização das edificações das imagens 19 e 20 no mapa acústico da cidade de Caruaru-PE.



Fonte: (ROCHA *et al.*, 2014).

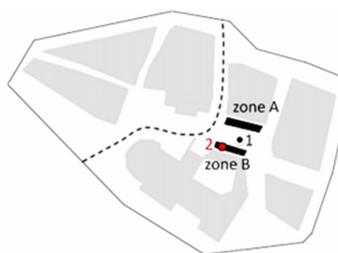
Ou seja, nesses mapas, as edificações são consideradas com morfologia que, muitas vezes, pouco se assemelha ao real, sem qualquer variação mais expressiva de volume, sendo retratadas, e calculadas, como blocos monolíticos, e prismas puros.

Isto posto - tanto pela incerteza envolvida nas aproximações dos métodos de cálculo, quanto pela inviabilidade tecnológica dos *softwares* específicos de mapeamento acústico em caracterizar mais fielmente a geometria desses espaços abertos - os estudos urbanos que necessitam de maior minúcia e precisão, envolvendo parâmetros objetivos e subjetivos, são executados através dos métodos de cálculo que englobam a microescala da acústica urbana. Esses métodos podem ser aplicados tanto em termos de procedimentos analíticos quanto computacionais e se apropriam, teórica e empiricamente, das estratégias comumente utilizadas em acústicas de salas constituindo o estado da arte em estudos de acústica urbana em microescala. Um olhar detalhado do estudo da acústica urbana em microescala será conduzido no capítulo que se segue.

3. A acústica e a microescala urbana

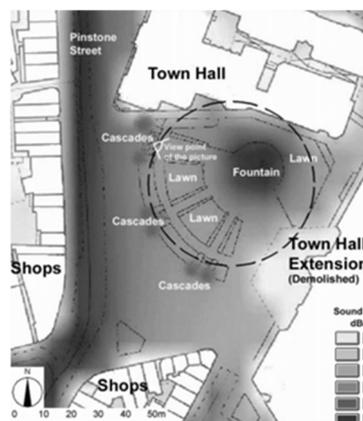
As investigações em acústica urbana que envolvem o alcance espacial da rua ou aquelas que ampliam sutilmente esta escala incorporando trajetos lineares facilmente percorridos e apreendidos em uma caminhada são qualificadas como estudos em microescala urbana. O termo foi empregado pela primeira vez por Kang na década de 2000, adaptando livremente *microscopic* e *macroscopic* como referência aos métodos de abordagem acústica feita por Kuttruff em 1975¹⁰ (KANG, 2001; KANG; MENG; BROWN, 2003). Ruas, esplanadas, praças, jardins, pátios entre outros espaços abertos representam a delimitação espacial da acústica urbana em microescala (Figura 22, Figura 23 e Figura 24).

Figura 22 - Planta esquemática de estudo acústico em microescala de um pátio na Bélgica.



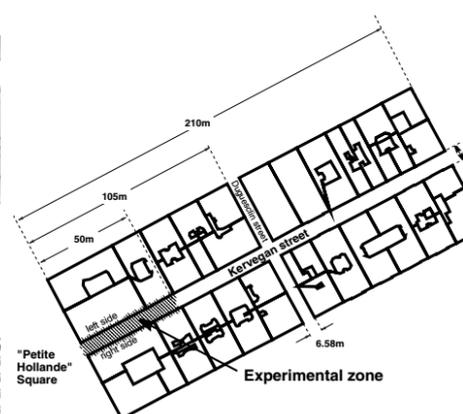
Fonte: RYCHTÁRIKOVÁ *et al.*, 2014, p. 145.

Figura 23 - Planta esquemática de estudo acústico em microescala de uma praça na Inglaterra.



Fonte: YANG; KANG, 2005b, p. 65.

Figura 24 - Planta esquemática de estudo acústico em microescala urbana de uma rua na França.



Fonte: PICAUT *et al.*, 2005, p. 152.

Nas investigações em microescala urbana o principal parâmetro acústico analisado tem sido a distribuição dos níveis de pressão sonora¹¹ (KANG, 2007). Essa preferência é derivada da excelência do parâmetro em descrever a sensação subjetiva do quão intenso é um som ao sistema auditivo humano. Esta sensação é nomeada audibilidade ou *loudness*, apontada coloquialmente como “volume” (FLETCHER; MUNSON, 1933).

¹⁰ No artigo “On calculating average levels and level fluctuating of street noise” do periódico *Acustica*, hoje *Acta Acustica united with Acustica*, volume 32, número 2 de fevereiro de 1975.

¹¹ Conceituado e discutido no capítulo anterior.

Além da pressão sonora, a reverberação é um fenômeno físico que também tem sido investigado com atenção em microescala urbana (KANG, 2007). A reverberação, igualmente chamada de decaimento sonoro, é um processo de reflexões múltiplas onde a cada nova reflexão se perde energia até o som tornar-se inaudível (KUTTRUFF, 2009; SABINE, 1922). O parâmetro acústico vinculado a este fenômeno é o tempo de reverberação ou *reverberation time* (RT ou T), proposto por Wallace Clement Sabine no final do século XIX. O RT é definido como sendo o tempo necessário para que o nível de pressão sonora de um ambiente decaia 60 dB após a interrupção de uma fonte sonora contínua. Na prática, devido às flutuações sempre presentes nas curvas de decaimento sonoro, são utilizados intervalos menores para essa determinação como os trechos de -5 dB a -35 dB (T30) ou -5 dB a -25 dB (T20) ambos ainda relacionados matematicamente ao decaimento de 60 dB (GADE, 2007; SABINE, 1922). Outro parâmetro acústico vinculado ao decaimento sonoro é o tempo inicial de decaimento ou *early decay time* (EDT). O EDT também se refere a um intervalo da curva de decaimento, mas diferentemente do RT, seu intervalo corresponde aos -10 dB iniciais (ATAL; SCHROEDER; SESSLER, 1965; JORDAN, 1970).

Por descrever uma das sensações subjetivas mais facilmente percebidas pelo sistema auditivo humano – a sensação de permanência do som, ou reverberância – ambos os parâmetros, RT e EDT, são fundamentais em investigações de espaços urbanos em microescala. Apesar de ambos caracterizarem a percepção de reverberância, o EDT demonstra ser melhor descritor do que o T30¹². Isto ocorre porque ao longo do tempo de decaimento de sons continuados, a parte tardia do T30 é mais fraca do que a parte inicial. Por ser mais fraca, pode ser mascarada pelas novas partes subsequentes do som continuado. Assim, por referir-se aos primeiros -10 dB, parte inicial do decaimento sonoro, os valores objetivos do EDT são melhores correlacionados a sensação subjetiva de reverberância (ATAL; SCHROEDER; SESSLER, 1965; GADE, 2007; JORDAN, 1970).

A importância de análise do SPL, T30 e EDT na microescala urbana reside na minúcia de interconexão destes três parâmetros: o aumento de T30 pode levar ao aumento da percepção de audibilidade; por sua vez, o EDT descreve melhor a sensação de reverberância do que o T30, e assim, seu aumento também pode estar melhor relacionado à percepção de aumento de volume sonoro no espaço urbano. A variação destas percepções é determinada através do *just*

¹² Deste ponto em diante o T30 é o termo, e intervalo, adotado por esta pesquisa para referir-se ao tempo de reverberação.

noticeable difference (JND) que significa a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros. Para o SPL a menor variação percebida é de 1 dB, para o T30 e EDT a variação é equivalente a 5% do valor absoluto do parâmetro (FASTL; ZWICKER, 2007; GELFAND, 2004; ISO, 2009; VORLÄNDER, 1995).

Sendo assim, pelo vínculo entre a percepção de audibilidade e a sensação de reverberância existente na relação do SPL, T30 e EDT, estes são os três parâmetros acústicos utilizados como referência pela presente pesquisa para atingir o objetivo de demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho da acústica urbana. Estes parâmetros também são analisados em termos de percepção com o JND. Como o JND significa a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros (GELFAND, 2004), encontrar diferenças em relação ao JND de cada parâmetro para os cenários urbanos investigados, significará constatar que a presença de detalhes não só altera o desempenho acústico do espaço urbano, como possivelmente também alterará a percepção acústica de quem ocupa estes espaços.

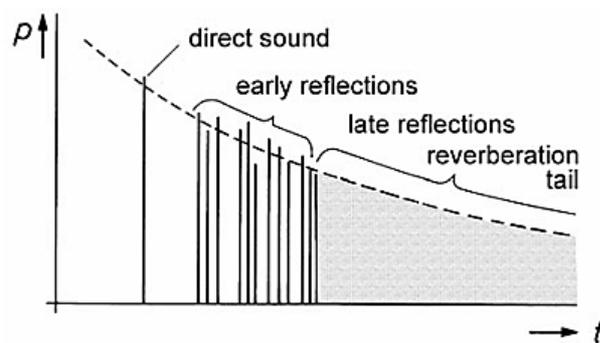
Para a obtenção dos parâmetros SPL, T30 e EDT a curva de decaimento de energia sonora pode ser produzida a partir de dois métodos: o do ruído ou fonte interrompida (*Interrupted Noise Method*), e, o método da resposta impulsiva (*Integrated Impulse Response Method – IR*). O primeiro registra diretamente o decaimento do nível de pressão sonora após a interrupção de uma fonte com sinal sonoro em banda larga de frequência. O segundo obtém o decaimento através da integração inversa quadrática da resposta impulsiva, que por sua vez, consiste no comportamento temporal do nível de pressão sonora em um dado ponto receptor como resultado da emissão de um impulso de Dirac¹³ (ISO, 2009).

Proposta por Schroeder em 1965, a resposta impulsiva de um espaço contém com precisão toda a informação das características sonoras necessárias à obtenção da maior parte dos parâmetros de análise do desempenho acústico. Por isso, tanto medições acústicas *in situ*, quanto simulações acústicas em modelos reduzidos em escala, ou, em modelos virtuais computacionais, costumam utilizá-la como um dos princípios teóricos de obtenção de parâmetros (ARAU, 1999; CHRISTENSEN; KOUTSOURIS; GIL, 2016; ISO, 2009; SCHROEDER, 1965).

¹³ É uma função para um pulso cujo valor tende ao infinito quando o tempo é igual a zero, se dissipando em todos os outros tempos (KUTTRUFF, 2007).

Sendo a resposta impulsiva um estímulo sonoro, o som recebido em um espaço a partir desse estímulo, pode ser compreendido a partir de três componentes: o som direto (*direct sound*), as primeiras reflexões (*early reflections*), e o som reverberante tardio (*late reflections* e *reverberant tail*), (Figura 25). O som direto se propaga como uma linha direta entre a fonte e o receptor. Em seguida, surgem as primeiras reflexões proporcionadas pela incidência da onda sonora nos elementos arquitetônicos existentes no espaço - como teto, piso e paredes laterais em espaços fechados; e muros, pisos e fachadas em espaços urbanos abertos (BARRON, 2010).

Figura 25 – Resposta impulsiva.



Fonte: BLAUERT; XIANG, 2009, p. 168.

Compreendendo o campo sonoro a partir destes três componentes, compreende-se também a importância dos detalhes arquitetônicos inseridos em um espaço. Seja ele aberto ou fechado, serão as características da forma e da composição física dos detalhes arquitetônicos ou das irregularidades das superfícies das fachadas que irão atuar diretamente no desempenho acústico proporcionado tanto pelas primeiras reflexões, quanto pelo campo reverberante.

Neste sentido, as características da forma e da composição física dessas superfícies podem proporcionar de modo geral dois efeitos importantes no campo sonoro: a redução de energia através da absorção e a permanência ou o aumento de energia através de reflexões. Na absorção ao atingir uma superfície parte da energia sonora é dissipada em forma de calor, e assim sendo, reduzida. No caso das reflexões sonoras, estas podem ser especulares, sendo redirecionadas por grandes superfícies lisas; ou difusas, quando espalhadas por superfícies irregulares que distribuem a maior parte da energia sonora espacial e temporalmente de maneira dispersa. Longas empenas ou fachadas de concreto ou vidro existentes nas edificações do espaço urbano (Figura 26 e Figura 27) tendem a refletir specularmente a energia sonora, enquanto fachadas com superfícies irregulares, como as de edificações antigas com adornos de estuque (Figura

28), tendem a proporcionar espalhamento (CAN; FORTIN; PICAUT, 2015; COX; D'ANTONIO, 2009; EVEREST; POHLMANN, 2009; KANG, 2007; LYON, 1974).

Figura 26 – Edificação com fachada de vidro comumente encontrada em espaços urbanos ocasionam reflexões especulares.



Fonte: <http://www.avec.com.br/jcp-m-trade-center-recife/>. Acesso em 20/07/2016.

Figura 27 – Empenas ou fachadas de concreto, ocasionam reflexões especulares.



Fonte: <http://www.camilacardoso.com/guia-de-revestimentos-para-fachadas-materiais-vantagens-precos-e-inspiracoes/>. Acesso em 20/07/2016.

Figura 28 – Fachadas com superfícies irregulares por adornos ou ornamentos históricos tendem a proporcionar reflexões difusas.



Fonte: http://caferiogrande.blogspot.com.br/2010_07_01_archive.html. Acesso em 20/07/2016.

Assim como as ruas em cânion¹⁴, fachadas com superfícies irregulares são típicas em sítios históricos e antigos centros urbanos das cidades europeias, e por isso, a sua relação com reflexões difusas e espalhamento é bastante investigada¹⁵. Entretanto, fora da área de abrangência dos antigos centros urbanos, tanto as superfícies das fachadas tendem a se tornar ausentes de adornos históricos, quanto as características dos detalhes arquitetônicos da forma das edificações incorporaram outros elementos, como varandas, *baywindows*, sacadas, jardineiras, septos verticais, septos horizontais, beirais, *brise-soleils*, estrutura de pilares e vigas, entre outros.

Na literatura, a existência destes detalhes da forma das edificações não é comumente investigada, se constituindo em uma lacuna da acústica urbana. Logo, ao se formular a hipótese desta pesquisa – se existirem espaços urbanos delineados por edificações com presença profusa de detalhes em sua forma, então há modificação no desempenho acústico desse mesmo espaço – o percurso teórico discutido neste capítulo oferece indícios de que é provável que esta

¹⁴ Capítulo 2 – *A propagação sonora em espaços abertos*.

¹⁵ Entre outros autores destacam-se os seguintes: CAN; FORTIN; PICAUT, 2015; DAVIES, 1978; KANG, 2002; LYON, 1974; ONAGA; RINDEL, 2007; PICAUT; SIMON, 2001.

modificação no desempenho ocorra devido à atuação de reflexões difusas proporcionadas pela presença dos detalhes nas fachadas das edificações.

Tanto para a comprovação desta hipótese, quanto para a investigação de outros fenômenos acústicos que ocorrem em microescala urbana, a literatura existente aponta diferentes processos metodológicos possíveis. Os procedimentos experimentais mais usuais para investigação em microescala urbana são:

- Os estudos de campo, tendo como referência **medições acústicas in situ** (ALBERT; LIU, 2010; BALL, 1942; BILLON *et al.*, 2009; DELANY; RENNIE; COLLINS, 1978; KO; TANG, 1978; ONAGA; RINDEL, 2007; PAINI *et al.*, 2004; PAINI; GADE; RINDEL, 2005; PICAUT *et al.*, 2005; REMILLIEUX *et al.*, 2012; RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2010; ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015; ROCHA; MAIORINO; BERTOLI, 2017; SATOH *et al.*, 2013; THOMAS *et al.*, 2013; WIENER; MALME; GOGOS, 1965; YANG; KANG, 2005a, b);
- Os procedimentos que se apropriam da execução de **modelos reduzidos** em escala, a partir da construção de maquetes físicas (EL DIEN; WOLOSZYN, 2005; HOROSHENKOV; HOTHERSALL; MERCY, 1999; ISMAIL; OLDHAM, 2005; IU; LI, 2002; JANG *et al.*, 2015; JANG; KIM; JEON, 2015; MOLERÓN *et al.*, 2014; OSHIMA; ISHIZUKA; KAMIJO, 2014; PICAUT; SIMON, 2001; RICHOUX *et al.*, 2010; TANG, 2005, 2010);
- E os procedimentos que abrangem as pesquisas mais recentes em microescala urbana, utilizando programas computacionais para a construção de **modelos virtuais** (ALBERT; LIU, 2010; ECHEVARRIA SANCHEZ *et al.*, 2016; EL DIEN; WOLOSZYN, 2005; FARINA, 2000; HEIMANN, 2007; HORNIX; FORSSÉN, 2011; JANG; KIM; JEON, 2015; KANG, 2001; KANG; MENG; BROWN, 2003; LEE; KANG, 2015; MENNITT; JOHNSON, 2010; MOLERÓN *et al.*, 2012, 2014, MORI *et al.*, 2011a, 2014; ONAGA; RINDEL, 2007; OSHIMA; ISHIZUKA; KAMIJO, 2014; PAINI *et al.*, 2004; PAINI; GADE; RINDEL, 2005; PICAUT *et al.*, 2004; REMILLIEUX *et al.*, 2012; RICHOUX *et al.*, 2010; ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015, 2017; ROCHA; MAIORINO; BERTOLI, 2017; SMYRNOVA; KANG, 2013; SMYRNOWA *et al.*, 2012; VAN RENTERGHEM; SALOMONS; BOTTELDOOREN, 2006).

Neste último procedimento, os modelos virtuais são embasados na aplicação computacional de duas das principais teorias da acústica: (i) a teoria ondulatória e a (ii) teoria geométrica.

Os modelos em microescala urbana derivados da (i) teoria ondulatória (*wave-based methods*) se fundamentam na resolução numérica da equação da onda sonora (KANG, 2013) gerando diferentes métodos de abordagem que podem estar inseridos tanto no domínio tempo (*time-domain*) quanto no domínio da frequência (*frequency-domain*). Tais como o Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*), Método dos Elementos de Contorno (*Boundary Element Method - BEM*), Método das Fontes Equivalentes (*Equivalent Sources Method - ESM*) e o Método da Equação Parabólica (*Parabolic Equation - PE*) no domínio da frequência; e o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference-Time Domain Method - FDTD*), Método Pseudo Espectral no Domínio do Tempo (*Pseudo Spectral Time-Domain Method - PSTD*) e o Método da Matriz de Linha de Transmissão (*Transmission Line Matrix Method - TLM*) no domínio do tempo (HORNIX, 2016; KANG, 2013).

Estes métodos da equação da onda são precisos na simulação de fenômenos ondulatórios como a difração, e, na consideração de condições meteorológicas mais variáveis, como os fenômenos de turbulência atmosférica causado pelo vento (SMYRNOVA; KANG, 2013; VAN RENTERGHEM; SALOMONS; BOTTELDOOREN, 2006). Contudo, apresentam limitações significativas para serem considerados alicerce metodológico para atingir o objetivo de demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho da acústica urbana.

Em grande parte dos métodos ondulatórios o campo sonoro é considerado de modo bidimensional, assumindo uma relação ponto-a-ponto onde a geometria urbana deve ser considerada invariante e apenas em uma direção (HORNIX, 2016). Essa premissa restringe a contribuição acústica simultânea dos elementos e detalhes arquitetônicos inseridos no espaço urbano, sendo obtida apenas a influência do recorte específico de uma seção bidimensional, seja ela vertical ou horizontal. Além disso, métodos da equação da onda requerem alto desempenho computacional demandando grande capacidade de memória e longo tempo de processamento à medida que se aumenta as frequências pesquisadas, comumente inviabilizando resultados mais precisos nas médias e altas frequências. Deste modo, pela restrição bidimensional do campo sonoro, pela limitação das faixas de frequência, e pela alta demanda computacional, em investigações de microescala urbana com geometrias complexas

estes métodos não são recomendados (ALBERT; LIU, 2010; SMYRNOVA; KANG, 2013; WANG, HAIDONG; ZHAI, 2016).

Essas lacunas da maioria dos modelos ondulatórios aplicados à espaços urbanos ricos em elementos e detalhes arquitetônicos podem ser preenchidas a partir de modelos virtuais embasados na (ii) teoria da acústica geométrica. Esta teoria se fundamenta na consideração de que a energia sonora (*energy-based methods*) pode ser simplificada em raios sendo seu comportamento regido pelas leis da óptica geométrica. Assume-se que o som se propaga a partir do centro de uma fonte sonora ao longo de raios que representam uma pequena porção de uma onda esférica. Os principais métodos de acústica geométrica utilizados em espaços urbanos são: o Método de Traçado de Raios (*Ray Tracing Method*), o Método de Fonte-Imagem (*Image-Source Method*), Equação de Difusão (*Diffuse Equation*) e o Método da Radiosidade (*Radiosity Method*) (HORNIKX, 2016; SMYRNOVA; KANG, 2013).

De modo equivocado, a aplicação computacional dos programas que apresentam estes métodos de cálculos baseados em acústica geométrica é comumente identificada como sendo exclusiva para uso no domínio da acústica de salas¹⁶. Entretanto, tal identificação é reducionista: diversas pesquisas na literatura já validaram o uso destes *softwares* para utilização em investigações de espaços urbanos em microescala, uma vez que os métodos de cálculo destes programas são fundamentados na teoria que vem sendo aplicada a estudos acústicos urbanos não computacionais em microescala desde a segunda metade do século XX: as “*techniques of ray tracing with pencil and ruler*” (KUTTRUFF, 2009, p. 300), ou simplesmente traçado de raios, e, o método de *image source* ou fonte-imagem, ambas originadas da acústica geométrica (EL DIEN; WOLOSZYN, 2005; FARINA, 2000; HORNIKX, 2016; ISMAIL; OLDHAM, 2003; JANG; KIM; JEON, 2015; LEE; KANG, 2015; MENG; KANG, 2007; MORI *et al.*, 2011a, 2014; ONAGA; RINDEL, 2007; PAINI *et al.*, 2004; PAINI; GADE; RINDEL, 2005; ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015, 2017; ROCHA; MAIORINO; BERTOLI, 2017; SMYRNOVA; KANG, 2013; SMYRNOWA *et al.*, 2012).

Assim sendo, sob o olhar computacional da acústica geométrica foi utilizada simulação de modelos virtuais para investigações de desempenho acústico em espaços urbanos na escala da praça por MENG; KANG, 2007; PAINI *et al.*, 2004; SMYRNOVA; KANG, 2013, e, na escala

¹⁶ Tais como Odeon S/A, EASE/AFMG e o CATT-Acoustic.

da rua por JANG; KIM; JEON, 2015; LEE; KANG, 2015; ONAGA; RINDEL, 2007; SMYRNOWA *et al.*, 2012. Nestas pesquisas de microescala urbana, são consideradas a presença da vegetação ou a existência de janelas, portas e adornos que proporcionem irregularidades nas fachadas. Entretanto, os detalhes arquitetônicos que podem transformar a forma volumétrica pura das edificações – como varandas, *baywindows*, sacadas, jardineiras, septos verticais, septos horizontais, beirais, *brise-soleils*, estrutura de pilares e vigas – *não* constituem o foco destes estudos. Escassas são as investigações que associam o espaço urbano, os detalhes da forma das edificações e a acústica geométrica. Em diferentes modos de abordagem e graus de refinamento, detalhes arquitetônicos estão inseridos nas pesquisas de (EL DIEN; WOLOSZYN, 2005; MORI *et al.*, 2011a, 2014, ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015, 2017; ROCHA; MAIORINO; BERTOLI, 2017). A escala urbana, o método, o *software* e o conteúdo de cada um destes estudos de simulação de modelos virtuais em microescala urbana fundamentados em acústica geométrica são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Pesquisas em microescala urbana com simulações de modelos virtuais fundamentadas em acústica geométrica

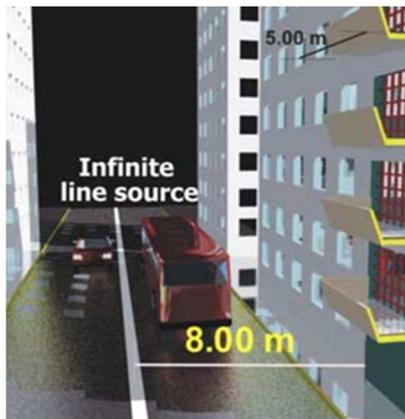
Autores	Escala urbana	Método	Software	Fonte sonora	Estratégia	Parâmetros acústicos	Conteúdo
ONAGA; RINDEL, 2007	Rua	HIB TR FI	não informa	PON	HIP	SPL T30	Avalia a contribuição para o espalhamento sonoro de fachadas sem detalhes arquitetônicos de ruas em cânion. Faz uso metodológico exclusivo de simulações acústicas de modelos virtuais fundamentadas em cenários urbanos hipotéticos. Encontra que o coeficiente de absorção e de espalhamento de fachadas de ruas em cânion varia de 0,1 a 0,25.
LEE; KANG, 2015	Rua	HIB TR FI	Odeon	PON e LIN	HIP	SPL T30 EDT	Investiga a influência da relação altura-largura no desempenho acústico de ruas em cânion. Utiliza medições de um espaço urbano real existente na literatura, e, simula 28 modelos virtuais de cenários hipotéticos. As larguras das ruas variam de 6 a 27 m. As alturas das edificações variam de 3 a 162 m. Utiliza 30 pontos receptores de altura fixa (1,5m) variando suas distâncias em relação a uma fonte sonora pontual e uma linear, localadas no eixo da rua. Encontra que a variação do SPL com a relação altura-largura só ocorre em ruas com larguras menores. Para todos os cenários T30 e EDT aumentam com o aumento da relação altura-largura e T30 diminui com o aumento do coeficiente de espalhamento. Para a fonte linear o SPL e o EDT são constantes ao longo do comprimento da rua.
JANG; KIM; JEON, 2015	Rua	HIB TR FI	Odeon	LIN	HIP	SPL T20 IL	Propõe um procedimento por meio de modelos reduzidos em escala de avaliação da redução de ruído urbano propiciada por fachadas verdes. Utiliza uma fonte sonora linear formada por várias fontes pontuais em ruas em formato de cânion. Compara os dados obtidos do modelo reduzido com simulação acústica de modelos virtuais. Encontra redução sonora de aproximadamente 2 dB(A) com a inserção de fachadas verdes.
PAINI; GADE; RINDEL, 2005	Praça	HIB TR FI	Odeon	PON	HIP	G T30 EDT C80 STI CD RI	Pesquisa espaços públicos na escala da praça sob os mesmos critérios e parâmetros acústicos objetivos e subjetivos utilizados para analisar salas de concerto e teatros, identificando a influência de arcadas associadas à galerias. Utiliza três diferentes cenários urbanos hipotéticos para a simulação de modelos virtuais com presença <i>versus</i> ausência das arcadas, totalizando seis condições experimentais. Conclui que a presença de arcadas influencia nos parâmetros acústicos analisados.

Autores	Escala urbana	Método	Software	Fonte sonora	Estratégia	Parâmetros acústicos	Conteúdo
EL DIEN; WOLOSZYN, 2005	Rua	TR	Disipayr	LIN	HIP	SPL	Pesquisa a influência da profundidade de varandas e a forma de seus parapeitos no desempenho acústico de fachadas de edificações próximas à fontes sonoras lineares. Objetiva compreender como estes detalhes arquitetônicos contribuem para o ambiente acústico do interior de uma edificação. Utiliza cenários urbanos hipotéticos em seis condições experimentais. Compara dados acústicos obtidos de modelos reduzidos em escala e de simulações de modelos virtuais. Identifica redução de 4 a 8 dB(A) no SPL do interior da edificação na presença das varandas.
SMYRNOVA; KANG, 2013	Praça	HIB TR RD	CRR	PON e LIN	HIP	T30 EDT D50 IL	Estuda a propagação sonora em espaços urbanos considerando o efeito da vegetação. Utiliza exclusivamente cenários urbanos hipotéticos de praças simulando acusticamente seus modelos virtuais. Nos modelos, insere portas e janelas diferenciando a composição dos materiais e considerando seus respectivos coeficientes de absorção e espalhamento. Identifica redução sonora de 1 a 1,5 dB(A) com a inserção da vegetação em formato de paredes verdes.
SMYRNOVA <i>et al.</i> , 2012	Praça e rua	HIB TR RD	CRR e método PSTD	LIN	HIP	SPL IL	Investiga a influência da vegetação em espaços urbanos. Faz uso exclusivo de cenários urbanos hipotéticos de ruas e praças simulando acusticamente seus modelos virtuais. Compara a aplicação de duas teorias acústicas em espaços urbanos: a teoria ondulatória, por meio do método PSTD e a teoria geométrica, por meio do método CRR. Encontra discrepâncias nos resultados obtidos pelos dois métodos nas baixas e médias frequências.
PAINI <i>et al.</i> , 2004	Praça	HIB TR FI	Odeon	PON	MED SIM	T30 T20 T10 EDT C80 D50 STI RI	Analisa o desempenho acústico de praça pública como ponto de encontro para concertos musicais. Faz comparações entre medições <i>in situ</i> e simulações de modelos virtuais. Entre outros resultados, identifica ser necessária a modelagem, inserção e detalhamento computacional das árvores existentes na praça para existir uma boa aderência entre medições e simulações.
ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015	Praça	HIB TR FI	Ease	PON	MED SIM	T30 C80 D50 CTE RI	Pesquisam a presença versus ausência dos detalhes da forma das edificações na caracterização acústica de espaços urbanos em modelos virtuais. Faz comparações entre medições <i>in situ</i> e simulações de modelos virtuais. Entre outros resultados, identifica que modelos virtuais detalhados melhor representam a realidade acústica de espaços urbanos reais.
ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2017	Praça	HIB TR FI	Odeon	PON	MED SIM	SPL T30 EDT CD	
ROCHA; MAIORINO; BERTOLI, 2017	Praça	HIB TR FI	Odeon	PON	MED SIM	SPL T30 EDT CD	
MORI <i>et al.</i> , 2011	Praça	HIB TR FI	Odeon	PON	MED SIM	RI	Analisa os alto-falantes urbanos do sistema de anúncio público municipal (<i>Municipal Public Address</i> - MPA) da cidade de Chiba no Japão. Objetiva validar o uso de simulação de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica para auxiliar no projeto de sistemas de alto-falantes mais eficientes para o sistema de anúncio público municipal. Faz comparações entre medições <i>in situ</i> e simulações de modelos virtuais. Compara respostas impulsivas (diagramas de eco). Identifica ser possível simulações de modelos virtuais para melhoria do sistema de anúncio público municipal. Mas para obter boa aderência entre medições e simulações, foi necessária a inserção de detalhes da forma das edificações nos modelos computacionais.
MORI <i>et al.</i> , 2014	Praça	HIB TR FI	Odeon	PON	MED SIM	RI	
MENG; KANG, 2007	Praça	HIB TR RD	CRR	PON	LIT SIM	SPL T30 EDT	Apresenta a validação do CRR para a utilização em espaços urbanos. Utiliza um cenário urbano hipotético em configuração de praça. Compara os resultados obtidos com as simulações acústicas dos modelos virtuais com medições <i>in situ</i> existentes na literatura. Compara ainda, com outros resultados de simulações baseados em outros métodos de acústica geométrica existentes na literatura.
Legenda:			Parâmetros:				
HIB: híbrido		PSTD: Pseudo Espectral no		SPL: nível de pressão sonora		D50: definição	
TR: traçado de raios		Domínio de Tempo		G: força sonora		C80: clareza	
FI: fonte-imagem		HIP: cenários urbanos hipotéticos		IL: perda por inserção		STI: índice de transmissão da fala	
RD: radiosidade		MED: medições <i>in situ</i>		T30, T20, T10: tempo de reverberação		RI: resposta impulsiva	
PON: pontual		SIM: simulação de modelos virtuais		EDT: tempo inicial de decaimento		CTE: curva tempo-energia	
LIN: linear		LIT: uso de dados da literatura				CD: curva de decaimento	

Fonte: a autora.

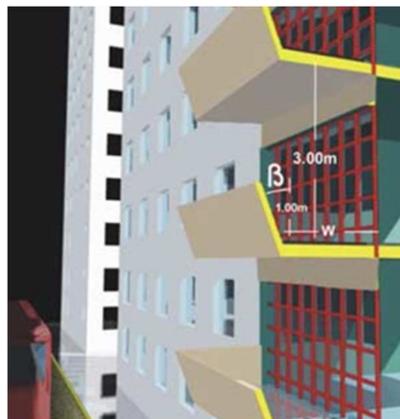
Dentre essas investigações, a influência da profundidade de varandas e a forma de seus parapeitos no desempenho acústico de fachadas de edificações próximas a fontes sonoras lineares foi pesquisada por El Dien; Woloszyn (2005). O objetivo era compreender como estes detalhes arquitetônicos contribuem para o ambiente acústico do interior de uma edificação. O parâmetro analisado foi o nível de pressão sonora (*sound pressure level* - SPL). Cenários hipotéticos contendo edificações de 8 pavimentos, com pé direito de 3 m, com varandas de profundidade 1 m, 2 m e 3 m, de comprimento constante 5 m, e com inclinação extra do parapeito de 15° e 30°; foram tanto simulados virtualmente, quanto construídos em modelos reduzidos em escala (Figura 29 e Figura 30). Os dados obtidos dos modelos virtuais e físicos foram comparados aos dados de equações empíricas. Foi identificada uma redução de 4 a 8 dB(A) no SPL do interior da edificação na presença das varandas. Houve ainda uma redução adicional de 0,5 a 4 dB(A) ao se inclinar o parapeito (Figura 31). Para os autores, os resultados poderão ser futuramente utilizados para derivação de equações de predição de proteção/isolamento no interior das edificações em função dos detalhes arquitetônicos e seus parâmetros geométricos externos.

Figura 29 - Configuração de rua do cenário urbano hipotético.



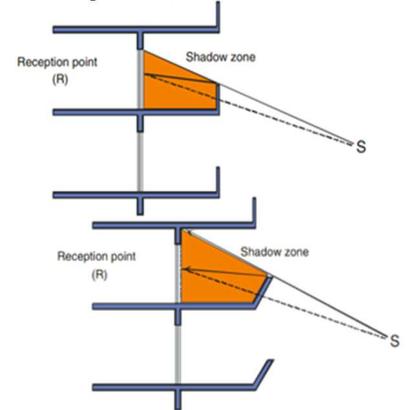
Fonte: EL DIEN; WOLOSZYN, 2005, p. 4.

Figura 30 - Detalhe de uma das varandas investigadas pelos autores.



Fonte: EL DIEN; WOLOSZYN, 2005, p. 4.

Figura 31 - Sendo S a fonte sonora e R o receptor, em laranja a área de sombra a partir da inclinação do parapeito.



Fonte: EL DIEN; WOLOSZYN, 2005, p. 4.

Além de utilizar simulação de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica para relacionar o espaço urbano, os detalhes da forma das edificações e a acústica, destaca-se outra postura metodológica relevante no estudo de El Dien; Woloszyn (2005): o uso exclusivo de cenários hipotéticos. Tanto os modelos reduzidos em escala, quanto os modelos virtuais são abstrações da realidade arquitetônica e urbana. O objetivo dos autores não foi o de validar o

método – já validado pela literatura; tampouco calibrar o modelo – para isso seriam necessários espaços urbanos reais e medições *in situ*. O propósito dos cenários hipotéticos foi o de utilizar condições idealizadas e, portanto, mais facilmente controladas e manipuladas, para investigar a influência da modificação de suas variáveis independentes (a profundidade da varanda e a inclinação do parapeito) na sua variável dependente (o nível de pressão sonora no interior da edificação), configurando um delineamento típico de pesquisas experimentais.

