

Desempenho sonoro em auditórios acessíveis para pessoas cegas

Sound performance in accessible auditoriums for blind people

Diener, Kareenn Cristina Zanela^{1*}, Oliveira, Grazielle Schemes¹, Heck, Marcia¹, Lopes
Gastão Pericles¹, Wegner, Edgar¹, Costa, Valdeci¹

¹Grupo de Pesquisa Conforto, Eficiência Energética e Sustentabilidade – GPCEES, Arquitetura, Universidade do Planalto Catarinense, Lages, Santa Catarina, Brasil.

*Autora para correspondência: kareenn@uniplaclages.edu.br

RESUMO

Este artigo discute o papel dos parâmetros acústicos na criação de auditórios sensorialmente inclusivos, com foco na experiência espacial de pessoas com deficiência visual. Em um campo historicamente centrado na visão, a pesquisa propõe o som como linguagem arquitetônica e agente de inclusão. Para pessoas cegas, a audição é mais que meio de comunicação, é ferramenta de orientação, leitura volumétrica do espaço e interação social. O estudo combina simulações no software *EASE Acoustics* e auralização binaural para avaliar tanto os aspectos técnicos quanto a escuta subjetiva do ambiente. São considerados parâmetros como tempo de reverberação (RT60), índice de clareza (C50), índice de transmissão da fala (STI), além de dos parâmetros de Diferença de Nível Interaural (ILD) e Diferença de Tempo Interaural (ITD), considerando cenários antes e depois de intervenções acústicas com carpetes, painéis absorventes e refletores. Os resultados demonstraram reduções acima de 60% no RT60 (500Hz), aumento de até 173% no C50 e elevação significativa no STI, favorecendo a inteligibilidade da fala, a direcionalidade sonora e a percepção de profundidade espacial. Essas melhorias ampliam a escuta e a inteligibilidade da fala de pessoas cegas em ambientes construídos. A pesquisa propõe diretrizes específicas de desempenho acústico voltadas à acessibilidade sensorial, defendendo a escuta como critério de projeto arquitetônico, e não apenas como atributo técnico, reforçando a importância da acústica como elemento estruturante da experiência espacial para todos, especialmente para quem escuta para ver. A pesquisa contribui, assim, para ampliar o entendimento sobre acessibilidade arquitetônica, posicionando a acústica como uma dimensão crítica do projeto inclusivo contemporâneo.

Palavras-chave: acústica arquitetônica; inteligibilidade da fala; acessibilidade sensorial.

ABSTRACT

This article discusses the role of acoustic parameters in creating sensorily inclusive auditoriums, focusing on the spatial experience of visually impaired individuals. In a field historically centered on vision, the research proposes sound as an architectural language and a tool for inclusion. For blind individuals, hearing is more than a means of communication—it is a tool for orientation, volumetric reading of space, and social interaction. The study combines simulations using the EASE Acoustics software and binaural auralization to evaluate both the technical aspects and the subjective listening experience within the environment. Parameters such as reverberation time (RT60), clarity index (C50), speech transmission index (STI), as well as Interaural Level Difference (ILD) and Interaural Time Difference (ITD) are considered, analyzing scenarios before and after acoustic interventions using carpets, absorbent panels, and reflectors. The results demonstrated reductions of over 60% in RT60 (500Hz), increases of up to 173% in C50, and significant improvement in STI, enhancing speech intelligibility, sound directionality, and the perception of spatial depth. These improvements broaden auditory perception and speech clarity for blind individuals in built environments. The research proposes specific acoustic performance guidelines focused on sensory accessibility, advocating for listening as a design criterion rather than merely a technical attribute. It reinforces the importance of acoustics as a structuring element of spatial experience for all, especially for those who listen to see. Thus, the research contributes to expanding the understanding of architectural accessibility, positioning acoustics as a critical dimension of contemporary inclusive design.

Keywords: architectural acoustics; speech intelligibility; sensory accessibility.

1 INTRODUÇÃO

A experiência espacial da arquitetura foi, historicamente, pensada a partir da visão. No entanto, para pessoas cegas, o som assume papel central na construção da percepção ambiental (Bakir *et al.*, 2022). Auditórios e espaços coletivos, quando mal projetados acusticamente, tornam-se pouco acessíveis ou mesmo hostis para quem depende exclusivamente da escuta para

localizar fontes, compreender fala ou se orientar. Assim, melhorar a acústica desses espaços não é apenas uma questão de desempenho técnico, é um ato de inclusão.

