

# A acústica dos espaços urbanos em microescala: geometria e acurácia em modelos virtuais

Rocha, R. E. da<sup>1</sup> ; Bertoli, S. R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, rafaellaestevaorocha@gmail.com, rolla@fec.unicamp.br

## Resumo

Apesar da lacuna de pesquisas nacionais, a literatura internacional aponta diferentes modos de investigação acústica dos espaços urbanos em microescala. Algumas dessas abordagens baseiam-se na aplicação computacional da teoria da acústica geométrica, comumente utilizada para investigações em acústica de salas. Apesar do uso em comum, as interfaces da simulação computacional da propagação sonora nos espaços urbanos em microescala, como numa praça, podem ser diferentes das de um espaço fechado, como uma sala de concertos. Assim, tanto pela lacuna de estudos em microescala urbana que comparem medições *in situ* e simulações virtuais, quanto pela escassez de investigações acerca das diferentes posturas metodológicas na construção de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica de espaços urbanos abertos, o presente estudo objetiva identificar qual modelo virtual acústico, com a geometria detalhada ou simplificada (reduzida), melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real, verificando a sua acurácia. Para isso, foram realizadas medições acústicas *in situ* de um espaço urbano real na microescala de uma praça a partir da técnica da Resposta Impulsiva, e, simulações acústicas virtuais desse mesmo espaço a partir de *software* fundamentado em acústica geométrica. Os parâmetros investigados foram o  $T_{30}$ , EDT e SPL. Os resultados evidenciaram que, em simulações computacionais, as recomendações aplicadas às salas não são necessariamente as mesmas para espaços urbanos. Ainda que se apliquem compensações típicas nos modelos com a geometria reduzida – como o aumento do coeficiente de espalhamento – àqueles com a geometria detalhada apresentaram maior aderência e acurácia em relação aos parâmetros medidos, melhor representando a realidade acústica do espaço urbano real.

**Palavras-chave:** detalhes arquitetônicos, mapa acústico, métodos *ray tracing* e *image source*.

**PACS:** 43.50.Rq, 43.55.-n, 43.55.Ka, 43.58.-e.

## Microscale urban acoustics: geometry and accuracy of virtual models

### Abstract

The International literature indicates different methods for microscale acoustic investigation in urban spaces. However, it is observed a lack of these investigations in Brazil. Some methods are based on computational application of geometric acoustic theory, commonly used in room acoustics simulations. However, some interfaces used in the simulation of sound propagation for microscale urban environments are different when compared to closed spaces, such as a concert hall. The purpose of this study is to identify which virtual acoustic model, with a detailed geometry or with a simplified one, better represent a real urban acoustic space. The accuracy of the model will be also investigated. A real microscale urban space, a square, was measured using the impulse response technique, and, virtually simulated using geometric acoustic software. Acoustic parameters  $T_{30}$ , EDT and SPL were investigated. Results showed that the recommendations usually applied to closed rooms are not necessarily the same for open urban spaces. Even when it is applied typical compensations in reduced geometry models, such as the increase of scattering coefficients, the model with a more detailed geometry showed better accuracy and adherence to measured results, thus better representing the reality of the actual urban space.

**Keywords:** architectural details, noise mapping, methods, ray tracing, image source.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os primeiros avanços da onda sonora na propagação em espaços abertos, diversas são as variáveis atuantes no trajeto entre a fonte e o receptor. De maneira geral, essa interferência ocorre principalmente a partir das relações com a fonte sonora (tipo, potência, direcionalidade e distância ao receptor); das relações com os efeitos do solo (tipo de superfície e sua capacidade de reflexão ou absorção, e, interferência na direcionalidade da fonte sonora); das relações com as condições atmosféricas existentes (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento); e, por meio das relações com a forma urbana (formato das edificações, sua altura, formato de perfil de rua, em cânion ou em “L”, e a permeabilidade das quadras à onda sonora).

Diante da diversidade de variáveis influenciadoras, quando a propagação sonora tem o espaço urbano enquanto trajeto, suas investigações são frequentemente concentradas em duas escalas espaciais: a macroescala e a microescala [1–3]. A macroescala abrange grandes dimensões urbanas, como um bairro inteiro ou uma cidade. Por sua abrangência geográfica está comumente associada à execução de mapas acústicos calculados, que se baseiam em simplificações algorítmicas e aproximações do fenômeno físico de propagação sonora em espaços abertos [4,5].

Uma das aproximações refere-se à redução da geometria das edificações e a supressão de detalhes da forma das edificações. Esses detalhes *não* se referem às fachadas com superfícies irregulares, como as de edificações antigas com adornos de estuque (Figura 1A). Fachadas com superfícies irregulares são típicas em sítios históricos e antigos centros urbanos das cidades europeias. Por esse motivo a relação dessas fachadas com os fenômenos de reflexão e espalhamento é

bastante investigada<sup>1</sup>. Por recomendação da União Europeia [12] grande parte das normas que regulamentam os cálculos dos mapas acústicos adotam diferentes coeficientes de absorção e espalhamento 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 os adornos históricos.

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 arquitetônicos, como varandas, estrutura de pilares e vigas, sacadas, jardineiras, septos verticais, septos horizontais, beirais, *brise-soleils*, volumes reentrantes, volumes salientes entre outros que vão além da ornamentação da superfície (Figura 1B).



**Figura 1:** Superfície ornamentada de uma fachada em A; detalhes arquitetônicos da forma das edificações. Fonte: <https://pxhere.com/en/photo/1207668> para A; os autores para B.

No mapeamento acústico esses detalhes e elementos da forma arquitetônica são suprimidos. As edificações passam a ser caracterizadas enquanto blocos monolíticos ou

<sup>1</sup>Para uma leitura precursora destes estudos recomenda-se Lyon (1974)[6] e Davies (1978)[7]; Recomenda-se ainda [8–11].

prismas puros, sem os detalhes geométricos de sua forma arquitetônica, e, portanto, muitas vezes distante de uma reprodução mais realística do espaço urbano [13].

Hoje, as aproximações na produção dos mapas acústicos admite uma margem de erro da ordem de 5 dB [12]. Valor considerado alto para ser admitido como máximo de incerteza, uma vez que a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros (*just noticeable difference* – JND) do nível pressão sonora é de 1 dB [12,14,15]. Ainda assim, o mapeamento acústico é um instrumento bastante eficiente na caracterização sonora de grandes espaços urbanos. Ao ser aplicado à correta dimensão urbana pode se constituir em uma referência para gestão e planejamento contribuindo para a prevenção, controle e monitoramento do ruído urbano [16–18].

Por outro lado, para investigações de espaços urbanos em microescala, essas simplificações algorítmicas e aproximações do mapa acústico calculado podem não ser suficientes: análises em acústica urbana que necessitam de maior precisão não devem ser conduzidas através da delimitação e métodos da macroescala, e sim da microescala. A microescala abrange dimensões urbanas de pequenas proporções, tais como ruas, esplanadas, praças, jardins, pátios entre outros.

A decisão e seleção entre macroescala e microescala urbana de investigação e seus respectivos métodos e ferramentas depende do objetivo e objeto que se anseia pesquisar [17]. Assim sendo, quando se deseja pesquisar a acústica urbana em microescala existem processos metodológicos específicos e mais adequados [17,19]. A literatura internacional aponta diferentes modos de investigação acústica desses espaços urbanos em microescala. Todos possuem em comum um alto grau de precisão e menor possibilidade de erro de maneira geral. Algumas dessas abordagens são fundamentadas e comumente executadas através de simulações acústicas de

modelos virtuais do espaço urbano em microescala.

Essas pesquisas utilizam abordagens baseadas em métodos de cálculo como o fonte-imagem (*image source*) e o traçado de raios (*ray tracing*), comumente utilizados para investigações em acústica de salas. Ambos os métodos são fundamentados na aplicação computacional da teoria da acústica geométrica que, muito simplificada, apropriam-se do princípio de que a onda sonora se propaga através do caminho mais curto<sup>2</sup> entre a fonte e o receptor em uma linha reta, ou um “raio”, sendo suas reflexões consideradas especulares ou difusas [20,21]. Esses métodos podem ser utilizados individualmente ou em processos combinados de cálculo, onde uma parte da simulação acústica é assumida pelo método fonte-imagem e a outra pelo traçado de raios e são chamados de métodos híbridos [22].