Neste sentido, a investigação de El Dien; Woloszyn (2005) é bastante relevante por apontar um percurso metodológico possível e aderente para se atingir o objetivo desta tese de demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho da acústica urbana por meio de pesquisas experimentais fundamentadas em modelos virtuais de cenários urbanos hipotéticos.

Os detalhes arquitetônicos também estão presentes de forma incidental nos estudos de Mori *et al.* (2011a, 2014). Os autores analisaram os sistemas de alto-falantes urbanos do sistema de Anúncio Público Municipal (*Municipal Public Address* - MPA) da cidade de Chiba no Japão. Este sistema é intensamente utilizado para prevenção de desastres, ordens de evacuação e prevenção de crimes. Apesar de sua importância, o MPA apresenta problemas de excesso de reverberação, longos atrasos sonoros e ecos contribuindo para a deterioração da inteligibilidade dos anúncios. Estes problemas são originados das interfaces de propagação da onda sonora no espaço urbano, causados por múltiplas reflexões nas edificações tanto próximas aos alto-falantes, quanto próximas ao receptor. O objetivo da pesquisa foi validar o uso de simulação de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica para auxiliar no projeto de sistemas de alto-falantes mais eficientes para o sistema de anúncio público municipal. Dois espaços urbanos na escala da praça foram utilizados como estudo de caso para simulação de modelos virtuais e medições acústicas *in situ*. Uma fonte sonora dodecaédrica e os próprios alto-falantes do MPA foram utilizados em posições variadas, tanto próximas ao nível do solo quanto nas varandas e topos das edificações das praças. A análise foi realizada comparando as respostas impulsivas entre as simulações dos modelos virtuais e as medições.

Os resultados indicaram que o som direto possui uma boa aderência entre as simulações e as medições. Contudo, inicialmente, algumas importantes reflexões sonoras não foram bem descritas pelas simulações em ambos os espaços urbanos investigados. Nessas primeiras simulações as edificações eram consideradas como prismas puros, sem a inserção de detalhes

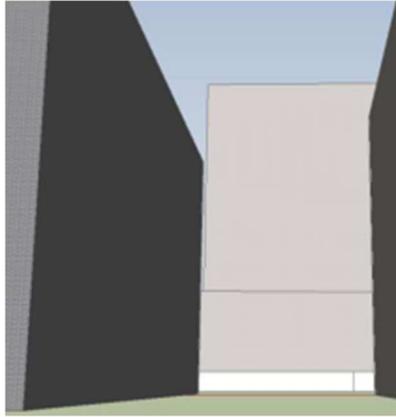
arquitetônicos. Em uma nova rodada foram inseridas varandas nas edificações da primeira praça e beirais em uma edificação da segunda praça (Figura 32, Figura 33 e Figura 34).

Figura 32 - Edificação do espaço urbano real da segunda praça investigada.



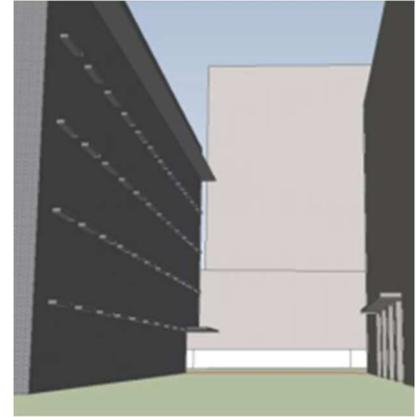
Fonte: (MORI *et al.*, 2011b, p. 30).

Figura 33 - Edificação da segunda praça nas primeiras simulações acústicas.



Fonte: (MORI *et al.*, 2011b, p. 30).

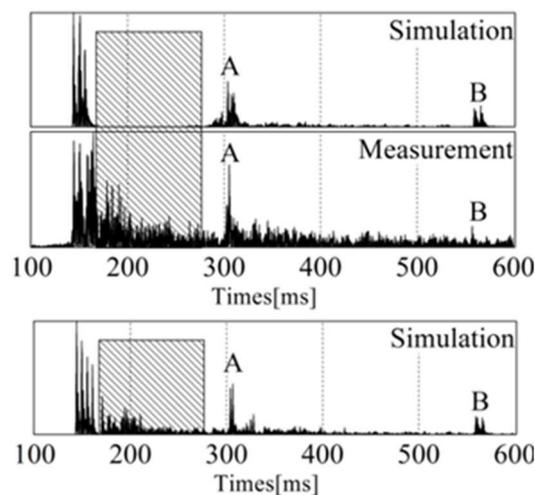
Figura 34 - Edificação da segunda praça com a inserção dos detalhes arquitetônicos nas novas simulações



Fonte: (MORI *et al.*, 2011b, p. 30).

A presença dos detalhes possibilitou que outras reflexões importantes também fossem caracterizadas nas respostas impulsivas dos modelos virtuais (Figura 35). A investigação concluiu que é possível utilizar com precisão simulações de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica para tornar o sistema de Anúncio Público Municipal (*Municipal Public Adress - MPA*) mais eficiente.

Figura 35 - Na resposta impulsiva simulada (acima) a hachura evidencia a ausência de reflexões importantes quando comparadas com as medições *in situ* (ao meio). Abaixo, a nova resposta impulsiva simulada com a inserção e presença dos detalhes arquitetônicos consegue caracterizar estas reflexões.



Fonte: (MORI *et al.*, 2011a, p. 3).

Os detalhes da forma das edificações não estavam inseridos na proposição das pesquisas de Mori *et al.* (2011a, 2014). Entretanto, sua consideração foi essencial para se obter uma boa aderência entre as respostas impulsivas medidas *in situ* e as simuladas em modelos virtuais. Por isso, em suas conclusões os autores recomendam que a lacuna existente na relação entre o espaço urbano, os detalhes da forma das edificações e a acústica seja investigada. Reforçando a relevância de comprovar metodologicamente a hipótese da presente pesquisa de que se existirem espaços urbanos delineados por edificações com presença profusa de detalhes em sua forma – *e.g.* varandas, reentrâncias e saliências, jardineiras, *baywindows* – então há modificação no desempenho acústico desse mesmo espaço.

Contribuindo para resolução dessa lacuna Rocha; Bertoli; Maiorino (2015, 2017) e Rocha; Maiorino; Bertoli (2017) pesquisaram a presença *versus* ausência dos detalhes da forma das edificações na caracterização acústica de espaços urbanos em microescala verificando qual dos cenários melhor representa a realidade de propagação sonora quando são utilizadas simulações de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica e medições *in situ*. Um espaço urbano na escala da praça com edificações circundantes ricas em detalhes arquitetônicos – septos verticais, septos horizontais, beirais, entre outros – foi utilizado como estudo de caso (Figura 36 e Figura 37). Nas medições, uma fonte sonora dodecaédrica foi utilizada em posições variadas para obtenção da resposta impulsiva. Nas simulações foram elaborados modelos virtuais detalhados e simplificados – sem os detalhes da forma da edificação (Figura 38).

Figura 36 - Espaço urbano na escala da praça.



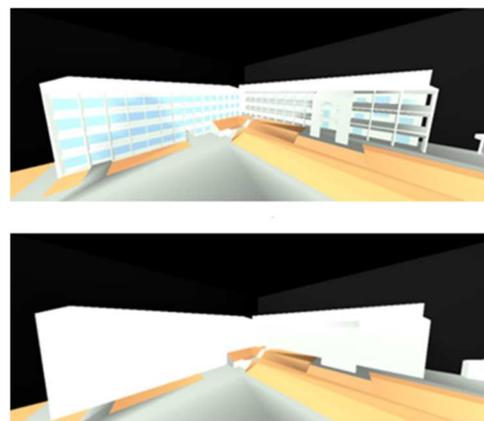
Fonte: ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2015, p. 3.

Figura 37 - Detalhes arquitetônicos das edificações.



Fonte: ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2017, p. 3.

Figura 38 - Modelo virtual detalhado (acima) e simplificado (abaixo) utilizados nas simulações acústicas.



Fonte: ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2017, p. 7.

Os dados obtidos foram comparados entre si em termos absolutos e em termos de acurácia em função do grau de erro da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano a estímulos sonoros, o JND – *just noticeable difference*. Os resultados confirmaram os indícios existentes na literatura (LISA; HOLGER RINDEL; CHRISTENSEN, 2004; MORI *et al.*, 2011a, 2014; PAINI *et al.*, 2004; PAINI; GADE; RINDEL, 2005) de que a inserção dos detalhes pode tornar os modelos virtuais em microescala urbana mais realísticos, e em geral, com menores erros no JND.

Logo, Rocha; Bertoli; Maiorino (2015, 2017) e Rocha; Maiorino; Bertoli (2017) demonstraram que algumas das recomendações e compensações da simplificação da geometria comumente aplicadas à acústica de salas, não são necessariamente aplicáveis à acústica urbana. Isto se deve às interfaces acústicas de propagação sonora em espaços urbanos abertos, como numa praça, que possuem alguns aspectos diferentes da propagação em um espaço fechado, como uma sala de concertos. A grande quantidade de absorção da energia sonora proporcionada pelo ar em espaços abertos – influenciando o campo livre e o campo reverberante da propagação – torna a *supressão* do detalhe da forma das edificações insuficiente para reproduzir reflexões importantes, que se perdem na parcela absorvida da energia dos modelos virtuais do espaço urbano, descaracterizando o desempenho acústico real e, portanto, aumentando o erro e diminuindo a acurácia dos modelos.

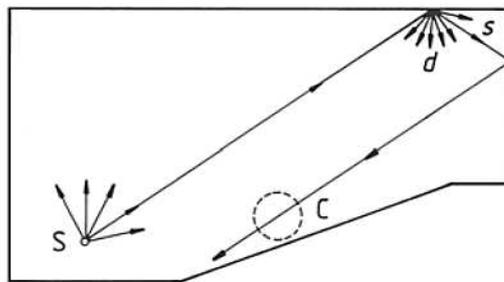
Os resultados de Rocha; Bertoli; Maiorino (2015, 2017) e Rocha; Maiorino; Bertoli (2017) ratificaram que simulações de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica possuem uma boa aderência na caracterização de espaços urbanos em microescala, quando são considerados os detalhes da forma das edificações. A investigação concluiu que modelos virtuais detalhados melhor representam a realidade acústica de espaços urbanos reais.

Além da associação entre o espaço urbano, os detalhes da forma das edificações e a acústica geométrica as pesquisas aqui discutidas de El Dien; Woloszyn (2005), Mori *et al.* (2011a, 2014), Rocha; Bertoli; Maiorino (2015, 2017) e Rocha; Maiorino; Bertoli (2017) possuem como convergência metodológica os métodos de traçados de raios e de fonte-imagem.

O princípio computacional do traçado de raios considera que a onda sonora se propaga em várias direções na forma de inúmeras partículas através do caminho mais curto entre a fonte e o receptor, em uma linha reta, ou um raio sonoro. Ao atingir uma superfície – dependendo das

características potenciais de reflexão, absorção ou espalhamento desta superfície – o raio é refletido e redirecionado de modo especular segundo a Lei de Snell¹⁷, ou de modo difuso segundo a Lei de Lambert¹⁸. Sucessivamente, os diversos raios emitidos pela fonte sonora diretos e refletidos, intersectam um ponto receptor (Figura 39). A cada intersecção, são registradas a energia, a direção de origem e o tempo de chegada de todos os raios sonoros. Estes registros são sistematizados computacionalmente em um histograma resultando na resposta impulsiva para aquele sistema fonte-receptor (HOWARTH; LAM, 2000; KUTTRUFF, 2009; RINDEL, 2000).

Figura 39 – Ilustração do princípio de traçado de raios. Fonte sonora: S; reflexão especular: s; reflexão difusa: d; o receptor que intersecta os raios: C.



Fonte: KUTTRUFF, 2009, p. 319.

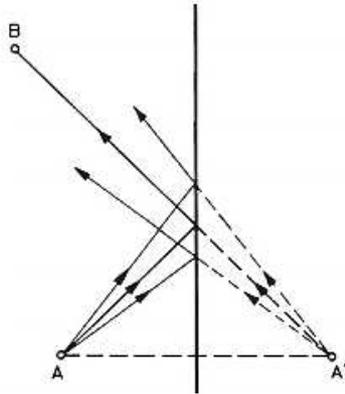
Já o método fonte-imagem, *image source* ou *mirror source*, parte do princípio que uma reflexão especular pode ser construída geometricamente através do espelhamento da fonte sonora em uma superfície segundo as leis de reflexão da física óptica (Figura 40). Assim sendo, o ângulo do raio sonoro incidente na superfície, será igual ao ângulo do raio refletido. Mas o raio refletido terá energia diferente em função da frequência, bem como uma menor intensidade sonora em relação ao raio incidente. Quando este raio sonoro atinge mais de uma superfície, a cada nova reflexão o processo de espelhamento de imagem reinicia. Assim múltiplas imagens de fontes sonoras e, por conseguinte, múltiplas reflexões são criadas. Cada nova reflexão originada de uma fonte espelhada é nomeada de acordo com a ordem em que esta imagem surgiu durante a propagação do raio: se derivada da primeira fonte-imagem, será nomeada de *reflexão de primeira ordem*, se originada da segunda fonte-imagem, *reflexão de segunda ordem*, e assim sucessivamente (Figura 41). As fontes-imagem existentes em um espaço irão contribuir com uma determinada

¹⁷ Em acústica, assim como na física óptica, a Lei de Snell afirma que o ângulo do raio sonoro refletido por uma superfície, será igual ao ângulo do raio incidente (KUTTRUFF, 2007).

¹⁸ A Lei de Lambert determina distribuição em direção e ângulos aleatórios para reflexões difusas (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS; GIL, 2016; KUTTRUFF, 2007).

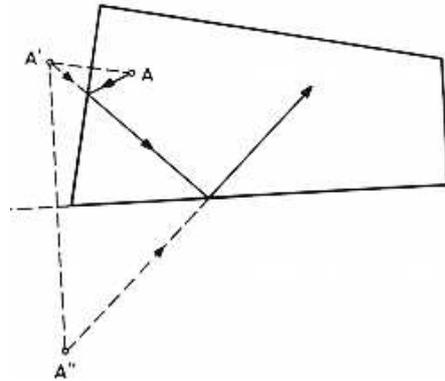
quantidade de energia sonora. Estas energias são somadas à energia do som direto para a obtenção final da resposta impulsiva de um sistema fonte-receptor, e assim, dos parâmetros acústicos que se deseja analisar. (EVEREST; POHLMANN, 2009; KUTTRUFF, 2009; RINDEL, 2000).

Figura 40 – Construção de uma fonte-imagem por espelhamento.



Fonte: KUTTRUFF, 2009, p. 104.

Figura 41 – Reflexão de primeira ordem da fonte-imagem A', e, de segunda ordem da fonte-imagem A''.



Fonte: KUTTRUFF, 2009, p. 105.

Na prática dos cálculos computacionais, ambos os métodos geométricos, fonte-imagem e o de traçado de raios, possuem vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens, o método de fonte-imagem é extremamente preciso, principalmente na caracterização do som direto e das primeiras reflexões. Por outro lado, este método não consegue caracterizar bem a parcela tardia e reverberante da resposta impulsiva. Fato ainda mais complicado se o espaço possuir geometrias complexas e com grande quantidade de superfícies para espelhamento da fonte sonora, gerando um aumento exponencial do número de fontes-imagem e, conseqüentemente, das ordens de reflexão. Este aumento pode inviabilizar o processamento de dados computacionais sem necessariamente levar a resultados mais precisos, podendo haver erros na soma das contribuições de energia sonora pelo excesso de fontes-imagem (KUTTRUFF, 2009; RINDEL, 2000; SAVIOJA; SVENSSON, 2015).

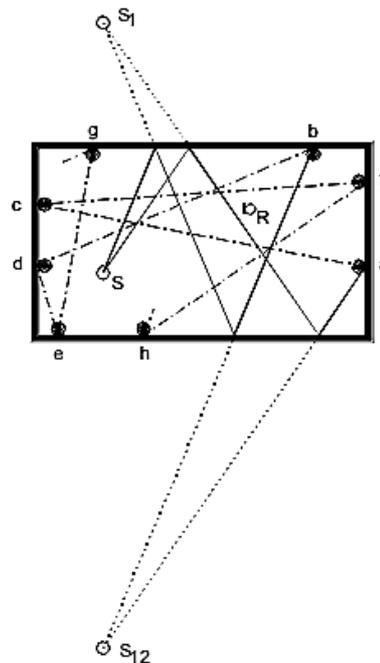
Já o método de traçado de raios, não é tão preciso nas primeiras reflexões, mas caracteriza com excelência a parcela tardia e reverberante da resposta impulsiva, além de obter ótimos resultados em espaços com geometrias mais detalhadas e com grande quantidade de superfícies. Assim sendo, a complementaridade das vantagens e desvantagens acústicas dos dois métodos levou ao desenvolvimento e uso de programas computacionais com processos integrados de

cálculo, chamados de *método híbrido* ou *modelos híbridos* (EVEREST; POHLMANN, 2009; KUTTRUFF, 2009; RINDEL, 2000).

Os arranjos, combinações e refinamento do modo de associação entre os métodos de traçado de raios e fonte-imagem aplicado a um modelo de cálculo híbrido pode ser diversificado, mas em geral, a construção da primeira parte da resposta impulsiva, que se constitui do som direto e das primeiras reflexões, é determinada pelo método fonte-imagem. Já a parte sonora reverberante da resposta impulsiva é formada pelo método de traçado de raios. A transição de um método para o outro é estabelecida pelo usuário do programa computacional a partir do número de transição de ordem (*transition order ou TO*) que se deseja.

Essa relação pode ser melhor ilustrada a partir da Figura 42, onde S_1 e S_{12} são as fontes-imagem criadas a partir do estabelecimento de um $TO = 2$, que se encarregará da determinação do som direto e das primeiras reflexões. A partir de S_{12} , se inicia o processo de *ray tracing* que se encarregará da parte reverberante. Tanto as energias obtidas com a fonte-imagem quanto com o traçado de raios são somadas para a obtenção final da resposta impulsiva do sistema fonte-receptor (KUTTRUFF, 2009; RINDEL, 2000).

Figura 42 – Princípio de um modelo híbrido de cálculo.



Fonte: RINDEL, 2000, p. 221.

Isto posto, tanto por tratar-se de um processo validado para aplicação em microescala urbana como ilustraram as investigações existentes na literatura discutidas neste capítulo, quanto por

melhor conciliar as vantagens dos métodos traçado de raios e fonte-imagem, a abordagem teórica que fundamenta esta pesquisa de doutorado é a de acústica geométrica baseada em métodos de cálculo híbridos computacionais. A aplicação experimental desta teoria para a construção dos modelos virtuais de estudo, bem como outras interfaces do processo metodológico serão tratadas no capítulo que se segue.

4. Método da pesquisa

De modo geral, o método adotado para atingir o objetivo desta tese de doutorado - demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho acústico urbano – segue o delineamento aplicado às pesquisas *experimentais*. Este capítulo apresenta e discorre sobre os processos e decisões metodológicas percorridas por este delineamento:

- (a) a operacionalização das variáveis de pesquisa: *detalhes da forma das edificações*, variável independente manipulada através da variação do detalhe arquitetônico; o *desempenho acústico urbano*, variável dependente analisada através dos parâmetros acústicos discutidos e justificados no capítulo 2 – *A acústica e a microescala urbana*: nível de pressão sonora (SPL), tempo de reverberação (T30) e tempo inicial de decaimento (EDT).
- (b) a delimitação dos detalhes arquitetônicos e de suas condições experimentais de investigação: varandas, *baywindows* e jardineiras em um ambiente de estudo virtual a partir de cenários urbanos hipotéticos;
- (c) a caracterização do *instrumento* de investigação do desempenho acústico urbano e o estabelecimento das configurações necessárias para sua execução: simulações acústicas virtuais com programa computacional baseado em método de cálculo híbrido fundamentado na teoria da acústica geométrica.
- (d) a determinação da forma de análise de dados – avaliação comparativa dos resultados obtidos com as simulações acústicas a partir de dois eixos: (i) em termos objetivos, a partir dos valores absolutos e (ii) em termos subjetivos, a partir da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros, o JND (*just noticeable difference*).

4.1. A operacionalização das variáveis de pesquisa

A determinação do objeto de estudo, a seleção de uma variável de investigação que o influencia e a definição do modo de controle e observação dos efeitos produzidos no objeto por essa mesma variável tornam este estudo uma *pesquisa experimental* segundo a classificação proposta por Gil (2006).

Assim, para atender o objetivo proposto de demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho acústico urbano esta pesquisa experimental foi conduzida através da articulação de duas variáveis principais: (i) o *detalhe da forma da edificação* e (ii) o *desempenho acústico urbano*. Estas variáveis se articulam através da hipótese que se existem espaços urbanos delineados por edificações com presença profusa de *detalhes em sua forma* (i) – e.g. varandas, reentrâncias e saliências, jardineiras, *baywindows* – então há modificação no *desempenho acústico* (ii) desse mesmo espaço.

O *detalhe da forma da edificação* (i) representa uma *variável independente*. Esta variável irá então influenciar outra variável de maneira determinante para a condição ou causa dos resultados apresentados. Deste modo, o detalhe da forma da edificação constitui o fator manipulado pelo investigador “na sua tentativa de assegurar a relação do fator com um fenômeno observado ou a ser descoberto, para ver que influência exerce sobre determinado resultado” (LAKATOS; MARCONI, 2003, p. 138). Enquanto variável, o manejo do detalhe da forma da edificação ocorreu através da modificação dos elementos arquitetônicos estabelecidos na hipótese – varandas, *baywindows* e jardineiras¹⁹. O efeito ou resultado da manipulação do detalhe da forma da edificação se constitui em *variável dependente* representada pelo *desempenho acústico urbano* (ii). A modificação do desempenho foi determinada a partir das diferenças identificadas nos três parâmetros acústicos elucidados no capítulo anterior: (1) o nível de pressão sonora (SPL), (2) o tempo de reverberação (T30) e o (3) tempo inicial de decaimento (EDT) para todas as frequências em bandas de oitava.

Neste contexto, como o que se deseja demonstrar é a influência do detalhe arquitetônico no desempenho acústico urbano, o ambiente de estudo é prontamente delineado como sendo o espaço urbano. Mas a operacionalização dessas variáveis em um espaço urbano *real* envolve uma multiplicidade de outras variáveis independentes reduzindo sua possibilidade de controle e tornando sua análise demasiado complexa²⁰. As fontes sonoras urbanas, a variação de altura das edificações, o tipo de material das superfícies urbanas, o modo de implantação da edificação no lote, entre outros, são exemplos de elementos que por si só se constituiriam em outras variáveis independentes. Assim sendo, métodos comumente aplicados à estudos de campo experimentais não seriam compatíveis pois as características das variáveis de qualquer ambiente

¹⁹ A determinação destes detalhes será melhor elucidada nos itens 4.2. *A delimitação das condições experimentais* e no item 4.3. *Os cenários urbanos hipotéticos*.

²⁰ Conforme elucidado no *Capítulo 2 – A propagação sonora em espaços abertos*.

urbano real selecionado como ambiente de pesquisa tornaria a pesquisa um estudo de caso, gerando resultados específicos para àquelas variáveis existentes no espaço urbano deste mesmo caso.

Isto posto, a presente pesquisa investigou a influência do detalhe a partir da produção de um ambiente de estudo virtual adotando cenários hipotéticos que representam aspectos físicos e materiais do espaço urbano²¹. Esta opção de procedimento metodológico permitiu a execução da pesquisa dentro de um contexto o mais controlado possível, proporcionando as condições ótimas para a manipulação da variável independente e verificação de seu efeito na variável dependente sem interferências externas (GIL, 2006). Para isso, todas as outras variáveis independentes existentes nos cenários urbanos hipotéticos foram neutralizadas, tornando-as variáveis de controle:

[...] variável de controle aparece na investigação de situações complexas, quando se sabe que um efeito não tem apenas uma causa, mas pode sofrer influência de vários fatores. Não interessando ao investigador, ou não sendo possível analisá-los todos em determinado experimento, torna-se necessário neutralizá-los para que não interfiram ou não exerçam influência sobre o fenômeno estudado (LAKATOS; MARCONI, 2003, p. 145).

Com apenas uma variável independente os cenários urbanos de articulação das variáveis foram manipulados através das *condições experimentais de pesquisa*, distribuídas em dois grupos o *grupo de controle* e o *grupo experimental*. O grupo de controle foi aquele não manipulado, àquele ao qual o tratamento das variáveis não foi aplicado (GROAT; WANG, 2013). Em outras palavras, no grupo de controle as edificações foram consideradas como prismas puros e blocos monolíticos sem a presença de quaisquer detalhes arquitetônicos. O grupo experimental é composto por edificações com diferentes variações de *detalhes da forma das edificações*. Porém, diante da pluralidade de detalhes arquitetônicos possíveis e da diversidade de espaços urbanos que podem fundamentar a elaboração dos cenários urbanos hipotéticos, como delinear tanto estes cenários, quanto os detalhes arquitetônicos neles inseridos?

²¹ Neste sentido, os cenários urbanos são modelos que representam de modo simplificado e abstrato uma situação urbana que poderia ser real, mas é por natureza uma situação hipotética. Apesar de o espaço urbano envolver uma multiplicidade de abordagens na arquitetura e urbanismo, enquanto elemento de estudo de parâmetros objetivos da acústica urbana ele se caracteriza como componente da trajetória de propagação sonora entre a fonte e o receptor. Por conseguinte, é considerado essencialmente a partir de seus aspectos físicos e materiais.

4.2. A delimitação das condições experimentais de pesquisa

O espaço urbano é uma rede intrincada e complexa de relações que se desenvolve em múltiplos níveis de leitura (LAMAS, 2004). Sua formação abarca tanto aspectos físico-materiais quanto processos cumulativos e simultâneos que perpassam por aspectos históricos, culturais, sociais e econômicos.

A transposição destes processos em implantação efetiva - formação de vias, loteamentos, edificações, entre outros - envolve algum grau de princípio regulador. Mesmo os espaços urbanos considerados de formação espontânea, como as favelas, ou as antigas cidades históricas ou medievais, seguem algum condicionante intencional em sua implantação, seja a geografia do sítio, o estabelecimento de acessos, ou a necessidade de proteção (KIEFER, 2010).

Quando a ocupação dos espaços urbanos é formalmente planejada o princípio regulador a ser seguido consta nos códigos urbanísticos, que operam através das leis complementares de cada cidade comumente designadas como *Código de Obras*, *Código de Posturas*, as *Leis de Parcelamento* e de *Uso e Ocupação do Solo*. Por ser uma condição *sine qua non* a ser atendida ao determinar o que pode ou não ser implantado ou construído em cada espaço urbano, estes códigos atuam diretamente na formação e configuração do espaço urbano. O instrumento que efetiva a implantação no espaço urbano destes códigos são os *parâmetros urbanísticos* que podem ser normativos - cujo atendimento é obrigatório - ou parâmetros informativos – onde há incentivo ao uso, enquanto sugestão, mas não há força de lei.

O conteúdo e especificidades destes parâmetros variam em espaço e tempo, a cada lugar e em cada época. Na Paris do século XIX de acordo com a reforma urbana do Plano Haussmann as edificações deviam possuir a mesma altura. Esta altura, por sua vez, estava relacionada à largura da via. As edificações deveriam ser implantadas ao longo do perímetro das quadras derivadas do traçado viário e a inclinação de suas coberturas devia se limitar a 45° (BENEVOLO, 1998) (Figura 43). Já na cidade de Curitiba de 1966 (ano da transformação em lei do Plano Preliminar de Urbanismo) até os dias atuais, as edificações verticais são restritas a implantação no núcleo central da cidade e ao longo de eixos estruturais lineares. Estas edificações podem conter um embasamento colado no lote, sendo o pavimento térreo de uso exclusivo para comércio e serviços (CURITIBA, 2000, 2008; GNOATO, 2006) (Figura 44 e Figura 45).

Figura 43 - Fotografia da "Paris Haussmaniana".



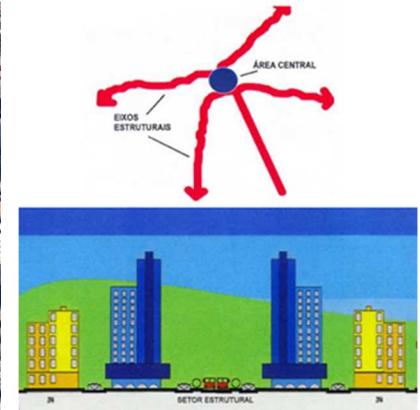
Fonte: BENEVOLO, 1998, p. 107.

Figura 44 - Um dos eixos estruturais de Curitiba.



Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@-25.4555133,-49.2843111,1922a,20y,355.9h,33.22t/data=!3m1!1e3>. Acesso em 17/06/2016.

Figura 45 - Zoneamento curitibano.



Fonte: CURITIBA, 2008, p. 28,29.

Apesar de direcionar a ocupação urbana, a aplicação de códigos e parâmetros urbanísticos não interfere na liberdade de concepção do projeto arquitetônico e urbano. Ainda quando normativos, os parâmetros contidos nos códigos urbanísticos indicam caminhos e possibilidades para determinadas configurações da concepção projetual, esses parâmetros não conduzem nem determinam a qualidade e quantidade da criatividade investida no projeto arquitetônico e urbano, tampouco seu resultado final. Dito em outras palavras, a existência de parâmetros a serem seguidos não cerceiam a criatividade do projeto, como também não garantem projetos de qualidade excepcional, “para isso são necessários arquitetos e urbanistas excepcionais” (CARMONA, 2006, p. 50).

Deste modo, esta discussão acerca dos parâmetros e códigos urbanísticos *não* pretende ponderar as repercussões favoráveis tampouco as desfavoráveis de suas aplicações na produção arquitetônica e urbana. Mas pretende evidenciar que sua existência é factual e, portanto, enquanto condição de contorno, ou inicial, acompanha a concepção edilícia e urbanística desde seus primeiros esboços seja através das legislações vigentes, das condições ambientais, econômicas, sociais, dos anseios e demandas do produtor individual do espaço²² e assim por diante. Neste sentido, a obra arquitetônica e urbana já nasce inserida num contexto preambular a ser atendido e ainda assim, seu resultado final é, em essência, distinto.

²² Proprietários de terra e promotores imobiliários influenciam na imaterial especulação imobiliária atuando no condicionamento e demandas de ocupação do espaço urbano.

Mas é justamente esse contexto de condições iniciais de contorno que fundamenta a delimitação das condições experimentais desta pesquisa: apesar do universo amostral arquitetônico e urbano ser vasto, e, apesar da liberdade criativa dos arquitetos e urbanistas, em todo universo amostral existe características que tornam os indivíduos pertencentes a um mesmo grupo (LEVIN; FOX, 2004). Entre outros fatores, os códigos e parâmetros urbanísticos atuam fortemente influenciando três destas características que comumente induzem à adoção de determinadas tipologias arquitetônicas: (i) *o modo de implantação da edificação no lote*, (ii) *a altura final da edificação derivada do número de pavimentos* e o (iii) *pé-esquerdo*²³ *de cada pavimento*.

O modo de implantação no lote (i) determina as relações das edificações com as ruas e suas quadras, contribuindo para as definições de configurações dos espaços urbanos em que elas se inserem. Um loteamento com a testada longa ou outro com a testada curta; um modo de ocupação com recuos ou outro sem recuos colado no lote; geram distribuições edilícias diferentes no tecido urbano. Diretamente associada à implantação está a altura final da edificação derivada do número de pavimentos (ii), que são determinadas por diversos fatores sendo grande parte deles vinculados aos parâmetros urbanísticos. É a relação *altura / número de pavimentos* que indica se uma edificação é ou não verticalizada. Comumente, a partir de três pavimentos uma edificação inicia sua inserção na verticalização²⁴.

²³ O pé-esquerdo é a distância entre pisos de pavimentos diferentes. Já o pé-direito é a distância entre o piso de um pavimento e a parte inferior do forro deste mesmo pavimento.

²⁴ Apesar das legislações e seus modos de aplicação prática serem respostas aos “pensamentos” e “correntes” urbanísticas vigentes à cada época, hoje, de modo simplificado e sintético, ao projetar e construir uma edificação o promotor individual do espaço deve atender, entre outras, às relações de taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento. Juntos estes dois parâmetros determinam a possibilidade de área possível de construção no lote e, por conseguinte do ganho financeiro obtido. Os parâmetros urbanísticos mais recentes tendem a diminuir a área de construção possível da lâmina de cada pavimento à medida que a altura da edificação aumenta. Assim, quando não há delimitação de gabarito máximo a altura final da edificação acaba atendendo ao equilíbrio da relação número de pavimentos/área construída/ganho obtido ao se ocupar o lote. Por isso é comum encontrar edificações verticais destinadas ao uso residencial de 15 a 25 pavimentos. As edificações destinadas a uso comercial variam numa escala maior, de 15 a 30 pavimentos.

Em ambos os casos – residenciais e comerciais – é possível aumentar a altura da edificação ao se ocupar o lote através da aplicação da Outorga Onerosa do Direito de Construir (OODC) e da Transferência do Direito de Construir (TDC) ambos instrumentos da Lei Federal nº 10.257/2001 (BRASIL, 2001). Por meio destes instrumentos é possível ceder potencial construtivo na contrapartida de ações de interesse público. Na prática, estes instrumentos viabilizam ao promotor individual do espaço o aumento dos ganhos obtidos com o aumento da área construída sob amparo da lei, possibilitando a construção de torres de edificação que chegam a possuir 45 pavimentos ou mais (BARBOSA, 2017).

Porém, é importante destacar que estas torres com grande número de pavimentos não são predominantes em tecidos urbanos consolidados. A Av. Paulista (São Paulo-SP) tipicamente comercial possui tendência vertical, iniciada nos anos 1950 e consolidada por volta dos anos 1970, de 20 pavimentos em suas edificações. Já a Av. Atlântica (Rio de Janeiro-RJ), com sua verticalização tipicamente residencial das décadas de 1950 e 1960, apresenta suas edificações em torno de 12 pavimentos com implantação colada no lote. Ou seja, ainda existam torres acima de 45 pavimentos inseridas no tecido urbano, identifica-se um intervalo de ocorrência predominante que varia de 15 a 30 pavimentos.

Juntas estas duas características derivadas dos parâmetros *urbanísticos* - o modo de implantação da edificação no lote e a altura final da edificação derivada do número de pavimentos – produzem diferentes espaços acústicos urbanos: se aberto ou fechado; se mais ou menos permeável à propagação sonora; se com ruas em “L”, ou em cânion. Nesse contexto de espaços acústicos, a hipótese de haver influência do detalhe de edificações *não* verticalizadas é menor, uma vez que rapidamente a onda sonora se propaga para campo livre²⁵.

