



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Uma rua em uma caixa: a construção computacional dos espaços urbanos abertos

Rocha, Rafaella Estevão da¹; Bertoli, Stelamaris Rolla²

¹ Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, PE, Brasil, rafaella.darocha@ufpe.br

² Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, rolla@fec.unicamp.br

Resumo

Por sua relevância, os programas de execução dos mapas acústicos calculados de ruído, enquanto instrumento de pesquisa da macroescala urbana, passou a ser utilizado por alguns pesquisadores para objetivos diversificados e em pequenas escalas do tecido urbano não necessariamente aderentes às limitações que o instrumento apresenta. Na microescala, uma rua pode ser investigada a partir de softwares fundamentados em métodos híbridos de acústica geométrica comumente utilizado em acústica de salas. Entretanto, diferentes técnicas devem ser aplicadas quando se modela computacionalmente o espaço aberto em relação às técnicas de modelagem do espaço fechado. Assim sendo, o objetivo da presente pesquisa é evidenciar sistematicamente como modelar computacionalmente espaços urbanos abertos a partir de métodos híbridos de acústica geométrica, tendo como referência a escala dimensional da rua. Para isso, foi utilizado o modelo virtual de uma rua com diferentes configurações experimentais de implantação de edificações elaborado por meio do *software* Odeon para as simulações acústicas. A partir do processo de modelagem, foi desenvolvido um fluxograma metodológico para espaços urbanos abertos, que foi detalhado e discutido em cada uma de suas respectivas etapas. Foram destacadas as diferenças e particularidades entre a construção dos modelos dos espaços abertos e espaços fechados. Enquanto resultados, identificou-se que nos espaços abertos a necessidade de modelar elementos que representem a absorção do “céu aberto”, pode levar a necessidade de maior número de raios tardios. Constatou-se ainda que é importante modelar uma maior quantidade de elementos arquitetônicos nas fachadas das edificações que fazem parte dos espaços urbanos, a fim de melhor retratar a energia sonora. Concluiu-se que apesar de diversos pontos de interseção entre a construção de modelos de espaços abertos e fechados, são as diferenças metodológicas entre os dois que se constituem em pontos críticos e que podem alterar significativamente os resultados do espaço urbano.

Palavras-chave: mapeamento, mapa de ruído, simulação, modelo virtual, tutorial, métodos, microescala

PACS: 43.10.Ln, 43.50.Rq, 43.50.Sr, 43.55.Ka

A street in a box: computational construction of open urban spaces

Abstract

The present research aims to systematically show how to computationally model open urban spaces with hybrid methods of geometric acoustics, having as reference the dimensional scale of the street. For this, a virtual model of a street was used with different experimental configurations for the implementation of buildings. A methodological flowchart for open urban spaces was developed, detailed, and discussed in each of its respective stages. As result, it was identified that in open spaces, the need to model elements that represent the absorption of the "open sky", may lead to the need for a greater number of late rays. It was also found that it is important to model a greater number of architectural elements on the facades of buildings that are part of urban spaces, to better characterize the sound energy. It was concluded that despite several points of intersection between the construction of open and closed spaces models, it is the methodological differences between them that constitute critical points and that can significantly change the results in the urban space.

Keywords: noise mapping, environmental noise, computer simulation, virtual model, tutorial, methods



1. INTRODUÇÃO

Sob o olhar acústico, diversos são recortes de pesquisa e os métodos de abordagem para investigação do espaço urbano. Dentre tais enfoques, os mapas acústicos têm se destacado nas pesquisas brasileiras das últimas décadas enquanto instrumento no processo metodológico para caracterização e análise do ambiente urbano [1], [2]. Tal intensificação das pesquisas nacionais baseadas em mapas calculados de ruído está estreitamente relacionada a três acontecimentos temporais com repercussão na acústica brasileira.