Processos metodológicos comparativos (*Round Robin*) já demonstraram a evolução da confiabilidade nos resultados obtidos de modelos híbridos em espaços fechados [23–25]. Entretanto, poucos são os estudos gerados por modelos virtuais de acústica geométrica quando comparados com medições *in situ* em espaços urbanos abertos<sup>3</sup>. Essa escassez de pesquisas comparativas não é trivial, visto que algumas das interfaces acústicas de propagação sonora nos espaços urbanos em microescala, como numa praça, podem ser ligeiramente diferentes das interfaces de propagação em um espaço

---

<sup>2</sup> Isso para aplicações computacionais dos métodos de cálculo de acústica geométrica que consideram a velocidade do som uniforme. Do contrário, a onda sonora é propagada considerando o caminho de menor tempo.

<sup>3</sup> Para uma leitura mais aprofundada, recomenda-se a revisão narrativa desses estudos que envolvem simulação de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica aplicadas ao espaço urbano em microescala apresentadas por [26] e as diferentes etapas da execução da presente pesquisa apresentadas em [13,27,28].

fechado, como uma sala de concertos. As relações entre o campo livre (*free field*) e o campo reverberante (*reverberant field*), por exemplo, podem gerar diferentes comportamentos acústicos em espaços abertos e fechados. Outra diferença está nas orientações para uso desses métodos através de *software* em relação à geometria das edificações. Em acústica de salas recomenda-se a redução da geometria, simplificando-a [22]. Mas pesquisas demonstram que essa recomendação nem sempre se aplica a modelos virtuais de espaços urbanos [13,27–32]. Isso ocorre devido à expressiva presença de absorção atmosférica representada pelas superfícies nos modelos que caracterizam o céu aberto. O que torna as reflexões derivadas dos detalhes arquitetônicos essenciais para o adequado registro da energia sonora.

Um dos possíveis indicativos para a permanência dessa lacuna e para o número baixo de investigações comparativas reside na dificuldade de executar medições acústicas em pesquisas de campo sem a interferência significativa do ruído de fundo existente em um típico espaço urbano, caracterizado por múltiplas variáveis e de difícil controle. Isto faz com que diversas pesquisas em microescala urbana recorram a métodos associados a cenários urbanos hipotéticos e às simulações virtuais.

Isto posto, a busca por mais conhecimento das relações acústicas dos espaços urbanos em microescala deve ser aprofundada. Por mais que os mapas acústicos caracterizem de modo eficiente grandes dimensões, a vivência urbana do usuário é na microescala. É na utilização da escala da rua, do pátio, da praça e do jardim que o cidadão está diretamente exposto à energia sonora produzida nesse mesmo espaço urbano. E assim sendo, nessa escala, toda caracterização acústica que melhor represente a realidade do espaço urbano pode contribuir para novos modos de planejamento urbano em escalas de fato vivenciáveis.

Tanto por essa lacuna de estudos em microescala urbana que comparem medições

*in situ* e simulações virtuais, quanto pela escassez de investigações acerca das diferentes posturas metodológicas na construção de modelos virtuais fundamentados em acústica geométrica de espaços urbanos abertos, o presente estudo objetiva identificar qual modelo virtual acústico, com a geometria detalhada ou simplificada (reduzida), melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real, verificando a sua acurácia.

## 2. MÉTODO

Para atingir o objetivo do presente estudo a base do processo metodológico percorrido foi a pesquisa de campo e simulações acústicas virtuais. A pesquisa de campo foi realizada a partir de medições *in situ* de um espaço urbano real na escala de uma praça. Esse mesmo espaço foi modelado virtualmente a partir de *software* fundamentado em acústica geométrica, o Odeon v13 *Room Acoustic*. A seguir o espaço urbano selecionado para investigação (Seção 2.1), as medições *in situ* (Seção 2.2) e a construção dos modelos e simulações virtuais são melhor detalhadas.

### 2.1. O espaço urbano

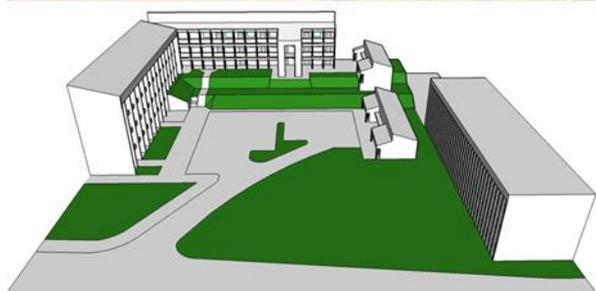
A primeira definição fundamental dessa investigação foi a determinação do espaço urbano real a ser investigado. O local teve que necessariamente atender ao requisito da presença mínima de ruído de fundo para não comprometer os resultados das medições. Mesmo os mais calmos espaços urbanos são problemáticos em termos de medições que necessitem da ausência de ruídos urbanos típicos. Tais como vozes, buzinas, alarmes, sirenes, motores, frenagens, compressores entre outros.

Nesse sentido, alguns locais existentes em campi universitários proporcionam uma boa relação entre espaços urbanos e ausência de ruído de fundo. Comumente esses campi possuem grandes dimensões geográficas, abrangendo bairros inteiros, e contêm alguns espaços desocupados durante os finais de

semana, sem atividades educacionais ou de lazer, permitindo medições sem interferência significativa de ruído de fundo.

O estacionamento da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo-FEC da Universidade Estadual de Campinas-Unicamp é um desses espaços. A caracterização de sua implantação se aproxima da configuração de espaços urbanos abertos tradicionais, como um jardim urbano, uma praça ou uma esplanada, e por isso será mencionado simplesmente como “praça”.

As edificações que constituem a praça da FEC apresentam grande riqueza de detalhes arquitetônicos – com reentrâncias e saliências derivadas da presença de pilares, vigas e *brise-soleils* aparentes – constituindo-se em uma boa referência para a execução do modelo virtual detalhado (Figura 2).



**Figura 2:** Características morfológicas e de implantação da praça da FEC. Fonte: os autores.

A implantação dessas edificações configura um formato predominante em “L” (edificações mais altas) e em “U” (edificações mais altas associadas às mais baixas) possibilitando uma boa quantidade das reflexões necessárias para obtenção dos parâmetros investigados (Figura 2).

Tanto por tais características morfológicas, quanto pela possibilidade de ausência de ruídos aos finais de semana, a praça da FEC configura-se como um excelente espaço urbano para as medições acústicas necessárias a esta pesquisa. Assim sendo, essa praça foi selecionada para representar o espaço urbano real nessa investigação. Outras de suas características e materiais predominantes são sintetizadas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Caracterização da praça da FEC.

#### **Materiais predominantes**

Edificações em blocos de concreto pintado, janelas em vidro comum, portas metálicas; pavimentação em bloco intertravado de concreto, solo natural com cobertura de grama.

#### **Dimensões predominantes**

Praça com dimensões aproximadas de 40x48 m; edificações com altura variável de 5,75 m a 18 m.

Fonte: os autores.