Isto posto, diante das semelhanças e repetições existentes no universo amostral de cenários urbanos reais, proporcionadas pelas condições iniciais de contorno dos parâmetros urbanísticos que atuam no modo de implantação da edificação no lote e na altura final derivada do número de pavimentos, aclaram-se as primeiras delimitações das condições experimentais de pesquisa: foram investigadas *edificações verticais de 16 pavimentos (térreo + 15 andares)*, tanto em contexto de implantação *solta no lote* quanto *coladas no lote*²⁶.

Outra característica derivada dos códigos e parâmetros urbanísticos que pode atrelar indivíduos a um mesmo grupo amostral é o pé-esquerdo dos pavimentos das edificações verticais (iii). Habitualmente, os parâmetros urbanísticos não atuam na determinação do pé-esquerdo, e sim no estabelecimento do pé-direito mínimo de acordo com o uso que se faz de cada ambiente. Ambientes de curta permanência como corredores e banheiros tendem a apresentar pé-direito mais baixo de 2,20 a 2,30 metros. Já ambientes de permanência prolongada como salas e quartos variam o pé-direito de 2,40 a 3,00 metros.

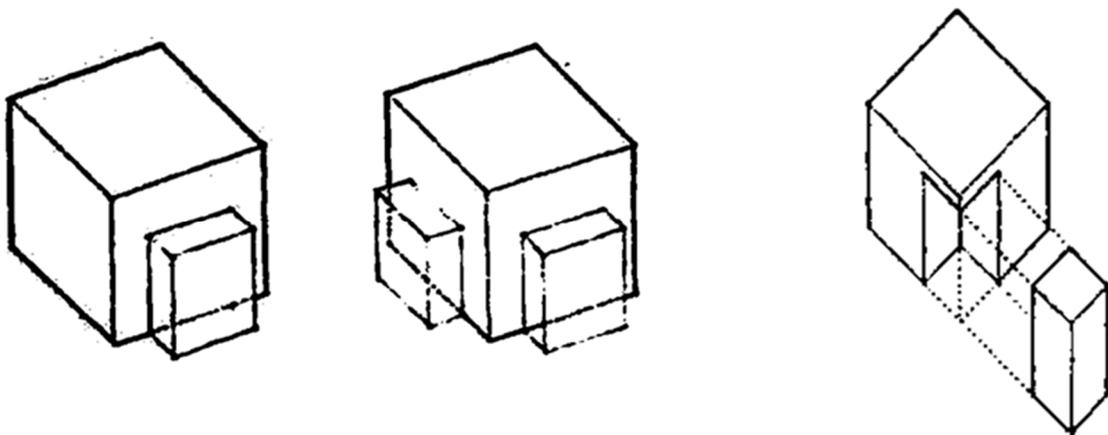
Efetivamente, o pé-esquerdo é consequência da associação entre o atendimento do pé-direito mínimo e a racionalização do sistema construtivo escolhido para a edificação. Logo, sistemas estruturais metálicos ou de concreto, lajes tradicionais ou nervuradas vão gerar diferentes relações de altura entre os pisos de cada pavimento que tendem a variar em um intervalo de 3,00 e 4,00 metros. Deste modo, foi estabelecido para as edificações verticais das condições experimentais de pesquisa um *pé-esquerdo de 3,50 metros*. O pé-esquerdo vincula-se diretamente com a última delimitação das condições experimentais a ser tratada – é entre os pavimentos das edificações verticais que estão inseridos os detalhes da forma das edificações investigados por esta pesquisa.

²⁵ Conforme apresentado no *Capítulo 2 – A propagação sonora em espaços abertos*.

²⁶ Modo de implantação também chamado de cânion pela presente pesquisa.

Nesta pesquisa, os detalhes são elementos arquitetônicos que transformam a forma volumétrica pura e inicial das edificações. Se originalmente uma edificação vertical pode ser um prisma puro, um dos modos projetuais de modificar sua forma por meio da adição e subtração de detalhes arquitetônicos (Figura 46). Estes detalhes acrescentam às edificações textura, movimento (estático/dinâmico) e sentido (horizontal/vertical) através da aplicação de princípios compositivos de ordem, eixo, simetria, hierarquia, ritmo, repetição, continuidade, entre outros (CHING, 1998).

Figura 46 - À esquerda, transformação da forma pura original por meio da adição de detalhes; à direita por meio da subtração de detalhes.



Fonte: CHING, 1998, p. 48,49.

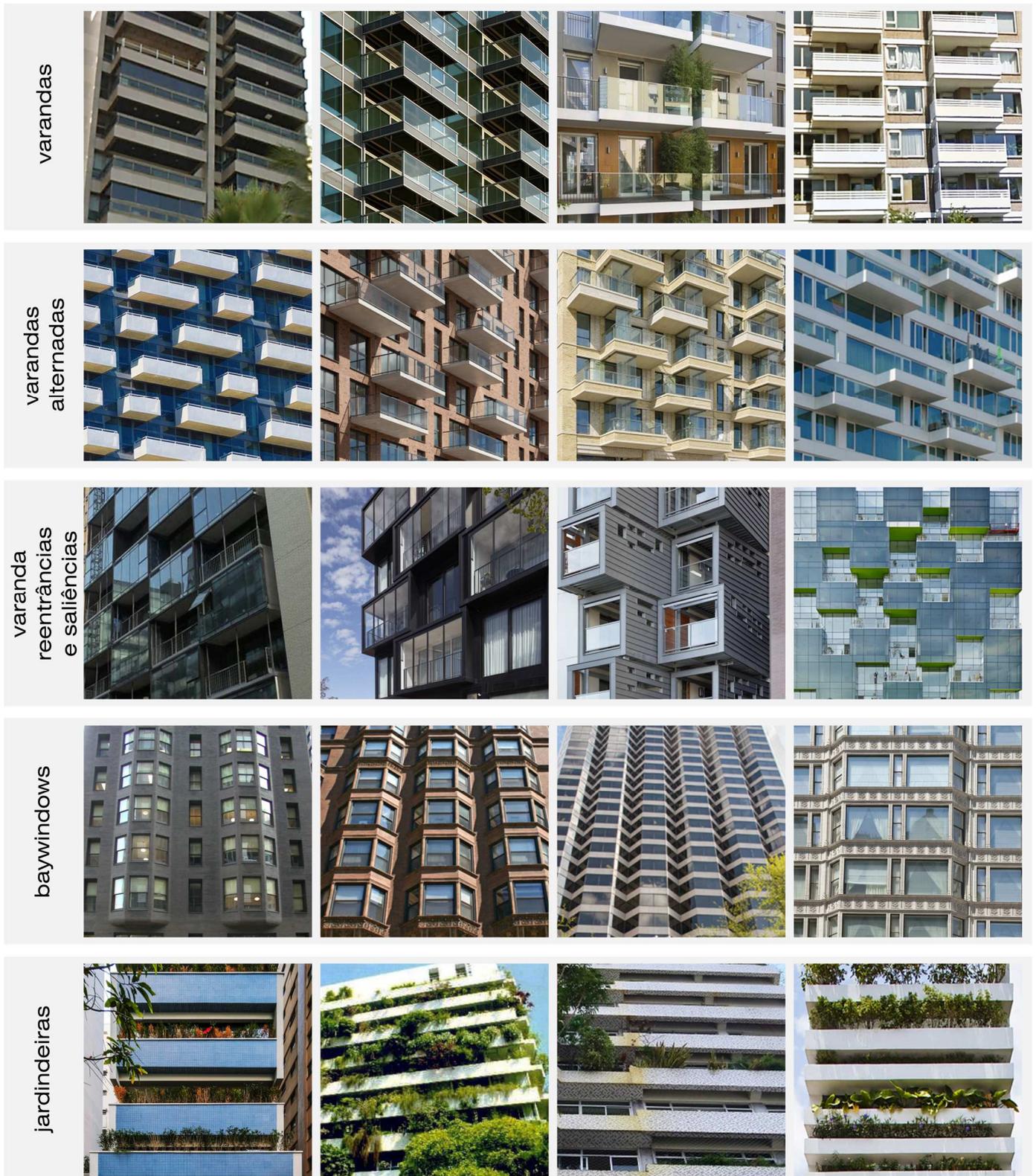
Neste modo projetual, a transformação intencional da forma pura original é concebida a partir da exploração compositiva das partes das edificações verticais: caixas de escada, poços de elevadores, *brise-soleils*, molduras de janelas, beirais, varandas, churrasqueiras, sacadas, jardineiras, septos verticais, septos horizontais e a própria estrutura de pilares e vigas. Será a manipulação destes elementos associados ao todo da edificação que possibilitará a apresentação da expressividade plástica pretendida pelo projetista²⁷. Como também, são estes mesmos elementos que possibilitam encontrar em diversas edificações verticais repetições e semelhanças que reúnem tais edificações em indivíduos pertencentes a um mesmo grupo amostral. Logo, apesar da diversidade de concepção criativa, da variedade de princípios compositivos, de tendências arquitetônicas e de estilos, *não* são as diferenças dos detalhes da forma da edificação que fundamentaram as condições experimentais desta investigação, e *sim* as suas semelhanças.

²⁷ Existem *n* modos e processos de criar e conceber em arquitetura. Logo, este modo de exploração compositiva das partes de uma edificação vertical é apenas um deles.

Assim, diante das características comuns às edificações verticais do universo amostral de cenários urbanos reais, foram delimitados os seguintes detalhes da forma das edificações: varandas, jardineiras e *baywindows*. As varandas foram investigadas em três variações arquitetônicas: (1) como adição ordenada e simétrica ao eixo da forma prismática original da edificação vertical, denominada por esta pesquisa como *varandas*; (2) como adição ordenada e alternada, denominadas *varandas alternadas*; e (3) como subtração ordenada e alternada da forma original do prisma vertical caracterizando reentrâncias e saliências em sua volumetria, denominadas de *varandas reentrâncias e saliências*. As *jardineiras* e *baywindows* foram investigadas como adição ordenada e simétrica ao eixo da forma prismática original da edificação. A Figura 47 ilustra as características semelhantes da delimitação dos detalhes da forma da edificação.

No contexto de realização da presente pesquisa, a delimitação de suas condições experimentais pode ser sintetizada em *edificações verticais de 16 pavimentos* (térreo + 15); com um pé-esquerdo de *3,50 metros*; com modo de implantação tanto *solta no lote* quanto *coladas no lote(cânion)*; com detalhes arquitetônicos, formando o grupo experimental, compostos por *varandas (1)*, *varandas alternadas (2)*, *varandas em reentrâncias e saliências (3)*, *baywindows (4)* e *jardineiras (5)*; e com *edificações sem detalhes* arquitetônicos formando o grupo de controle. Tais condições experimentais são esquematizadas graficamente na Figura 48.

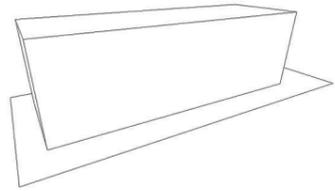
Figura 47 – Semelhanças entre detalhes arquitetônicos investigados.



Fonte: para cada uma das imagens, vide apêndice A.

EDIFICAÇÕES COLADAS NO LOTE

grupo de controle sem detalhes



EDIFICAÇÕES SOLTAS NO LOTE

grupo de controle sem detalhes

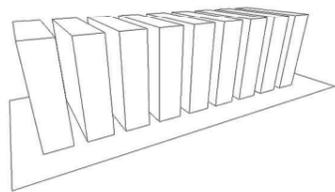
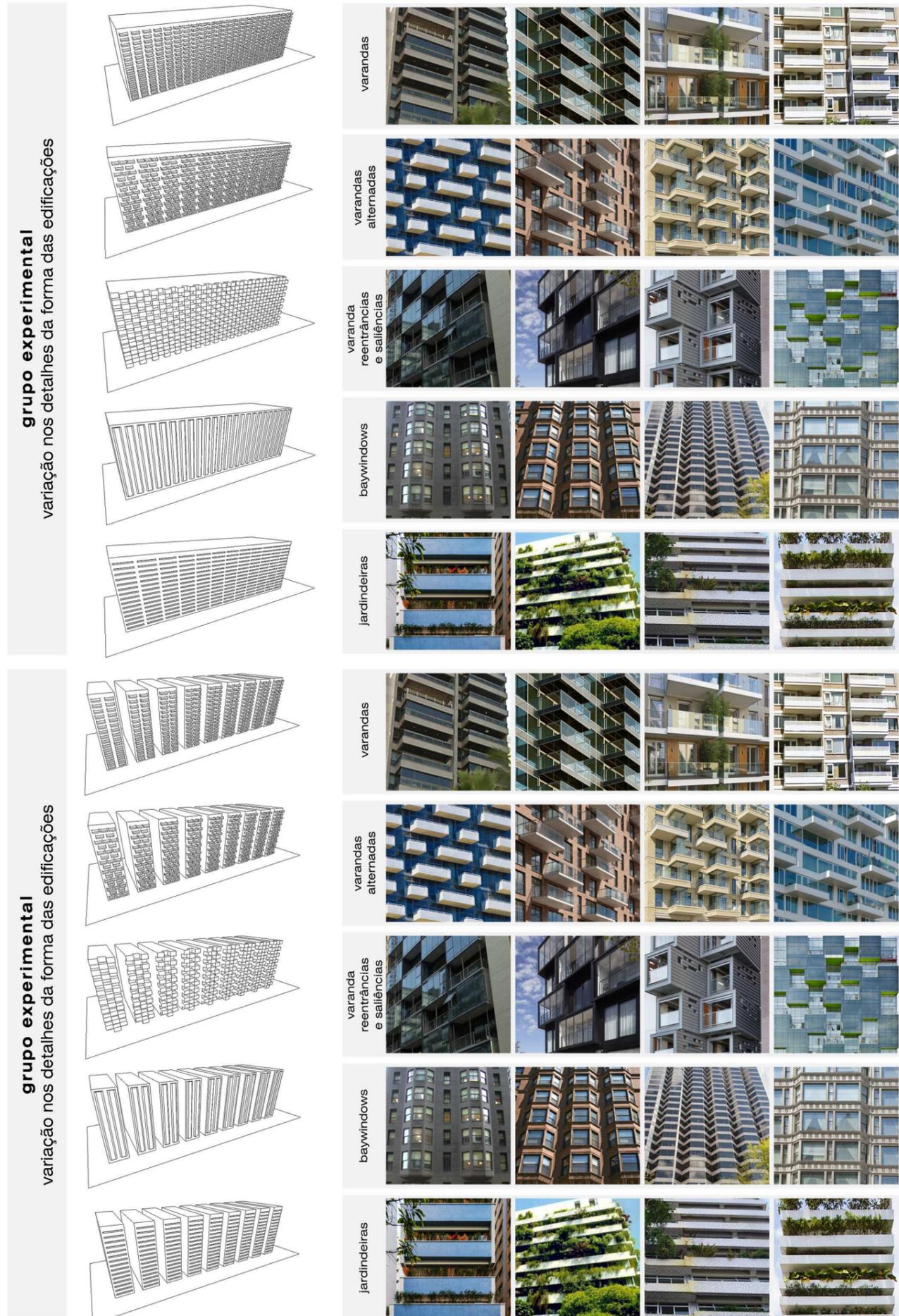


Figura 48 - Representação esquemática das condições experimentais de pesquisa.

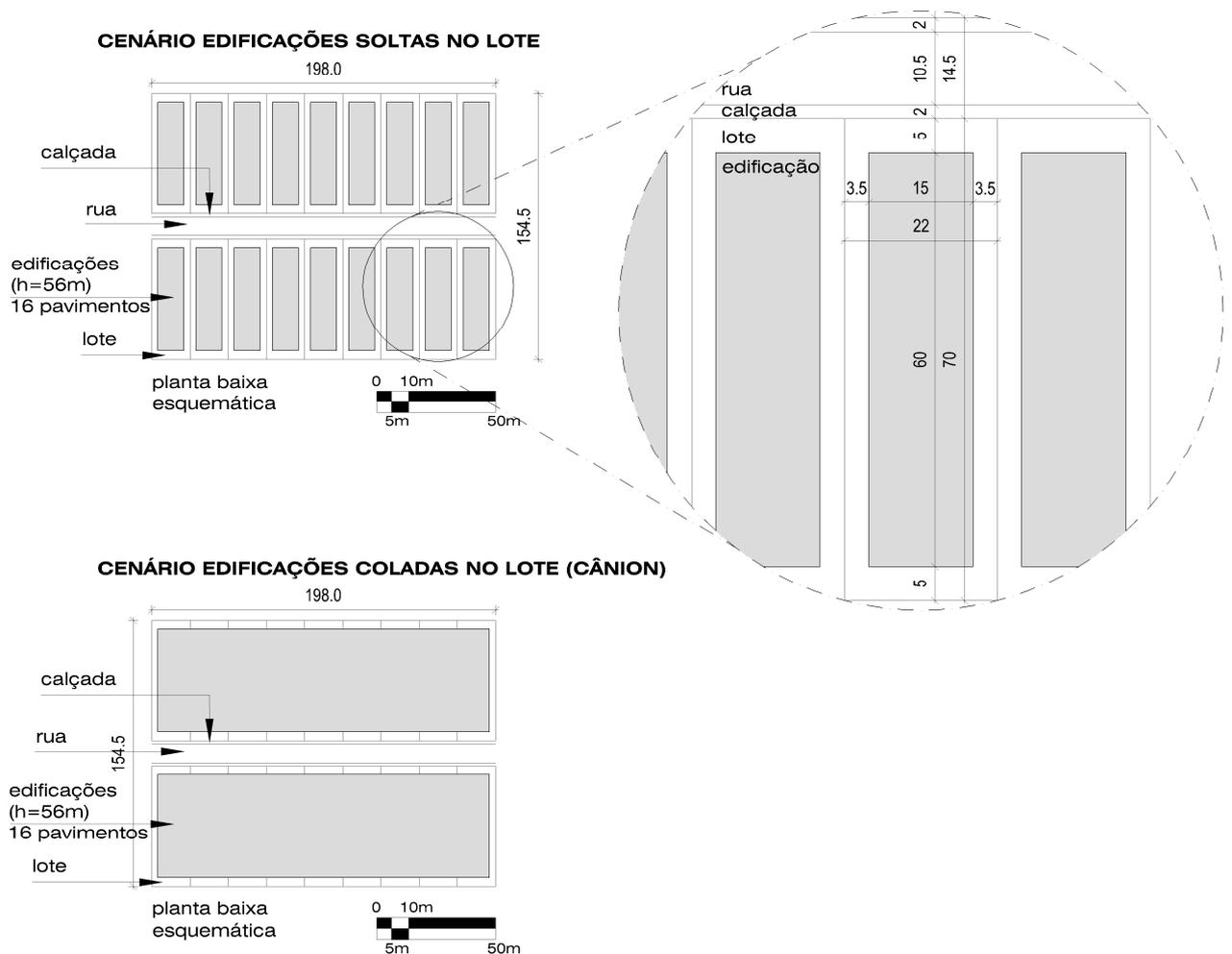


Fonte: a autora.

4.3. Os cenários urbanos hipotéticos

As configurações e dimensionamento dos cenários hipotéticos foram delineados a partir de relações de implantação possíveis de serem identificadas em um espaço urbano real. Assim, tanto na condição experimental solta no lote, quanto na colada ao lote, as edificações verticais foram distribuídas ao longo de cada um dos lados de uma rua hipotética, e implantadas com um recuo frontal de 5 metros. Nas edificações soltas no lote os recuos laterais considerados foram de 3,50 metros. Estas e outras dimensões são ilustradas na Figura 49.

Figura 49 - Dimensionamento dos cenários urbanos hipotéticos.



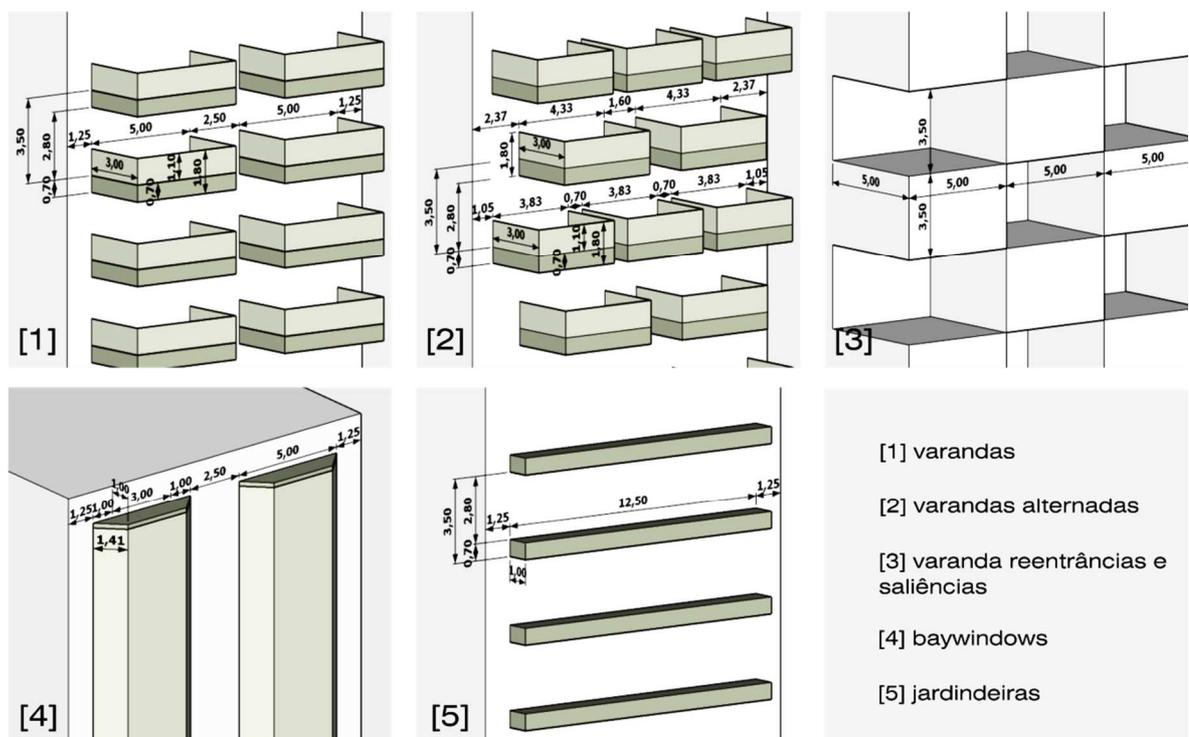
Fonte: a autora.

Na elaboração dos cenários urbanos, três aspectos foram fundamentais para o dimensionamento dos detalhes da forma da edificação. O primeiro deles refere-se à relação das dimensões dos detalhes arquitetônicos e o comprimento da onda sonora. Por possuírem comprimentos de onda pequenos, as altas frequências são suscetíveis a elementos

arquitetônicos também pequenos. Por outro lado, as baixas frequências apresentam grandes comprimentos de onda, o que torna alguns dos detalhes arquitetônicos existentes no meio urbano imperceptíveis a estas frequências. Para que quaisquer detalhes arquitetônicos sejam perceptíveis à onda sonora, suas dimensões devem possuir pelo menos $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda da frequência analisada para relações de absorção e $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda para relações de espalhamento²⁸ (COX; D'ANTONIO, 2009).

Deste modo, os menores detalhes arquitetônicos dos cenários urbanos hipotéticos foram dimensionados a partir de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda²⁹ da frequência 125 Hz, aproximadamente 0,70 m, como ilustra o dimensionamento dos detalhes da forma das edificações da Figura 50. Esta dimensão se relaciona aos outros dois aspectos que fundamentaram o dimensionamento dos detalhes: 0,70 m também atende a um dimensionamento possível para um sistema de vigas de sustentação de varandas, *baywindows* e jardineiras, bem como atende às recomendações de dimensões mínimas a serem consideradas pelo *software* utilizado para obtenção dos parâmetros acústicos investigados.

Figura 50 – Dimensionamento dos detalhes arquitetônicos investigados.



Fonte: a autora.

²⁸ No caso do espalhamento, além da frequência que se deseja analisar, pode-se abranger ainda até uma oitava abaixo (COX; D'ANTONIO, 2009).

²⁹ $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda na frequência de 125 Hz – sendo a temperatura do ar 20° e a velocidade de propagação 343 m/s – é de 0,686 m, ou aproximadamente 0,70 m.

Tabela 2 - Materiais dos cenários urbanos e seus respectivos coeficientes de absorção por frequência.

Elemento	Material da superfície	Coeficientes de absorção por frequência (Hz)						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Céu aberto	-	1	1	1	1	1	1	1
Edificações	Concreto ou cimento liso, pintado ou envidraçado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Detalhes	Concreto ou cimento liso, pintado ou envidraçado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Piso lote	Concreto ou cimento sem acabamento	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,07
Piso calçada	Concreto ou cimento sem acabamento	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,07
Piso rua	Asfalto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02

Fonte: (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS; GIL, 2016; JANG; KIM; JEON, 2015).

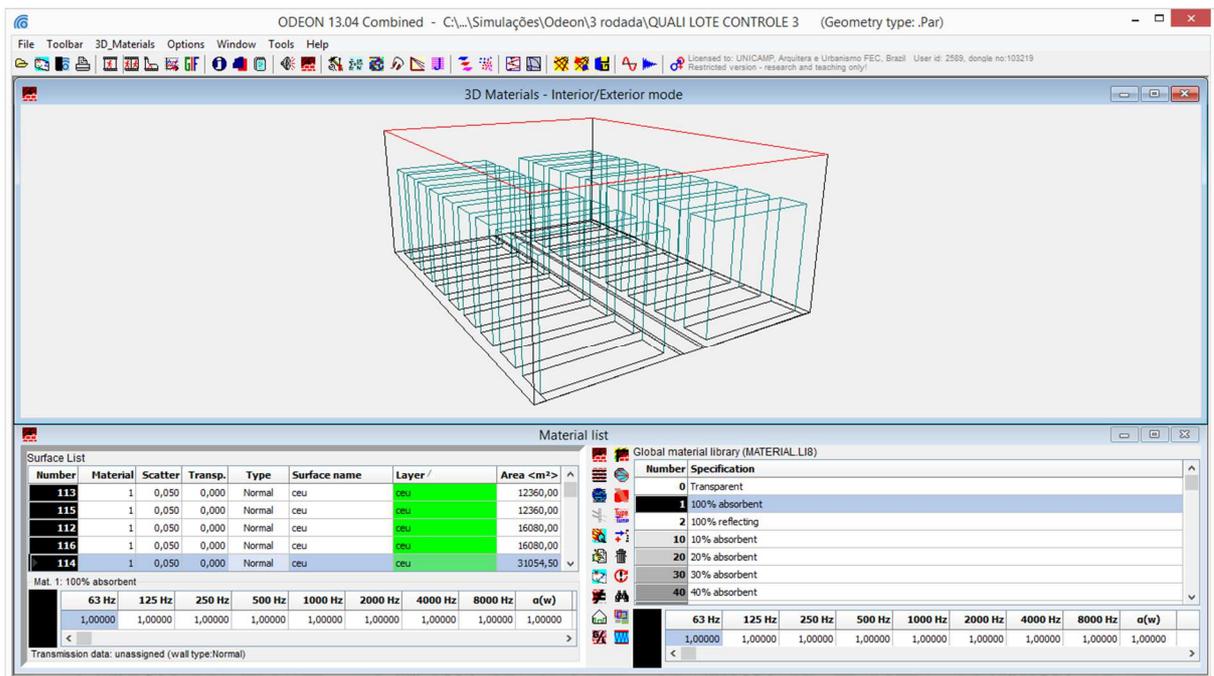
Ainda na Tabela 2, observa-se que o elemento “céu aberto” recebeu 100% de absorção para todas as frequências. Este é um importante diferencial metodológico entre simulações de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica de *espaços abertos* e *espaços fechados*: em espaços abertos são necessárias superfícies que simulem as condições acústicas de campo livre. Estas superfícies são comumente modeladas como uma “caixa” que envolve todo o modelo. A base desta caixa é constituída pelas superfícies do piso do espaço urbano investigado e por suas respectivas propriedades acústicas. As outras faces da caixa completam a caracterização virtual do céu aberto recebendo, portanto, coeficiente de absorção 1 e assim reproduzindo computacionalmente o decaimento sonoro proporcionado pela absorção atmosférica em espaços abertos.

A Figura 52 apresenta a caixa que representa o céu aberto a partir da interface de trabalho do *software* de acústica geométrica utilizado por esta pesquisa com o modelo virtual do grupo de controle do modo de implantação com as edificações soltas no lote utilizado como exemplo. Exceto o piso, todas as superfícies da caixa representam céu aberto são, portanto, 100% absorventes. As arestas em vermelho ressaltam a face da “tampa da caixa”.

A próxima etapa na construção dos modelos foi a determinação da posição da fonte sonora e os pontos receptores. Foi utilizada uma fonte sonora pontual omnidirecional. Seu nível de potência global (L_w) é de 74 dB e foi posicionada a 1,50 m de altura do piso no eixo central horizontal da rua do espaço urbano investigado. Na Figura 53 a fonte sonora é representada na cor azul. Para os pontos receptores, também ilustrados na Figura 53 em vermelho, foram determinadas 32 posições arranjadas linearmente com alturas variadas. A primeira linha de

pontos receptores dista 1,20 m de altura do piso. A segunda 4 m do piso, mesma altura estabelecida para elaboração dos mapas acústicos (BRAMBILLA, 2013). A terceira linha foi locada próxima à metade do eixo vertical em relação à altura final das edificações, na região do 7º pavimento a 24,00 m do piso. A última e quarta linha de pontos receptores dista 44,50 m do piso e foi posicionada próxima ao 13º pavimento.

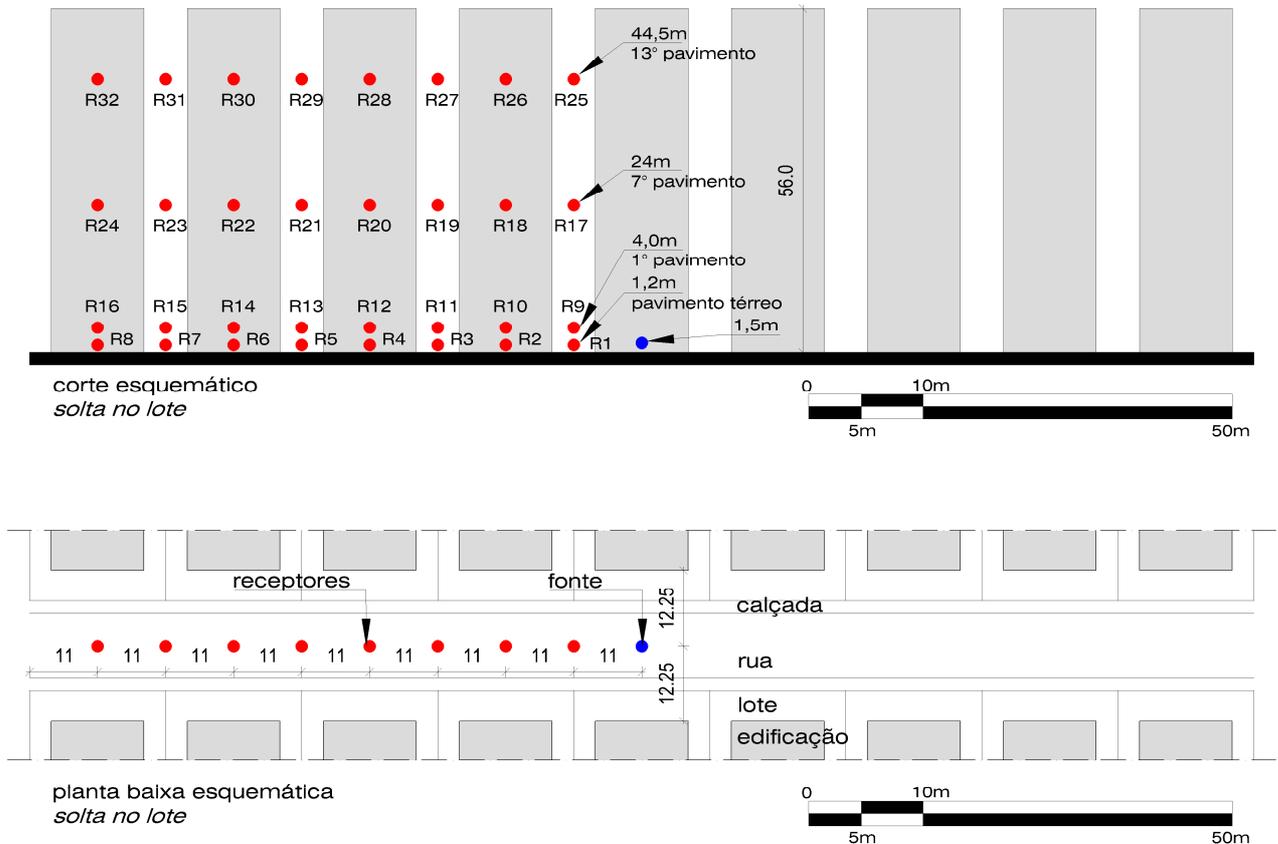
Figura 52 - Interface do Odeon com a visualização do modelo virtual do grupo de controle no modo de implantação lote.



Fonte: a autora.

Na próxima etapa – após a inserção dos materiais das superfícies, da fonte sonora e dos pontos receptores – foi feita a primeira simulação de verificação do modelo porque no Odeon é necessário ratificar que a caixa que envolve qualquer modelo esteja “fechada” (*investigate rays*). Isso significa que um raio sonoro não deve ser projetado para fora do modelo virtual, um raio não deve “escapar” da caixa. Assim, todos os raios sonoros emitidos pela fonte devem entrar em contato com as superfícies do modelo, sendo seus efeitos acústicos de reflexão ou absorção derivados deste contato com as propriedades acústicas atribuídas à cada superfície. Na caracterização das superfícies que representam o céu aberto, por exemplo, os raios emitidos pela fonte devem ser 100% absorvidos pela consideração das propriedades dos materiais, e não porque o raio sonoro foi projetado para fora do ambiente de estudo por algum equívoco na construção geométrica do modelo virtual.

Figura 53 – Posicionamento de fonte sonora, em azul, e pontos receptores em vermelho.



Fonte: a autora

A verificação da “vedação” da caixa é fundamental para propiciar resultados confiáveis dos cálculos dos parâmetros acústicos. Neste processo, caso seja verificado que a caixa está “aberta” dever-se retornar a etapa inicial de elaboração tridimensional do modelo no *software* SketchUp, corrigir o erro de construção geométrica e repetir novamente as etapas seguintes.

Após a verificação da vedação da caixa, definiram-se as configurações de *setup* para os cálculos dos parâmetros acústicos, apresentadas na Tabela 3. Estas configurações seguiram tanto a literatura existente acerca de simulações de modelos virtuais em microescala urbana fundamentados em acústica geométrica³⁰, quanto as recomendações do manual do Odeon (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS; GIL, 2016). As definições de *setup* para os cálculos dos parâmetros acústicos foram repetidas para cada um dos modelos (variável de controle).