O primeiro deles foi a implementação da regulação da produção de mapas acústicos nas cidades da União Europeia, a Diretiva Europeia 2002/49/CE. Nessa época, os mapas calculados de ruído já eram utilizados no Brasil tanto em pesquisas, quanto em consultorias acústicas, como evidenciam os primeiros estudos¹ publicados nos anais do Encontro SOBRAC de 2002 que utilizam mapas acústicos calculados como ferramenta de método, elaborados por Pinto *et al.* [3] e por Fernandes e Viveiros [4]. Em suas respectivas pesquisas, esses autores utilizaram os mapas acústicos calculados como instrumento de análise do impacto do ruído de tráfego em edificações escolares e do impacto ambiental causado por uma termoelétrica. Porém, a primeira pesquisa publicada em encontros nacionais especificamente com mapa calculado de ruído para fins estratégicos de planejamento urbano foi apresentada por Moraes et al. [5] no ENCAC 2009.

O segundo momento que estimulou as pesquisas nacionais baseadas em mapas calculados de ruído foram os debates, estudos e testes acerca da Norma de Desempenho a NBR 15575:2021 [6]. O processo de discussão da norma aconteceu desde os primeiros anos da década de 2000, mas foi fortemente impulsionada com a o

lançamento em 2008 de sua primeira versão, que só entrou definitivamente em vigor em 2013. No contexto da ABNT NBR 15575, os mapas acústicos fornecem dados sonoros do ambiente urbano de inserção da edificação que subsidiam a tomada de decisão projetual quanto às partes das vedações verticais externas, parte 4, e, dos sistemas de coberturas, parte 5. De modo simultâneo, soma-se ao período de debates e testes da Norma de Desempenho o aumento da incorporação de novos softwares de mapeamento nas principais universidades brasileiras que fomentam pesquisas em acústica urbana.

O terceiro acontecimento temporal que incitou o crescimento das pesquisas nacionais baseadas em mapas calculados foi a aprovação da primeira legislação brasileira sobre mapas acústicos, a Lei Municipal 16.499/2016 que regulamenta a execução dos mapas de ruído da cidade de São Paulo. Contudo, outras iniciativas municipais em acústica urbana anteriores à legislação paulistana já haviam sido conduzidas. Como em Fortaleza: a primeira cidade brasileira a ser inteiramente mapeada em 2012. A condução de seu mapeamento não seguiu uma legislação vigente, mas foi promovido por iniciativa da Secretaria do Meio Ambiente e da Equipe de Controle da Poluição Sonora da prefeitura de Fortaleza como apoio ao cumprimento de outras legislações vigentes acerca da poluição sonora [7].

Esses três períodos marcantes confirmam a eficácia da utilização de mapas acústicos como instrumento no processo metodológico para caracterização e análise dos espaços urbanos, e por conseguinte, sua importância enquanto referência para o planejamento, gestão, prevenção, controle e monitoramento do ruído urbano nas grandes cidades, sendo um

¹ Estas são referências para mapas *calculados* de ruído, portanto, não incluem mapas acústicos baseados em hachuras, em isolinhas e mapas acústicos baseados em interpolação de cor executados por softwares de georreferenciamento [5]. Ainda assim, sabe-se que há diversos registros na literatura nacional de pesquisas baseadas em outras formas de abordagem metodológica para representação, dos níveis de pressão sonora equivalente de ambientes urbanos, em mapas.

instrumento já discutido, testado e consolidado na literatura da acústica urbana [8]–[13].

Por sua relevância, o mapeamento calculado, enquanto instrumento de pesquisa da macroescala urbana², passou a ser utilizado para objetivos diversificados e em pequenas escalas do tecido urbano não necessariamente aderentes às limitações que o instrumento apresenta. O método de cálculo dos mapas acústicos se baseia em simplificações algorítmicas e aproximações do fenômeno físico de propagação sonora em grandes espaços abertos [15], [16]. Essa simplificação, quando associada à outras variáveis e limitações de execução em campo e em *software*, adicionam significativa incerteza e margem de erro aos mapas, contribuindo para propiciar resultados equivocados e pouco confiáveis quando utilizados na microescala urbana [17], [18].

Quando se deseja investigar ambientes urbanos com alcance espacial de pequenas dimensões como os da microescala, ou seja, facilmente percorridos e apreendidos em uma caminhada, como ruas, praças, jardins, pátios, interiores de quadras, entre outros espaços do tecido urbano, outras abordagens metodológicas, instrumentos e ferramentas – desvinculados dos softwares de mapeamento acústico – são mais adequadas por proporcionar maior grau de precisão e menor possibilidade de erro [7], [11], [17].