Este artigo investiga como estratégias de auralização e realidade virtual auditiva podem auxiliar na construção de auditórios acessíveis a partir da escuta. O foco é demonstrar, com dados técnicos e simulações perceptivas, como o projeto acústico pode ampliar a autonomia e a dignidade de pessoas cegas. Mais do que aumentar o conforto de todos, propõe-se aqui compreender o som como linguagem projetual e como meio de cidadania arquitetônica.

A experiência humana no espaço é profundamente mediada pela integração sensorial. Os sentidos moldam tanto a cognição espacial quanto as conexões sociais e afetivas (Fernandes Junior, 2005). Quando a visão é comprometida, os demais sentidos, especialmente a audição, tornam-se protagonistas. A neuroplasticidade permite que pessoas cegas desenvolvam habilidades auditivas refinadas, utilizando o som para navegar, localizar, medir distâncias e compreender volumes espaciais (Arora *et al.*, 2024; Bujacz *et al.*, 2024).

A audição assume um papel ampliado, substituindo parcialmente a visão. Estudos demonstram que ouvintes cegos superam videntes na discriminação de distância sonora e dependem de pistas como ILD, ITD e relação direto-reverberante (Kolarik *et al.*, 2013). Esse aprimoramento auditivo permite interação segura com o espaço e favorece a inclusão plena. Projetar a partir da escuta é, portanto, uma necessidade epistemológica e ética para uma arquitetura verdadeiramente inclusiva.

A inteligibilidade da fala e a percepção espacial auditiva são comprometidas em ambientes reverberantes, mal condicionados acusticamente (Leo, 2010; Park; Haan, 2012, 2013). Em auditórios, a ausência de controle de RT, C50 e STI pode gerar desorientação em usuários com deficiência visual, impossibilitando sua plena participação. Apesar dos avanços da norma ISO 3382 e da IEC 60268, a maior parte das medições acústicas é monoaural, não contemplando os aspectos subjetivos e binaurais da escuta. A falta de modelos projetuais baseados em experiência auditiva impede o desenvolvimento de espaços verdadeiramente legíveis para cegos. A arquitetura segue tratando a acústica como complemento, e não como linguagem projetual (Fernandes Júnior, 2005).

Como objetivos, esse estudo propõe, 1) Investigar como pessoas cegas constroem a experiência espacial por meio do som, 2) Analisar como a auralização binaural pode antecipar a escuta de um auditório, 3) Testar indicadores técnicos ($C50 > 2$ dB, $STI > 0,6$, $RT < 1,0$ s) como critérios de acessibilidade auditiva e, 4) Propor diretrizes de projeto acústico orientado à escuta

inclusiva. Ao integrar percepção subjetiva, modelagem computacional e parâmetros objetivos, a pesquisa pretende consolidar a escuta como um novo paradigma no projeto de auditórios.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa adota uma abordagem quantitativa, integrando simulações acústicas computacionais, a partir das técnicas normatizadas (ISO 3382-1/2017; IEC 60268-16), e interpretações perceptivas a partir de escuta binaural. O método parte da premissa de que a percepção auditiva em pessoas cegas é constituída por um conjunto integrado de pistas espaciais, espectrais e temporais que podem ser analisadas e simuladas.

Para tanto, fez uso do Softwares EASE 5.0 com módulo de auralização binaural simulando o espaço do auditório, antes e depois de intervenções acústicas, com a escuta aural em primeira pessoa. Realização de simulação acústica tridimensional, com a geração de mapas de RT, C50, STI e distribuição de reflexões. A Análise de parâmetros acústicos normatizados são do RT60 (tempo de reverberação), C50 (clareza para fala), STI (índice de transmissão da fala), ILD (Interaural Level Difference) e ITD (Interaural Time Difference).

Foi modelado um auditório padrão com capacidade para até 175 lugares, com geometrias típicas de salas de conferência e revestimentos variados. Os cenários estudados foram, o antes da intervenção acústica: superfícies refletoras, reverberação elevada, ausência de difusão controlada. E, o depois da intervenção acústica, com aplicação de carpetes, painéis absorventes porosos, difusores geométricos e refletores direcionais.

As simulações acústicas foram realizadas para quatro pontos de escuta em cadeiras preferenciais (PREF 01 a 04), com geração de arquivos binaurais .wav para avaliação perceptiva. As análises foram realizadas no Microsoft Excel e apresentadas em gráficos no Power BI. O estudo envolveu a comparação dos valores medidos antes e depois das intervenções para os parâmetros RT60, C50, C80 e STI e os arranjos binaurais ILD e IDT. A interpretação perceptiva da espacialidade auditiva teve como base três critérios: clareza da fala, precisão direcional e percepção de profundidade sonora.