Posteriormente, foram determinadas que tipos de associações entre fontes e receptores, nomeadas de *jobs* pelo *software*, seriam calculadas. Foi definida uma associação para cada um dos

³⁰ Discutidos no Capítulo 3 - *A acústica e a microescala urbana*.

pontos receptores e a fonte sonora, resultando em 32 *single-point jobs*; e um cálculo simultâneo entre todos os 32 pontos receptores e a fonte, resultando em 01 *multi-point job*. A diferença entre o *single-point* e o *multi-point* reside no tipo de informações acústicas que são obtidas. Relações de parâmetros *versus* distância e relações dos parâmetros de energia para todos os pontos receptores simultaneamente são obtidas no cálculo *multi-point*. Já curvas de decaimento sonoro, diagramas de impulso, resposta impulsiva e trajetos de reflexão dos raios emitidos são derivados do cálculo *single-point*.

Tabela 3 - Configurações utilizadas no cálculo dos cenários urbanos hipotéticos.

Item	Configurações
Ordem de transição de métodos (<i>transition order</i>)	TO = 3
Número de raios tardios (<i>late rays</i>)	200.000 raios
Número de primeiros raios (<i>early rays</i>)	definido automaticamente pelo <i>software</i>
Comprimento da resposta impulsiva	10.000 ms
Resolução da resposta impulsiva	3 ms
Espalhamento da superfície (<i>surface scattering</i>)	0,05 (recomendado pelo Odeon)

Fonte: a autora.

Uma vez definidas estas associações, procedeu-se ao cálculo dos parâmetros nível de pressão sonora (SPL), tempo de reverberação (T30) e tempo inicial de decaimento (EDT) para obtenção dos dados acústicos analisados. Foram calculadas 384 relações fonte-receptor para as condições experimentais *solta no lote*, e, 384 relações fonte-receptor para aquelas *coladas no lote*. A presente pesquisa totalizou então, 768 cálculos de relações fonte-receptor em todas as suas condições experimentais, e, de 9216 relações fonte-receptor em todos os parâmetros e frequências investigadas. Os dados dos parâmetros obtidos com os cálculos acústicos foram organizados em planilhas extraídas do *software* Odeon. A apresentação dos dados foi sistematizada em gráficos dos parâmetros em função da frequência e dos parâmetros em função do ponto receptor com uso de programação de rotinas com o *software* Matlab 2015 (MathWorks).

4.5. Forma de análise de dados

Os resultados dos parâmetros SPL, T30 e EDT para todas as frequências em bandas de oitava obtidos com as simulações acústicas das condições experimentais de pesquisa investigadas são

expostos e analisados de duas maneiras: (i) em termos objetivos, a partir dos valores absolutos e (ii) em termos subjetivos, a partir da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros, o JND (*just noticeable difference*)³¹.

Em termos de valores absolutos (i) a análise objetiva terá como base referencial os resultados dos parâmetros acústicos obtidos com as simulações do grupo experimental em relação comparativa aos valores apresentados pelo grupo de controle, observando os efeitos da presença *versus* ausência de detalhes. Nas apreciações dos dados são apontadas tendências de desempenho e discutidos os possíveis motivos dos comportamentos acústicos identificados. Neste sentido, mais importante do que o valor absoluto em si, será a variação identificada entre a presença *versus* ausência de detalhes, seja aumentando o valor dos parâmetros, seja diminuindo-os.

Na (ii) análise subjetiva, o enfoque está na associação dos valores absolutos obtidos com seus respectivos JND. O valor da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano difere para cada parâmetro acústico. Para o nível de pressão sonora (SPL) o JND é da ordem de 1 dB. Para o tempo de reverberação (T30) e para o tempo inicial de decaimento (EDT) o JND a menor variação percebida é equivalente a 5% o valor absoluto de cada parâmetro (FASTL; ZWICKER, 2007; GELFAND, 2004; ISO, 2009; VORLÄNDER, 1995).

Os parâmetros obtidos com as simulações acústicas serão associados aos seus respectivos JND através da Equação 6, que consiste numa adaptação da expressão proposta por Bork (2000) para análise de erro baseado em JND para acústica de salas, chamada por esta pesquisa de *equação-base* (Equação 7).

$$\text{Diferença em JND} = \frac{|PA_{\text{controle}} - PA_{\text{experimental}}|}{JND} \quad (6)$$

Onde:

PA_{controle}

valor do grupo de controle para o parâmetro acústico em avaliação

$PA_{\text{experimental}}$

valor do grupo experimental para o parâmetro acústico em avaliação

JND

menor diferença percebida do parâmetro em avaliação do grupo de controle

O princípio da equação-base (Equação 7) é comparar os valores de parâmetros acústicos de um espaço arquitetônico obtidos a partir de medições *in situ* aos valores destes mesmos

³¹ O JND também é discutido Capítulo 3 - *A acústica e a microescala urbana*.

parâmetros obtidos a partir de simulações acústicas computacionais. Se os resultados derivados da equação-base forem de até 1 JND a diferença entre o medido e o simulado é aceitável, pois independentemente da variação de valores absolutos do parâmetro acústico, esta modificação *não será percebida* pelo receptor. O que indica que o modelo computacional possui uma ótima caracterização da situação real.

$$Error = \frac{|PA_{medido} - PA_{simulado}|}{JND} \quad (7)$$

Onde:

PA_{medido} valor medido para o parâmetro acústico em avaliação
 $PA_{simulado}$ valor simulado para o parâmetro acústico em avaliação
 JND menor diferença percebida do parâmetro medido

Como esta investigação se propõe a demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho da acústica urbana a partir da produção de um ambiente de estudo virtual³², as relações da equação-base foram ajustadas. Os parâmetros acústicos obtidos com as medições *in situ*, na equação-base (Equação 7) tornam-se, na Equação 6 proposta por esta pesquisa, os valores dos parâmetros acústicos obtidos com as simulações computacionais do *grupo de controle* – sem detalhes da forma das edificações ($PA_{controle}$). E os parâmetros simulados, tornam-se os valores dos parâmetros acústicos obtidos com as simulações computacionais do *grupo experimental* – com detalhes ($PA_{experimental}$).

Os valores que serão obtidos com esta equação indicarão que quanto maior for seu resultado, maior são as diferenças entre os parâmetros de cada cenário do grupo experimental em relação ao grupo de controle, comparando a presença *versus* ausência de detalhes. Por conseguinte, quanto menor, mais próximos da semelhança estarão os parâmetros.

Como o JND significa a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros (GELFAND, 2004), encontrar diferenças maiores do que 1 JND em cada parâmetro das condições experimentais de pesquisa investigadas, significará constatar que a presença de detalhes não só influencia e modifica o desempenho acústico do espaço urbano, como também modificará a percepção acústica de quem ocupa estes espaços.

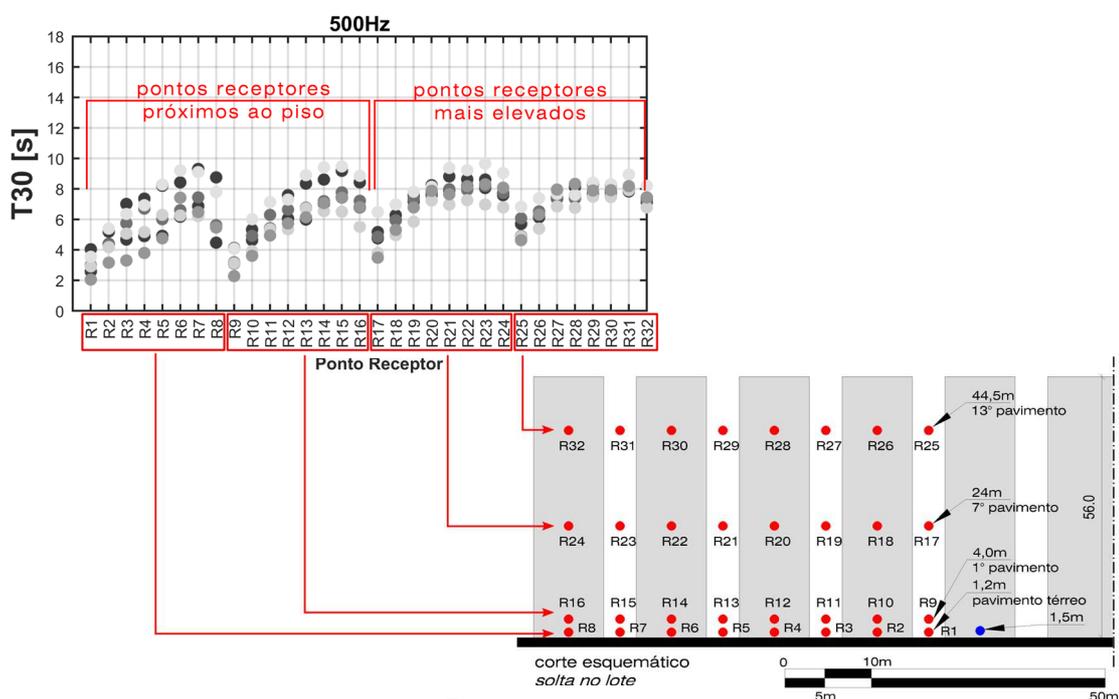
³² Discutido no item 4.1 – A operacionalização das variáveis de pesquisa.

Isto posto, a identificação de diferenças absolutas reforçada pela análise de JND entre os parâmetros que avaliam o desempenho acústico urbano nesta pesquisa, indicará a comprovação da hipótese de que se existirem espaços urbanos delineados por edificações com presença profusa de *detalhes em sua forma*, então há modificação no *desempenho acústico* desse mesmo espaço.

5. Apresentação e discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no processo de demonstrar a influência do detalhe da forma das edificações no desempenho da acústica urbana por meio das simulações acústicas das condições experimentais propostas por esta pesquisa: os grupos de controle *sem detalhes* e dos grupos experimentais *com detalhes*, para as situações de implantação soltas no lote e coladas no lote (cânion). São expostos e analisados os valores absolutos e as diferenças em JND para cada um dos parâmetros investigados: nível de pressão sonora (SPL), tempo de reverberação (T30), e tempo inicial de decaimento (EDT). Os dados obtidos são apresentados de modo sistematizado em gráficos com os valores dos parâmetros em função do ponto receptor. Deste modo, pode-se associar rapidamente a relação de altura e posicionamento dos pontos receptores em relação ao contexto da rua dos cenários urbanos hipotéticos. A Figura 54 ilustra a visualização do modo de disposição dos pontos receptores nos gráficos em relação aos pontos receptores da rua. A discussão acerca dos parâmetros acústicos investigados acontece conjuntamente para T30 e EDT, pois ambos representam a sensação subjetiva de reverberância, enquanto o SPL, que representa a sensação de “volume” sonoro, é apresentado individualmente.

Figura 54 - Modo de apresentação dos parâmetros acústicos nos gráficos em relação aos pontos receptores, tomando como base a Figura 53 já apresentada.



Fonte: a autora.

5.1. Nível de Pressão Sonora (SPL)

A Figura 55 mostra os resultados obtidos para o nível de pressão sonora em função dos pontos receptores distribuídos por frequência da situação de implantação *solta no lote*. Observando os gráficos em todas as frequências da Figura 55 percebe-se que o SPL dos pontos receptores mais próximos à fonte sonora - pontos R1, R2, R9 e R10 (Tabela 4) - apresentam comportamento de diminuição de energia sonora semelhante à propagação em campo livre. Há o decaimento de aproximadamente 6 dB para cada dobro da distância e assim sendo, nos pontos R1, R2, R9 e R10 a propagação é regida pela lei do inverso da distância. Para os outros pontos receptores os valores de SPL obtidos são influenciados pelo trajeto de propagação da onda sonora e, portanto, pelos fatores que interferem na propagação sonora em espaços abertos discutidos teoricamente no capítulo 2 – *A propagação sonora em espaços abertos*.

Tabela 4 - Distâncias dos pontos receptores à fonte sonora.

Receptores pavimento térreo (h=1,2 m do piso)	R1 11 m	R2 22 m	R3 33 m	R4 44 m	R5 55 m	R6 66 m	R7 77 m	R8 88 m
Receptores 1° pavimento (h=4 m do piso)	R9 11,28 m	R10 22,14 m	R11 33,09 m	R12 44,07 m	R13 55,08 m	R14 66,05 m	R15 77,04 m	R16 88,04 m
Receptores 7° pavimento (h=24 m do piso)	R17 25,04 m	R18 31,47 m	R19 39,94 m	R20 49,42 m	R21 59,42 m	R22 69,73 m	R23 80,22 m	R24 90,83 m
Receptores 13° pavimento (h=44,5 m do piso)	R25 44,38 m	R26 48,30 m	R27 54,20 m	R28 61,52 m	R29 69,81 m	R30 78,77 m	R31 88,19 m	R32 97,94 m

Fonte: a autora.

De modo predominante, identifica-se por meio da Figura 55 que a presença dos detalhes arquitetônicos *aumentou* os níveis de pressão sonora dos cenários urbanos. Este aumento ocorre em todas as frequências nos pontos receptores mais próximos da superfície do piso, àqueles a 1,2 m de altura - R1 a R8, e, àqueles a 4 m de altura – R9 a R16, principalmente nos cenários urbanos *varandas, varandas alternadas e jardineiras*.

O aumento do nível de pressão sonora (SPL) na presença dos detalhes pode parecer inesperado uma vez que a construção do raciocínio teórico acústico levaria a suposição de que os detalhes arquitetônicos acrescentam superfícies para as múltiplas reflexões da onda sonora, logo, cada nova reflexão induziria à redução progressiva da energia sonora. Seguindo esta dedução lógica, os detalhes causariam a diminuição da energia sonora, e não o aumento predominante encontrado nos cenários urbanos investigados.

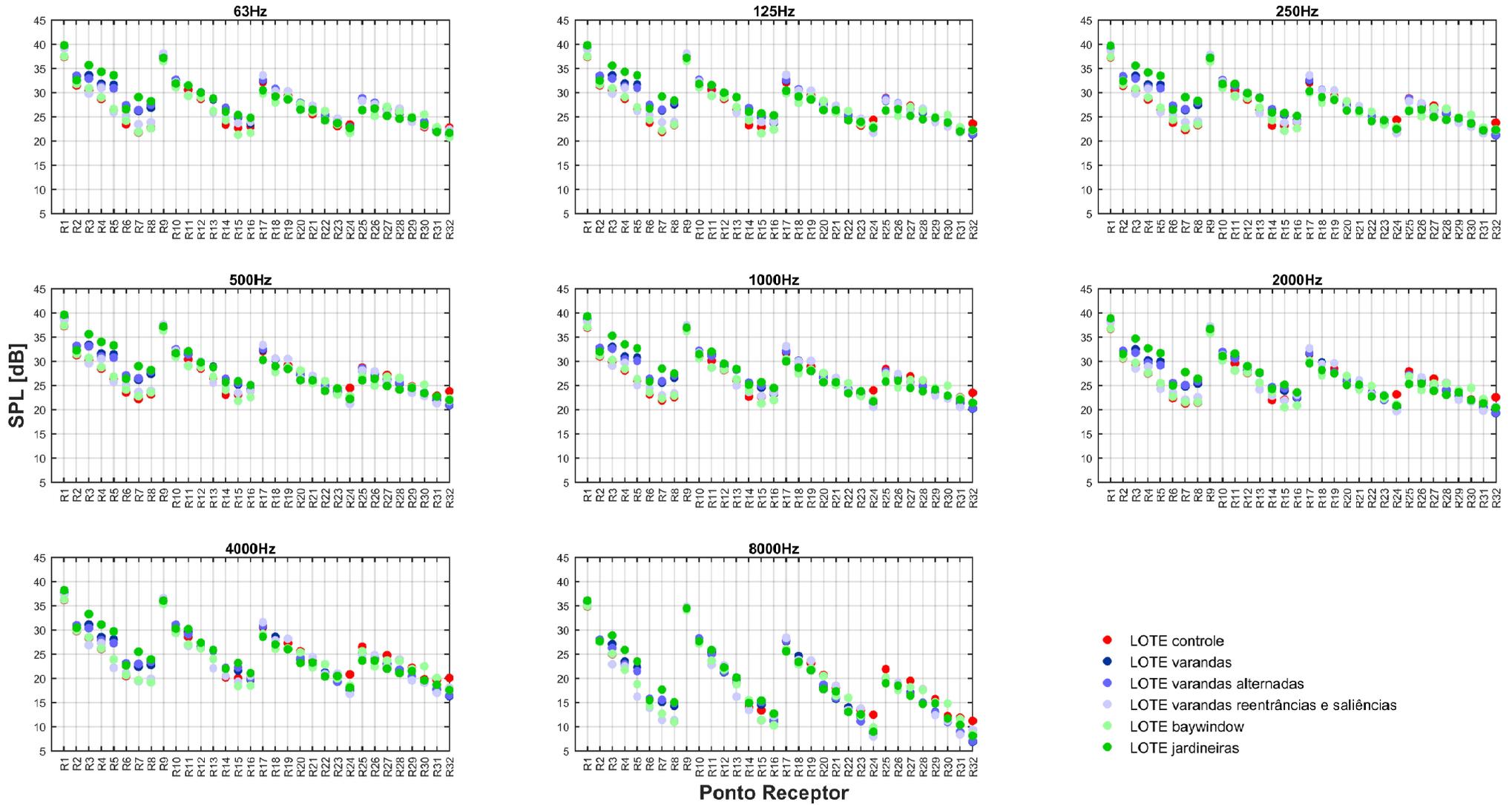
Na verdade, essa dedução do fenômeno acústico é exatamente o que ocorre mas com um intervalo de tempo diferente para o início do decaimento da energia entre os cenários com detalhes e sem detalhes. Antes da redução progressiva da energia sonora nos cenários com detalhes arquitetônicos, a profusão de primeiras reflexões derivadas da presença destes detalhes da forma das edificações forma um campo sonoro com grande concentração de energia que permanece por mais tempo no espaço urbano da rua antes de decair mais rapidamente do que no cenário do grupo de controle – sem detalhes. O excesso de primeiras reflexões é propiciado tanto pela presença dos detalhes arquitetônicos quanto pelas características acústicas altamente reflexivas de seus materiais compositivos, como são os vidros e os concretos encontrados tipicamente no espaço urbano.

Este processo de concentração e aumento da energia sonora propiciado pelas primeiras reflexões nos cenários com detalhes pode ser melhor elucidado por meio da Figura 56 que apresenta a visualização das sucessivas reflexões ao longo do tempo nos cenários urbanos do grupo de *controle* e do grupo experimental *varandas alternadas*. Nesta figura, cada raio sonoro é representado por um ponto colorido. As cores dos pontos são estabelecidas de acordo com a ordem em que são refletidas: o som direto recebe a cor [0], um tom de vinho com marrom. As 1^{as} e 2^{as} reflexões recebem as cores [1] verde e [2] um tom de ocre amarelado, e assim sucessivamente como indicado na legenda. Estas cores por ordem de reflexão são determinadas automaticamente pelo *software* Odeon, sem a possibilidade de edição por parte do usuário.

O tempo de 150 ms da Figura 56 evidencia que as reflexões propiciadas pelos detalhes arquitetônicos do cenário *varandas alternadas* atingem mais rapidamente a 5^a e 6^a ordem de reflexão em comparação com o mesmo tempo do grupo de controle sem detalhes.

Na continuidade da propagação sonora, observa-se no tempo de 300 ms a concentração de reflexões difusas no cenário urbano *varandas alternadas* – representadas pelo excesso de pontos azuis no centro do cenário urbano – levando ao aumento da energia sonora e ao consequente aumento identificado do nível de pressão sonora na presença dos detalhes arquitetônicos. Já no grupo de controle no tempo de 300 ms percebe-se pela ausência e rarefação de pontos no centro do cenário urbano que as reflexões possuem um caráter bem mais especular do que

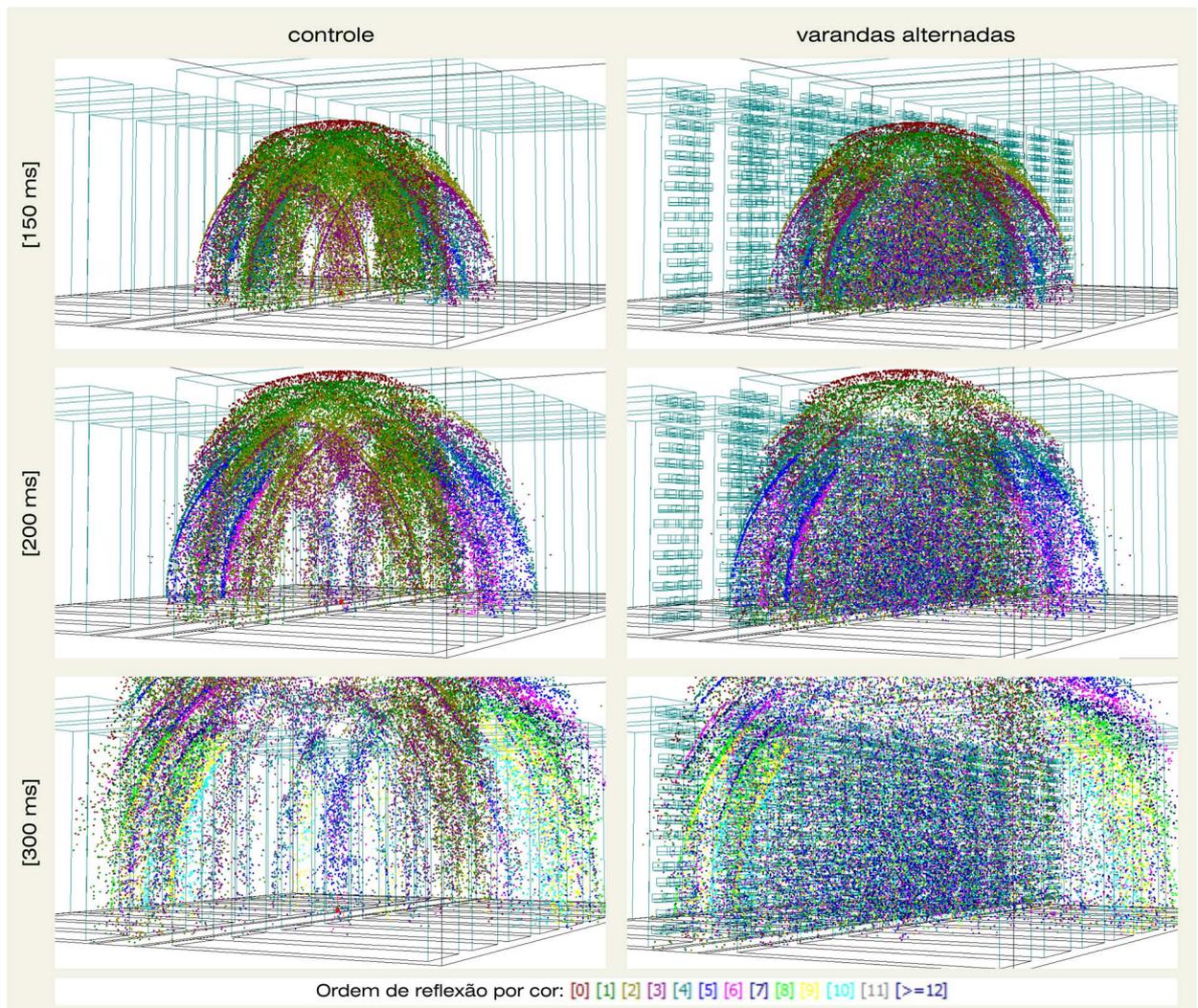
Figura 55 – LOTE - Nível de pressão sonora (SPL) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.

difuso, fazendo com que não haja concentração de reflexões difusas, levando o cenário urbano sem detalhes arquitetônicos a apresentar menores níveis de pressão sonora (SPL) para os receptores próximos ao piso da rua entre as condições experimentais investigadas.

Figura 56 - Visualização da propagação sonora ao longo do tempo.



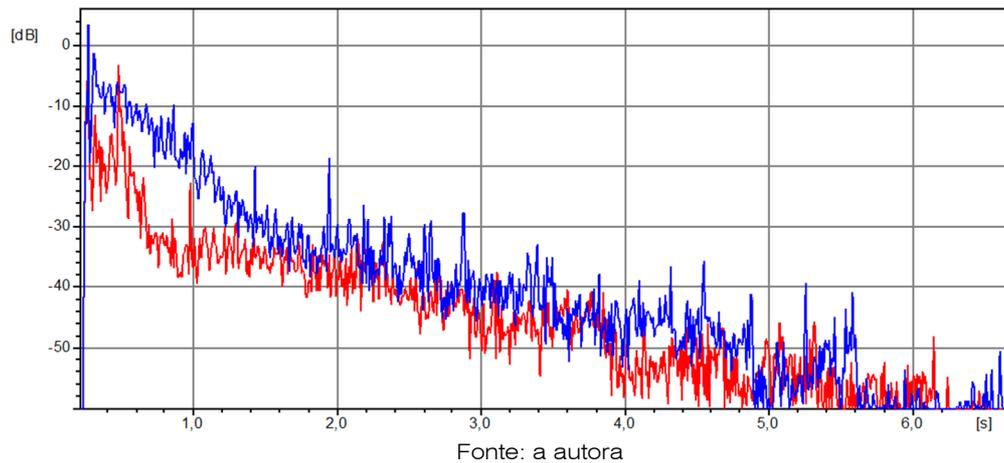
Fonte: a autora.

A visualização da curva tempo-energia (*energy-time curve* - ETC) na Figura 57 reforça este comportamento acústico identificado de aumento de energia sonora com a presença dos detalhes arquitetônicos do cenário *varandas alternadas* em relação ao grupo de controle – sem detalhes.

A exceção a esse comportamento foi encontrada no grupo experimental do cenário urbano *baywindow*, que de maneira geral apresentou resultados de nível de pressão sonora similares aos

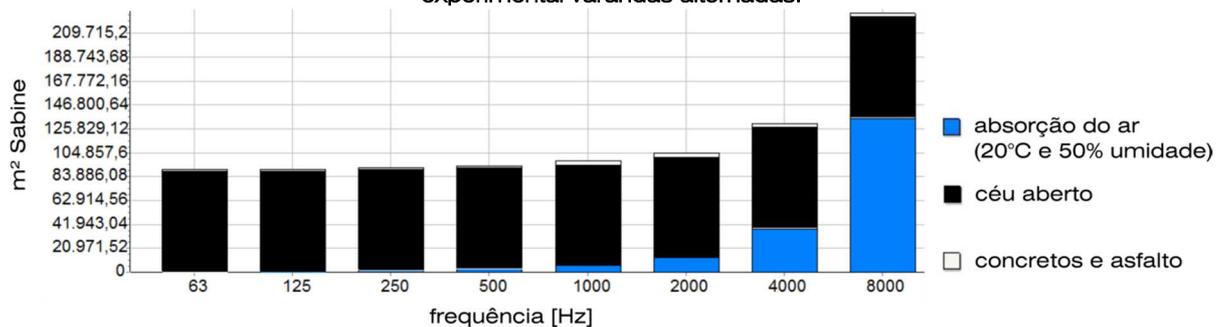
do grupo de controle. Ao observar o item 4 da Figura 50 (página 70) percebe-se que a similaridade de resultados pode ser derivada das grandes superfícies verticais, contínuas e paralelas à fachada que caracterizam as *baywindow* do cenário urbano investigado, reproduzindo, em certo grau, as longas fachadas lisas das edificações do grupo de controle.

Figura 57 – Curva tempo-energia do ponto R13. Em vermelho o grupo de controle e em azul o grupo experimental cenário varandas alternadas



Retomando a análise dos gráficos da Figura 55, observando os pontos mais elevados, a 28 m – R17 a R24, e, a 52 m de altura – R25 a R32, para as frequências de 63 Hz a 1000 Hz, percebe-se que há pouca variação nos resultados de SPL obtidos nas condições experimentais investigadas predominando a sobreposição e agrupamento de valores. Contudo, nestes pontos receptores mais elevados, nas frequências mais altas – 2000 Hz a 8000 Hz - a presença dos detalhes arquitetônicos leva à *diminuição* dos níveis de pressão sonora. Mas esta diminuição do SPL nos pontos mais altos para as frequências de 2000 Hz a 8000 Hz está muito mais vinculado a grande quantidade de absorção de energia sonora promovida pelo ar, como ilustra a Figura 58, do que necessariamente associado a presença dos detalhes arquitetônicos.

Figura 58 - Distribuição de absorção m^2 Sabine por frequência em banda de oitava da condição experimental varandas alternadas.



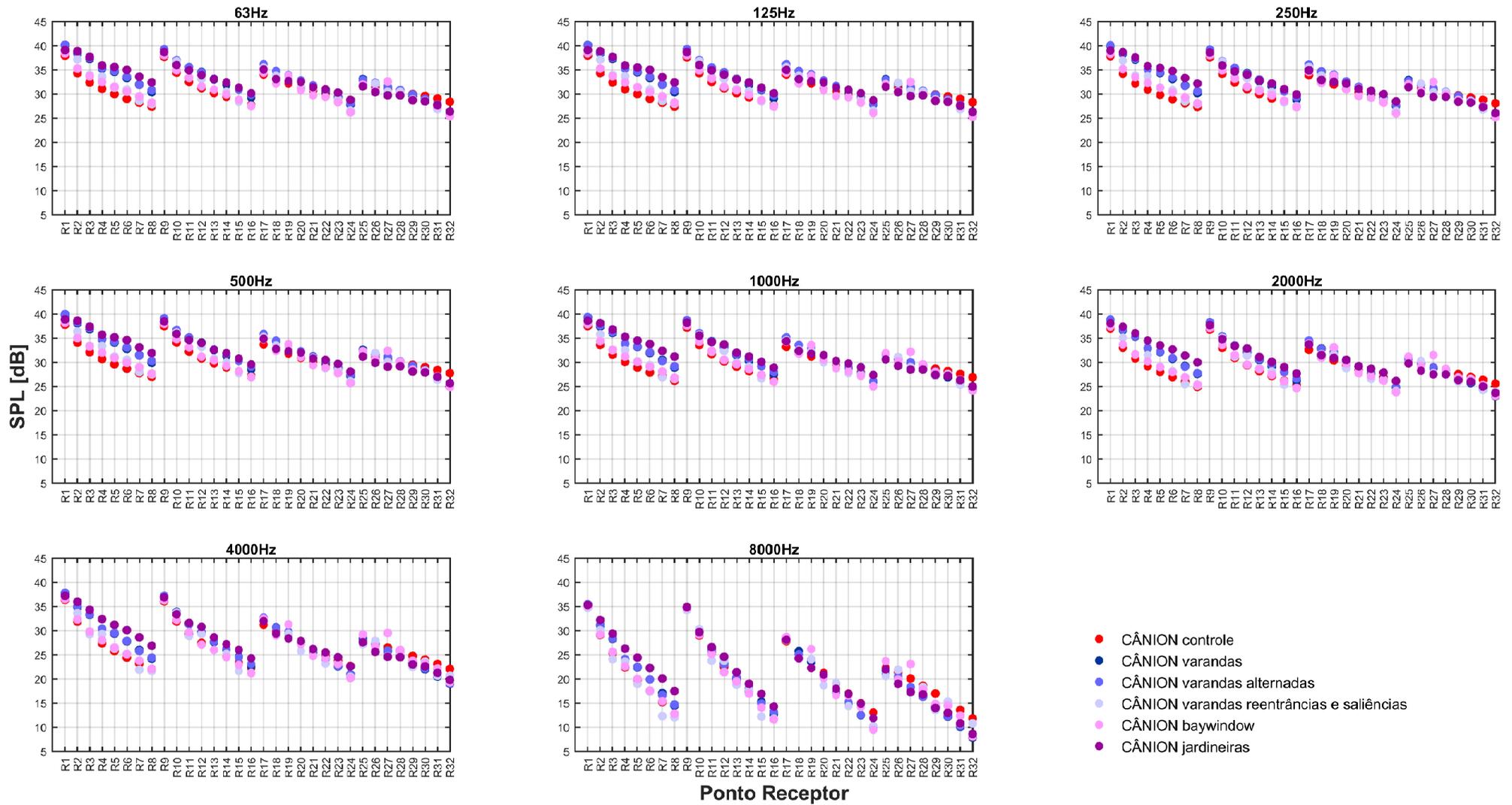
Para as condições experimentais da situação de implantação *colada no lote*, também denominada de *cânion*, foi encontrado o mesmo comportamento acústico urbano das condições soltas no lote como ilustram os gráficos da Figura 59: aumento dos níveis de pressão sonora (SPL) com a presença dos detalhes arquitetônicos nos pontos receptores mais baixos, e de sua diminuição nos pontos receptores mais altos com o aumento da frequência sonora.

Apesar disso, observa-se na Figura 55 e Figura 59 que os níveis de pressão sonora do grupo de controle e experimental *cânion* são em geral maiores do que os do grupo de controle e experimental *lote* para os mesmos pontos receptores, como exemplifica a Figura 60. Este comportamento é decorrência das diferenças no modo de propagação sonora entre um modo de implantação e outro.

No lote, os espaços derivados do recuo de implantação entre as edificações influenciam modificando a trajetória e diminuindo a energia sonora das reflexões fazendo com que os valores de SPL sejam mais variáveis. Já no cânion as múltiplas reflexões proporcionadas pelas edificações fazem com que a energia sonora permaneça no espaço da rua com um lento e estável decaimento até a onda sonora encontrar o céu aberto, ou ter sua energia dissipada, comportamento estreitamente vinculado às características acústicas de propagação sonora em espaços fechados. Este resultado é reforçado pela grande diferença de quantidade de energia identificada em trecho da resposta impulsiva (RI) do mesmo cenário varandas para os diferentes modos de implantação lote e cânion (Figura 61). Na RI do lote também se percebe reflexões com grande quantidade de energia derivadas da presença dos detalhes da forma das edificações.

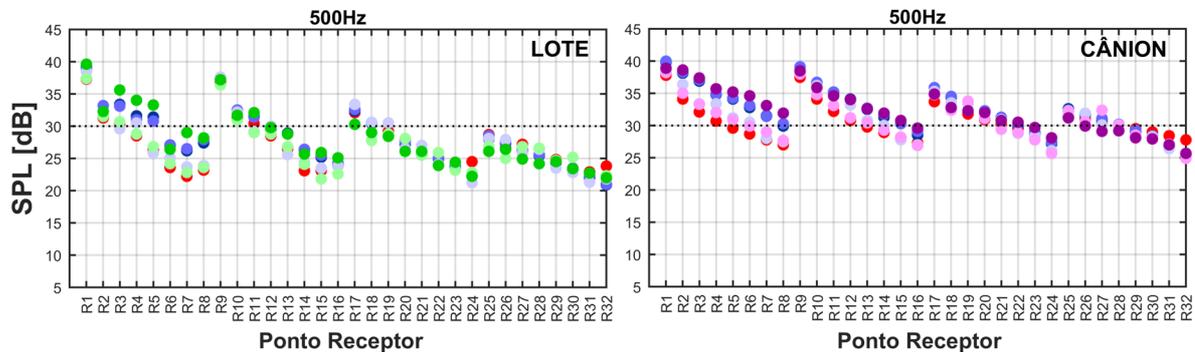
Até aqui, tanto as análises em termos de valores absolutos do grupo lote, quanto as do grupo cânion apontam que os detalhes da forma das edificações influenciam no desempenho acústico urbano. Seja por meio do aumento do SPL nos pontos receptores mais próximos aos primeiros pavimentos, seja por meio de sua diminuição nos pontos receptores mais altos. Tomando como referência a frequência de 1000 Hz, a maior diferença absoluta dos grupos experimentais em relação ao grupo de controle foi encontrada no cenário urbano *jardineiras* da situação lote, diferença de 6,7 dB no ponto R5 em relação ao mesmo ponto no grupo controle. Na situação cânion a maior diferença também foi encontrada no cenário urbano *jardineiras* – 5,9 dB no ponto R6.

