XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Avaliação da influência do ruído de tráfego veicular em usuários de salas de aula por meio da realidade virtual

Evaluación de la influencia del ruido del tráfico de vehículosem usuarios de aulas mediante realidad virtual

Evaluation of the influence of vehicular traffic noise on classroom users through virtual reality

Acústica arquitetônica e urbana / *Acústica arquitectónica y urbana / Architectural and urban acoustics*

Alves, Luciana da Rocha

Doutora, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e de Design, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, luciana.ralves@usp.br

Araújo, Bianca Carla Dantas de

Doutora, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, dantasbianca@gmail.com

Resumo

A arquitetura pode influenciar de diversas formas nas funções executadas pelos usuários. Em ambientes de sala de aula, a qualidade acústica pode impactar na atenção e concentração de professores e estudantes. O objetivo desse trabalho foi avaliar como o ruído de tráfego veicular influencia o desempenho cognitivo de usuários de salas de aula sob diferentes condições acústicas, resultantes de combinações entre isolamento e condicionamento acústicos distintos. Os participantes foram submetidos a testes de memorização em ambiente de realidade virtual sob ruído de tráfego. Os resultados mostraram que os participantes foram mais influenciados pelo isolamento do que pelo condicionamento sonoro. No entanto, a tendência entre condições acústicas variou de acordo com os participantes.

Palavras-chave: Qualidade acústica. Realidade virtual. Auralização. Acústica de salas de aula.

Resumen

La arquitectura puede influir de diversas maneras en las funciones que desempeñan los usuarios. En las aulas, la calidad acústica puede influir en la atención y la concentración de profesores y alumnos. El objetivo de este estudio era evaluar cómo influye el ruido del tráfico de vehículos en el rendimiento cognitivo de los usuarios de aulas en diferentes condiciones acústicas, resultantes de combinaciones de distintos aislamientos y acondicionamientos acústicos. Se sometió a los participantes a pruebas de memorización en un entorno de realidad virtual bajo ruido de tráfico. Los resultados mostraron que los participantes se veían más influidos por el aislamiento que por el acondicionamiento acústico. Sin embargo, la tendencia entre condiciones acústicas variaba según los participantes.

Palabras clave: Calidad acústica. Realidad virtual. Auralización. Acústica en las aulas.

Abstract

Architecture can influence the functions performed by users in various ways. In classroom environments, acoustic quality can have an impact on the attention and concentration of teachers and students. The objective of this study was to evaluate how vehicular traffic noise influences the cognitive performance of classroom users under different acoustic conditions, resulting from combinations of different acoustic insulation and conditioning. Participants were submitted to memorization tests in a virtual reality environment under traffic noise. The results showed that participants were more influenced by sound insulation than by the impulse response. However, the trend between acoustic conditions varied according to the participants.

Keywords: Acoustic quality. Virtual reality. Auralization. Classroom acoustics.

Introdução

A arquitetura pode impactar a vida das pessoas de inúmeras formas a depender de diversas variáveis. É importante atentar que esse impacto pode acontecer até mesmo quando são desempenhadas atividades que em nada envolvem a arquitetura, mas que são igualmente influenciadas por fatores que podem ser derivados das soluções arquitetônicas.

Comumente, os ambientes de sala de aula são padronizados e projetados de modo semelhante, no entanto, a escolha de *layout*, materiais, dimensões, dentre outros, podem influenciar positiva ou negativamente nas tarefas ali realizadas. Kowaltowski; Moreira; Deliberador (2012) afirmam que a arquitetura pode influenciar o desempenho do aluno tanto no aprendizado como no comportamento. A sala de aula é um ambiente em que o usuário deve estar em conforto para desempenhar bem suas funções, sejam elas quais forem. Quanto ao conforto acústico, o professor deve ser capaz de falar sem esforço e escutar as perguntas dos alunos com clareza, enquanto os alunos devem ter inteligibilidade em qualquer ponto da sala para escutar o professor, além de não escutar ruídos que atrapalhem sua concentração em tarefas comandadas pelo professor ou sem interrupção de fala (SEEP et al., 2002).