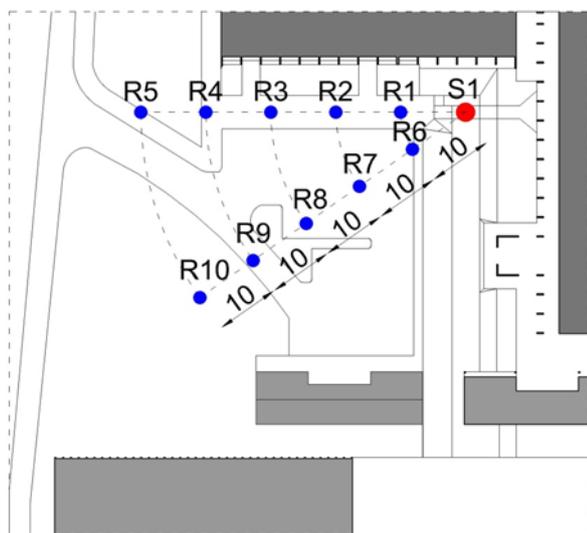
## **2.2. As medições *in situ***

Após a definição do espaço urbano a ser investigado, foram realizadas as medições *in situ*. Foi utilizada a técnica de resposta impulsiva (RI) obtida a partir do *software* Dirac Room Acoustics. O sinal utilizado foi um *sweep* exponencial de 10,9 s. Os parâmetros<sup>4</sup> obtidos a partir do Dirac foram o tempo de reverberação ( $T_{30}$ ) e o tempo de decaimento inicial (*early decay time* - EDT) para as frequências em banda de oitava de 125 Hz a 4000 Hz. Todas as medições ficaram acima dos recomendados 40 dB para a relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* -SNR). O parâmetro nível de pressão sonora (*sound*

<sup>4</sup> A escolha dos parâmetros foi derivada dos achados da revisão narrativa apresentada em [26]: em pesquisas de microescala urbana que comparam medições *in situ* e simulações virtuais predomina a investigação de SPL, EDT e  $T_{30}$ .

*pressure level* - SPL) e o ruído de fundo foram captados com o sonômetro tipo 2270 da Brüel & Kjær, sendo o SPL obtido através de ruído rosa. As compensações em relação ao ruído de fundo não foram necessárias para as frequências investigadas. As medições foram realizadas em um dia ensolarado de outono, apresentando 61,5% de umidade relativa e 28,3 °C de temperatura, valores devidamente inseridos nos modelos virtuais.

A posição da fonte sonora e dos pontos receptores foi determinada para obter melhor proveito de interação entre a propagação sonora e as edificações existentes na praça, e assim permitir uma boa comparação dos resultados acústicos entre a presença ou ausência dos detalhes arquitetônicos. Desse modo, foi utilizada uma fonte sonora omnidirecional a 1,6 m do piso, no vértice do conjunto de edificações mais altas, a 1,6 m do piso, em um patamar mais próximo das edificações distanciando-se 2,1 m do plano de superfícies dos pontos receptores (Figura 3).



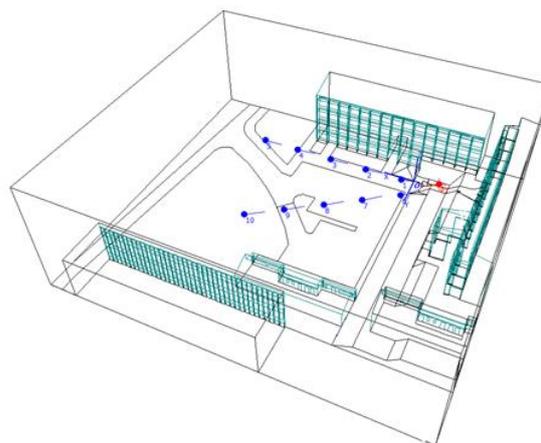
**Figura 3:** Posicionamento da fonte sonora S1, em vermelho, e, dos pontos receptores R1 a R10, em azul. Fonte: os autores.

Microfones de medição omnidirecionais foram utilizados em 10 posições a 1,5 m do piso. Os cinco primeiros receptores (R1-R5) foram alocados a cada 10 m da fonte em uma linha paralela à edificação mais alta da praça.

Os cinco pontos restantes (R6-R10) foram alocados com os mesmos raios de distância, em relação à fonte, dos primeiros pontos, mas dessa vez distribuídos com uma maior distância das edificações, projetando-se para o campo aberto como ilustrado na Figura 3.

### 2.3. Os modelos virtuais e as simulações

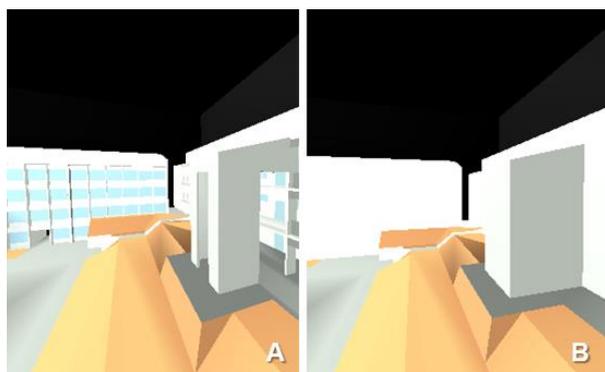
Os modelos virtuais do espaço urbano investigado foram construídos e calculados a partir de método híbrido – que associa o método traçado de raios (*ray tracing*) ao método fonte-imagem (*image source*) – no *software* Odeon v13 Room Acoustic. Comumente utilizado para a elaboração de modelos virtuais de salas, como teatros e salas de concerto. A Figura 4 apresenta a visualização da interface do modelo virtual no Odeon.



**Figura 4:** Imagem de interface do modelo virtual construído no *software* Odeon. Fonte: os autores.

Uma das recomendações do *software* é a redução da geometria dos modelos [22]. Contudo, devido aos poucos estudos comparativos entre métodos de cálculo híbridos aplicados a espaços urbanos em microescala associados à medições *in situ* [13,27,28,31,33] foram construídos dois modelos base, um com a geometria detalhada e outro com a geometria reduzida ou simplificada. O primeiro considerou todos os detalhes arquitetônicos conforme os encontrados nas edificações do local investigado: reentrâncias e saliências

derivadas da presença de pilares, vigas e *brise-soleils* aparentes. A Figura 5A apresenta uma imagem do modelo virtual detalhado. O segundo modelo seguiu a recomendação usual para acústica de salas, com a simplificação da sua geometria e sua respectiva compensação com o aumento do coeficiente de espalhamento (*scattering coefficient* - *s*) das superfícies geometricamente reduzidas (Figura 5B).



**Figura 5:** Em A, uma redenrização do modelo virtual detalhado construído no *software* Odeon; em B, o modelo simplificado. Fonte: os autores.

Devido a essas diferenças de geometria, foram necessárias configurações de cálculo (*setup*) também diferentes para alcançar a melhor aderência na calibração entre o modelo virtual e os resultados das medições *in situ*. A opção metodológica de diferentes *setups* não se constitui em uma variável independente, ou, em uma variável que comprometa a verificação dos resultados e da acurácia, visto que os parâmetros de referência são os dados medidos no espaço urbano real. Assim, para o ajuste do *setup* tanto faz se a geometria é simplificada ou detalhada, para ambos os modelos o objetivo é atingir valores os mais próximos possíveis da realidade acústica encontrada no local investigado.

Cada modelo foi calibrado a partir da inserção no *software* dos *audiofiles* das RI obtidas nas medições, possibilitando encontrar qual configuração de cálculo melhor se adequa aos resultados medidos através da ferramenta *Investigations of Simulations Parameters-*

ISP. Assim, foram investigados o número ótimo de raios iniciais e tardios (*early and late rays*), e o número ótimo da ordem de transição (*transition order* - TO) entre os métodos fonte-imagem e traçado de raios para cada modelo virtual para os parâmetros EDT, *T*<sub>30</sub> e SPL. As variações de *setup* de cada um dos modelos virtuais estão detalhadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Configurações dos modelos virtuais.

Modelo	Ordem de transição (TO) e raios	Coeficientes de absorção
Modelo A Detalhado	Derivados da ISP (TO 3; 200000 <i>late rays</i> ; 100 <i>early rays</i> ).	Livraria do Odeon de acordo existentes <i>in loco</i> .
Modelo B Detalhado com otimizado	Iguais ao modelo anterior. $\alpha$	Modelo anterior otimizados por algoritmos genéticos.
Modelo C Simplificado	Iguais ao modelo anterior.	Iguais ao modelo anterior.
Modelo D Simplificado com novos TO e raios	Derivados da ISP (TO 0; 100000 <i>late rays</i> ; 0 <i>early rays</i> ).	Iguais do modelo anterior.
Modelo E Simplificado com $s=1$	Iguais ao modelo anterior.	Iguais ao modelo anterior.
Modelo F Simplificado com $s=0,7$	Iguais do modelo anterior.	Iguais ao modelo anterior.
Modelo G Simplificado com otimizado	Iguais ao modelo anterior. $\alpha$	Modelo anterior otimizados por algoritmos genéticos.