Algumas dessas abordagens metodológicas são fundamentadas na aplicação computacional de uma, ou mais, enfoques teóricos da acústica. Comumente, são métodos de cálculo híbridos que associam a acústica estatística fundamentada na consideração da energia

sonora, à acústica geométrica fundamentada na simplificação do campo sonoro em raios [19].

A validação do uso de softwares de métodos híbridos para utilização em investigações de espaços urbanos em microescala já está consolidada na literatura internacional. Entretanto, diante das esparsas pesquisas nacionais, o método deve ser disseminado, promovendo a ampliação do olhar acústico para o tecido urbano também a partir da microescala.

Além disso, apesar dos softwares fundamentados em métodos híbridos constituírem um ponto de interseção instrumental entre investigações em microescala dos espaços urbanos, e entre ambientes edificados fechados, diferentes ajustes técnicos devem ser aplicados quando se modela computacionalmente um ambiente aberto em relação aos procedimentos de modelagem de um ambiente fechado.

Assim sendo, o objetivo da presente pesquisa é evidenciar sistematicamente como modelar computacionalmente espaços urbanos abertos em microescala a partir de métodos híbridos de acústica geométrica, tendo como referência a escala dimensional da rua.

2. MÉTODO

De modo a atingir o objetivo de evidenciar como modelar computacionalmente espaços urbanos abertos em microescala, foi utilizado enquanto caso de referência o modelo virtual de uma rua com diferentes configurações experimentais de implantação das edificações:

² A macroescala urbana refere-se a escala dimensional da cidade, do bairro ou de um conjunto de quadras. Já a microescala urbana refere-se a escala dimensional da quadra, da rua ou da praça. Os termos foram empregados 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 1975 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 [14].



soltas no lote e colada no lote (ruas em cânion) como evidencia a Figura 1.

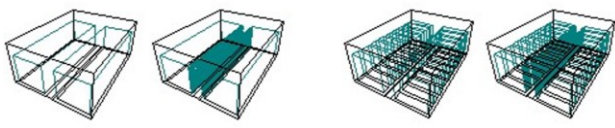


Figura 1: Modelos virtuais de uma rua com diferentes configurações experimentais de implantação das edificações.
(Fonte: as autoras).

Essa rua faz parte de pesquisa em vias de publicação das autoras do presente artigo. Portanto, neste *paper* não serão apontados os resultados do artigo que está em execução. Aqui, o foco está no processo tutorial de modelagem virtual do espaço urbano em microescala, apontando as interconexões e diferenças entre os ambientes abertos e ambientes fechados.

Por tratar-se da demonstração de um processo, o método foi a execução, observação e registro sistemático das interfaces e pormenores de cada etapa durante o uso do *software* Odeon versão 13. Cada fase foi sistematizada em um fluxograma metodológico, que foi detalhado e discutido nos itens que se seguem.

2. AS EDIFICAÇÕES E A RUA

As configurações e dimensionamento dos cenários urbanos 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.

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 espalhamento³ [20].

Deste modo, os menores detalhes arquitetônicos dos cenários urbanos foram dimensionados a partir de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda⁴ da frequência 125 Hz, aproximadamente 0,70 m. 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.

3. AS SIMULAÇÕES E A CAIXA

Nas simulações acústicas realizadas pela presente pesquisa foi utilizado o programa computacional Odeon versão 13. O Odeon é um *software* baseado em método de cálculo híbrido de fonte-imagem e traçado de raios. A produção dos modelos seguiu um procedimento ordenado de cumprimento sucessivo de etapas que são apresentadas em síntese na Figura 2.

³ No caso do espalhamento, além da frequência que se deseja analisar, pode-se abranger ainda até uma oitava abaixo [20].

⁴ $\frac{1}{4}$ 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.