Um meio de prever tanto as respostas acústicas da sala de aula quanto o desempenho dos usuários ao realizar tarefas é a combinação do uso de auralização e realidade virtual. O processo de auralização consiste em combinar um áudio gravado com a resposta impulsiva de uma sala, gerando um áudio digital que simula como o som será escutado naquela sala sob tais condições (VORLÄNDER, 2020). Ao combinar o áudio com a realidade virtual, o usuário pode ter uma experiência imersiva e contribuir com pesquisas, principalmente de aspecto qualitativo, para testar a resposta do usuário ao ambiente.

A fim de analisar a influência do ruído residual no desempenho cognitivo de usuários de salas de aula em diferentes condições acústicas quanto a atividades de memória de curto prazo, a pesquisa foi conduzida em realidade virtual com áudios auralizados, simulando diferentes cenários acústicos. Foram realizados testes seriados de rememorização (*Serial Recall Test*, em inglês), conforme metodologia explicada por Klatte, Lachmann e Meis (2010), para avaliar os efeitos de condições de isolamento e condicionamento acústicos combinados entre si com ruído de tráfego veicular como ruído residual.

Metodologia

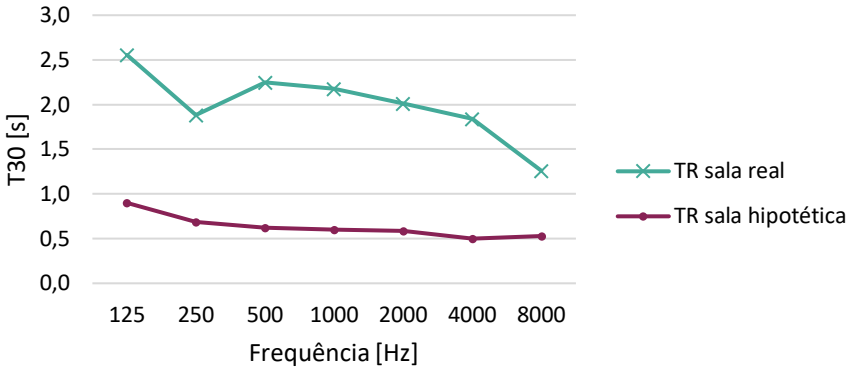
Para esta pesquisa, uma sala de aula da Universidade Federal do Rio Grande do Norte foi usada como modelo, sendo realizada a medição da resposta impulsiva (utilizando varredura de senos e microfone omnidirecional) e o levantamento arquitetônico para modelagem e simulação. A metodologia da medição e simulação pode ser conferida em Alves (2023). Para aplicação do teste de desempenho cognitivo, as seguintes etapas foram realizadas: simulação e validação da resposta impulsiva pelos dados medidos *in loco*; criação de filtro de isolamento acústico; auralização do áudio de tráfego veicular gravado e filtrado com a resposta impulsiva gerando áudio Ambisonics; modelagem digital da sala de aula em Sketchup® e importação para Unity®; criação do teste em ambiente virtual; calibração dos fones de ouvido e aplicação do teste com participantes, que deram anuência em TCLE de projeto submetido à Plataforma Brasil. Essas etapas serão descritas nos tópicos a seguir.

Condições de simulação e auralização

A pesquisa objetivava avaliar se o desempenho cognitivo em atividades de memória de curto prazo era afetado pelo ruído residual em salas de aula, sendo usado um áudio de ruído de tráfego veicular para tal. Considerando que as salas de aula possuem uma qualidade acústica que derivam tanto do condicionamento quanto isolamento sonoros, essas características foram combinadas entre si para gerar diferentes condições acústicas a serem avaliadas. A medição da resposta impulsiva da sala resultou em tempos de reverberação elevados quando comparados às recomendações da literatura ou da *Building Bulletin 93* (DEPARTMENT FOR EDUCATION, 2015), utilizada internacionalmente como referência para valores ideais em salas de aula. O gráfico da Figura 1 mostra os valores de tempo de reverberação da sala real e da sala hipotética, que segue a BB93 (DfE, 2015).