Fonte: os autores.

As configurações de posições de fonte e receptor e a potência da fonte sonora por frequência foram as mesmas para todos os modelos. Também em todos os modelos, as superfícies que representam céu aberto

receberam absorção de 100%, estratégia típica de estudos de microescala urbana baseadas em acústica geométrica. Todos os cálculos foram realizados pelo método de precisão (*precision*)<sup>5</sup>.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Seções 3.1 e 3.2 são discutidos os modelos que melhor representam a realidade acústica de um espaço urbano real, com a geometria detalhada ou simplificada (reduzida), sendo discutida também a acurácia desses modelos.

#### 3.1. Reduzir ou detalhar a geometria?

A comparação entre os modelos e os resultados das medições foi feita a partir das médias de todos os pontos receptores por frequência para cada parâmetro analisado, conforme apresentado na Figura 6. De modo geral, a tendência predominante de comportamento das curvas entre todos os modelos e a medição para os parâmetros  $T_{30}$  e SPL foram as mesmas. Pequenas variações de tendência foram encontradas no modelo simplificado para  $T_{30}$ , nos resultados medidos de SPL nas frequências 1000 Hz e 2000 Hz e nas baixas frequências para EDT. Mas no caso de EDT, a variação de tendência causada pela frequência de 125 Hz pode estar vinculada às limitações da fonte sonora em excitar as baixas frequências.

Entre os modelos de geometria reduzida, o modelo C (simplificado) foi o que apresentou o pior desempenho em todos os parâmetros, chegando a variações de 2 dB no SPL, quase 0,8 s em  $T_{30}$  e EDT. Já os modelos E (simplificado  $s=1$ ) e F (simplificado  $s=0,7$ ) apresentaram os melhores desempenhos em  $T_{30}$  e EDT, mas ainda sem uma boa aderência com as medições. Nesse sentido, não houve diferenças relevantes nos resultados obtidos

dos parâmetros analisados entre a modificação gradual dos coeficientes de espalhamento como pode ser visto na Figura 6. Já para o SPL esses mesmos modelos apresentaram os melhores desempenhos entre todos os modelos para as frequências de 125 Hz a 1000 Hz.

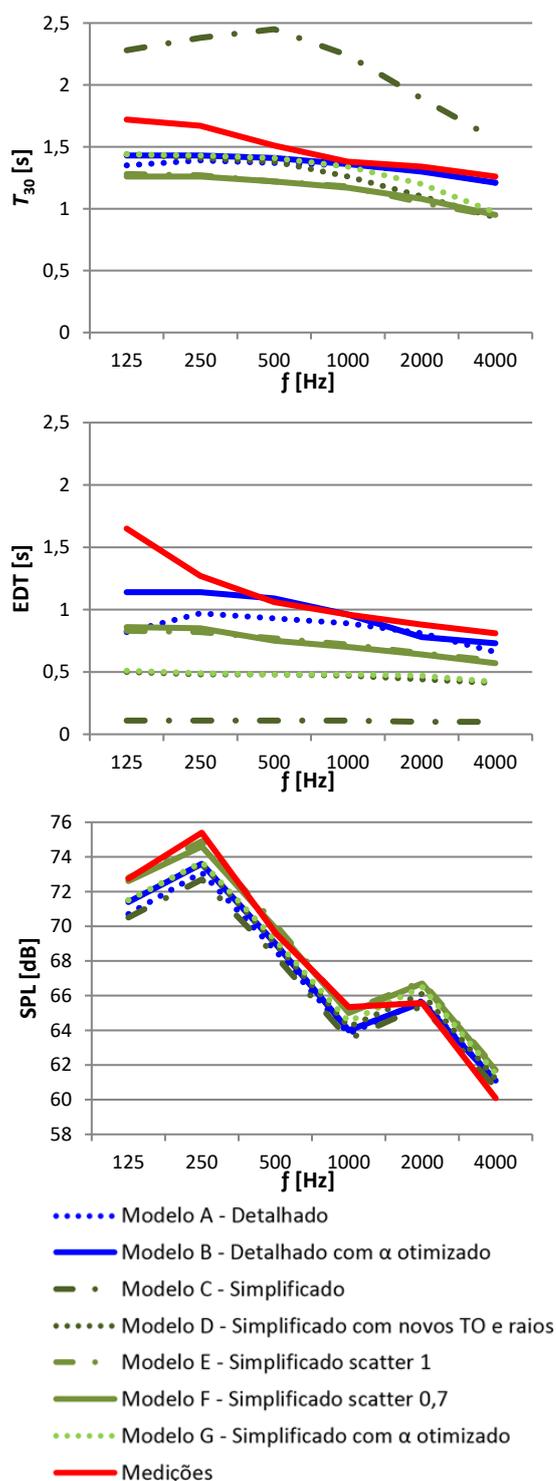


Figura 6: Médias dos resultados de  $T_{30}$ , EDT e SPL em função da frequência. Fonte: os autores.

<sup>5</sup> Alinhando-se com as normas internacionais, é comum existir três opções de cálculos em *software* de acústica geométrica: o método *survey*; o *engineering* e o *precision*.

Entre os modelos com geometria detalhada os melhores resultados foram obtidos pelo modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado). Esse também foi o modelo, dentre todos os modelos investigados que obteve a maior proximidade com os resultados medidos *in situ*. A exceção está nas frequências de 125 Hz a 1000 Hz, cujo desempenho do modelo F (simplificado  $s=0,7$ ) continuou em boa aderência com as medições.

O modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado) passou por um processo de aperfeiçoamento dos coeficientes de absorção de seus materiais. Esse processo de otimização proporcionado pelo Odeon v13 baseia-se na aplicação de algoritmos genéticos, que simplificada, representa o aprimoramento de indivíduos através de técnicas de biologia molecular como recombinação (crossover) e mutação [22]. Essas técnicas são aplicadas nos coeficientes de absorção de materiais específicos para o modelo em todas as frequências. O objetivo é fazer com que os resultados obtidos para os parâmetros analisados a partir de novos cálculos – após o  $\alpha$  otimizado, ou seja, modificado – coincida com os resultados desses mesmos parâmetros obtidos nas medições, e assim, melhor representar no modelo a situação real<sup>6</sup>.

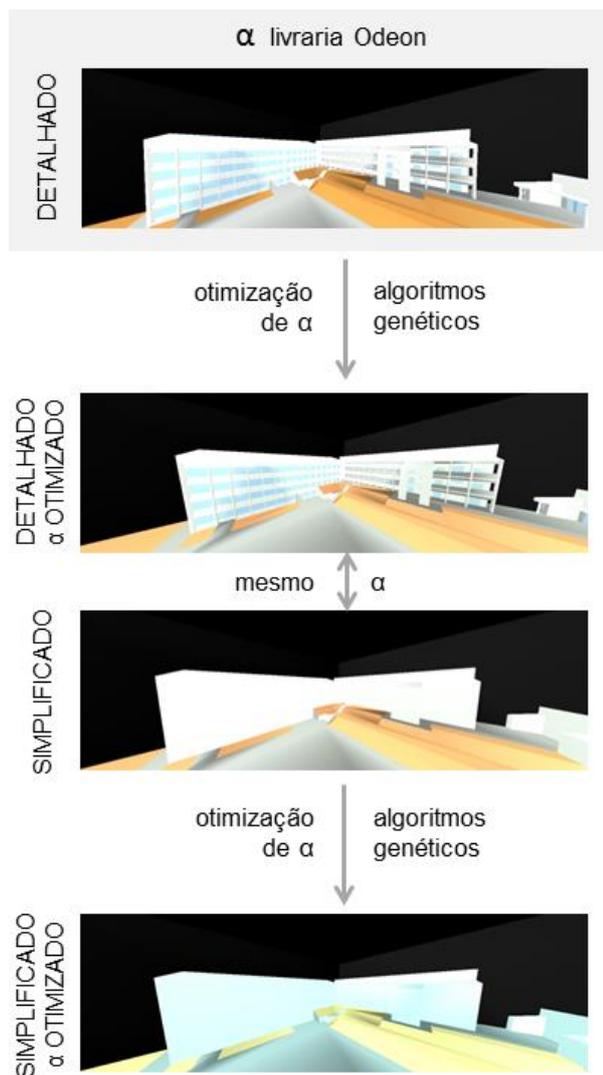
A limitação dessa aplicação está na possibilidade de se distanciar dos  $\alpha$  dos materiais determinados originalmente e acabar incorporando coeficientes que fogem da realidade de valores para cada material, apenas para induzir a coincidência dos valores calculados com os valores medidos. Essa limitação fica perceptível quando se analisa as cores dos modelos virtuais. O Odeon estabelece as cores dos materiais de acordo com suas propriedades acústicas. Quanto mais absorvente em altas frequências, mais quentes são as tonalidades de cores apresentadas pelo modelo, como tons vermelhos e terrosos. Quanto mais absorvente em baixas frequências, mais frias serão as cores, como tons azuis e verdes. Quanto mais escura é a cor, maior é o seu coeficiente de absorção. Por exemplo, a cor preta significa que o material é 100% absorvente, como as superfícies que representam céu aberto no modelo. A Figura 7 apresenta um comparativo dessa relação em quatro modelos, o modelo A (detalhado); o modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado), o modelo C (simplificado) e o modelo G (simplificado com  $\alpha$  otimizado).