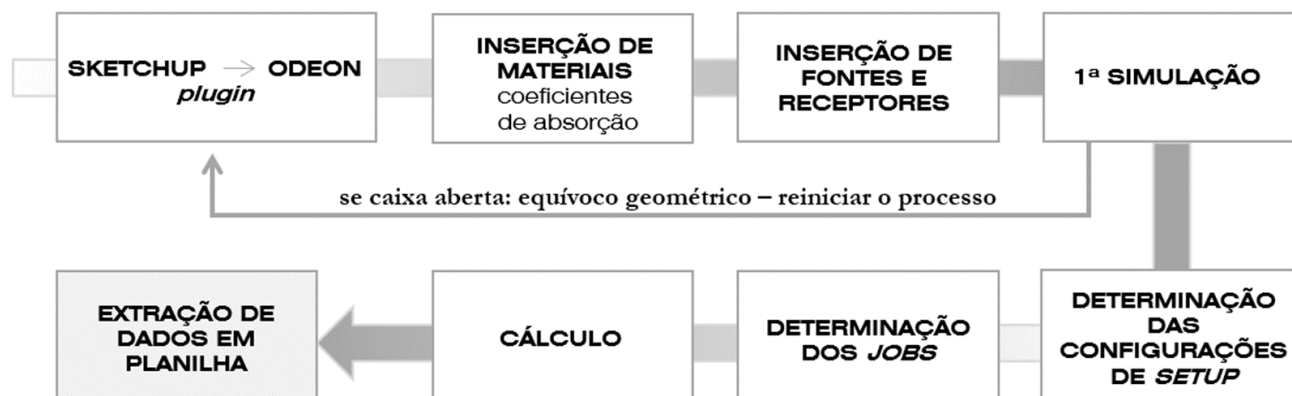


Figura 2: Organograma do processo metodológico para construção de modelos virtuais espaços urbanos abertos em microescala. (Fonte: as autoras).

Inicialmente, os cenários urbanos foram elaborados no *software* SketchUp (Trimble Buildings) que possui um *plugin* de interface direta com o Odeon, facilitando o processo de intercâmbio de desenhos entre programas (exportação).

Após a exportação para o Odeon, foram atribuídos os materiais de composição para cada superfície existente nos modelos e seus respectivos coeficientes de absorção. Todas as caracterizações de materiais foram repetidas em todos os modelos (variável de controle). Essas superfícies e seus respectivos coeficientes de absorção são apresentados na Tabela 1.

Ainda na Tabela 1, 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 do espaço urbano, nesse caso, uma rua. 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.

Tabela 1: 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 dos coeficientes e absorção: [21], [22]



A Figura 3 apresenta a caixa que representa o céu aberto em um dos modelos da pesquisa, apresentando também a interface de trabalho do *software* de acústica geométrica utilizado, o Odeon. 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”.

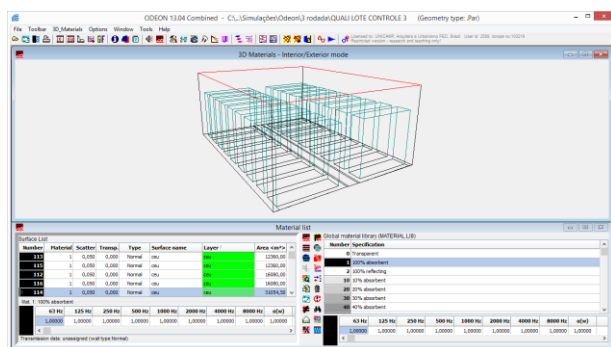


Figura 3: Interface do Odeon com a visualização caixa que representa o céu aberto em um dos modelos da pesquisa.
(Fonte: as autoras).

A próxima etapa na construção dos modelos foi a determinação da posição da fonte sonora e dos pontos receptores. Essa determinação tem estreita ligação com os objetivos da pesquisa de quem está modelando, logo pode e deve variar de acordo com a meta que se deseja atingir. Investigações que focam o pedestre, por exemplo, podem situar tanto fontes quanto receptores mais próximos ao piso. Já pesquisas que desejam verificar resultados incidentes na fachada em diferentes níveis de altura das edificações, pode situar os pontos receptores nas proximidades de cada pavimento investigado, e assim por diante. Para a fonte, se estabelece o nível de potência global (L_w) e sua altura. Para os pontos receptores, as suas respectivas alturas em relação ao piso

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.