Figura 59 – CÂNION – Nível de Pressão Sonora (SPL) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



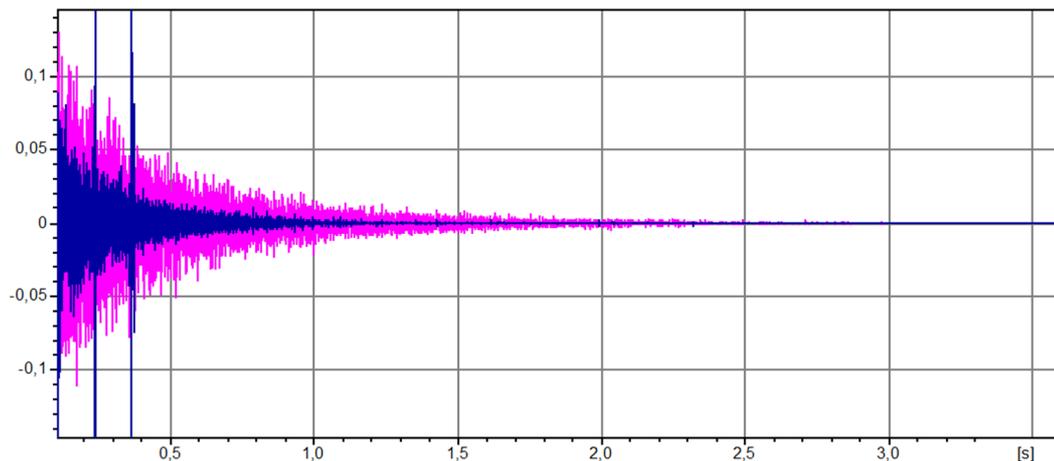
Fonte: a autora.

Figura 60 – Níveis de pressão sonora do cânion são em geral maiores do que do lote, como se exemplifica pela quantidade de valores dos pontos receptores acima da linha pontilhada nos dois modos de implantação.



Fonte: a autora.

Figura 61 – Sobreposição alinhada de trechos das RI do cenário varandas. Em magenta o modo de implantação cânion, e em azul escuro, o lote.



Fonte: a autora.

Com estas diferenças encontradas em todas as condições experimentais, percebe-se então que a presença profusa de detalhes da forma das edificações modifica o desempenho acústico urbano dos cenários investigados. Mas em quê essa modificação implica? O comportamento de aumento no nível de pressão sonora (SPL) produzido pela presença de detalhes arquitetônicos nos pontos receptores mais próximos ao piso de ambos os grupos cânion e lote pode implicar em um aumento da percepção de audibilidade para os pedestres. E assim sendo, no aumento da sensação subjetiva de “volume” sonoro no espaço urbano. Já a sua diminuição nos pontos receptores mais altos pode implicar na diminuição da percepção de volume, beneficiando os últimos pavimentos das edificações com um menor SPL e menor sensação de volume.

Uma das formas de analisar a percepção dessa sensação subjetiva é através da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano a estímulos sonoros, o JND – *just noticeable difference*: diferenças no nível de pressão sonora iguais ou maiores do que 1 JND já são perceptíveis aos ocupantes dos cenários urbanos hipotéticos investigados³³. Em outras palavras, quaisquer que sejam as diferenças absolutas das variações de nível de pressão sonora nos pontos receptores – se grandes ou pequenas, ou, se o desempenho acústico for alterado para maior ou menor SPL – caso a modificação na diferença em JND do SPL apresente 1 JND ou mais na relação da Equação 6³⁴, esta modificação de desempenho acústico será necessariamente percebida.

Nesse sentido, as Figura 62 e Figura 63 apresentam a diferença em JND para o SPL de todos os grupos experimentais da situação de implantação lote (Figura 62) e cânion (Figura 63). Nos gráficos destas figuras a linha pontilhada sinaliza o limite para transição de 1 JND.

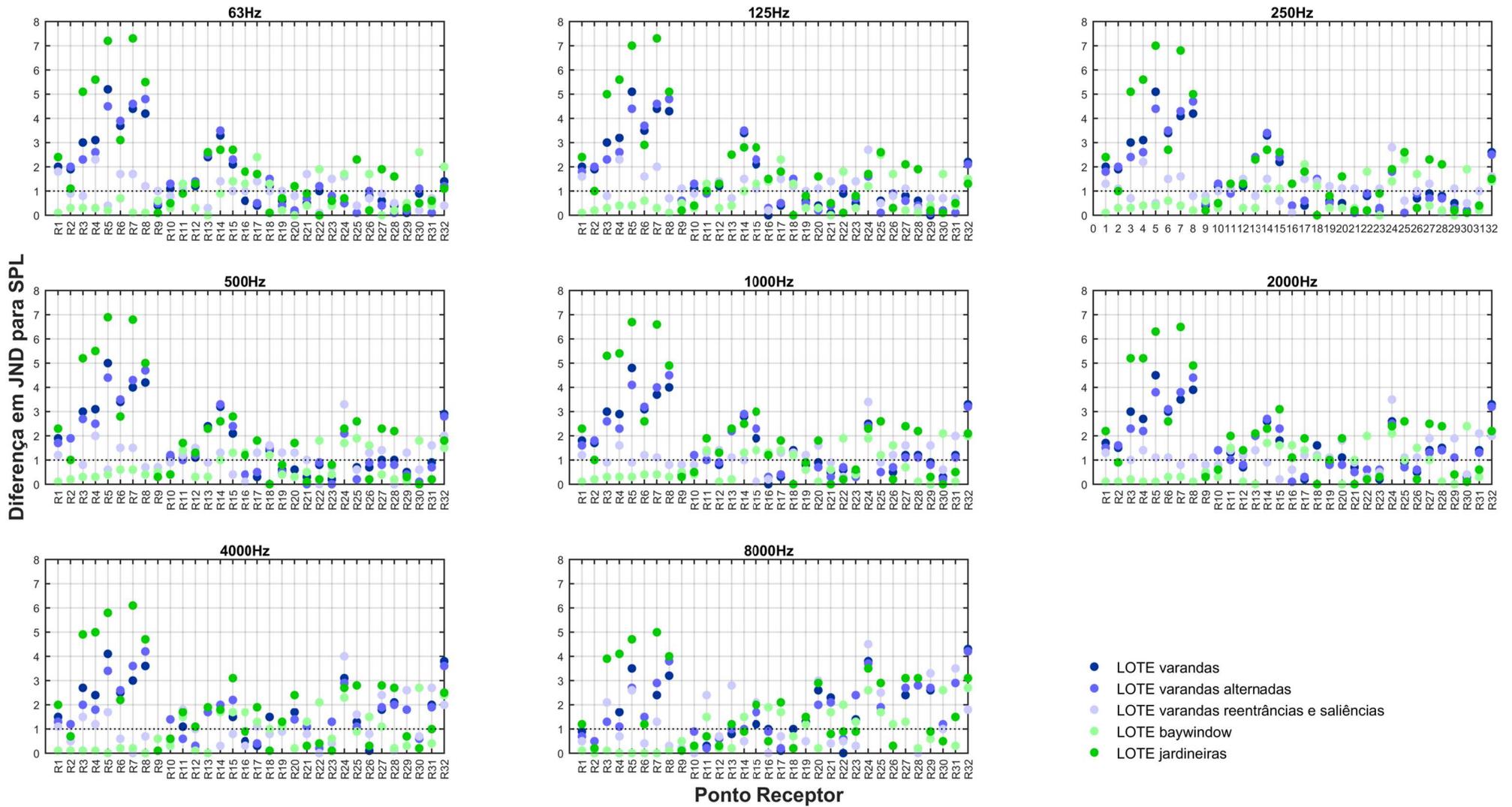
Tanto no lote quanto no cânion percebe-se que os pontos receptores mais próximos ao piso, R1 a R8 e R9 a R16, possuem as maiores diferenças em JND. Nestes pontos as variações de nível de pressão sonora, que aumentaram na presença dos detalhes da forma das edificações, serão bastante percebidas pelos ocupantes do espaço urbano. Principalmente nos cenários *varandas*, *varandas alternadas* e *jardineiras*, cuja média percentual em todas as frequências dos pontos acima de 1 JND a 1,2 m se aproximam de 100% para *varandas*, *varandas alternadas* e *jardineiras*, em ambas as situações de implantação, lote e cânion, como ilustra a Figura 64 A e B. A 4 m essas médias percentuais se aproximam de 60% dos pontos para estes mesmos cenários no lote, e de 90% no cânion Figura 64 B.

As menores médias percentuais de resultados acima de 1 JND para o nível de pressão sonora (SPL) nos receptores mais próximos ao piso foram encontradas no cenário *baywindow*. Neste cenário urbano apenas 6% dos pontos receptores apresentaram diferenças perceptíveis na modificação do SPL a 4 m no grupo cânion. No grupo lote, o cenário *baywindow* não chegou a apresentar variação perceptível, como indicam os percentuais dos gráficos da Figura 64 B e os gráficos da Figura 62. Neste último, é possível verificar que nenhuma das diferenças em JND para SPL ultrapassa a linha pontilhada que marca o limite para transição de 1 JND sendo, portanto, imperceptível neste cenário a variação do SPL.

³³ Conforme apresentado no item 4.5 – *Forma e análise de dados* do capítulo 4 – *Método*.

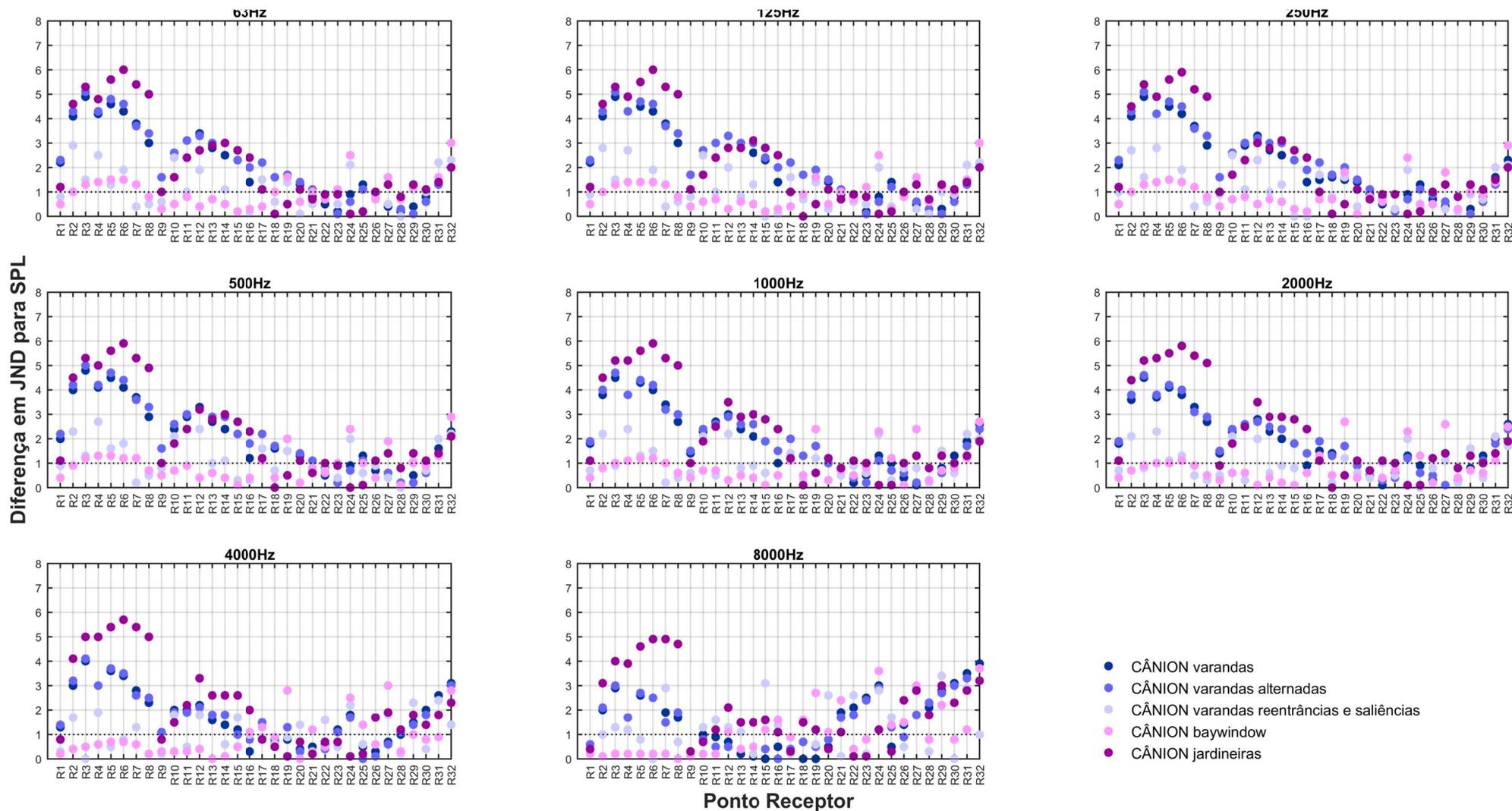
³⁴ Idem anterior.

Figura 62 – LOTE - Diferença em JND para o nível de pressão sonora do em função do ponto receptor, distribuídos por frequência. A linha pontilhada marca o limite de transição de 1 JND.



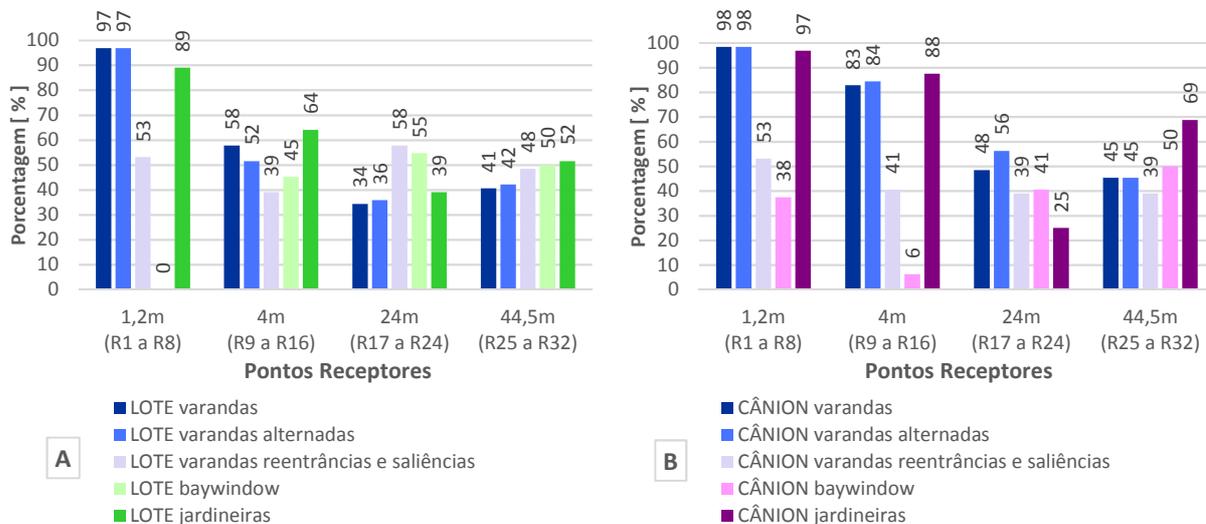
Fonte: a autora.

Figura 63 - CÂNION - Diferença em JND para o nível de pressão sonora do em função do ponto receptor, distribuídos por frequência. A linha pontilhada marca o limite de transição de 1 JND.



Fonte: a autora.

Figura 64 - Média percentual de todas as frequências para pontos acima de 1 JND para SPL. O gráfico "A" sendo do modo de implantação lote, e o gráfico "B" do cânion.



Fonte: a autora.

Uma possível indicação para a baixa influência das *baywindow* no SPL dos pontos receptores mais baixos pode ser decorrência de certa influência das grandes superfícies contínuas e paralelas à fachada que configuram o cenário *baywindow*, aproximando-o das longas fachadas lisas das edificações do grupo de controle, interferindo nos resultados de SPL para estes pontos receptores mais próximos aos primeiros pavimentos das edificações. Apesar disso, à medida que o posicionamento dos pontos receptores se eleva o cenário *baywindow* volta a apresentar diferenças em JND perceptíveis como evidenciam os pontos acima da linha de transição de 1 JND da Figura 62 e Figura 63.

Ocorre que, não só para os pontos receptores mais altos do *baywindow* como para todos os receptores mais elevados dos grupos experimentais investigados, a percepção da variação no SPL ocorre através da *diminuição* do valor absoluto do SPL com a presença dos detalhes arquitetônicos. Isto ocorre modo bastante perceptível para os pontos receptores a 44,5 m (R25 a R32) e nas frequências mais altas, como foi discutido anteriormente na análise absoluta do nível de pressão sonora através da Figura 55 e da Figura 59. Já para os pontos receptores a 24,5 m (R17 a R24) isto ocorre de forma variável em todas as frequências em ambas situações de implantação, sendo a diferença em JND para SPL percebida ora pelo aumento de seu valor absoluto, ora por sua diminuição (Figura 55 e Figura 59).

Esta análise da diferença em JND para o nível de pressão sonora associada a análise dos valores absolutos obtidos com as simulações acústicas dos cenários urbanos *com* e *sem* detalhes da forma

das edificações demonstra que há influência no SPL com a presença dos detalhes arquitetônicos. Demonstra ainda que esta variação proporcionada pelos detalhes da forma das edificações será bastante percebida pelos ocupantes do espaço urbano: aumentando a sensação subjetiva de “volume” dos sons produzidos no espaço urbano para os pedestres e primeiros pavimentos das edificações e diminuindo esta sensação de “volume” para os pavimentos mais elevados das edificações deste mesmo espaço urbano.

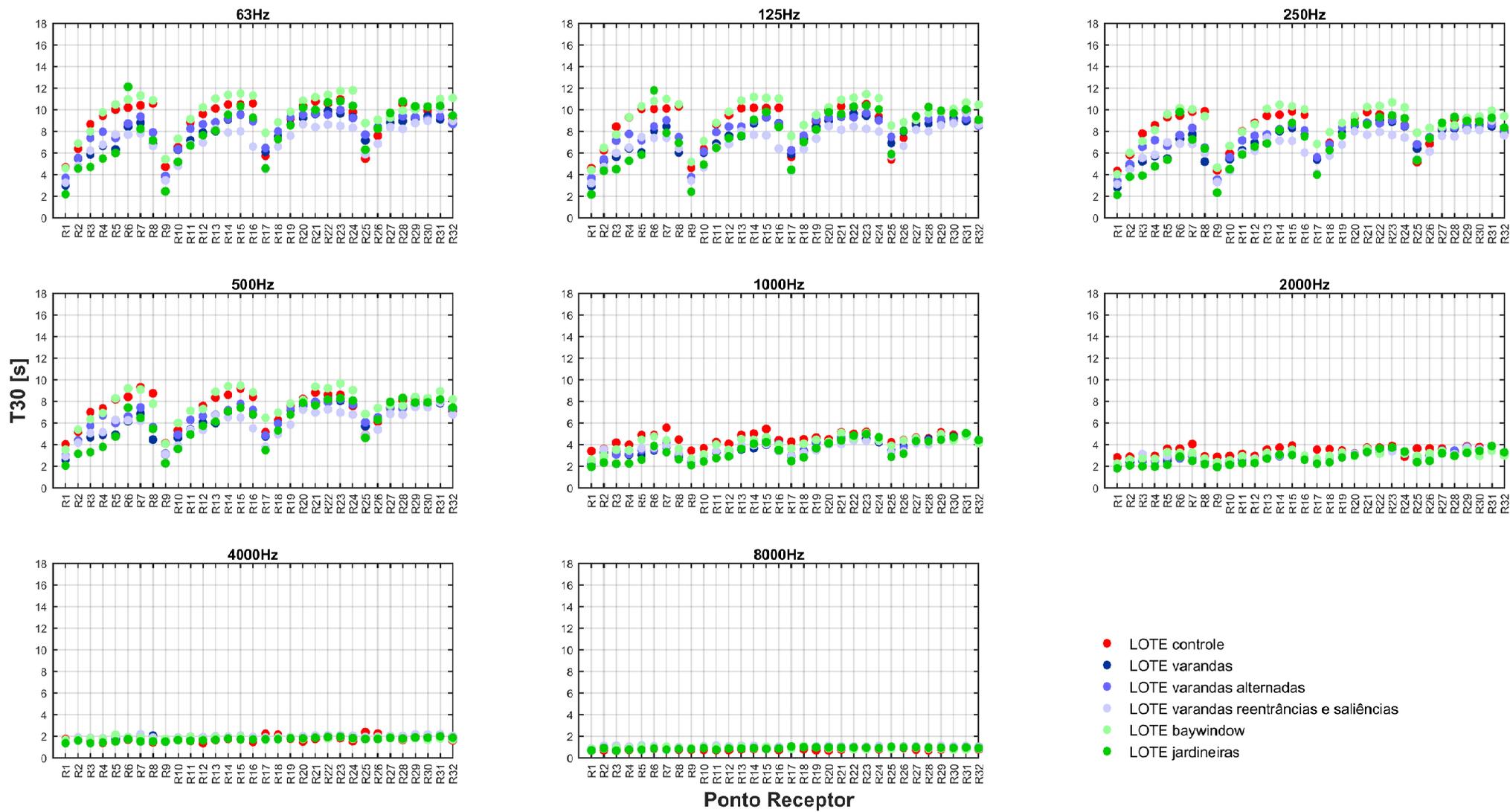
5.2. Tempo de Reverberação (T30) e Tempo Inicial de Decaimento (EDT)

A Figura 65 mostra os resultados obtidos para o tempo de reverberação (T30) em função dos pontos receptores distribuídos em gráficos por frequência do modo de implantação *lote*. Observando os gráficos para as frequências em bandas de oitava de 63 Hz a 1000 Hz identifica-se que de maneira geral no grupo experimental investigado prevalece a *diminuição* do tempo de reverberação com a presença dos detalhes arquitetônicos nos cenários urbanos investigados. Já para os pontos receptores mais elevados a 44,5 m de altura – R25 a R32 na frequência de 1000 Hz e para as altas frequências – 2000 Hz a 8000 Hz - há pouca variação nos resultados de T30 devido à grande quantidade de absorção de energia sonora promovida pelo ar nas altas frequências como ilustra a Figura 58.

Para o tempo inicial de decaimento (EDT) do modo de implantação *lote*, cujos resultados são apresentados na Figura 66, o desempenho acústico foi inverso ao do T30, prevalecendo em todas as frequências o *aumento* do tempo inicial de decaimento com a presença dos detalhes arquitetônicos nos cenários urbanos investigados.

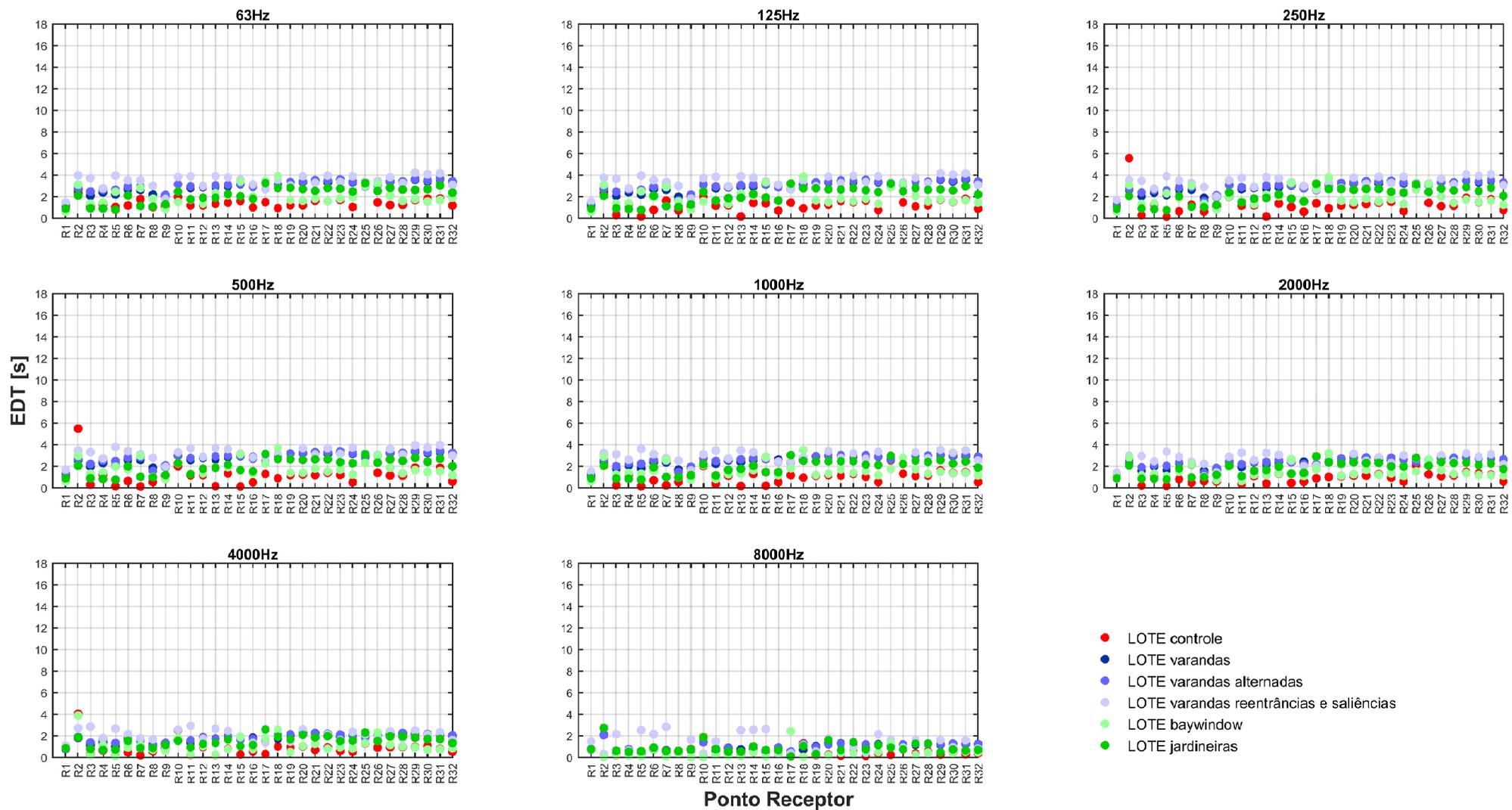
Ao analisar comparativamente as curvas de decaimento sonoro da Figura 67 de duas condições experimentais investigadas, o grupo de *controle* e o grupo experimental *varandas alternadas* na frequência de 500 Hz no ponto receptor R13, se evidencia a razão do aumento do EDT e da diminuição do T30. Por abarcar o decaimento dos primeiros -10 dB, o cenário urbano com a presença de detalhes arquitetônicos o EDT é influenciado pelas sucessivas reflexões iniciais que formam um campo reverberante. Assim sendo, quando o decaimento sonoro atinge -10

Figura 65 – LOTE - Tempo de reverberação (T30) em função do ponto receptor, distribuidos por frequência



Fonte: a autora

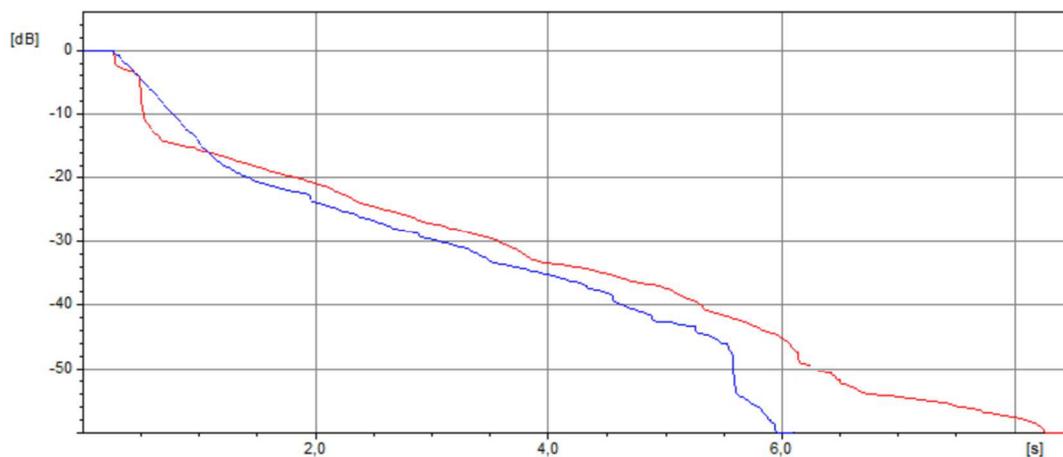
Figura 66 - LOTE - Tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.

dB os pontos receptores ainda estão sob a influência do campo reverberante, fazendo com que o grupo experimental com detalhes apresente um tempo inicial de decaimento (EDT) maior do que o grupo de controle. Entretanto, quando o campo reverberante formado pelas sucessivas reflexões iniciais do grupo com detalhes inicia a perda de energia sonora, o decaimento ocorre mais rapidamente do que o decaimento do grupo de controle. Logo, o tempo de reverberação (T30) do grupo de controle apresenta valores maiores do que o tempo de reverberação dos cenários urbanos com a presença dos detalhes da forma das edificações.

Figura 67 - Curvas de decaimento em 500 Hz do ponto R13. Em vermelho o controle, em azul varandas alternadas.



Fonte: a autora.

À exceção das frequências 4000 Hz e 8000 Hz devido a absorção do ar, outro fenômeno identificado e que merece discussão é o aumento do T30 em relação ao aumento da distância da fonte sonora verificado na Figura 65. Pela natureza conceitual do T30³⁵, espaços fechados tendem a fornecer uma resposta do ambiente com energia sonora distribuída mais uniforme para obtenção da curva de decaimento sonoro. Nestes espaços fechados, o tempo de reverberação não costuma sofrer variação *significativa* de valores em relação à modificação da posição dos pontos receptores tendendo a apresentar valores muito próximos de T30 variando principalmente com as frequências³⁶ (BARRON, 2010).

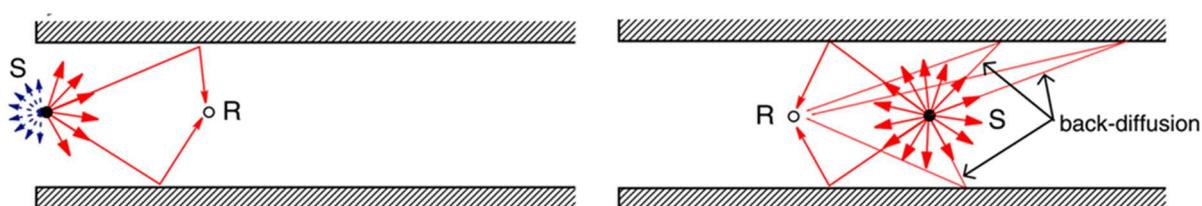
³⁵ Tempo necessário para decaimento de -60 dB após interrupção da fonte sonora, ou seja, até a percepção do som tornar-se inaudível (SABINE, 1922), conforme discutido no Capítulo 3 - *A acústica e a microescala urbana*.

³⁶ Algumas posições de pontos receptores em espaços fechados podem apresentar uma maior variação de T30 quando próximas a superfícies de alta absorção sonora, como cadeiras próximas a paredes de fundo, ou ainda, próximas a aberturas de espaços acoplados (MAIORINO; BERTOLI, 2016).

Porém, nas condições experimentais investigadas e apresentadas na Figura 65 para as frequências de 63 Hz a 2000 Hz foi identificado que em espaços abertos *existe* a variação do tempo de reverberação em função da distância do ponto receptor à fonte sonora. Assim sendo, à medida que se afasta da fonte sonora os pontos receptores estão sujeitos ao aumento do tempo de reverberação (T30) devido à resposta dada pelo ambiente urbano.

O comportamento de aumento do T30 em função da distância à fonte sonora também foi identificado em outras investigações de propagação sonora em espaços abertos (KANG, 2000, 2007; MENG; KANG, 2007; ONAGA; RINDEL, 2007; PICAUT *et al.*, 2005; PICAUT; SIMON, 2001; ROCHA; BERTOLI; MAIORINO, 2017). Este aumento do tempo de reverberação com o aumento da distância é causado por reflexões que surgem na parte posterior da fonte sonora chamadas de *difusão posterior*³⁷ (Figura 68).

Figura 68 - À esquerda reflexões simples, à direita reflexões difusas posteriores.
"S" e "R" são respectivamente a fonte sonora e o receptor.



Fonte: PICAUT *et al.*, 2005.

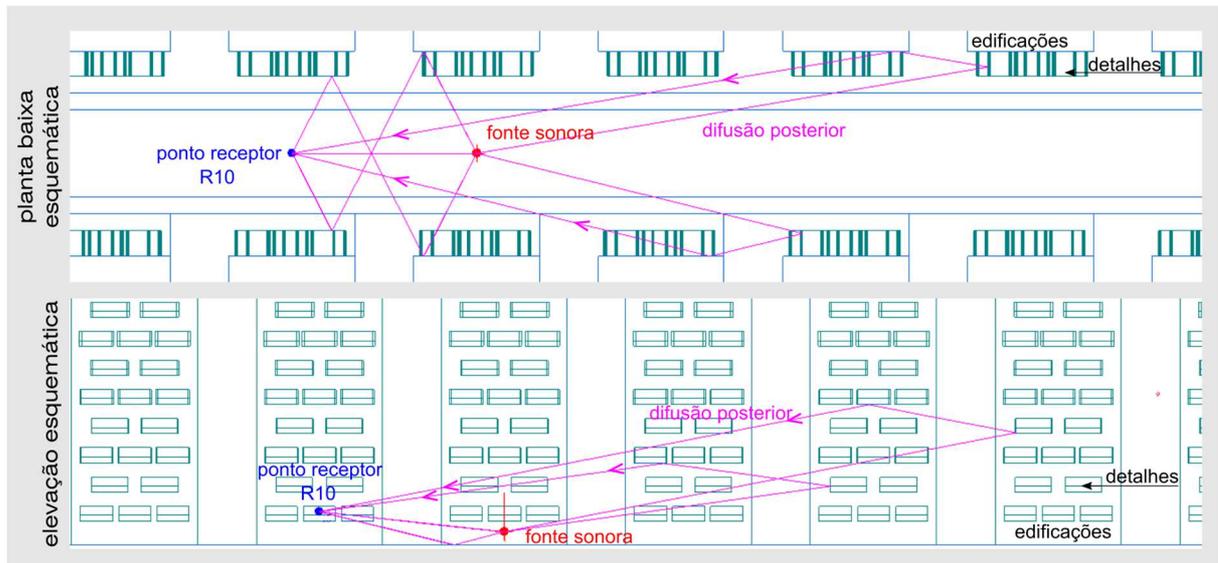
Este fenômeno ocorre quando parte da energia sonora de uma fonte omnidirecional é propagada em direção oposta aos pontos receptores. Ao deparar-se com um obstáculo a trajetória de propagação da onda pode ser modificada fazendo com que novas reflexões retornem em direção à fonte reforçando a permanência sonora nos pontos receptores mais distantes (PICAUT *et al.*, 2005).