---

<sup>6</sup> Diferentes ferramentas que facilitam o processo de modelagem e de verificação de aderência às medições são incluídas nos diversos *software* de acústica geométrica, tais como Odeon S/A, EASE/AFMG, CATT-Acoustic, entre outros. Tais ferramentas visam dinamizar o processo, diminuindo horas trabalhadas, aumentando a assertividade e possibilitando vantagens de uso específicas a cada *software*. A aplicação de algoritmos genéticos oferecidos pelo ODEON, por exemplo, diminui a margem de erro no uso de coeficientes de absorção não aderentes. Como no caso desta pesquisa, o alfa da grama. (Segue ao lado).

---

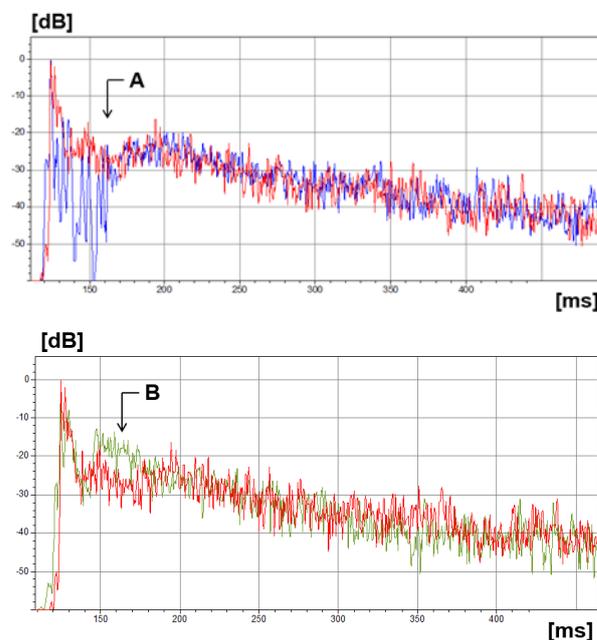
Na literatura o alfa de coberturas vegetais no solo é bastante variado por banda de frequência. Depende de sua composição, da variedade da cobertura vegetal, umidade, entre outros aspectos. Na ausência da ferramenta, o processo seria executado de modo mais “analógico” e menos automatizado: diversos coeficientes de absorção disponíveis na literatura seriam testados. Para cada um deles um novo cálculo seria realizado para ser testada a aderência. Em outras palavras, o uso da ferramenta não interfere na reprodutibilidade do processo metodológico, apenas otimiza-o.



**Figura 7:** Distorção evidenciada pela cor azul-esverdeada dos coeficientes de absorção dos materiais dos modelos virtuais antes e após a otimização com algoritmos genéticos. Fonte: os autores.

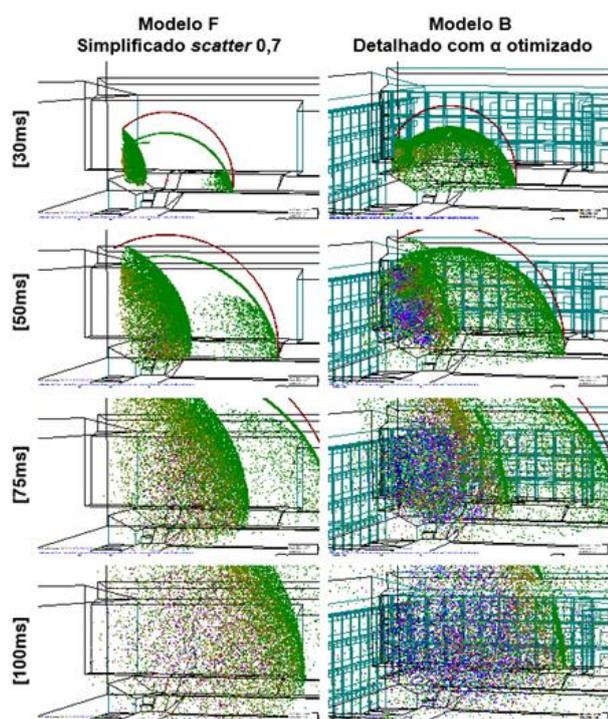
Nos modelos otimizados foi utilizado 85% de abrangência de busca para o aperfeiçoamento para os materiais bloco de concreto, piso intertravado e grama. Entre a otimização dos modelos detalhados não houve distorções na predominância geral de absorção. Mas no caso dos modelos simplificados a distorção foi bastante grande, descaracterizando demasiadamente os coeficientes de absorção dos materiais determinados originalmente, como pode-se observar no tom azul esverdeado do modelo virtual G (simplificado com  $\alpha$  otimizado) na Figura 7.

Nos resultados de SPL houve uma pequena diferença entre os modelos simulados e a medição acústica, que podem ser melhor compreendidos através de suas Curvas Tempo-Energia (*energy time curve- ETC*) para a posição de receptor R1 e através da visualização do comportamento da propagação de suas frentes de onda em função do tempo. A ETC do modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado) mostra a energia contida nas primeiras reflexões subdimensionadas em relação à energia obtida na ETC das medições (Figura 8-A).



**Figura 8:** Sobreposição das ETC do ponto receptor R1. Em vermelho a curva medida *in situ*; em azul a curva do modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado); em verde a curva do modelo F (simplificado com  $s=0,7$ ). Fonte: os autores.

Mas o período de duração dessa redução coincide com a distância percorrida até a última reflexão causada pelo final da edificação, indicando que as distorções podem ser causadas pela presença dos detalhes geométricos. Esse comportamento é evidenciado pela análise da propagação da frente de onda, que mostra a rapidez com que as reflexões propiciadas pelos detalhes existentes atingem a 5ª e 6ª ordem de reflexão (em azul e magenta) (Figura 9).



**Figura 9:** Representação do comportamento da frente de onda em função do tempo. Fonte: os autores.

Assim, uma vez que o material desses detalhes possui alguma absorção, a cada nova reflexão menos energia é lançada para o modelo, justificando a diferença de desempenho nas médias dos valores de SPL em relação aos valores medidos. Ainda assim, nas altas frequências o modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado) continuou sendo o modelo com maior aderência em relação às medições.

Por sua vez, o bom desempenho do modelo F (simplificado com  $s=0,7$ ) em relação ao medido deve-se ao aumento do espalhamento das superfícies das edificações, o que também causou distorções na ETC, mas dessa vez superdimensionado parte da energia inicial, também justificado na predominância das reflexões de 1ª, 2ª e 3ª ordem da propagação da frente de onda, levando a uma boa aderência entre os resultados médios de SPL simulados e medidos nas baixas e médias frequências (Figura 8-B).