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 as etapas seguintes.

Após a verificação da vedação da caixa, definiram-se as configurações de *setup* para os cálculos dos parâmetros acústicos, apresentados no Quadro 1. Estas configurações seguiram tanto a literatura existente acerca de simulações de modelos virtuais em microescala urbana fundamentados em acústica geométrica, quanto as recomendações do manual do Odeon [21]. 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 sonoras e receptores, existiriam na simulação para serem calculadas pelo *software*. Nomeadas de *Jobs*, as associações podem acontecer de duas maneiras: a primeira relaciona individualmente cada um dos pontos receptores e a fonte sonora, o *single-point job*; e a segunda maneira relaciona um cálculo simultâneo entre todos os pontos receptores estabelecidos e a fonte, resultando em no *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

Quadro 1: Configurações utilizadas no cálculo dos cenários urbanos.

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: as autoras).

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*. Uma vez definidas estas associações, procedeu-se para as etapas finais da simulação: os cálculos dos parâmetros que se desejava investigar e a extração de dados resultantes para serem sistematizados e analisados.

4. RUA “EM UMA” CAIXA *VERSUS* A SALA “COMO UMA” CAIXA

A partir da discussão dos itens anteriores acerca do processo metodológico e para construção computacional da rua enquanto referência espacial de microescala urbana, percebe-se que as similaridades predominam sobre as diferenças quando da elaboração de modelos de ambientes abertos e fechados para simulação acústica.

Contudo, as tênues distinções entre a construção dos espaços urbanos abertos e os espaços fechados de salas não são triviais e podem interferir significativamente nos resultados dos parâmetros que se deseja investigar. Duas relevantes considerações quanto às diferenças devem ser melhor discutidas.

A primeira consideração diz respeito a caixa que representa o céu aberto. Enquanto nos modelos

de salas o limite do espaço fechado é a arquitetura da própria sala – paredes, pisos e lajes, ou forro e cobertura – no espaço urbano aberto o limite do espaço é caracterizado pela caixa que representa o céu aberto e que envolve todos os componentes do espaço urbano sob investigação, nesse caso, a rua.

Raramente os limites espaciais de uma sala fechada receberá grandes áreas de um material com 100% de absorção em todas as bandas de frequência, como nos modelos dos espaços abertos. Em ambientes fechados, os variados coeficientes de absorção farão com que parte da energia retorne para seu interior, aumentando a possibilidade de ter suas ordens de reflexão captadas pelos pontos receptores. Isso faz com que aquela energia sonora que retorna seja computada para o decaimento total da sala, segundo os princípios de construção dos algoritmos de cálculos dos métodos híbridos⁵.

Já no espaço urbano aberto, uma vez que o raio incide no material da caixa que representa o “céu”, essa energia sonora simulada é 100% absorvida em todas as bandas de frequência, não retornando para o modelo. Isso pode gerar uma lacuna algorítmica associada ao lançamento de raios no cálculo efetuado pelo *software* influenciando na caracterização da parcela tardia e reverberante do decaimento.

⁵ Nos métodos híbridos que associam fonte-imagem e traçado de raios a construção da primeira parte da resposta impulsiva é constituída pelo som direto e por suas primeiras reflexões e é determinada pelo método fonte-imagem. Já a parte sonora reverberante da resposta impulsiva é formada pelo método de traçado de raios [7].



Portanto, na elaboração de modelos virtuais de espaços urbanos em microescala, deve-se atentar para a possível necessidade de configuração de *setup* com uma maior quantidade de raios tardios (*late rays*). Essa recomendação de aumento de raios dependerá da forma (tipo de geometria) de cada espaço urbano aberto investigado, e não segue necessariamente as recomendações de número de raios para ambientes fechados. No caso do *software* Odeon, a ferramenta *Investigations of Simulations Parameters* [21] auxilia na determinação do número de raios, mas ainda assim, a cada rodada de cálculo dos modelos deve-se pré-avaliar os dados obtidos verificando se os resultados dos parâmetros são aderentes.

A segunda consideração refere-se ao nível de detalhamento da geometria entre os espaços urbanos abertos e espaços fechados de salas. A simplificação da geometria é um requisito para simulações computacionais em acústica, sendo recomendada a compensação com aumento do coeficiente de espalhamento (*scattering coefficient*) das superfícies geometricamente reduzidas.