As reflexões que surgem na parte posterior da fonte sonora - a *difusão posterior* - e que causam o aumento do T30 com o aumento da distância à fonte sonora nos cenários urbanos investigados pode ser exemplificado a partir da visualização do traçado de raios da propagação sonora do ponto receptor R10 da condição experimental *varandas alternadas* (Figura 69). É possível identificar na Figura 69 os raios sonoros do som direto, das primeiras reflexões e das

³⁷ Termo livremente traduzido de “*back-diffusion*” (PICAUT *et al.*, 2005).

reflexões difusas posteriores que causam o aumento do tempo de reverberação (T30) com o aumento da distância à fonte sonora.

Figura 69 - Traçado de raios sonoros do cenário varandas alternadas evidenciando a difusão posterior (setas em magenta) à fonte sonora que chega ao ponto receptor R10.



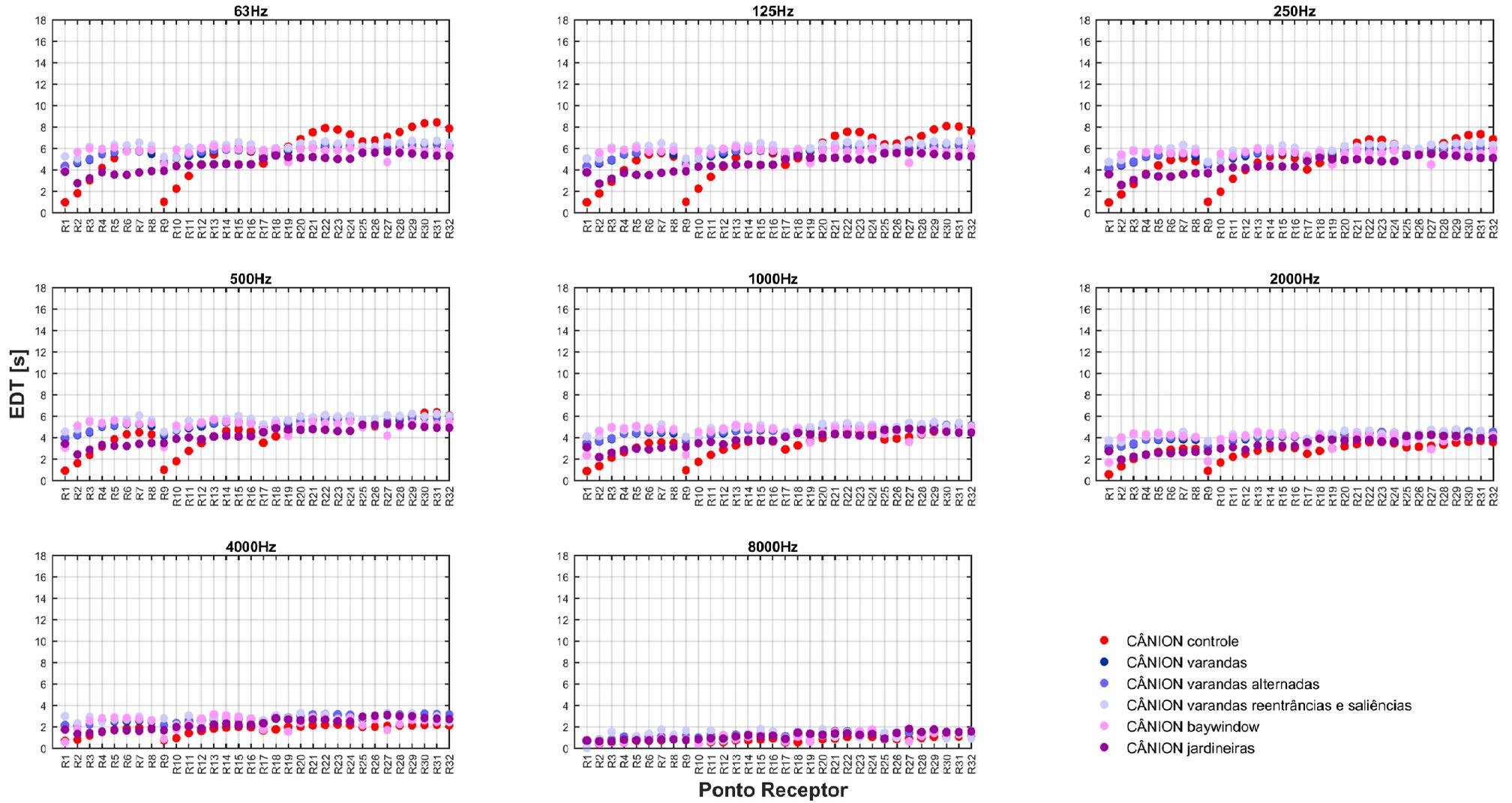
Fonte: a autora.

A difusão posterior também influencia no aumento do tempo de reverberação (T30) do cenário *baywindow* nas frequências de 63 Hz a 500 Hz em relação ao T30 do grupo de controle. No *baywindow* as grandes superfícies verticalmente contínuas e paralelas à fachada reproduzem, em certo grau, as longas fachadas lisas das edificações do grupo de controle. Os chanfros inclinados do *baywindow* podem contribuir para o aumento de reflexões especulares da difusão posterior, influenciando o aumento do T30. Este aumento, torna o cenário urbano *baywindow* a exceção do comportamento predominante de diminuição do T30 na presença de detalhes da forma das edificações.

A difusão posterior que causa o aumento predominante do tempo de reverberação (T30) com o aumento da distância *não* interfere no desempenho do tempo inicial de decaimento (EDT). Uma vez que por sua natureza de abarcar apenas o decaimento inicial de -10 dB, o EDT se encontra fora da área de influência das reflexões tardias. Mas ainda assim, o EDT varia em função do som direto, das primeiras reflexões e da posição do ponto receptor (GADE, 2007).

Ao examinar o EDT nos modos de implantação lote (Figura 66) e cânion (Figura 70) verifica-se que o EDT do lote apresenta de maneira geral um pequeno aumento com a distância em

Figura 70 - CÂNION - Tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuidos por frequência.



Fonte: a autora.

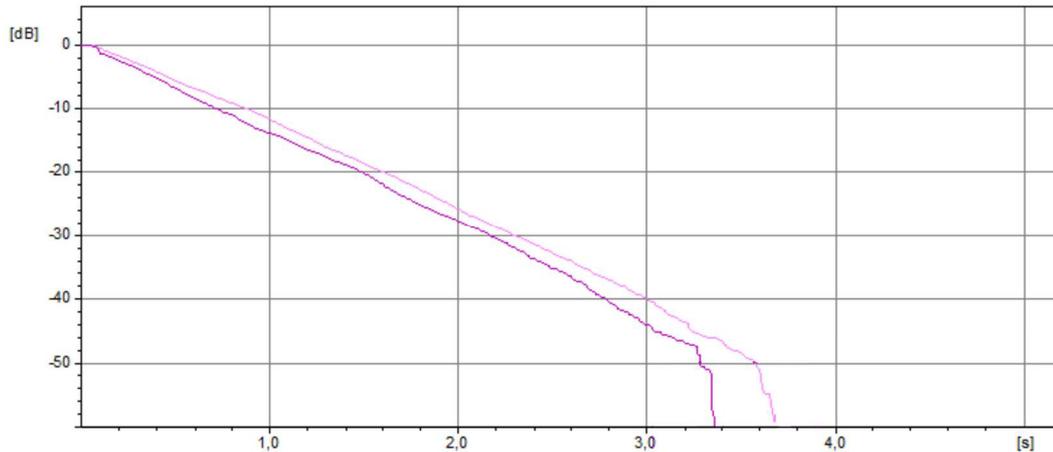
relação ao cânion, onde a variação do tempo inicial de decaimento é muito mais acentuada, como verifica-se nos resultados apresentados pela Figura 70. Para o cenário urbano *jardineiras* e para o grupo de controle em todos os pontos receptores nas frequências de 63 Hz a 250 Hz, e, para os pontos receptores mais próximos ao piso nas frequências de 500 Hz a 4000 Hz o aumento do EDT com a distância é mais evidente. Isto ocorre devido à proximidade da fonte sonora aos pontos receptores que pela pequena distância recebem um menor número de primeiras reflexões durante o decaimento de -10 dB. Já os pontos receptores mais distantes da fonte recebem um maior número de primeiras reflexões devido a trajetória mais longa da onda sonora. Além disso, estas primeiras reflexões nos pontos receptores mais distantes contêm grande quantidade de energia derivada das múltiplas reflexões nas superfícies do espaço urbano, comportamento acústico comum em espaços urbanos em cânion. Este desempenho de aumento de EDT com a distância também foi identificado em outras pesquisas de propagação sonora em espaços abertos (ANGELAKIS, 2006; KANG; MENG; BROWN, 2003; LEE; KANG, 2015; LEITE; MAIORINO; BERTOLI, 2017; ROCHA; MAIORINO; BERTOLI, 2017).

Nos cenários *varandas*, *varandas alternadas*, *varandas reentrâncias e saliências* e *baywindow* em todas as frequências em bandas de oitava, e, no cenário *jardineiras* e no grupo de controle dos pontos receptores mais afastados do piso para frequências a partir de 500 Hz, o aumento do EDT com a distância é mais moderado. Indicando que nestas condições o campo sonoro do cânion é mais difuso e todos os receptores recebem uma quantidade de energia e de primeiras reflexões de modo proporcional gerando resultados mais semelhantes no decaimento dos primeiros -10 dB. Isto pode ser ilustrado pelas características semelhantes do decaimento linear – comuns em campos sonoros difusos de determinados espaços fechados – de duas curvas do mesmo ponto receptor para cenários urbanos diferentes: *varandas* e *jardineiras* na Figura 71.

Analisando o modo de implantação lote em relação ao cânion percebe-se que de maneira geral no lote a presença dos detalhes aumentou o EDT do grupo experimental em comparação ao grupo de controle, como mostram os gráficos da Figura 66. Mas o mesmo não ocorreu no cânion, como se verifica nos gráficos da Figura 70. No cânion os detalhes arquitetônicos proporcionaram aumento de EDT nos pontos receptores mais próximos aos primeiros pavimentos das edificações. Mas nos pontos mais elevados até a frequência de 500 Hz a

presença dos detalhes levou à diminuição do tempo inicial de decaimento em relação ao grupo de controle.

Figura 71 - Curvas de decaimento em 500Hz do ponto R20. Em rosa o cenário varandas, em lilás o cenário jardineira.

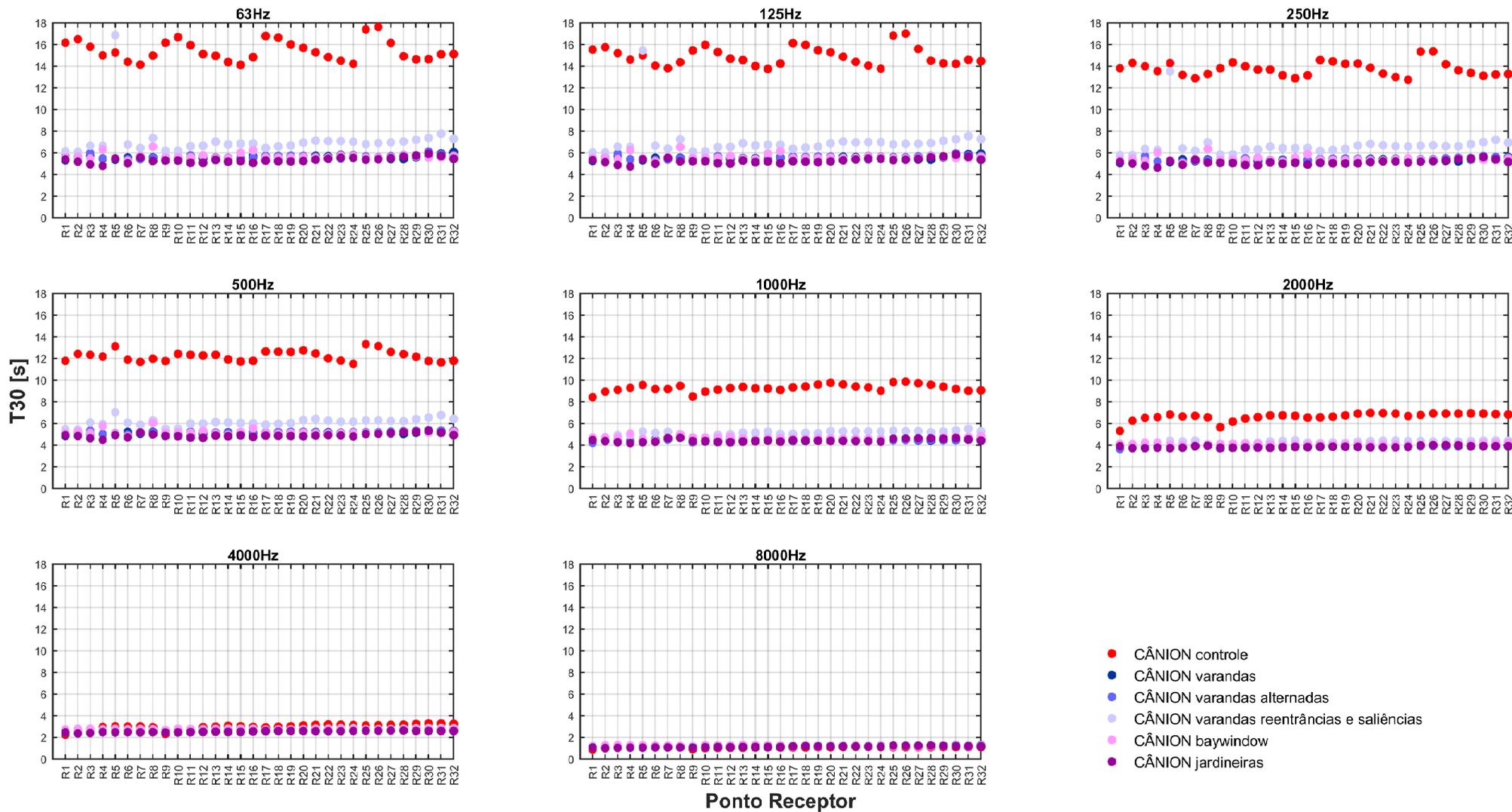


Fonte: a autora.

Apesar do comportamento do EDT apresentar variações entre o lote e o cânion, o tempo de reverberação dos dois modos de implantação apresentaram comportamento semelhante de diminuição do T30 na presença dos detalhes da forma das edificações, como ilustra os gráficos da Figura 72 para o cânion e Figura 65 para o lote. Mas ao contrário do lote (Figura 65), o T30 do cânion apresenta um comportamento muito mais próximo do tempo de reverberação de espaços fechados, não variando significativamente em relação à modificação da posição dos pontos receptores.

Ocorre que as características das edificações dos cenários urbanos investigados - rua com 24,5 m de largura em relação à altura de 56 m das edificações com 16 pavimentos - aproxima o cânion de algumas características de espaços fechados. Isto pode fornecer uma resposta do ambiente com energia sonora distribuída mais uniformemente ao tempo do decaimento de -5 a -35 dB, tendendo a apresentar valores muito próximos de T30 entre os pontos receptores de cada cenário urbano variando significativamente apenas com a mudança de frequência, comportamento comum de determinados espaços fechados como evidencia os gráficos da Figura 72. Esta tendência em T30 de espaços urbanos abertos apresentarem comportamentos semelhantes ao de espaços fechados devido à relação altura/largura em cânions urbanos, também chamada de *height-to-width ratio*, também é identificada no T30 em outras investigações acústicas de espaços abertos (LEE; KANG, 2015; ONAGA; RINDEL, 2007).

Figura 72 - CÂNION - Tempo de reverberação (T30) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.

Para o T30 do cânion nas frequências em bandas de oitava de 63 Hz a 250 Hz, o decaimento de -5 a -35 dB apresentou limitações para caracterizar com eficiência o tempo de reverberação do grupo de controle. A limitação pode ser observada pelo comportamento atípico de diminuição do T30 com o aumento da distância dos pontos receptores à fonte sonora, como ilustram gráficos da Figura 72.

Isto pode ocorrer por uma lacuna algorítmica associada ao lançamento de raios no cálculo efetuado pelo *software*. O *traçado de raios* é o método responsável por caracterizar a parcela tardia e reverberante da resposta impulsiva no modelo híbrido adotado por esta investigação. Este método proporciona ótimos resultados na caracterização acústica de espaços com geometrias mais detalhadas e com grande quantidade de superfícies. Por isso o grupo experimental *com detalhes* respondeu satisfatoriamente aos cálculos com o *software*. Porém, para o grupo de controle nas frequências de 63 Hz a 250 Hz os resultados incomuns obtidos são indícios de que não houve uma quantidade de raios suficientes para caracterização do tempo de reverberação neste intervalo de frequência

Esta limitação de pesquisa no grupo de controle do modo de implantação cânion nas frequências de 63 Hz, 125 Hz e 250 Hz deverá ser investigada com cautela e prudência em futuras verificações. Uma vez que a nova determinação de raios não deve tornar-se uma *variável independente*, e, assim sendo não deve influenciar, determinar ou afetar os parâmetros acústicos estudados – as *variáveis dependentes*. Também não deve interferir nos outros grupos experimentais, cujos resultados não foram comprometidos. A quantidade de raios deverá então, permanecer uma *variável de controle*, neutra por conceituação, não exercendo influência sobre o fenômeno estudado (LAKATOS; MARCONI, 2003).

De qualquer modo, num contexto de 768 cálculos de relações fonte-receptor em todas as condições experimentais investigadas e de 9216 relações fonte-receptor em todos os parâmetros e frequências calculadas, as limitações do grupo de controle nestas três frequências em bandas de oitava não afetam a precisão, tampouco a confiabilidade dos resultados obtidos para os outros parâmetros calculados. Pelo contrário, ao apresentar resultados atípicos esta exceção ratifica a aderência às simulações do desempenho acústico encontrado para os outros resultados dos modos de implantação lote e cânion.

Assim sendo, retomando a análise e discussão do tempo de reverberação (T30) e de tempo inicial de decaimento (EDT), em valores absolutos, utilizando como referência a frequência de 500 Hz, a maior diferença absoluta dos grupos experimentais em relação ao grupo de controle para o T30 da situação lote foi encontrada no cenário urbano *varandas*, diferença de 4,3 s no ponto R8 em relação ao mesmo ponto no grupo controle. Na situação cânion a maior diferença de T30 foi encontrada no cenário urbano *jardineiras* – 8,3 s no ponto R25. Para o EDT, no lote o cenário *varandas reentrâncias e saliências* apresentou a maior diferença de 3,6 s no ponto R5, e, no cânion a maior diferença também foi de 3,6 s do cenário *varandas reentrâncias e saliências* no ponto R1.

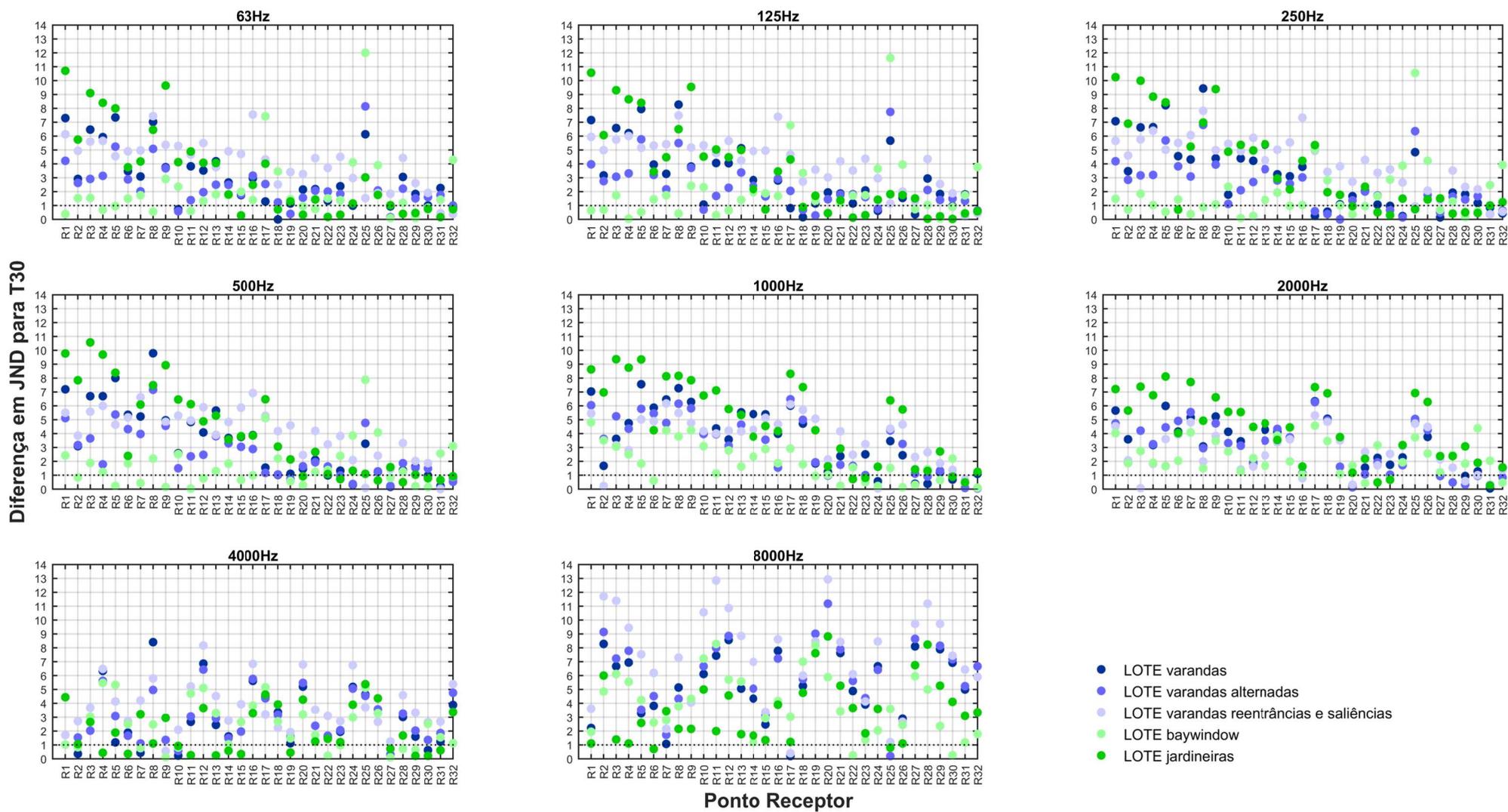
Estas variações em valores absolutos do T30 e EDT com a presença dos detalhes da forma das edificações demonstram que a presença dos detalhes da forma das edificações influencia no desempenho acústico do tempo de reverberação (T30) e do tempo inicial de decaimento (EDT) no espaço urbano. Os resultados são então ratificados pela análise da percepção da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano a estímulos sonoros o JND – *just noticeable difference*.

A diferença em JND para T30 dos modos de implantação lote e cânion são apresentados na Figura 73 e na Figura 74. E a diferença em JND para EDT dos modos de implantação lote e cânion são apresentados na Figura 75 e na Figura 76. Nos gráficos destas figuras a linha pontilhada sinaliza o limite para transição de 1 JND. Para o T30 e EDT 1 JND se refere a 5% o valor do parâmetro acústico de referência - o grupo de controle. Diferenças no tempo de reverberação e no tempo inicial de decaimento iguais ou maiores do que 1 JND são percebidas pelos ocupantes dos cenários urbanos investigados. Independentemente dos valores absolutos das variações em T30 e EDT nos pontos receptores – se grandes ou pequenas, ou, se o desempenho acústico for alterado para maior ou menor valor – se a modificação na diferença em JND do T30 e EDT apresentar 1 ou mais JNDs na relação da Equação 6³⁸, esta modificação de desempenho acústico será necessariamente percebida.

Na diferença em JND para o T30 do modo de implantação lote percebe-se que os pontos receptores mais elevados, R17 a R24 e R25 a R32, possuem as menores diferenças em JND,

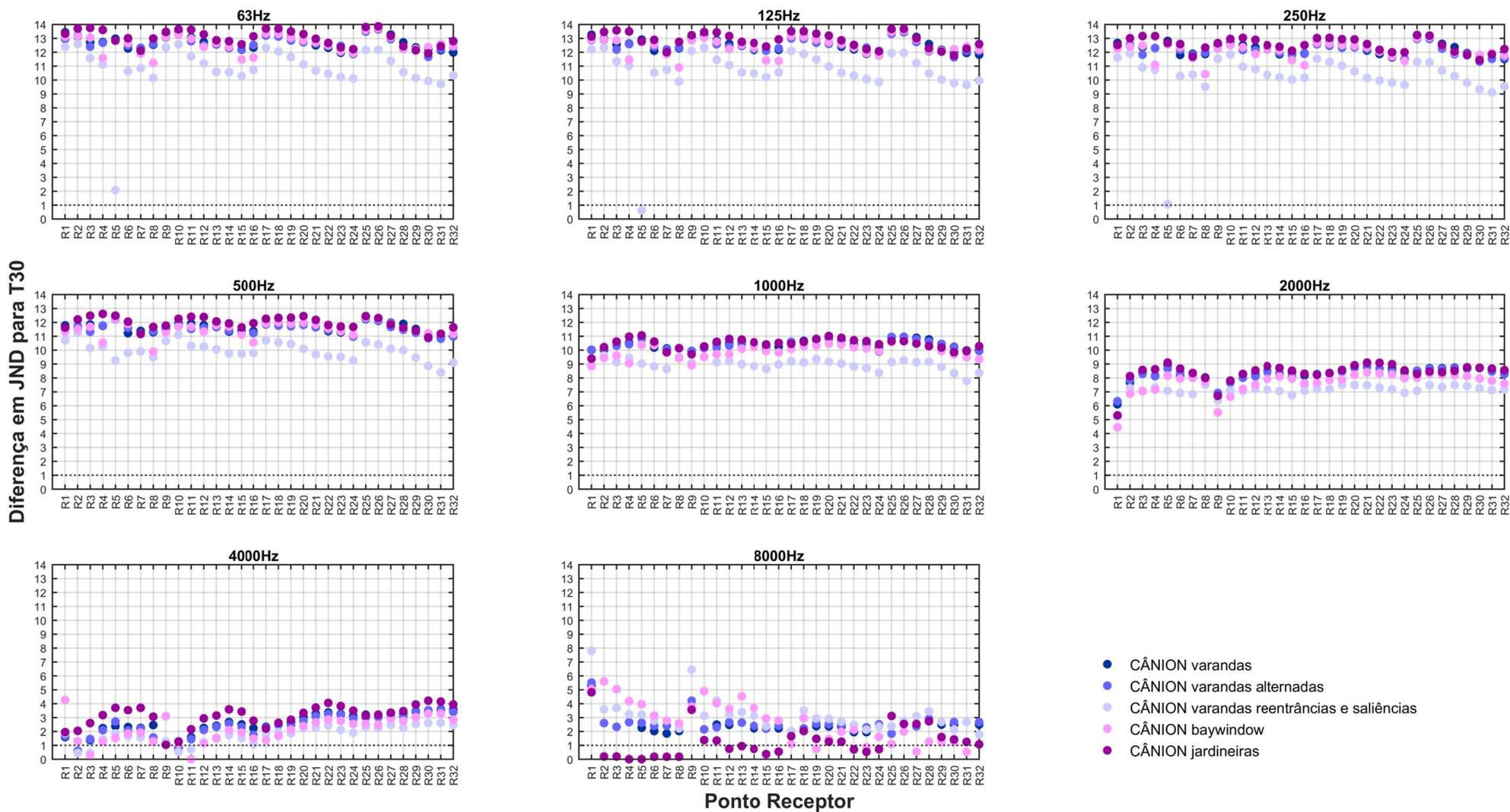
³⁸ Equação apresentada no item 4.5 – *Forma e análise de dados* do capítulo 4 – *Método*.

Figura 73 - LOTE – Diferença em JND para tempo de reverberação (T30) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



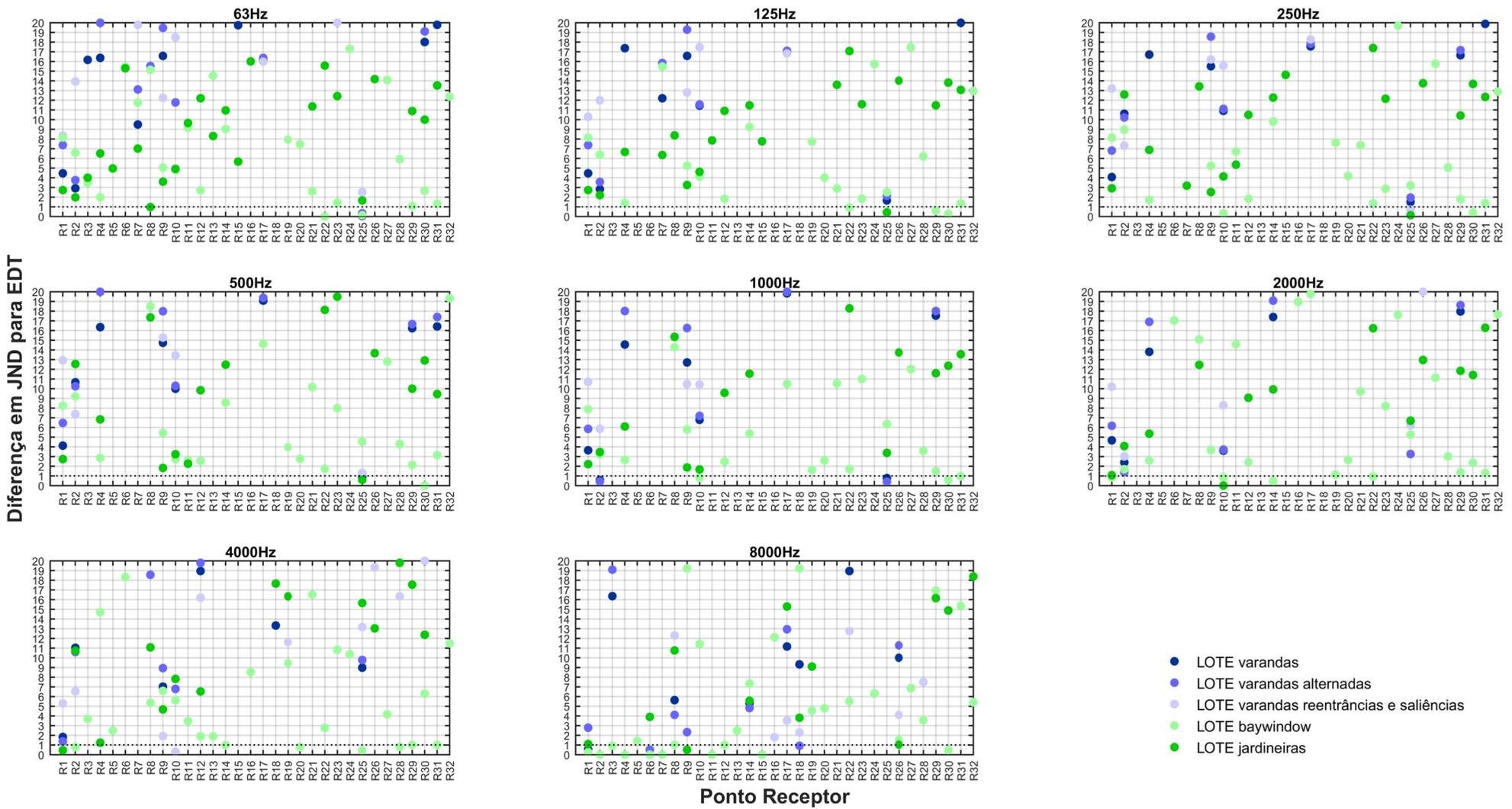
Fonte: a autora.

Figura 74 - CÂNION – Diferença em JND para tempo de reverberação (T30) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.

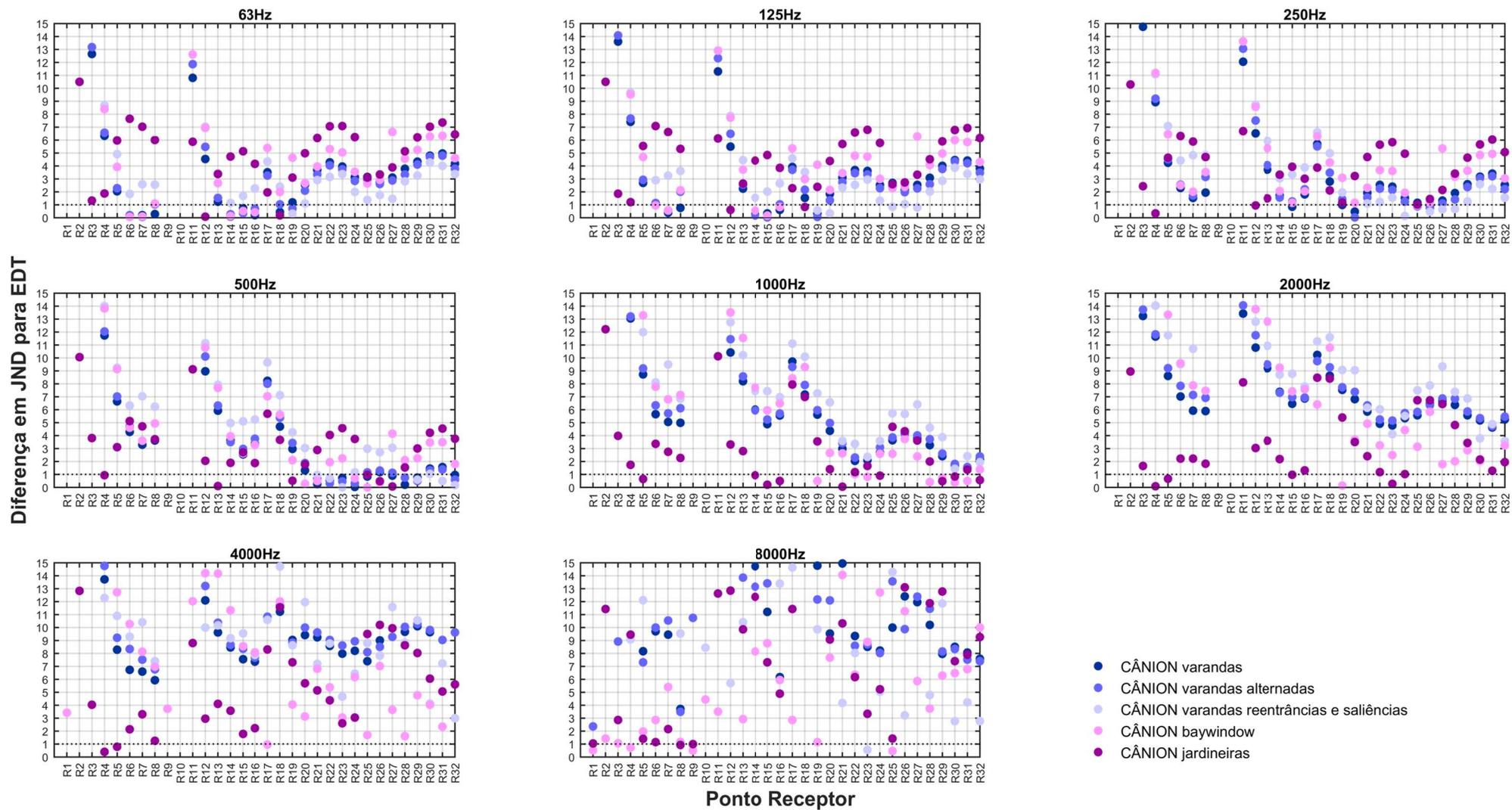
Figura 75 - LOTE – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência



- LOTE varandas
- LOTE varandas alternadas
- LOTE varandas reentrâncias e saliências
- LOTE baywindow
- LOTE jardineiras

Fonte: a autora.