Diante de um desempenho próximo dos valores absolutos obtidos tanto por um dos modelos com geometria reduzida quanto por

um com geometria detalhada, foi importante aprofundar a análise de dados além da investigação das médias de todos os pontos receptores por frequência para cada parâmetro. Assim sendo, o modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado) e o modelo F (simplificado com  $s=0,7$ ) foram analisados estatisticamente com o T-Test<sup>7</sup> para verificar se os valores obtidos para cada parâmetro nas simulações em cada ponto receptor pertencem ou não à mesma população de indivíduos dos resultados das medições, ou seja, para verificar se há ou não há diferenças significativas entre os resultados obtidos entre os modelos virtuais e as medições. O nível de significância estabelecido foi de 95% ( $p=0,05$ ) e a frequência selecionada foi a de 1000 Hz.

Apesar de sua proximidade com as medições na avaliação das médias, todos os parâmetros do modelo F (simplificado com  $s=0,7$ ) rejeitaram a hipótese nula apresentando 99,9% de certeza de que o modelo difere das medições. Portanto, pode-se inferir que, em 1000 Hz, o modelo simplificado não possui semelhança acústica ao espaço urbano real, havendo diferenças bastante significativas entre eles. Já o modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado) não apresentou diferença estatística entre os parâmetros simulados e os obtidos nas medições, reforçando a necessidade de não reduzir a geometria em modelos que visam representar espaços urbanos.

### 3.2. A acurácia no espaço urbano em microescala

Para a análise da acurácia dos modelos virtuais da praça da FEC foi selecionado um modelo virtual com maior aderência às medições entre os modelos detalhados, e um entre os simplificados. A acurácia do modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado) e do modelo F

<sup>7</sup> O “T-test” ou “Teste T de Student” foi utilizado por representar um método consagrado na estatística para testar hipóteses nulas.

(simplificado com  $s=0,7$ ) foi analisada em função do grau de erro em relação a menor diferença percebida pelo sistema auditivo humano entre estímulos sonoros (*just noticeable difference* – JND) para cada parâmetro analisado segundo procedimento proposto por Bork [34].

Foi aplicado às médias de cada parâmetro em função da frequência, o erro dado por

$$\text{Erro} = \frac{|PA_{\text{medido}} - PA_{\text{simulado}}|}{\text{JND}} \quad (1)$$

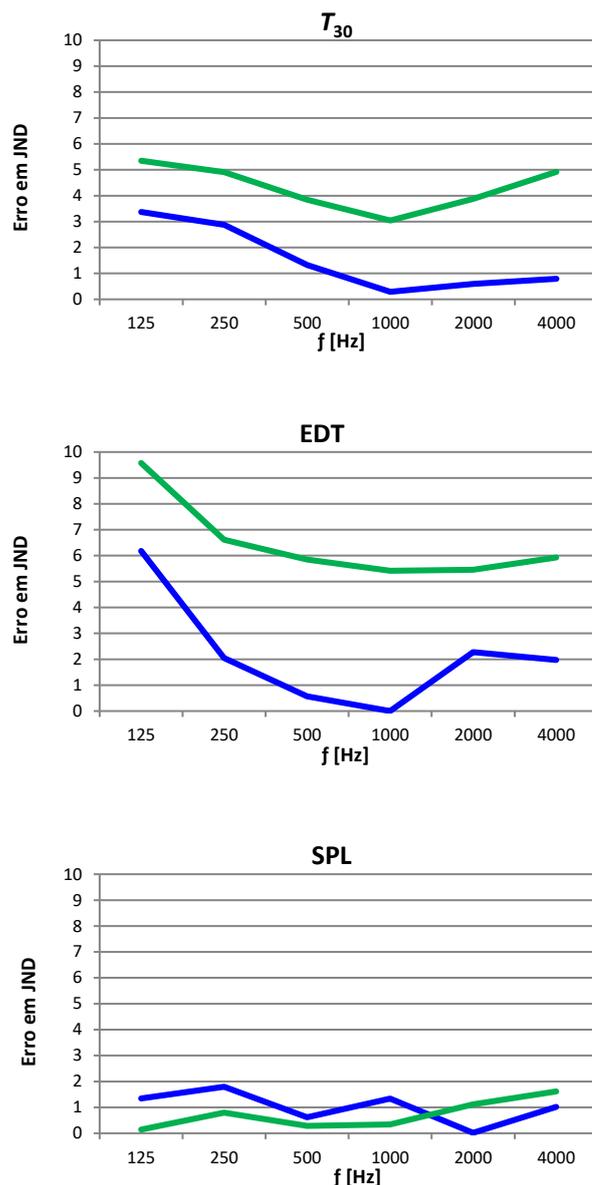
em que  $PA_{\text{medido}}$  é o valor médio medido in situ do parâmetro acústico;  $PA_{\text{simulado}}$  é o valor médio simulado nos modelos virtuais do parâmetro acústico; e JND é a menor diferença percebida para o parâmetro acústico analisado.

Dessa equação, quanto mais próximo de zero o valor do erro, mais acurado o parâmetro investigado está.

A Figura 10 apresenta os erros em JND dos parâmetros  $T_{30}$ , EDT e SPL para o modelo B (detalhado com  $\alpha$  otimizado) e o modelo F (simplificado com  $s=0,7$ ), que a partir de agora serão tratados apenas como modelo detalhado e modelo simplificado.

Para  $T_{30}$  e EDT a tendência predominante da curva de erro é a mesma para os dois modelos. Mas a diferença no erro entre os modelos detalhado e simplificado é bastante significativa, chegando a 6 JND nas médias frequências em EDT e a 4 JND nas altas frequências em  $T_{30}$ .

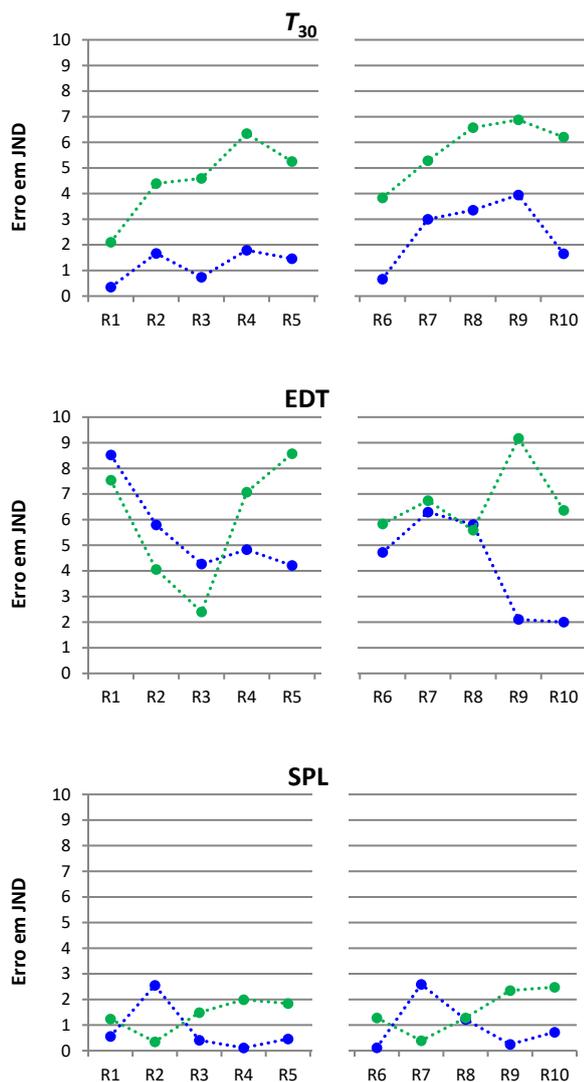
Para esses dois parâmetros o modelo detalhado apresentou a melhor acurácia, apresentando o menor erro no JND, em relação aos resultados medidos. Isso ocorreu especialmente nas frequências de 1000 Hz e 2000 Hz com apenas 1 JND de erro em  $T_{30}$ , e até 1 JND em EDT para as frequências 500 Hz e 1000 Hz.



**Figura 10:** Erro em JND em função da frequência para  $T_{30}$ , EDT e SPL. Em verde o modelo simplificado, em azul o detalhado. Fonte: os autores.

Já no parâmetro SPL ambos os modelos apresentaram baixo grau de erro, chegando ao máximo de 2 JND. Ao contrário do  $T_{30}$  e EDT, o modelo simplificado apresentou os menores erros de JND para o parâmetro SPL.