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir das simulações acústicas no software EASE Acoustics

Realização

**SIMPÓSIO
INTER
NACIONAL**



Financiamento



fapesc
Fundação de Amparo à
Pesquisa e Inovação do
Estado de Santa Catarina

Apoio



demonstraram melhorias significativas nos parâmetros de desempenho sonoro após a implementação dos tratamentos acústicos propostos para o Auditório do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET), com 4.284,98 m³ de volume.

Na condição original do auditório, o tempo médio de reverberação (RT60) na faixa de 500 Hz foi de 2,55 segundos, excedendo os valores recomendados para ambientes voltados à fala. Após as intervenções acústicas, o RT60 foi reduzido para 0,89 segundos, representando uma redução média de 65%. Essa queda foi observada de maneira uniforme em todas as bandas críticas de frequência (125 Hz a 2000 Hz). Os valores de C50 aumentaram significativamente. Em assentos da primeira fileira, o índice passou de -5,60dB para +4,90dB, ultrapassando o valor mínimo recomendado de +2, especialmente relevante para auditórios voltados à fala. Esse aumento reflete uma melhora substancial na definição das palavras e inteligibilidade perceptiva. O índice STI aumentou de 0,42 para 0,69, indicando boa inteligibilidade. A distribuição do SPL foi uniformizada, eliminando zonas mortas e equalizando perdas de até -6 dB com ganho médio de +4 dB(A), garantindo propagação sonora mais eficiente e homogênea no auditório.

A análise dos arquivos binaurais revelou maior simetria nos valores de ILD e ITD. O ILD (diferença de nível interaural) apresentou variação de até 1,23dB entre os canais antes do tratamento, reduzida para cerca de 3 dB após a intervenção, indicando maior estabilidade na lateralização sonora. O ITD (diferença de tempo interaural), originalmente com desvios negativos, foi estabilizado para valores médios de $\pm 0,32\mu\text{s}$, favorecendo a precisão na percepção direcional da fonte sonora.

A simulação binaural (módulo Aura do EASE) permitiu a geração de arquivos estéreo representando a escuta nos assentos reservados às pessoas cegas. A análise auditiva desses arquivos demonstrou, maior nitidez na definição da fonte; clareza verbal aprimorada; melhora na sensação de envolvimento espacial e redução das reflexões tardias prejudiciais à ecolocalização. Foram realizadas as seguintes intervenções Arquitetônicas, substituição de piso cerâmico por carpete de absorção média $\alpha > 0,6$; instalação de painéis absorventes no forro e nas paredes laterais (com coeficientes $> 0,8$ em 1 kHz); aplicação de difusores nas paredes posteriores e a inserção de painéis direcionais no palco, otimizando a projeção direta do som.

4 DISCUSSÃO

Os resultados da pesquisa indicam que estratégias acústicas direcionadas à percepção

Realização

**SIMPÓSIO
INTER
NACIONAL**



Ciência, Saúde e Território

PPGAS
PROGRAMA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
em Ambiente e Saúde

UNIPLAC

Financiamento



fapesc

Fundação de Amparo à
Pesquisa e Inovação do
Estado de Santa Catarina

Apoio



Epagri

PPGSCol

unesc

INSTITUTO
FEDERAL
Santa Catarina

CIDASC

UDESC
LAGES - CAV

FURB

ABRASUNI

binaural promovem melhorias significativas na inteligibilidade da fala, na clareza sonora e na espacialização auditiva, elementos fundamentais para a acessibilidade de pessoas com deficiência visual. A redução do tempo de reverberação (RT60) de 2,55 s para 0,89 s atende às recomendações da NBR ISO 3382-1/2017, revelando não apenas uma adequação técnica, mas uma melhoria substancial na legibilidade espacial auditiva do ambiente. A elevação dos índices C50 e STI para valores superiores a +4,90dB e +0,27 (o valor é adimensional), respectivamente, indicam avanços na clareza verbal e na direcionalidade da fonte sonora, aspectos diretamente ligados à ecolocalização e à construção de mapas mentais auditivos por usuários cegos. Da mesma forma, a redução das assimetrias nos parâmetros binaurais ILD e ITD demonstrou ganho na precisão auditiva direcional, especialmente nos assentos reservados à acessibilidade.