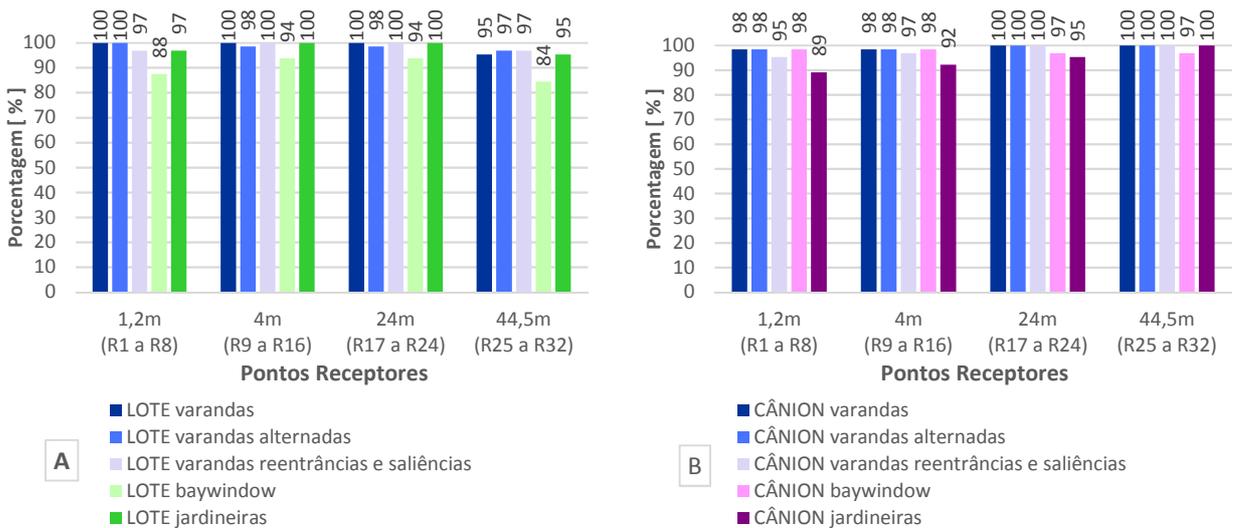
Figura 76 - CÂNION – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência



Fonte: a autora.

apresentando uma relativa concentração de pontos abaixo da linha pontilhada que marca a transição de 1 JND para os cenários *baywindow* e *jardineiras*. Sendo, portanto, imperceptíveis as variações de T30 para estes receptores, como se verifica na Figura 73. Ainda assim, a média percentual em todas as frequências dos pontos acima de 1 JND para todas as alturas investigadas se aproximam de 100% como se verifica na Figura 77. Isto implica numa variação no tempo de reverberação (T30) veementemente percebida pelos receptores do espaço urbano na presença dos detalhes da forma das edificações. Apesar do cenário *baywindow* ter apresentado o menor percentual de resultados acima de 1 JND – 84% para os pontos a 44,5 m (R25 a R32) (Figura 77-A), este ainda é um número bastante alto de pontos receptores com percepção na variação de T30.

Figura 77 – Média percentual de todas as frequências para pontos acima de 1 JND para T30. O gráfico “A” sendo do modo de implantação lote, e o gráfico “B” do cânion.

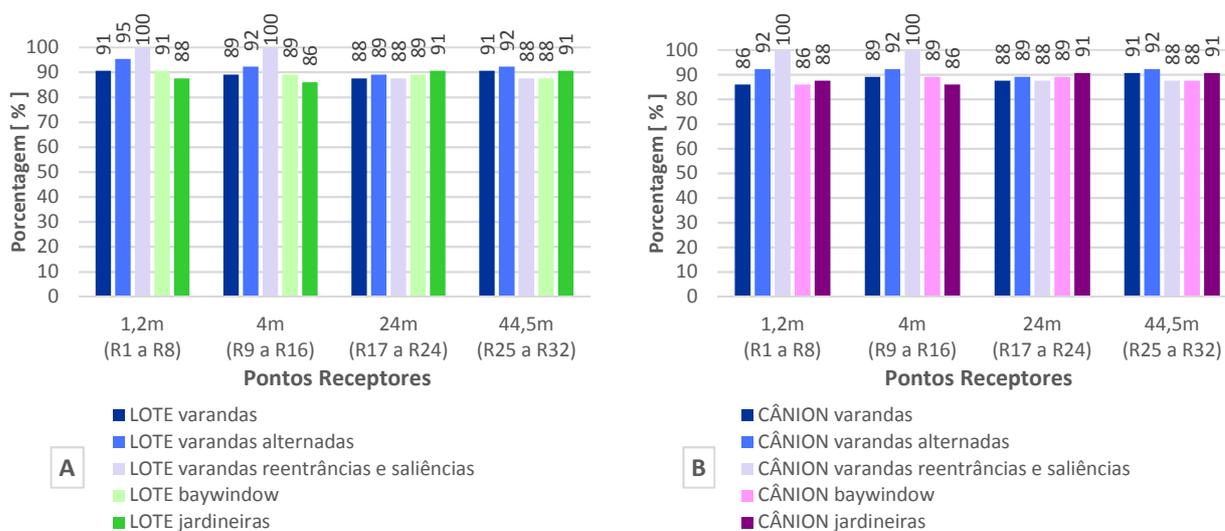


Fonte: a autora.

Este comportamento de alta percepção na variação do tempo de reverberação (T30) também é identificado com expressividade no modo de implantação cânion (Figura 77-B). No cânion apenas as frequências de 4000 Hz e 8000 Hz apresentam resultados abaixo de 1 JND principalmente para o cenário urbano *jardineiras*, como se verifica na Figura 74 e nos gráficos de percentual de pontos acima de 1 JND em função da frequência do Apêndice B. Na grande maioria das outras frequências do cânion, predomina 100% de percepção na variação do T30 (Apêndice B). Os altos percentuais encontrados de resultados acima de 1 JND para todas as alturas investigadas ratificam que a variação de T30 no modo de implantação cânion será extremamente percebida com a presença dos detalhes arquitetônicos.

Para o Tempo inicial de decaimento (EDT) em relação ao JND ambos os modos de implantação, lote e cânion, apresentaram alto percentual de resultados acima do limite de transição de 1 JND como ilustram os gráficos da Figura 78-A e Figura 78-B. Isto implica em alta percepção na variação do EDT pelos ocupantes do espaço urbano com a presença dos detalhes da forma da edificação.

Figura 78 - Média percentual de todas as frequências para pontos acima de 1 JND para EDT. O gráfico "A" sendo do modo de implantação lote, e o gráfico "B" do cânion.



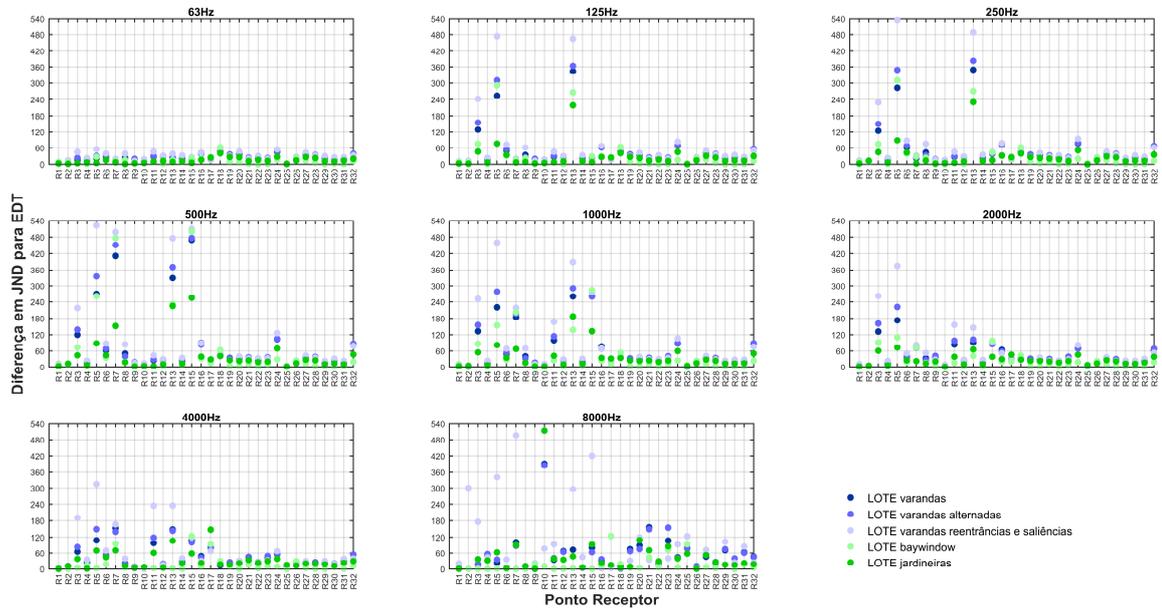
Fonte: a autora.

De maneira minoritária, no modo de implantação cânion para as frequências de 500 Hz e 1000 Hz nos pavimentos mais elevados, R17 a R24 e R25 a R32, foi identificada uma concentração de pontos receptores em que a variação de EDT não é percebida no espaço urbano, ou seja, abaixo de 1 JND como se identifica na Figura 76. No modo de implantação lote, a variação do tempo inicial de decaimento (EDT) é bastante perceptível com a presença dos detalhes, como se pode observar na Figura 75 pelos aleatórios e escassos pontos abaixo de 1 JND.

Apesar disso, na diferença em JND para EDT foi identificado um comportamento interessante nos pontos receptores mais próximos ao piso: a diferença de percepção com a presença dos detalhes arquitetônicos em alguns pontos receptores foi tão elevada que não foi possível sua apresentação em um gráfico único que ilustre tanto o limite de transição de 1 JND quanto o ponto receptor com maior diferença em JND para EDT. Assim sendo, as Figura 75 e Figura 76 só exibem uma parte da diferença em JND encontrada no EDT com escala reduzida no eixo y dos gráficos. As Figura 79 e Figura 80 que exibem o comportamento geral de toda a diferença

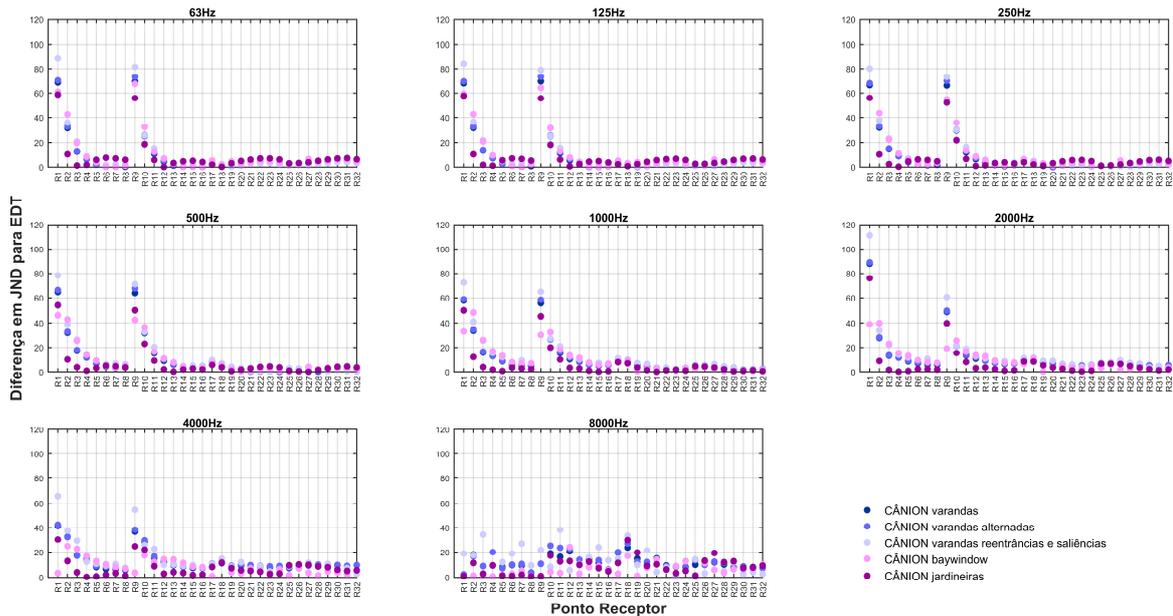
em JND com a escala do *eixo y* dos gráficos ampliada. Estas duas figuras são rerepresentadas em maior tamanho Apêndice C.

Figura 79 – LOTE – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.

Figura 80 – CÂNION – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.

Valores bastante altos para a diferença em JND ocorrem quando o módulo $PA_{controle} - PA_{experimental}$ da Equação 6³⁹ é bem maior do que o denominador desta mesma equação. Ou seja, quando o JND do parâmetro investigado é pequeno quanto a diferença do grupo de controle em relação ao grupo experimental. Estes resultados bastante elevados evidenciam que a variação de EDT na presença dos detalhes arquitetônicos é altamente perceptível no espaço urbano.

A associação dos valores absolutos obtidos com as simulações acústicas dos cenários urbanos *com* e *sem* detalhes da forma das edificações com a diferença em JND para o T30 e o EDT demonstra que há influência da presença dos detalhes arquitetônicos no tempo de reverberação (T30) e no tempo inicial de decaimento (EDT). Demonstra ainda que essa variação proporcionada pelos detalhes influencia na percepção da sensação de reverberância dos sons emitidos no espaço urbano.

Neste sentido, por ser um melhor descritor da sensação de reverberância o *aumento* do EDT identificado com presença dos detalhes arquitetônicos, conforme verificado no grupo experimental do lote e nos pontos receptores mais próximos ao piso no grupo experimental cânion, adiciona a percepção de reverberância aos sons urbanos de maneira geral (*e.g.* tráfego de veículos). Que por sua vez, leva ao aumento da percepção de audibilidade dos sons produzidos neste espaço urbano em relação ao grupo de controle – sem detalhes. Já a *diminuição* do EDT identificada nos receptores mais elevados diminui a sensação de reverberância em relação ao grupo de controle para os últimos pavimentos das edificações de um espaço urbano.

Também vinculado a sensação de reverberância, o tempo de reverberação (T30) atua muito mais na parcela tardia e, portanto, na parcela mais permanente dos sons emitidos no espaço urbano. Assim, a *diminuição* predominante do T30 identificada em ambos os modos de implantação lote e cânion no grupo experimental em relação ao grupo de controle diminui o tempo de permanência deste som no espaço urbano, o que leva a diminuição da sensação de volume sonoro com a presença dos detalhes da forma das edificações.

³⁹ Conforme apresentada no item 4.5 - *Forma de análise de dados* do capítulo 4.

5.3. Síntese dos resultados

Os resultados obtidos e discutidos ao longo deste capítulo a partir das simulações acústicas das condições experimentais propostas por esta pesquisa – os grupos de controle *sem detalhes* e dos grupos experimentais *com detalhes*, para as situações de implantação soltas no lote e coladas no lote (cânion) – são sintetizados e apresentados na Tabela 5 considerando as implicações da *presença* dos detalhes.

Tabela 5 - Síntese dos resultados de pesquisa.

A PRESENÇA DOS DETALHES NO MODO DE IMPLANTAÇÃO:	
LOTE	CÂNION
<p>SPL Aumenta o SPL, para os receptores próximos ao piso. Diminui o SPL para os receptores próximos aos pavimentos mais elevados das edificações da rua. Exceção: <i>baywindow</i> – SPL muito próximo ao controle</p>	<p>Aumenta o SPL para os receptores próximos ao piso. Diminui o SPL para os receptores próximos aos pavimentos mais elevados das edificações da rua. Exceção: <i>baywindow</i> – SPL muito próximo ao controle.</p>
<p>Diferença em JND para SPL LOTE e CÂNION: o aumento do SPL é bastante perceptível para os receptores próximos ao piso. A diminuição do SPL será medianamente percebida para os receptores próximos aos pavimentos mais elevados das edificações da rua. O aumento e diminuição de SPL no cenário urbano <i>baywindow</i> é pouco percebida, sendo não percebida no LOTE a 1,2m.</p>	
<p>T30 Diminui o T30. T30 varia com a distância, aumentando (<i>back-diffusion</i>). Exceção: <i>baywindow</i> – aumentou o T30.</p>	<p>Diminui o T30. T30 não varia com a distância, e apresenta desempenho acústico semelhante aos espaços fechados (<i>height-to-width ratio</i>).</p>
<p>Diferença em JND para T30 LOTE e CÂNION: diminuição do T30 é extremamente perceptível para todos os receptores investigados.</p>	
<p>EDT Aumenta o EDT. EDT varia com a posição do receptor.</p>	<p>Aumenta o EDT para os receptores próximos ao piso. Diminui o EDT para os receptores próximos aos pavimentos mais elevados das edificações da rua. EDT varia com a posição do receptor, aumentando com a distância.</p>
<p>Diferença em JND para EDT LOTE e CÂNION: aumento e diminuição do EDT é extremamente perceptível para todos os receptores investigados.</p>	

Fonte: a autora.

6. Conclusões

O sopro motivador desta investigação é derivado da associação de uma das essências criativas da arquitetura – expressa pelos detalhes da forma das edificações – e o desempenho acústico urbano – representado pelos mapas acústicos.

Essa motivação incitou o questionamento científico de que se estes detalhes arquitetônicos existem no espaço urbano real alguma influência eles exercem. O que levou a construção da hipótese de que se se existirem espaços urbanos delineados por edificações com a presença profusa de detalhes em sua forma – *e.g.* varandas, reentrâncias e saliências, jardineiras, *baywindows* – então há modificação no *desempenho acústico* desse mesmo espaço.

A supressão dos detalhes da forma caracterizando as edificações como blocos monolíticos e prismas puros *não* deveria ser justificada pela necessidade de simplificações algorítmicas e aproximações do fenômeno físico de propagação sonora em espaços abertos. Antes disso, assim como outros elementos que influenciam na propagação sonora em espaços urbanos e que são efetivamente considerados nos cálculos dos mapas acústicos, as influências e implicações no desempenho acústico da presença do detalhe da forma das edificações no espaço urbano deveria ser demonstrada. E então, a partir daí, considerada.

Os algoritmos de cálculo e as ferramentas de mapeamento acústico deveriam buscar ao máximo conseguir representar a realidade acústica do espaço urbano. Isso significa em não adaptar o espaço urbano cerceando-o dos detalhes da forma das edificações, caso estes detalhes exerçam de fato uma influência em seu desempenho acústico. O mapa acústico que deve se ajustar à realidade do espaço urbano, e não a realidade se ajustar ao mapa acústico.

Estas inquietações são na verdade lacunas científicas que conduziram a estruturação do objetivo deste estudo: demonstrar a influência do detalhe arquitetônico no desempenho da acústica urbana.

Um dos fatores para a permanência deste desconhecimento acerca da influência do detalhe no desempenho acústico urbano reside na associação entre as escalas urbanas de análise e os procedimentos metodológicos comumente adotados pelo mapeamento acústico. Os mapas

acústicos são conduzidos sob as abordagens da acústica urbana em macroescala, envolvendo escalas urbanas de bairros inteiros, cidades ou longos percursos lineares. Nestas escalas urbanas, com os métodos de abordagem utilizados – comumente o método traçado de raios (*ray tracing*) fundamentado em acústica geométrica – tanto os detalhes da forma das edificações quanto quaisquer variações arquitetônicas mais elaboradas são desconsideradas pela condição de simplificação algorítmica e limitação na entrada de dados que caracterizam o espaço urbano.

Sendo assim, pelo teor do objetivo desta pesquisa de abarcar o detalhe da forma das edificações e o espaço urbano, a análise da literatura conduziu a adoção de métodos utilizados nos estudos de acústica urbana em microescala – e em específico a microescala da rua – a partir da abordagem teórica da acústica geométrica aplicada às simulações acústicas computacionais de modelos virtuais. Esta escolha, permitiu a associação das vantagens dos métodos traçado de raios e fonte-imagem sintetizados em um modelo híbrido de cálculo. O que possibilitou investigar espaços urbanos com variações arquitetônicas mais elaboradas, profusos em detalhes da forma das edificações, alinhando o objetivo de pesquisa a um método correspondente de investigação, mantendo assim a eficiência na obtenção dos resultados.

Para a construção dos modelos virtuais simulados computacionalmente foram adotados cenários urbanos hipotéticos. A abstração em uma situação urbana hipotética reduziu a multiplicidade de variáveis existentes no espaço urbano real que poderiam influenciar nos resultados. Deste modo, a execução da presente pesquisa ocorreu dentro de um contexto o mais controlado possível com condições ótimas para a manipulação da variável independente – o detalhe da forma das edificações – e a verificação de seu efeito na variável dependente – o desempenho acústico urbano – sem interferências externas.

O desempenho acústico urbano foi analisado por meio dos parâmetros nível de pressão sonora (SPL), tempo de reverberação (T30) e tempo inicial de decaimento (EDT). A importância da investigação destes parâmetros na microescala urbana residiu na essência de interconexão entre eles: o aumento de T30 leva a percepção de aumento do SPL, aumentando a sensação de “volume” sonoro. Por sua vez, o EDT descreve melhor a sensação de reverberância do que o T30, e assim, seu aumento também leva à percepção de aumento do SPL produzido no espaço urbano. Estes parâmetros foram considerados objetivamente em termos de valores absolutos e subjetivamente em termos da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros, o *just noticeable difference* – JND.

A análise objetiva dos valores absolutos respondeu às inquietações de pesquisa e demonstrou que o detalhe da forma das edificações influencia o desempenho da acústica urbana. Esta influência acontece propiciando a predominância de um campo sonoro urbano rico em reflexões difusas. Constatou-se que os detalhes da forma das edificações proporcionam: o aumento dos níveis de pressão sonora (SPL) no espaço urbano para os receptores próximos ao piso, diminuindo-o nas proximidades dos pisos mais elevados; os detalhes levam a diminuição do tempo de reverberação (T30); os detalhes proporcionam aumento do tempo inicial de decaimento (EDT) em configurações urbanas com edificações soltas no lote; os detalhes aumentam o EDT do espaço urbano para os receptores próximos ao piso, diminuindo-o nas proximidades dos pisos mais elevados para espaços urbanos com edificações em cânion.

Seja aumentando, seja diminuindo os parâmetros acústicos estudados, a análise em termos subjetivos a partir da menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros, o JND (*just noticeable difference*), demonstra que de modo predominante esta influência é extremamente percebida tanto para os receptores próximos ao piso – os pedestres da rua – quanto para os receptores dos pavimentos mais elevados das edificações que compõem esta mesma rua. Em outras palavras, a energia sonora produzida no espaço urbano é perceptivelmente influenciada pelos detalhes da forma das edificações quando recebida também neste mesmo espaço urbano.

Associando a influência do detalhe da forma das edificações aos pontos receptores é interessante observar que além de modificar o desempenho acústico urbano, a influência do detalhe está diretamente relacionada à proximidade e ao distanciamento do receptor ao piso referencial e à situação urbana verticalizada do espaço urbano, ora aumentando, ora diminuindo os parâmetros analisados.

Neste sentido, foi identificado que a *presença* dos detalhes arquitetônicos aumenta o SPL e o EDT para os receptores próximos ao piso e assim aumentam a sensação de reverberância e de “volume” sonoro para os pedestres e para os primeiros pavimentos das edificações. De modo complementar, a *ausência* de detalhes arquitetônicos proporciona a diminuição do SPL e do EDT. Já para os receptores próximos aos pavimentos mais elevados das edificações da rua foi identificado que de modo predominante a *presença* do detalhe gera diminuição do SPL, do T30 e do EDT e, portanto, conseqüente diminuição da audibilidade e da percepção de “volume sonoro”.

Esta constatação revela que a *ausência* de detalhes traz benefícios acústicos para o campo sonoro da rua nas proximidades do pedestre. Ao mesmo tempo que a *presença* dos detalhes pode melhorar a situação acústica em contextos urbanos verticalizados, beneficiando o campo sonoro nas proximidades dos pavimentos mais elevados da rua.

Incidentalmente em termos acústicos, os códigos urbanísticos que regulam a junção de lotes ou a exclusão de recuos laterais para construção de embasamentos que abrangem os primeiros pavimentos destinados às garagens em edifícios residenciais ou destinados à serviços em edifícios comerciais de múltiplo uso, trazem benefícios acústicos para o espaço urbano. Uma vez que comumente estes pavimentos iniciais são *desprovidos* de detalhes da forma das edificações possibilitando a diminuição nível de pressão sonora (SPL) e do tempo inicial de decaimento (EDT) e, como consequência, a diminuição da audibilidade e da sensação de reverberância para o ocupante do espaço urbano próximo ao piso – o pedestre.

Sob o olhar acústico, isso implica em considerar que o detalhe arquitetônico vai além de um modo de diferenciar uma expressão plástica arquitetônica de outra, ou, que o detalhe é mais do que um modo de expressar os aspectos criativos do arquiteto na concepção projetual de uma edificação. Implica em constatar que a *presença* do detalhe é um elemento arquitetônico que beneficia o desempenho acústico em situações urbanas verticalizadas.

Também implica em afirmar que a *presença* do detalhe *não* é trivial na execução de mapas acústicos, uma vez que foi demonstrado o detalhe da forma das edificações influencia o desempenho acústico urbano. O aumento do nível de pressão sonora (SPL) e do tempo inicial de decaimento (EDT) e as grandes diferenças em JND encontradas com a presença dos detalhes arquitetônicos para os receptores próximos ao piso – que inclui os receptores a 4m, a altura de execução dos mapas acústicos – aponta que a percepção de “volume” sonoro para o usuário do espaço urbano é na verdade maior do que normalmente se é considerado nas investigações de acústica urbana em macroescala, que simplificam o espaço urbano excluindo a influência de uma caracterização mais detalhada da forma das edificações. Dito de outra forma, esta pesquisa demonstrou que a influência do detalhe é muito mais significativa acusticamente do que as simplificações dos mapas acústicos podem mostrar.

Parte desta limitação dos mapas acústicos em melhor caracterizar o desempenho acústico urbano permanece devido à margem de erro admitida em sua produção, que é da ordem de 5

dB. Um valor considerado alto para ser tolerável quando associado às menores diferenças percebidas pelo sistema auditivo humano (JND) na variação de determinados parâmetros acústicos. Esta margem de erro pode *camuflar variações* em termos de valores absolutos, camuflando também suas relações subjetivas de aumento e diminuição dos parâmetros que são significativamente perceptíveis para o ocupante do espaço urbano como foi demonstrado por esta investigação.

Da constatação de que o detalhe da forma das edificações não só influencia o desempenho acústico urbano, como influencia determinantemente a percepção sonora de quem ocupa estes espaços, dois novos caminhos científicos de investigação podem ser traçados.

O primeiro deles refere-se a estudos acerca de “coeficientes da forma” ou “índices de correção da forma” que possam caracterizar a variação do detalhe arquitetônico em cada edificação. Estas propriedades poderiam ser inseridas tanto no algoritmo de cálculo dos mapas acústicos – como índice de correção – quanto nas informações acústicas que caracterizam a própria edificação – como coeficientes da forma.

Estes “índices ou coeficientes da forma” atuariam, por exemplo, de modo equivalente às correções que já existem nos mapas acústicos para caracterização dos diferentes coeficientes de absorção das superfícies que compõe as edificações. Estas correções de absorção existentes operam na caracterização das reflexões que incidem sobre estas fachadas e retornam para o espaço urbano. A inclusão dessas correções é derivada de estudos específicos acerca da influência no desempenho acústico urbano que as superfícies das edificações e suas variações, lisas ou irregulares, podem causar na absorção. Assim como a presente pesquisa, estes estudos utilizaram outros métodos numéricos e experimentais e não os próprios métodos de elaboração dos mapas acústicos para atingir seus objetivos e então extrapolar resultados. Uma vez demonstrado por esta pesquisa que os detalhes da forma das edificações influenciam no desempenho acústico urbano, novos estudos podem objetivar a criação destes “índices ou coeficientes da forma” que melhor caracterizem a influência que o detalhe exerce no campo sonoro do espaço urbano.

O segundo caminho de investigação que pode ser traçado refere-se a estudos que associem o detalhe da forma das edificações à parâmetros urbanísticos baseados em desempenho acústico urbano. Pesquisas recentes conduzidas na Inglaterra, Estados Unidos, Austrália, China e Índia

apontam a necessidade de retomar investigações para o estabelecimento de parâmetros urbanísticos mais específicos que atuem na forma da edificação e não apenas na escala do lote ou no zoneamento urbano. Essas investigações⁴⁰ identificaram o potencial destes parâmetros urbanísticos para beneficiar determinados aspectos do meio urbano através da obtenção de níveis de desempenho específicos, destacando-se àqueles referentes à eficiência energética, à sustentabilidade, e ao urbanismo bioclimático. No Brasil, a consideração de códigos e parâmetros urbanísticos visando níveis de desempenho urbano é pouco aplicado. Contudo, ainda que intencionalmente não enfoquem o desempenho do espaço urbano a partir do atendimento a níveis específicos, códigos acerca dos detalhes da forma da edificação já são ou foram utilizados pelas legislações de algumas cidades brasileiras. Esses benefícios ocorreram essencialmente em termos de conforto térmico⁴¹.

Assim como ocorre com a eficiência energética, a sustentabilidade e com o urbanismo bioclimático, podem ser conduzidas novas investigações sob o olhar acústico, abrindo caminho para pesquisas que vislumbrem a melhora do desempenho acústico urbano por uma atuação na trajetória, estimulando novas posturas legislativas de códigos e parâmetros urbanísticos baseados na influência dos detalhes da forma das edificações em ambientes urbanos verticalizados. Desse modo, através de parâmetros a serem seguidos pela edificação enquanto artefato individual, poderia existir um benefício acústico para todo um conjunto urbano, enquanto artefato coletivo.

Por fim, ao demonstrar que espaços urbanos delineados por edificações com presença profusa de detalhes em sua forma modifica o desempenho acústico desse mesmo espaço, e, que o detalhe beneficia o campo acústico nas proximidades dos pavimentos mais elevados em situações urbanas verticalizadas, espera-se incitar a criatividade arquitetônica projetual em benefício da acústica urbana. A expressividade plástica pretendida pelo projetista e a exploração compositiva das partes das edificações verticais ganha uma nova centelha instigadora de partidos arquitetônicos: o olhar acústico para o projeto arquitetônico em benefício do espaço urbano.

⁴⁰ Como por exemplo as pesquisas de Guaralda (2014), Ben-Joseph (2009), Mendes *et al.* (2005), entre outras.

⁴¹ Permitindo a ventilação no espaço urbano pelo estabelecimento de recuos obrigatórios, como na maioria das cidades brasileiras; também em termos de ventilação estabelecendo escalonamento de edificações ou de pavimentos com limitação de gabarito nas cidades de João Pessoa-PB e Natal-RN; estimulando o uso de pilotis em pavimentos térreos, não os computando como área construída, na cidade de Recife-PE; estimulando o uso de jardineiras e sacadas, não os computando como área construída, caso não ultrapassassem determinado limite de área, como na cidade de São Paulo-SP e Recife-PE; entre outros.

Referências

- ALBERT, Donald G.; LIU, Lanbo. The effect of buildings on acoustic pulse propagation in an urban environment. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 127, n. 3, p. 1335–1346, 2010.
- ANDERSON, Grant; KURZE, Ulrich. Outdoor sound propagation. **Noise and vibration control engineering: principles and applications**. New York: Wiley, 1992.
- ANGELAKIS, Konstantinos. **The modern use of ancient greek and roman theatres from an acoustic point of view**. Technical University of Denmark, Department of Acoustic Technology, Dinamarca, 2006.
- ARAU, Higini. **ABC de la acústica arquitectónica**. Barcelona: Ediciones CEAC, 1999.
- ATAL, B.S.; SCHROEDER, M. R.; SESSLER, G. M. Subjective reverberation time and its relation to sound decay. In: 5º CONGRESS INTERNACIONAL D'ACOUSTIQUE, 1965, Lieja-Bélgica. **Anais...** Lieja-Bélgica: [s.n.], 1965.
- ATTENBOROUGH, Keith; LI, Kaiming; HOROSHENKOV, Kirill. **Predicting outdoor sound**. London: Taylor & Francis, 2007.
- BALL, Laurence M. Air Raid Siren Field Tests. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 14, n. 1, p. 10–13, 1942.
- BARBOSA, Bárbara Lopes. Transferência do potencial construtivo no Brasil. Convergência das políticas urbanas e de proteção ao patrimônio cultural. **Arquitextos**. n. 206.05, 2017.
- BARRON, Michael. **Auditorium acoustics and architectural design**. 2nd. ed. London; New York: Spon Press/Taylor & Francis, 2010.
- BENEVOLO, Leonardo. **História da arquitetura moderna**. São Paulo: Perspectiva, 1998.
- BEN-JOSEPH, Eran. Designing codes: trends in cities, planning and development. **Urban Studies**. v. 46, p. 2691–2702, nov. 2009.
- BILLON, Alexis *et al.* Numerical simulations of the sound propagation in non rectilinear streets. In: EURONOISE, 2009, Endiburgo, Escócia. **Anais...** Endiburgo, Escócia: [s.n.], 2009.
- BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- BLAUERT, Jens; XIANG, Ning. **Acoustics for engineers**. 2nd. ed. Berlin: Springer, 2009.

BORK, Ingolf. A comparison of room simulation software - the 2nd Round Robin on room acoustical computer simulation. **Acta Acustica united with Acustica**. v. 86, n. 6, p. 943–956, 2000.

BOTTELDOOREN, D.; DE COENSEL, B.; DE MUER, T. The temporal structure of urban soundscapes. **Journal of Sound and Vibration**. v. 292, n. 1–2, p. 105–123, 25 abr. 2006.

BRAMBILLA, G. Physical assessment and rating of urban noise. In: LICITRA, Gaetano (Org.). **Environmental urban noise**. Advances in ecological sciences. Southampton; Boston: WIT Press, 2001.