Diante desse desempenho do SPL optou-se por complementar a análise considerando o erro em JND por ponto receptor na frequência de 1000 Hz como apresentado nos gráficos da Figura 11.



**Figura 11:** Erro em JND em função do ponto receptor para a frequência de 1000 Hz. Em verde o modelo simplificado, em azul o detalhado. Fonte: os autores.

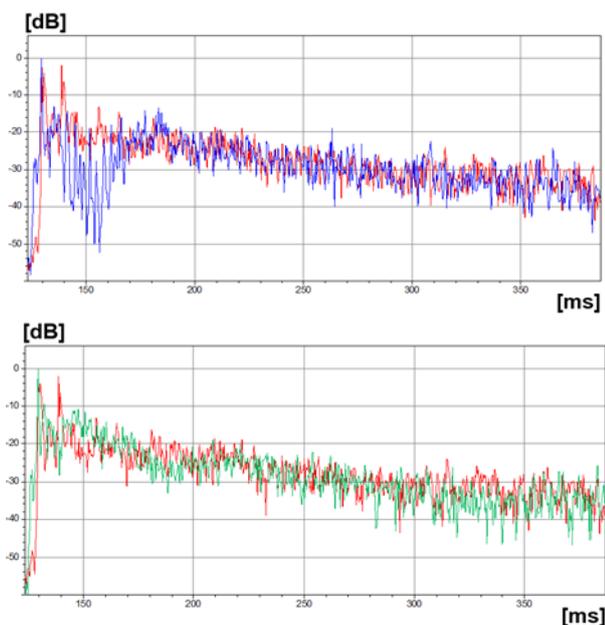
Essa frequência foi selecionada por ter sido a mais acurada na análise geral de erro. Devido à forma de distribuição dos pontos receptores no espaço urbano pesquisado, posicionados no mesmo raio de distância à fonte sonora (Figura 3), os gráficos são apresentados segmentados, no primeiro bloco os receptores R1-R5, próximos às edificações, e no segundo bloco os receptores R6-R10 mais distantes das edificações e tendendo a reproduzir o campo livre.

Na análise do SPL em 1000 Hz foi identificado que no modelo detalhado predominaram erros abaixo de 1 JND na

maioria dos pontos receptores, enquanto o simplificado apresentou a maior parte dos pontos acima de 1 JND. Essa inversão de predominância de erros entre o SPL dos modelos detalhado e simplificado na análise de erro geral (Figura 10) e na análise de erro por ponto receptor (Figura 11) pode ser causada pela maior quantidade de energia sonora proporcionada pelo aumento do coeficiente de espalhamento do modelo simplificado. Esse aumento nos modelos virtuais é necessário para preencher os espaços vazios entre as reflexões mais fortes e obter uma curva de decaimento mais aderente às curvas obtidas com as medições *in situ* [35], como pode ser visto nas Curvas Tempo-Energia (*energy time curve* - ETC) do ponto receptor R2 (Figura 12). Isso indica que o erro geral em JND do SPL no modelo simplificado apenas aparenta, em média, se aproximar mais dos valores medidos, mas na análise de erro por ponto o mesmo não ocorre, continuando o modelo detalhado a apresentar de modo geral o menor erro em JND.

Para o parâmetro  $T_{30}$  a análise de erro por ponto em ambos os modelos revelou que existe menor possibilidade de erro nos pontos próximos às edificações (R1-R5) do que àqueles mais distantes em diagonal adentrando o espaço aberto que se aproximam mais do comportamento de propagação sonora em campo livre (R6-R10). Já no EDT o oposto predominou: pela maior relação de dependência em relação à posição do ponto receptor, os mais próximos da fonte e das edificações apresentaram os maiores erros. No geral, na análise por frequência no erro em JND por ponto revelou a predominância de maior acurácia no modelo detalhado.

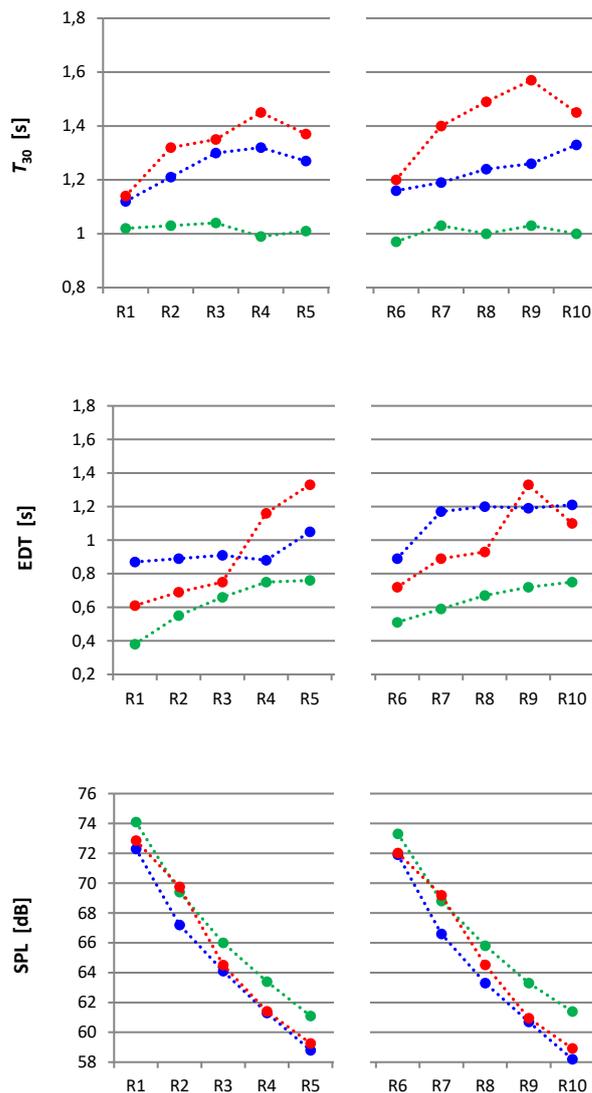
Uma última análise abordou os valores absolutos para todos os parâmetros em função da distância (por ponto receptor) na frequência de 1000 Hz entre os modelos detalhado, simplificado e as medições.



**Figura 12:** Sobreposição das ETC do ponto receptor R2. Em vermelho a curva medida *in situ*; em azul a curva do modelo detalhado; em verde a curva do modelo simplificado. Fonte: os autores.

A Figura 13 evidencia que os receptores mais distantes da fonte tendem a aumentar os valores de  $T_{30}$  e EDT com o aumento da distância à fonte sonora, até entrar em uma área de influência de propagação mais próxima do campo livre, e voltar a cair. Nesse sentido, o modelo detalhado conseguiu uma melhor aderência em relação aos valores medidos *in situ* do que o modelo simplificado. Também no modelo detalhado, foi identificado que a inserção dos detalhes arquitetônicos proporcionou uma melhor caracterização dos resultados dos receptores próximos às edificações (R1-R5), enquanto os pontos adentrando o campo livre (R6-R10) ficaram mais distantes dos valores medidos.

O resultado apresentado do aumento do  $T_{30}$  com a distância está vinculado à captação de reflexões tardias proporcionadas pelas edificações antes da perda de energia e entrada no espaço aberto. Esse comportamento de aumento do  $T_{30}$  em função da distância à fonte sonora também foi identificado em outras investigações de propagação sonora em espaços abertos [8,10,36–38].



**Figura 13:** Valores absolutos em função da distância (ponto receptor) para 1000 Hz. Em vermelho as medições *in situ*; em azul o modelo detalhado; em verde o modelo simplificado. Fonte: os autores.

Esse aumento é causado por reflexões que surgem na parte posterior da fonte sonora chamadas de difusão posterior (*back-diffusion*). Em outras palavras, no espaço urbano e microescala o  $T_{30}$  apresenta comportamento que é comumente dependente da posição do ponto receptor. Isso revela que em espaços em microescala o  $T_{30}$  é altamente influenciado pelo contexto da morfologia urbana ao redor, e assim sendo influenciado pelos detalhes da forma das edificações.