A análise subjetiva das auralizações confirmou a melhora da percepção de profundidade e nitidez sonora, sugerindo que ambientes auditivamente equilibrados promovem segurança e orientação espacial para quem depende da escuta como principal forma de percepção. Assim, reforça-se a hipótese de que a escuta deve ser reconhecida como linguagem projetual e critério de cidadania arquitetônica. A aplicação da análise binaural surge como ferramenta promissora para antecipar experiências auditivas em projetos arquitetônicos, abrindo caminhos para investigações futuras sobre geometrias acústicas, limiares auditivos e integração com interfaces táteis. Por fim, adotar parâmetros acústicos como critérios de acessibilidade sensorial e não apenas de desempenho, representa uma inflexão ética e epistemológica na prática projetual, necessária para garantir autonomia, pertencimento e dignidade às pessoas com deficiência visual. Projetar a partir da escuta é, portanto, um passo para a inclusão ativa.

5 CONCLUSÃO

Este artigo investiga o desempenho sonoro em auditórios acessíveis para pessoas cegas, propondo o som como linguagem arquitetônica e instrumento de inclusão. Por meio de simulações no software EASE e auralizações binaurais, foram analisados parâmetros como RT60, C50, STI, ILD e ITD antes e depois de intervenções acústicas. Os resultados demonstraram melhorias significativas na inteligibilidade da fala e na espacialização sonora. A pesquisa propõe diretrizes de acessibilidade sensorial baseadas em escuta, reposicionando a acústica como critério projetual essencial à inclusão e à autonomia de pessoas cegas em espaços coletivos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESC pela cooperação financeira e fomento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR IEC 60268-16:2018. **Avaliação da inteligibilidade da fala**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT NBR ISO 3382-1:2017. **Acústica**. Medição de parâmetros acústicos de salas. Parte 1: Espaços de apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

ARORA, Lauryn *et al.* A comprehensive review on NUI, multi-sensory interfaces and UX design for applications and devices for visually impaired users. **Frontiers in Public Health**, [s. l.], v. 12, p. 1357160, 2024.

BAKIR, Dina *et al.* The Spatial Experience of Visually Impaired and Blind: An Approach to Understanding the Importance of Multisensory Perception. **Civil Engineering and Architecture**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 644–658, 2022.

BUJACZ, Michał *et al.* Effectiveness of different sounds in human echolocation in live tests. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 19, n. 10, p. e0306001, 2024.

CHO, Jun-Dong. Multi-Sensory Interaction for Blind and Visually Impaired People. **Electronics**, [s. l.], v. 10, n. 24, p. 3170, 2021.

FERNANDES JUNIOR, Antonio Carlos Lopes. **Auralização: técnicas de modelagem e simulação binaural de ambientes acústicos virtuais**. 2005. (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=468995>. Acesso em: 29 abr. 2025.

HIGGINS, Nathan C. *et al.* Evidence for cue-independent spatial representation in the human auditory cortex during active listening. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 114, n. 36, 2017. Disponível em: <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1707522114>. Acesso em: 5 maio 2025.

HUDEEC, Milan; SMUTNY, Zdenek. Advanced Scene Recognition System for Blind People in Household: The Use of Notification Sounds in Spatial and Social Context of Blind People. *In: CSAE '18: The 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering*, 2018, Hohhot China. **Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering**. Hohhot China: ACM, 2018. p. 1–5. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3207677.3278101>. Acesso em: 9 fev. 2025.

KOLARIK, Andrew J. *et al.* Auditory spatial representations of the world are compressed in blind humans. **Experimental Brain Research**, [s. l.], v. 235, n. 2, p. 597–606, 2017.

KOLARIK, Andrew J *et al.* Using Acoustic Information to Perceive Room Size: Effects of Blindness, Room Reverberation Time, and Stimulus. **Perception**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 985–990, 2013.

LEO, K. Speech Intelligibility Measurements in Auditorium. **Acta Physica Polonica A**, [s. l.], v. 118, n. 01, 2010.

PARK, Chan-Jae; HAAN, Chan-Hoon. Effect of the Inter-aural Level Differences on the Speech Intelligibility Depending on the Room Absorption in Classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of Korea**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 335–345, 2013.

PARK, Chan Jae; HAAN, Chan Hoon. Effect of the inter-aural sound level differences on the speech intelligibility. **The Journal of the Acoustical Society of America**, [s. l.], v. 131, n. 4_Supplement, p. 3318–3318, 2012.