Embora a recomendação funcione para reproduzir o espalhamento dos interiores de salas ao substituir superfícies irregulares – como frisos em colunas, detalhes em madeira ou como os adornos de estuque de edificações antigas, ou a própria plateia – a mesma recomendação não acontece para o espaço urbano em microescala [17], [23]–[27]

Nesse sentido, no espaço urbano modelar elementos arquitetônicos que vão além das ornamentações das fachadas, tais como varandas, *baywindows*, sacadas, jardineiras, septos verticais, septos horizontais, beirais, *brise-soleils*, molduras de janelas, ou a própria estrutura aparente de pilares ou vigas da edificação, entre outros, irá contribuir para a confiável caracterização acústica deste espaço tornando os modelos virtuais em microescala urbana mais realísticos, e em geral, com menores erros no JND⁶ [24], [25], [27]–[29].

Fazendo uma analogia comparativa, modelar esses elementos arquitetônicos na forma das edificações do espaço urbano, varandas, sacadas, beirais, é equivalente a modelar balcões, pilares, vigas e painéis refletoras que se modela no espaço fechado de uma sala, como evidenciam os exemplos das Figura 4, 5, 6 e 7.

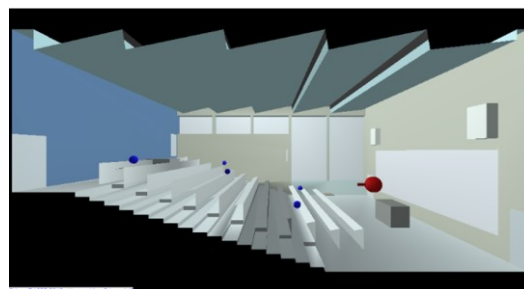


Figura 4: *Render* do Odeon de um auditório para 200 pessoas, com painéis refletoras, bancadas contínuas, a mesa do palestrante, entre outros.
Fonte: Rindel *et al.* 2013 [30].

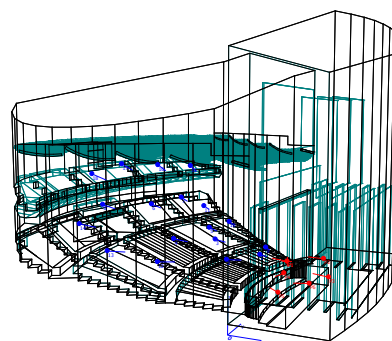


Figura 5: Perspectiva *wireframe* do Odeon de um teatro de ópera, com painéis refletoras, balcões, fosso de orquestra, arco do prosccênio, entre outros.
Fonte: Smiderle *et al.* 2016 [31].

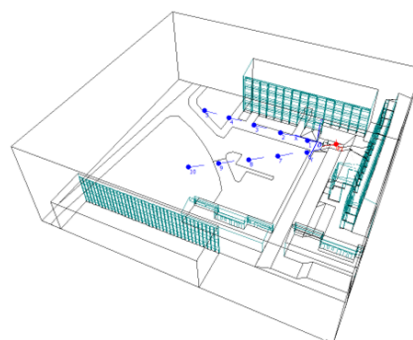


Figura 6: Perspectiva *wireframe* do Odeon de um espaço urbano na escala da praça, com brises, pilares e varanda, entre outros.
Fonte: Rocha e Bertolli, 2018 [26].

⁶ *Just Noticeable Difference* (JND) que significa a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros.

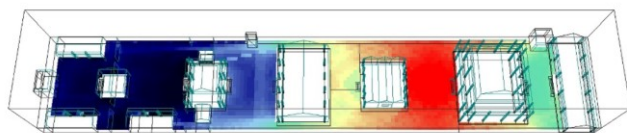


Figura 7: Perspectiva *wireframe* com mapa de resultados do Odeon de um espaço urbano na escala da praça, com pilares e alpendres, entre outros. Fonte: Zhang et al., 2020 [32].