No SPL a análise dos valores absolutos para a frequência de 1000 Hz confirma indícios que a determinação de um alto coeficiente de espalhamento para preencher a energia da resposta impulsiva no modelo simplificado em substituição aos detalhes da geometria existentes nas edificações leva ao superdimensionamento dos níveis de pressão sonora em todos os pontos receptores em relação aos níveis apresentados no modelo detalhado. Mas ainda assim, a variação encontrada é pequena e o comportamento dos modelos constante e estável.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Retomando o objetivo de estudo, esta pesquisa se propôs a identificar qual modelo virtual acústico, com a geometria detalhada ou simplificada, melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real, verificando a sua acurácia.

De modo comparativo, entre medições acústicas *in situ* e simulações computacionais de modelos virtuais realizadas, foi identificado que simulações fundamentadas em acústica geométrica a partir de métodos híbridos de cálculo, comumente utilizados em acústica de salas, também possuem um bom desempenho na representação acústica de espaços urbanos em microescala.

Apesar disso, algumas das recomendações aplicadas às salas, não são necessariamente as mesmas para espaços urbanos. Ratificou-se o exposto pelas poucas pesquisas em microescala urbana que comparam medições *in situ* e simulações virtuais: mesmo com as compensações normalmente utilizadas na redução da geometria dos modelos – como o aumento do coeficiente de espalhamento em modelos simplificados – aqueles com a geometria detalhada apresentaram maior aderência e acurácia na representação dos parâmetros acústicos medidos no espaço urbano real.

Verificou-se ainda que uma escolha criteriosa dos coeficientes de absorção para os materiais

das simulações demonstrou possuir importante influência para obtenção de resultados mais aderentes aos parâmetros existentes no espaço urbano real. Assim sendo, a possibilidade oferecida pelo *software* de otimizar os  $\alpha$  por algoritmos genéticos foi bastante eficiente para ajuste dos coeficientes de absorção simulados aos existentes *in loco*. Ainda assim, a ferramenta de otimização deve ser utilizada com critério, conforme discutido no item 3.1, pois também foi evidenciado que seu uso pode possibilitar distorções bastante relevantes na caracterização dos materiais nos modelos apenas para induzir a coincidência dos valores calculados com os valores medidos.

Confirmou-se também, que a redução da geometria não é recomendada para esses espaços, uma vez que a presença dos detalhes arquitetônicos aumentou a precisão acústica entre a representação do modelo e o espaço urbano real. Isso ocorre por que em simulações de espaços urbanos em microescala – com a expressiva influência da absorção atmosférica – todas as reflexões possíveis derivadas das edificações serão importantes para serem calculadas nos pontos receptores antes de seguirem para serem 100% absorvidas pelas superfícies dos modelos que caracterizam o céu aberto. E a presença dos detalhes arquitetônicos nas simulações virtuais proporcionaram essas reflexões.

Por fim, apesar de raras as pesquisas de simulações virtuais em microescala urbana, a equivalência dos achados da literatura associados aos da presente pesquisa indicam que modelos com a geometria detalhada melhor representa a realidade acústica de um espaço urbano real.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Alexandre Virginelli Maiorino e João Carlos Campos Vasconcellos Leite pela ajuda durante as medições, e, a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal

de Nível Superior do Ministério da Educação pela concessão de bolsa durante a realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

1. KANG, J. Sound Propagation in Interconnected Urban Streets: A Parametric Study. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 28, n. 2, p. 281–294, 2001.
2. KANG, J. *Urban sound environment*. London: Taylor & Francis, 2007.
3. KANG, J.; MENG, Y.; BROWN, G. J. Sound propagation in micro-scale urban areas: simulation and animation. In: *Euronoise*, Nápoles, Itália: 2003.
4. ATTENBOROUGH, K.; LI, K.; HOROSHENKOV, K. *Predicting outdoor sound*. London: Taylor & Francis, 2007.
5. PROBST, W. Uncertainty and quality assurance in simulation software. In: *Noise mapping in the EU models and procedures*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
6. LYON, R. 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.
7. DAVIES, H. 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.
8. PICAUT, J.; 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.
9. KANG, J. 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.
10. ONAGA, H.; RINDEL, J. H. Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades. *Applied Acoustics*, v. 68, n. 3, p. 310–325, 2007.
11. CAN, A.; FORTIN, N.; PICAUT, J. 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.
12. 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.
13. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R.; MAIORINO, A. V. Environmental noise performance: the detail of the building shape influence. In: *Internoise*, San Francisco, CA, USA: 2015.
14. FASTL, H.; ZWICKER, E. *Psychoacoustics: facts and models*. 3. ed. Berlin; New York: Springer, 2007.
15. LICITRA, G.; MEMOLI, G. Limits and advantages of Good Practice Guide to noise mapping. In: *Acoustic'08 Paris*. Paris: 2008.
16. KLÆBOE, R.; ENGELIEN, E.; STEINNES, M. Context Sensitive Noise Impact Mapping. *Applied Acoustics*, v. 67, n. 7, p. 620–642, jul. 2006.
17. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R. A acústica urbana e suas escalas de investigação. *Acústica e Vibrações*, v. 1, n. 48, p. 29–44, 2016.
18. TSAI, K.-T.; LIN, M.-D.; CHEN, Y.-H. Noise Mapping in Urban Environments: A Taiwan Study. *Applied Acoustics*, v. 70, n. 7, p. 964–972, 2008.
19. HORNIKX, M. Ten questions concerning computational urban acoustics. *Building and Environment*, p. 1–13, 2016.
20. 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.
21. KUTTRUFF, H. *Room acoustics*. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
22. CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G.; GIL, J. *ODEON room acoustics software version 13: user's manual*. Denmark: ODEON S/A, Scion DTU, 2016.

23. BORK, I. 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.
24. BORK, I. Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part I: Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 91, n. 4, p. 740–752, 1 jul. 2005.
25. VORLÄNDER, M. Internacional Round Robin on room acoustical computer simulations. In: ICA, Trondheim, Noruega: 1995.
26. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R. Outros olhares para o espaço urbano em microescala: uma revisão narrativa de simulações virtuais fundamentadas em acústica geométrica. In: XXVIII Encontro da SOBRAC, Porto Alegre, RS: 2018.
27. ROCHA, R. E. da; BERTOLI, S. R.; MAIORINO, A. V. Reducing geometry or detailing? Comparison between measured and modeled microscale urban spaces. *POMA/ASA*, v. 28, n. 015011, 2017.
28. ROCHA, R. E. da; MAIORINO, A. V.; BERTOLI, S. R. Accuracy of computer simulation software using hybrid models for microscale urban environments. *POMA/ASA* v. 28, n. 015012, 2017.
29. EL DIEN HH, WOLOSZYN P. The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations. *Applied Acoustics*. v. 66, n.2, p.533–51, 2005.
30. MORI J, YOSHINO D, SATOH F, TACHIBANA H. Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique. In: *Internoise*. Osaka, Japão:2011
31. MORI J, SATOH F, YOKOYAMA S, TACHIBANA H. Prediction of outdoor sound propagation by geometrical computer modeling. *Acoustical Science and Technology*. v.35, n.1,p.50-54, 2014.
32. PAINI D, GADE AC, RINDEL JH. Agorá acoustics - Effects of arcades on the acoustics of public squares. In: *Forum Acoustics*, p. 1813–8. Budapeste, Hungria; 2005.
33. MORI J, YOSHINO D, SATOH F, TACHIBANA H. Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique. In: *Internoise*, p. 3079–83. Osaka, Japão: 2011.
34. BORK, I. 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.
35. LISA, M.; HOLGER RINDEL, J.; CHRISTENSEN, C. L. Predicting the acoustics of ancient open-air theatres: the importance of calculation methods and geometrical details. In: *BNAM, Mariehamn, Finlândia*. Anais... In: *BNAM. Mariehamn, Finlândia*: 2004.
36. KANG, J. 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.
37. MENG, Y.; KANG, J. Combined ray-tracing and radiosity simulation for urban open spaces. In: *ICA, Madri, Espanha*. Anais... In: *ICA. Madri, Espanha*: 2007.
38. PICAUT et al. Experimental study of sound propagation in a street. *Applied Acoustics, Urban Acoustics*. v. 66, n. 2, p. 149–173, 2005.