BRAMBILLA, G. The evaluation of population exposure to noise. In: LICITRA, Gaetano (Org.). **Noise mapping in the EU: models and procedures**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.

BRASIL. Lei no 10.257 de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências, 2001. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm>. Acesso em: 11 maio 2017.

CAN, Arnaud; FORTIN, Nicolas; PICAUT, Judicaël. Accounting for the effect of diffuse reflections and fittings within street canyons, on the sound propagation predicted by ray tracing codes. **Applied Acoustics**. v. 96, p. 83–93, 2015.

CARMONA, Matthew (Org.). **Design coding in practice: an evaluation**. Londres: DCLG Publications, 2006.

CHING, Francis D. K. **Arquitetura forma, espaço e ordem**. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

CHRISTENSEN, Claus Lynge; KOUTSOURIS, George; GIL, Juan. **ODEON room acoustics software version 13: user's manual**. Denmark: ODEON S/A, Scion DTU, 2016.

COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application**. 2. ed. Londres: Taylor & Francis, 2009.

CURITIBA. Prefeitura Municipal de Curitiba. Decreto nº 190. Dispõe sobre os critérios de uso e ocupação do Plano Massa nos Setores Especiais Estruturais e dá outras providências, 12 out. 2000. Disponível em: <<http://multimedia.curitiba.pr.gov.br/2010/00084693.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2015.

CURITIBA. Prefeitura Municipal de Curitiba. Plano Municipal de Mobilidade Urbana e Transporte Integrado de Curitiba - Anexo II a - diagnóstico, sistemas viários de circulação e de trânsito, 2008. Disponível em: <http://ippuc.org.br/visualizar.php?doc=http://admsite2013.ippuc.org.br/arquivos/documentos/D312/D312_002_BR.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2015.

- DAVIES, Huw G. Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 64, n. 2, p. 517–521, 1978.
- DELANY, M. E.; RENNIE, A. J.; COLLINS, K. M. A scale model technique for investigating traffic noise propagation. **Journal of Sound and Vibration**. v. 56, n. 3, p. 325–340, 1978.
- ECHEVARRIA SANCHEZ, Gemma Maria *et al.* The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads. **Building and Environment**. v. 97, n. Supplement C, p. 96–110, 2016.
- EL DIEN, H. Hossam; WOLOSZYN, P. The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations. **Applied Acoustics**. v. 66, n. 5, p. 533–551, 2005.
- EUROPEAN COMMISSION. Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. WG-AEN. Versão 2. Versão final., 13 jan. 2006.
- EVEREST, F. Alton; POHLMANN, Ken C. **Master handbook of acoustics**. New York: McGraw-Hill, 2009.
- FARINA, A. Validation of the pyramid tracing algorithm for sound propagation outdoors: comparison with experimental measurements and with the ISO–DIS 9613 standards. **Advances in Engineering Software**. v. 31, n. 4, p. 241–250, abr. 2000.
- FASTL, H.; ZWICKER, Eberhard. **Psychoacoustics: facts and models**. 3. ed. Berlin; New York: Springer, 2007.
- FLETCHER, Harvey; MUNSON, Wilden. Loudness, its definition, measurement and calculation. **Journal of Acoustical Society of America**. v. 5, 1933.
- GADE, Anders Christian. **Springer handbook of acoustics**. New York: Springer, 2007.
- GELFAND, Stanley A. **Hearing: an introduction to psychological and physiological acoustics**. New York: Marcel Dekker, 2004. Acesso em: 16 jul. 2016.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2006.
- GNOATO, Salvador. Curitiba, cidade do amanhã: 40 depois. Algumas premissas teóricas do Plano Wilhelm-IPPUC. **Arquitextos**. n. 072.01, 2006.
- GROAT, Linda N.; WANG, David. **Architectural research methods**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2013.
- GUARALDA, Mirko. Form-based planning and liveable urban environments. **Urban Morphology**. v. 18, p. 157–162, 2014.

GUEDES, Italo C. Montalvão; BERTOLI, Stelamaris R.; ZANNIN, Paulo H. T. Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in Aracaju — Brazil. **Science of The Total Environment**. v. 412–413, p. 66–76, 2011.

GUILLAUME, G.; GAUVREAU, B.; L'HERMITE, P. Numerical study of the impact of vegetation coverings on sound levels and time decays in a canyon street model. **Science of The Total Environment**. v. 502, p. 22–30, 2015.

HANSEN, Colin H. **Noise control: from concept to application**. London: Taylor & Francis, 2005.

HEIMANN, Dietrich. Three-dimensional linearised Euler model simulations of sound propagation in idealised urban situations with wind effects. **Applied Acoustics**. v. 68, n. 2, p. 217–237, 2007.

HORNIKX, Maarten. Ten questions concerning computational urban acoustics. **Building and Environment**. p. 1–13, 2016.

HORNIKX, Maarten; FORSSÉN, Jens. Modelling of sound propagation to three-dimensional urban courtyards using the extended fourier PSTD method. **Applied Acoustics**. v. 72, n. 9, p. 665–676, 2011.

HOROSHENKOV, V. K.; HOTHERSALL, C. D.; MERCY, E. S. Scale Modelling of Sound Propagation in a City Street Canyon. **Journal of Sound and Vibration**. v. 223, n. 5, p. 795–819, 1999.

HOUAISS, Antônio; VILLAR, Mauro de Salles. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

HOWARTH, M. J; LAM, Y. W. An assessment of the accuracy of a hybrid room acoustics model with surface diffusion facility. **Applied Acoustics**. v. 60, n. 2, p. 237–251, 2000.

ISMAIL, M. R.; OLDHAM, D. J. A scale model investigation of sound reflection from building façades. **Applied Acoustics**. Urban AcousticsUrban Acoustics. v. 66, n. 2, p. 123–147, 2005.

ISMAIL, M. R.; OLDHAM, D. J. Computer Modelling of Urban Noise Propagation. **Building Acoustics**. v. 10, n. 3, p. 221–253, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3382-1: Acoustics - measurement of room acoustic parameters. Part 1: performance spaces. Suíça, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9613-2: Acoustics: attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: general method of calculation. Suíça, 1996.

IU, K. K.; LI, K. M. The propagation of sound in narrow street canyons. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 112, n. 2, p. 537–550, 2002.

JANG, Hyung Suk *et al.* Evaluation of road traffic noise abatement by vegetation treatment in a 1:10 urban scale model. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 138, n. 6, p. 3884–3895, 2015.

JANG, Hyung Suk; KIM, Ho Jun; JEON, Jin Yong. Scale-model method for measuring noise reduction in residential buildings by vegetation. **Building and Environment**. v. 86, p. 81–88, 2015.

JORDAN, Vilhelm Lassen. Acoustical criteria for auditoriums an their relation to model techniques. **Journal of Acoustical Society of America**. v. 47, n. 2, 1970.

KANG, Jian. Numerical modelling of the sound fields in urban streets with diffusely reflecting boundaries. **Journal of Sound and Vibration**. v. 258, n. 5, p. 793–813, 2002.

KANG, Jian. Sound Propagation in Interconnected Urban Streets: A Parametric Study. **Environment and Planning B: Planning and Design**. v. 28, n. 2, p. 281–294, 2001.

KANG, Jian. Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 107, n. 3, p. 1394–1404, 2000.

KANG, Jian. Urban Acoustic Environment. In: YAO, Runming (Org.). **Design and Management of Sustainable Built Environments**. London: Springer London, 2013. p. 99–118.

KANG, Jian. **Urban sound environment**. London: Taylor & Francis, 2007.

KANG, Jian; MENG, Y.; BROWN, G.J. Sound propagation in micro-scale urban areas: simulation and animation. In: EURONOISE, 2003, Nápoles, Itália. **Anais...** Nápoles, Itália: [s.n.], 2003.

KANG, Jian; ZHANG, M. Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces. **Building and Environment**. v. 45, n. 1, p. 150–157, 2010.

KIEFER, Matthew. The code of the city review. **Harvard Design Magazine**. v. 31 Fall/Winter, p. 151–154, 2010.

KLÆBOE, R.; ENGELIEN, E.; STEINNES, M. Context sensitive noise impact mapping. **Applied Acoustics**. v. 67, n. 7, p. 620–642, jul. 2006.

KO, N. W. M.; TANG, C. P. Reverberation time in a high-rise city. **Journal of Sound and Vibration**. v. 56, n. 3, p. 459–461, 1978.

KUTTRUFF, Heinrich. **Acoustics: an introduction**. London; New York: Taylor & Francis, 2007.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room acoustics**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

LAMAS, José M. Ressano Garcia. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004.

LANG, George; BERANEK, Leo L. Determination of sound power levels and directivity of noise sources. **Noise and vibration control engineering: principles and applications**. New York: Wiley, 1992.

LARSSON, Conny. Atmospheric absorption conditions for horizontal sound propagation. **Applied Acoustics**. v. 50, n. 3, p. 231–245, 1997.

LEE, P.J.; KANG, J. Effect of height-to-width ratio on the sound propagation in urban streets. **Acta Acustica united with Acustica**. v. 101, n. 1, p. 73–87, 2015.

LEITE, João Carlos Campos de Vasconcellos; MAIORINO, Alexandre Virginelli; BERTOLI, Stelamaris Rolla. Caracterização acústica de espaço aberto com concha acústica: o caso do Auditório Beethoven. In: ENCONTRO SOBRAC, 2017, Brasília-DF. **Anais...** Brasília-DF: [s.n.], 2017.

LEVIN, Jack; FOX, James Alan. **Estatística para ciências humanas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

LICITRA, Gaetano. **Noise mapping in the EU models and procedures**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.

LICITRA, Gaetano; MEMOLI, Gianluca. Limits and advantages of Good Practice Guide to noise mapping. In: ACOUSTIC'08 PARIS, 2008, Paris. **Anais...** Paris: [s.n.], 2008.

LISA, Martin; HOLGER RINDEL, Jens; CHRISTENSEN, Claus Lyngge. Predicting the acoustics of ancient open-air theatres: the importance of calculation methods and geometrical details. In: BNAM, 2004, Mariehamn, Finlândia. **Anais...** Mariehamn, Finlândia: [s.n.], 2004.

LONG, Marshall. **Architectural acoustics**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2006.

LOURA, R.M.; VALADARES, V.M. Morfologia urbana e ruído ambiental: verificação da metodologia de pesos aplicada no bairro Floresta. In: ENCAC – COTEDI, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: [s.n.], 2003.

LYON, Richard H. Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 55, n. 3, p. 493–503, 1974.

MAIORINO, Alexandre Virginelli; BERTOLI, Stelamaris Rolla. Double slope decay rooms: the influence of coupling aperture location on reverberation according to seat location. In: ISMRA, 2016, La Plata, Argentina. **Anais...** La Plata, Argentina: [s.n.], 2016.

MARDONES, Maysa Daniela Moreno. **Mapeamento dos níveis de ruído em Copacabana, Rio de Janeiro, através de simulação computacional**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

MARRY, S.; DEFRANCE, J. Analysis of the perception and representation of sonic public spaces through on site survey, acoustic indicators and in-depth interviews. **Applied Acoustics**. v. 74, n. 2, p. 282–292, 2013.

MEHTA, Madan; JOHNSON, James; ROCAFORT, Jorge. **Architectural acoustics: principles and design**. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1999.

MENDES, Nathan *et al.* Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**. v. 5, n. 4, p. 47–48, 2005.

MENG, Yan; KANG, Jian. Combined ray-tracing and radiosity simulation for urban open spaces. In: ICA, 2007, Madri, Espanha. **Anais...** Madri, Espanha: [s.n.], 2007.

MENNITT, Daniel; JOHNSON, Marty. Multiple-array passive acoustic source localization in urban environments. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 127, n. 5, p. 2932–2942, 2010.

MINISTERE DES TRANSPORTS, Ministere de L'environnement Et du cadre de vie. **Prévision des niveaux sonores: guide du bruit des Transports Terrestres. Direction Générale des Transports Intérieurs Frankreich**. Bagneux, France: CETUR, 1980.

MOLERÓN, Miguel *et al.* Low frequency acoustic resonances in urban courtyards. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 135, n. 1, p. 74–82, 2014.

MOLERÓN, Miguel *et al.* Sound propagation in periodic urban areas. **Journal of Applied Physics**. v. 111, n. 11, 2012. Acesso em: 27 abr. 2016.

MORAES, E.; LARA, N. Mapa acústico de Belém. In: ENCAC-ELACAC, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: [s.n.], 2005.

MORI, Junichi *et al.* **Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique**. Mídia eletrônica de apresentação em evento. In: INTERNOISE, 2011. Osaka-Japão, 2011a.

MORI, Junichi *et al.* Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique. In: INTERNOISE, 2011, Osaka-Japão. **Anais...** Osaka-Japão: [s.n.], 2011b.

MORI, Junichi *et al.* Prediction of outdoor sound propagation by geometrical computer modeling. **Acoustical Science and Technology**. v. 35, n. 1, p. 50–54, 2014.

- NGUYEN, Tuan Anh. **Caractérisation des particularités dominantes de la morphologie urbaine à travers l'environnement sonore**. Tese – L'université Bordeaux. École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, Bordeaux, França, 2007.
- NIEMEYER, Maria Lygia; SANTOS, Maria Julia de Oliveira. Qualidade acústica no espaço urbano. In: ENCAC/ELACAC 2001, 2001, São Pedro - SP. **Anais...** São Pedro - SP: [s.n.], 2001.
- NIEMEYER, Maria Lygia; SLAMA, Jules Ghislaim. O ruído e a cidade: elementos do ruído urbano. **Arquitetura: pesquisa & projecto**. São Paulo: PRO-Editores FAU-UFRJ, 1998.
- OLSON, Harry F. **Acoustical engineering**. New Jersey: D. Van Nostrand Company INC., 1957.
- ONAGA, Hiroshi; RINDEL, Jens Holger. Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades. **Applied Acoustics**. v. 68, n. 3, p. 310–325, 2007.
- ORTEGA, Agustin Rico. **Protección frente al ruido**. Santiago de Compostela: Tórculo Edicións, 2009.
- OSHIMA, Takuya; ISHIZUKA, Takashi; KAMIJO, Takahide. Three-dimensional urban acoustic simulations and scale-model measurements over real-life topography. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 135, n. 6, p. 324–330, 2014.
- PAINI, Dario *et al.* The acoustics of public squares/places: a comparison between results from a computer simulation program and measurements in situ. In: INTERNOISE, 2004, Praga, República Checa. **Anais...** Praga, República Checa: [s.n.], 2004.
- PAINI, Dario; GADE, Anders Christian; RINDEL, Jens Holger. Agora acoustics - Effects of arcades on the acoustics of public squares. In: FORUM ACOUSTICS, 2005, Budapeste, Hungria. **Anais...** Budapeste, Hungria: [s.n.], 2005. p.1813–1818.
- PALAZZUOLI, D; LICITRA, G. Fundamentals. In: LICITRA, Gaetano (Org.). **Noise mapping in the EU: models and procedures**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- PARLAMENTO EUROPEU. Directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. 25 jun. 2002. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/ALL/?uri=OJ:L:2002:189:TOC>>. Acesso em: 20 maio 2014.
- PELAT, Adrien *et al.* Sound propagation in a street canyon: A study by modal decomposition. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 123, n. 5, p. 3153–3153, 2008.
- PICAUT *et al.* Effets de la réflexion diffuse des façades sur la propagation acoustique et sur la représentation de l'environnement sonore en milieu urbain. **Acoustique et Techniques**. n. 369, p. 17–26, 2004.

- PICAUT *et al.* Experimental study of sound propagation in a street. **Applied Acoustics**. Urban AcousticsUrban Acoustics. v. 66, n. 2, p. 149–173, 2005.
- PICAUT, Judicaël; SIMON, L. A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas. **Applied Acoustics**. v. 62, n. 3, p. 327–340, 2001.
- PREFEITURA DE FORTALEZA. Carta Acústica de Fortaleza é apresentada na Seuma. Fortaleza, 2013 Disponível em: <<http://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/meio-ambiente/carta-acustica-de-fortaleza-e-apresentada-na-seuma>>. Acesso em: 7 jul. 2013.
- PROBST, W. Uncertainty and quality assurance in simulation software. **Noise mapping in the EU models and procedures**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- REMILLIEUX, Marcel C. *et al.* Experimental and numerical study on the propagation of impulsive sound around buildings. **Applied Acoustics**. v. 73, n. 10, p. 1029–1044, 2012.
- RENTERGHEN, Timothy Van; BOTTELDOOREN, Dick. Meteorological influence on sound propagation between adjacent city canyons: A real-life experiment. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 127, n. 6, p. 3335–3346, 2010.
- RICHOUX, O. *et al.* Effect of the open roof on low frequency acoustic propagation in street canyons. **Applied Acoustics**. v. 71, n. 8, p. 731–738, 2010.
- RINDEL, J. H. The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. **Journal of Vibroengineering**. v. 3, p. 41–72, 2000.
- ROCHA, Rafaella Estevão da; BERTOLI, Stelamaris R.; MAIORINO, Alexandre Virginelli. Environmental noise performance: the detail of the building shape influence. In: INTERNOISE, 2015, San Francisco, CA, USA. **Anais...** San Francisco, CA, USA: [s.n.], 2015.
- ROCHA, Rafaella Estevão da; BERTOLI, Stelamaris Rolla; MAIORINO, Alexandre Virginelli. Reducing geometry or detailing? Comparison between measured and modeled microscale urban spaces. **POMA**. v. 28, n. 015011, 2017. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0000391>>.
- ROCHA, Rafaella Estevão da; MAIORINO, Alexandre Virginelli; BERTOLI, Stelamaris Rolla. Accuracy of computer simulation software using hybrid models for microscale urban environments. **POMA**. v. 28, n. 015012, 2017. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0000412>>.
- ROCHA, Rafaella Estevão da *et al.* Uma década de poluição sonora: mapas acústicos da cidade de Caruaru-PE. In: XXV ENCONTRO SOBRAC, 2014, Campinas - SP. **Anais...** Campinas,SP: [s.n.], 2014.
- RYCHTÁRIKOVÁ, Monika *et al.* Synthesis of a Virtual Urban Soundscape. **Buildings**. v. 4, n. 2, p. 139–154, 2014.

SABINE, Wallace Clement. **Collected papers on acoustics**. Cambridge: Harvard University Press, 1922.

SANTOS, Maria Julia de Oliveira; MARTINS, Elizabete Campos. O som nosso de cada dia: percepção, meio e forma urbana. v. 9, p. 211–225, 2005.

SAPATA, Ana Maria A. *et al.* Avaliação do conforto acústico em edificações localizadas em região de cânion urbano. In: ENTAC, 2010, Canela-RS. **Anais...** Canela-RS: [s.n.], 2010.

SATOH, Fumiaki *et al.* Impulse response measurement in public space using musical signal including swept-sine signals. **POMA**. v. 19, n. 040097, 2013. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/asa/journal/poma/19/1/10.1121/1.4799092>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

SAVIOJA, Lauri; SVENSSON, U. Peter. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 138, n. 2, p. 708–730, 2015.

SCHROEDER, M. R. New method of measuring reverberation time. **Acoustical Society of America**. 1965.

SINGAL, S. P. **Noise pollution and control strategy**. Oxford: Alpha Science Internat, 2005.

SMYRNOVA, Y.; KANG, J. Modelling of sound propagation in urban environments with the effect of vegetation. In: INTERNOISE, 2013, Innsbruck, Áustria. **Anais...** Innsbruck, Áustria: [s.n.], 2013. p.2380–2389.

SMYRNOWA, Yuliya *et al.* Effect of vegetation on noise propagation in streets and squares. In: INSTITUTE OF ACOUSTICS, 2012, Londres, Reino Unido. **Anais...** Londres, Reino Unido: [s.n.], 2012. p.57–67.

SOUZA, Rafaella B. Estevão De. **O som nosso de cada dia: análise do comportamento da acústica urbana a partir de modificações na forma urbana**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano - MDU, Recife, 2010.

TANG, S. K. Noise screening effects of balconies on a building facade. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 118, n. 1, p. 213–221, 2005.

TANG, S. K. Scale model study of balcony insertion losses on a building façade with non-parallel line sources. **Applied Acoustics**. v. 71, n. 10, p. 947–954, 2010.

THOMAS, Pieter *et al.* Reverberation-based urban street sound level prediction. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 133, n. 6, p. 3929–3939, 2013.

THORSSON, Pontus J.; ÖGREN, Mikael; KROPP, Wolfgang. Noise levels on the shielded side in cities using a flat city model. **Applied Acoustics**. v. 65, n. 4, p. 313–323, 2004.

- TSAI, Kang-Ting; LIN, Min-Der; CHEN, Yen-Hua. Noise mapping in urban environments: A Taiwan study. **Applied Acoustics**. v. 70, n. 7, p. 964–972, 2008.
- VAN RENTERGHEM, T.; SALOMONS, E.; BOTTELDOOREN, D. Parameter study of sound propagation between city canyons with a coupled FDTD-PE model. **Applied Acoustics**. v. 67, n. 6, p. 487–510, 2006.
- VENTURA, A. *et al.* Uma contribuição para o aprimoramento do estudo de impacto de vizinhança: a gestão do ruído ambiental por mapeamento sonoro. In: ENCONTRO SOBRAC, 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2008.
- VORLÄNDER, Michael. Internacional Round Robin on room acoustical computer simulations. In: ICA, 1995, Trondheim, Noruega. **Anais...** Trondheim, Noruega: [s.n.], 1995.
- WANG, Bo; KANG, Jian. Effects of urban morphology on the traffic noise distribution through noise mapping: A comparative study between UK and China. **Applied Acoustics**. Noise Mapping. v. 72, n. 8, p. 556–568, 2011.
- WANG, Haidong; ZHAI, Zhiqiang. Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. **Energy and Buildings**. v. 128, n. Supplement C, p. 319–335, 2016.
- WIENER, Francis M.; MALME, Charles I.; GOGOS, Creighton M. Sound Propagation in Urban Areas. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 37, n. 4, p. 738–747, 1965.
- YANG, Wei; KANG, J. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces. **Applied Acoustics**. Urban AcousticsUrban Acoustics. v. 66, n. 2, p. 211–229, 2005a.
- YANG, Wei; KANG, Jian. Soundscape and Sound Preferences in Urban Squares: A Case Study in Sheffield. **Journal of Urban Design**. v. 10, n. 1, p. 61–80, 2005b.

Apêndice A - Fontes da figura 38

Fonte indicada por imagem, a partir da esquerda para direita.



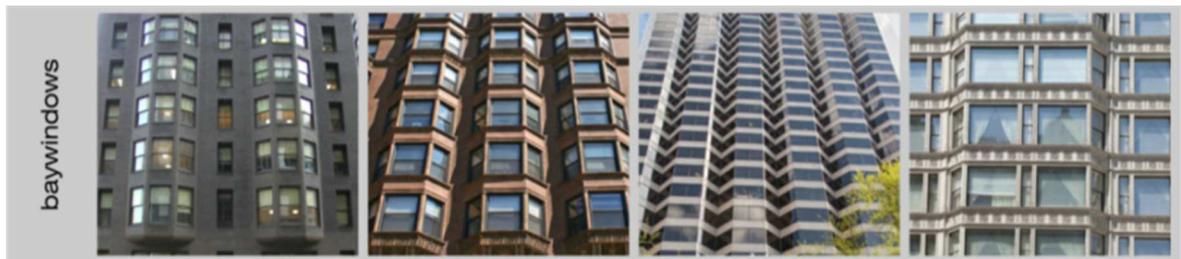
1. Recife – Pernambuco - Brasil. Fonte: https://www.google.com.br/maps/@-8.126043,-34.897469,3a,44.7y,311.2h,112.45t/data=!3m6!1e1!3m4!1sG_TzwjEsUA3GFSrncCqFBA!2e0!7i13312!8i6656. Acesso em 21/06/2016.
2. Roterdã - Holanda. Fonte: <http://www.archdaily.com/455282/b-tower-wiel-arets-architects>. Acesso em 21/06/2016.
3. Milão - Itália. Fonte: <http://www.archilovers.com/projects/107120/edificio-viale-monte-grappa.html>. Acesso em 21/06/2016.
4. Amsterdã - Holanda. Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@52.3632207,4.8432027,3a,30y,9.04h,105.57t/data=!3m6!1e1!3m4!1sFBBrUXEvGgVVEHcQNhZmVA!2e0!7i13312!8i6656>. Acesso em 21/06/2016.



1. Chicago - Estados Unidos da América. Fonte: <http://www.archdaily.com/96331/235-van-buren-perkins-will>. Acesso em 21/06/2016.
2. Rijswijk - Holanda. Fonte: <http://vd-k.eu/churchillaan-275-rijswijk/>. Acesso em 21/06/2016.
3. Amsterdã-Holanda. Fonte: <http://www.architectenweb.nl/aweb/redactie/Photo.asp?iNID=39090&PhotoID=388898>. Acesso em 21/06/2016.
4. Amsterdã - Holanda. Fonte: [http://www.architectuur-fotograaf.eu/?portfolio=amsterdam-osdorp#lightbox\[group\]/3/](http://www.architectuur-fotograaf.eu/?portfolio=amsterdam-osdorp#lightbox[group]/3/). Acesso em 21/06/2016.



1. Toronto - Canadá. Fonte: <http://urbantoronto.ca/sites/default/files/imagecache/display-slideshow/images/articles/2014/08/10469/urbantoronto-10469-37537.jpeg>. Acesso em 21/06/2016.
2. Malmo - Suécia. Fonte: <http://www.metaglas.nl/inspiratie/malmoe-tilburg/>. Acesso em 21/06/2016.
3. Paris - França. Fonte: <http://www.archdaily.com/481281/le-carre-en-seine-pietriarchitectes>. Acesso em 21/06/2016.
4. Seul - Coréia do Sul. Fonte: <http://www.designersparty.com/entry/Gwell-Tower-Seoul-Mass-Studies>. Acesso em 21/06/2016.



1. Chicago - Estados Unidos da América. Fonte: <http://www.architecture.org/architecture-chicago/buildings-of-chicago/building/monadnock-building>. Acesso em 21/06/2016.
2. Chicago - Estados Unidos da América. Fonte: <http://chicago-architecture-jyoti.blogspot.com.br/2009/04/manhattan-building.html>. Acesso em 21/06/2016.
3. Nova Orleans - Estados Unidos da América. Fonte: <http://hertzgroup.com/energyCentre.html>. Acesso em 21/06/2016.
4. Chicago - Estados Unidos da América. Fonte: <http://www.architecture.org/architecture-chicago/buildings-of-chicago/building/reliance-building>. Acesso em 21/06/2016.



1. São Paulo - São Paulo - Brasil. <http://www.archdaily.com.br/br/755258/itacolomi-445-gruposp>. Acesso em 21/06/2016.
2. Recife – Pernambuco - Brasil. Fonte: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/11.129/3749>. Acesso em 21/06/2016.
3. Jaboatão dos Guararapes – Pernambuco - Brasil. Fonte: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/11.129/3749>. Acesso em 21/06/2016.
4. Saigon- Vietnã. Fonte: <http://www.archdaily.com/199755/stacking-green-vo-trong-nghia>. Acesso em 21/06/2016.

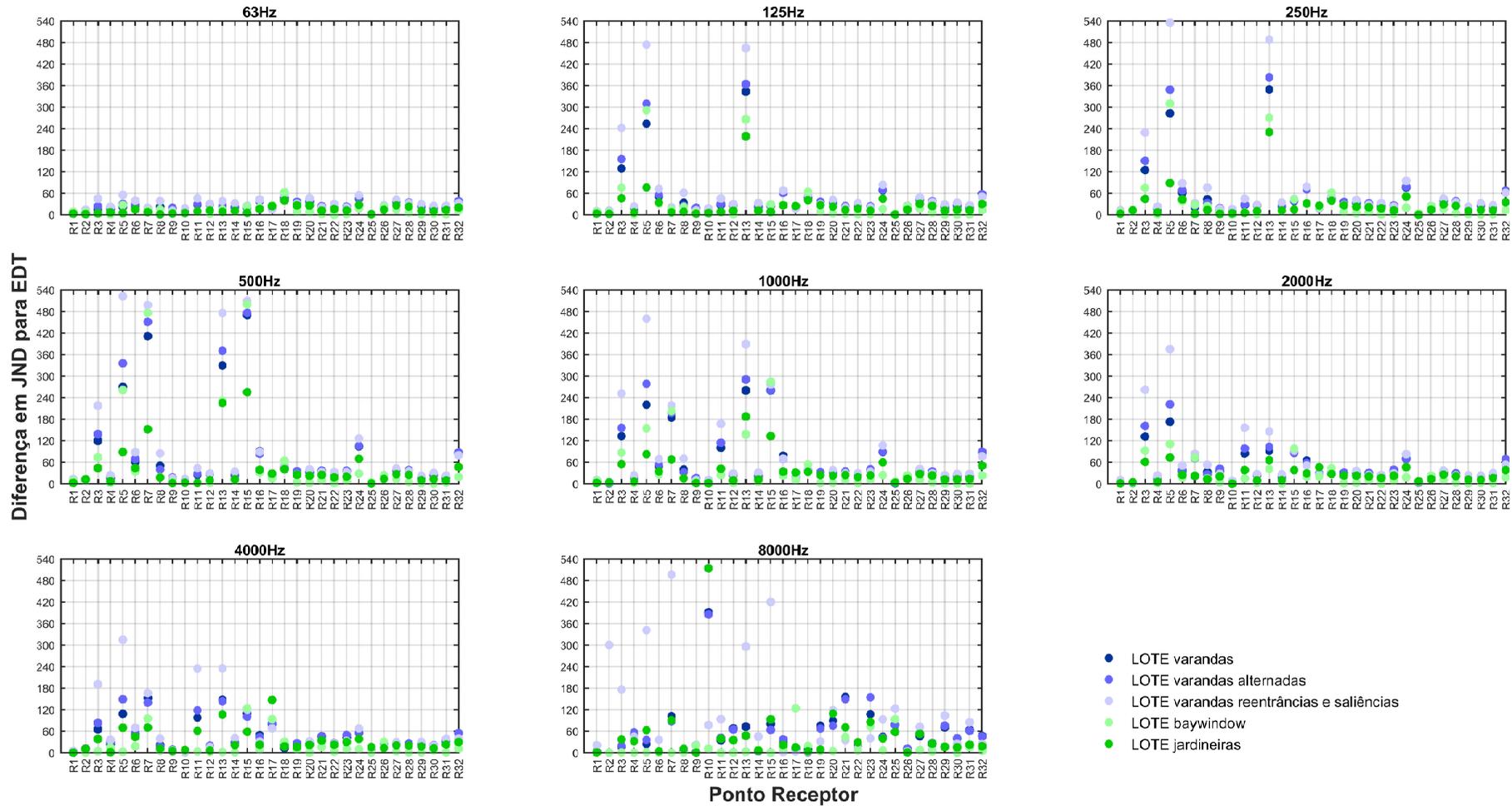
Apêndice B - Figura 81

Figura 81 - CÂNION - T30 - Percentual de pontos acima de 1 JND em função da frequência.



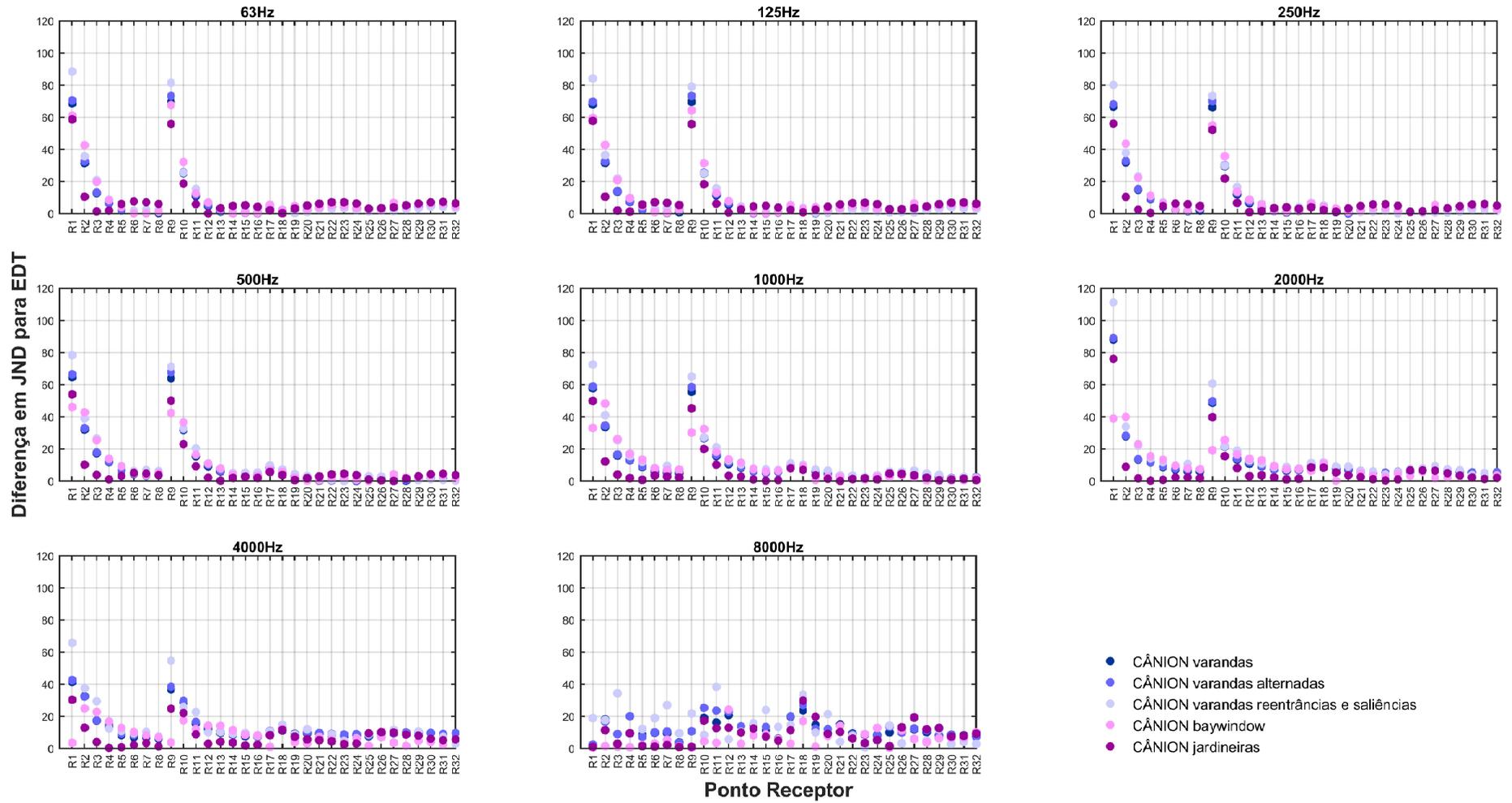
Fonte: a autora.

Figura 79 - LOTE – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.

Figura 80 - CÂNION – Diferença em JND para tempo inicial de decaimento (EDT) em função do ponto receptor, distribuídos por frequência.



Fonte: a autora.