A diferença entre modelar painéis refletorantes de teatros ou varandas de edificações reside apenas na escala dimensional dos elementos e seus espaços. A influência acústica dos elementos arquitetônicos da forma das edificações nas simulações computacionais de espaços urbanos em microescala existe, e sua contribuição é relevante para os resultados conforme debatido ao longo deste texto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, ao evidenciar sistematicamente como modelar computacionalmente espaços urbanos abertos em microescala a partir de método híbrido de acústica geométrica, tendo como referência a escala dimensional da rua, constatou-se que apesar de diversos pontos de interseção entre a construção de modelos virtuais de espaços abertos e fechados, são as pequenas diferenças nos processos metodológicos que se constituem em pontos críticos e que podem alterar significativamente os resultados dos parâmetros investigados.

Nesse sentido, além de compreender os potenciais e limitações das ferramentas para investigações no tecido urbano enquanto *locus situ*, é fundamental compreender a escala dimensional dos espaços urbanos que se desejam investigar para um processo metodológico aderente, e assim para a obtenção de dados confiáveis e que viabilizem a correta caracterização e análise do contexto sonoro de inserção desses espaços, sejam eles uma cidade, um bairro ou uma rua, uma praça.

REFERÊNCIAS

- [1] R. E. da Rocha e S. R. Bertoli, “Outros olhares para o espaço urbano em microescala: uma revisão narrativa de simulações virtuais fundamentadas em acústica geométrica”, apresentado em XXVIII Encontro da SOBRAC, Porto Alegre, RS, 2018.
- [2] R. E. da Rocha e S. R. Bertoli, “Panorama da produção científica de acústica no ambiente construído em encontros nacionais”, apresentado em XXVII Encontro SOBRAC-Sociedade Brasileira de Acústica, Brasília, DF, 2017. [Online]. Disponível em: <http://sobrac2017.com.br/index.php/submissao-de-artigos-2/anais-sobrac-2017/>
- [3] F. C. Pinto, G. F. de Jesus, e M. V. M. Pinheiro, “Simulação de impacto ambiental acústico provocado por termelétricas”, apresentado em XX Encontro SOBRAC, Rio de Janeiro, 2002.
- [4] A. G. Fernandes e E. B. Viveiros, “Impacto de ruído de tráfego em edificações escolares: uma metodologia de avaliação para o planejamento urbano”, apresentado em XX Encontro SOBRAC, Rio de Janeiro, 2002.
- [5] E. L. Moraes, F. Simón, e L. H. Guimarães, “Mapa de predicción del ruido ambiente en Belém - Brasil”, apresentado em ENCAC-ELACAC, Natal, 2009.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 15575-4:2021: Edificações habitacionais – Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas*. 2021.
- [7] R. E. da Rocha e S. R. Bertoli, “A acústica urbana e suas escalas de investigação”, *Acústica E Vibrações*, vol. 31, nº 48, p. 29–44, 2016.
- [8] R. Klæboe, E. Engelen, e M. Steinnes, “Context sensitive noise impact mapping”, *Appl. Acoust.*, vol. 67, nº 7, p. 620–642, jul. 2006, doi: 10.1016/j.apacoust.2005.12.002.
- [9] K.-T. Tsai, M.-D. Lin, e Y.-H. Chen, “Noise mapping in urban environments: A Taiwan study”, *Appl. Acoust.*, vol. 70, nº 7, p. 964–972, 2008, doi: 10.1016/j.apacoust.2008.11.001.
- [10] I. C. M. Guedes, S. R. Bertoli, e P. H. T. Zannin, “Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in Aracaju — Brazil”, *Sci. Total Environ.*, vol. 412–413, p. 66–76, 2011, doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.018.
- [11] M. Hornikx, “Ten questions concerning computational urban acoustics”, *Build. Environ.*, p. 1–13, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.06.028.
- [12] C. Asensio, M. Recuero, M. Ruiz, M. Ausejo, e I. Pavón, “Self-adaptive grids for noise mapping refinement”, *Appl. Acoust.*, vol. 72, nº 8, p. 599–610, jul. 2011, doi: 10.1016/j.apacoust.2010.12.007.
- [13] S. Kephelopoulou e M. Paviotti, “Noise maps from different national assessment methods: differences, uncertainties, and needs for harmonisation”, em *Noise mapping in the EU models and procedures*,



- Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [14] J. Kang, "Sound Propagation in Interconnected Urban Streets: A Parametric Study", *Environ. Plan. B Plan. Des.*, vol. 28, n° 2, p. 281–294, 2001, doi: 10.1068/b2680.
- [15] K. Attenborough, K. Li, e K. Horoshenkov, *Predicting outdoor sound*. London: Taylor & Francis, 2007.
- [16] W. Probst, "Uncertainty and quality assurance in simulation software", em *Noise mapping in the EU models and procedures*, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [17] R. E. da Rocha, S. R. Bertoli, e A. V. Maiorino, "Reducing geometry or detailing? Comparison between measured and modeled microscale urban spaces", *POMA*, vol. 28, n° 015011, 2017, doi: 10.1121/2.0000391.
- [18] R. E. da Rocha, S. R. Bertoli, e A. V. Maiorino, "Environmental noise performance: the detail of the building shape influence", apresentado em INTERNOISE, San Francisco, CA, USA, 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2015/00000250/00000003/art00016>
- [19] M. R. López e C. G. González, *Acústica arquitectónica*. Madrid: [s.n], 1991.
- [20] T. J. Cox e P. D'Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application*, 2° ed. Londres: Taylor & Francis, 2009.
- [21] C. L. Christensen, G. Koutsouris, e J. Gil, *ODEON room acoustics software version 13: user's manual*. Denmark: ODEON S/A, Scion DTU, 2016.
- [22] H. S. Jang, H. J. Kim, e J. Y. Jeon, "Scale-model method for measuring noise reduction in residential buildings by vegetation", *Build. Environ.*, vol. 86, p. 81–88, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.12.020.
- [23] H. H. El Dien e P. Woloszyn, "The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations", *Appl. Acoust.*, vol. 66, n° 5, p. 533–551, 2005, doi: 10.1016/j.apacoust.2004.09.004.
- [24] J. Mori, D. Yoshino, F. Satoh, e H. Tachibana, "Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique", em *INTERNOISE*, Osaka, Japão, 2011, vol. 2011, p. 3079–3083.
- [25] J. Mori, F. Satoh, S. Yokoyama, e H. Tachibana, "Prediction of outdoor sound propagation by geometrical computer modeling", *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 35, n° 1, p. 50–54, 2014, doi: 10.1250/ast.35.50.
- [26] R. E. da Rocha e S. R. Bertoli, "A acústica dos espaços urbanos em microescala: geometria e acurácia em modelos virtuais", *Acústica E Vibrações*, vol. 33, n° 50, 2018.
- [27] D. Paini, A. C. Gade, e J. H. Rindel, "Agorá acoustics - Effects of arcades on the acoustics of public squares", em *Forum Acoustics*, Budapeste, Hungria, 2005, p. 1813–1818.
- [28] M. Lisa, J. Holger Rindel, e C. L. Christensen, "Predicting the acoustics of ancient open-air theatres: the importance of calculation methods and geometrical details", apresentado em BNAM, Mariehamn, Finlândia, 2004.
- [29] D. Paini, J. Holger Rindel, A. Christian Gade, e G. Turchini, "The acoustics of public squares/places: a comparison between results from a computer simulation program and measurements in situ", apresentado em Internoise, Praga, República Checa, 2004.
- [30] J. H. Rindel, C. L. Christensen, e G. Koutsouris, "Simulations, measurements and auralisations in architectural acoustics", apresentado em ACOUSTICS 2013 NEW DELHI, Nova Déli, Índia, 2013.
- [31] R. Smiderle, A. V. Maiorino, e R. E. da Rocha, "The choice of architectural materials and its influence in the acoustical performance of an opera house", apresentado em ISMRA2016 - International Symposium of Music and Room Acoustics, La Plata, Argentina, 2016.
- [32] D. Zhang, C. Kong, M. Zhang, e Q. Meng, "Courtyard Sound Field Characteristics by Bell Sounds in Han Chinese Buddhist Temples", *Appl. Sci.*, vol. 10, n° 4, Art. n° 4, jan. 2020, doi: 10.3390/app10041279.