Considerou-se os valores medidos *in loco* como resposta impulsiva inadequada (*condição ruim*) e os indicados pela BB93 como uma situação ideal (*condição boa*). Para o isolamento acústico, foram gerados filtros de áudio considerando características reais de uma janela com baixo isolamento e outra com bom isolamento. Os áudios foram calibrados para tocarem a 35 dB e 55 dB no fone de ouvido, sendo respectivamente a condição boa e a condição ruim.

Figura 1 - Gráfico do tempo de reverberação da sala real e sala hipotética.



A combinação desses resultados gerou quatro condições acústicas que foram nomeadas conforme Tabela 1. A condição "RI_silêncio" refere-se a uma condição controle em que era reproduzido um ruído rosa no fone de ouvido para mascarar possíveis ruídos na sala de aplicação do teste. Após a definição das condições acústicas para utilização nos testes, baseadas em uma sala de aula real e outra hipotética, um áudio com gravação de ruído de tráfego veicular foi filtrado pelos filtros de isolamento acústico e convoluído com a resposta impulsiva simulada de acordo com as combinações preestabelecidas, gerando áudios para cada uma das condições descritas, através do uso do *software* Matlab®.

Tabela 1 - Condições acústicas testadas

Nomenclatura da condição acústica	Resposta impulsiva	Filtro de isolamento acústico	Tipo de áudio gerado na auralização
RI_ruim_IS_ruim (C.01)	Sala real	Sala real	De maior intensidade (50 dB) e em ambiente com tempo de reverberação mais longo (2,2s em 500 Hz)
RI_boa_IS_ruim (C.02)	Sala hipotética	Sala real	De maior intensidade (50 dB) e em ambiente com tempo de reverberação mais curto (0,6s em 500 Hz)
RI_ruim_IS_boa (C.03)	Sala real	Sala hipotética	De menor intensidade (35 dB) e em ambiente com tempo de reverberação mais longo (2,2s em 500 Hz)
RI_boa_IS_boa (C.04)	Sala hipotética	Sala hipotética	De menor intensidade (35 dB) e em ambiente com tempo de reverberação mais curto (0,6s em 500 Hz)
RI_silêncio (C.05)	---	---	Ruído rosa

Os filtros de isolamento acústico foram gerados no mesmo *software*, calculando-se o isolamento da fachada ($D_{2m,nT,w}$) conforme o Índice de Redução Sonora (R_w) dos materiais.

Para distinguir o isolamento adequado do inadequado, a diferença entre os filtros estava no R_w das janelas e na calibração do nível de pressão sonora do áudio emitido no fone de ouvido.

Aplicação do experimento em realidade virtual

Para a criação do ambiente em realidade virtual, a sala de aula foi modelada no *software* Trimble Sketchup® e importada para o *software* Unity®. Em seguida, o modelo do teste de desempenho cognitivo foi criado neste *software*, também utilizado durante a aplicação do teste. Para simular uma situação real de sala de aula, as etapas do teste eram "projetadas" no quadro branco da sala de aula virtual (Figura 2).

O teste foi aplicado utilizando-se um par de óculos de realidade virtual do modelo VIVE Pro Eye em conjunto com controle remoto, com áudio biauricular escutado através de fone de ouvido do modelo WH-1000XM3 da Sony. O fone de ouvido foi equalizado e calibrado quanto ao NPS após conectado ao computador através de placa de som da marca Focusrite (ver equipamentos utilizados em Figura 3). Com o conjunto de óculos, fone de ouvido e controle, o participante (Figura 4) executava um teste de desempenho cognitivo de memória de curto prazo (do tipo *Serial Recall Test*, em inglês).

Figura 2 - Visão do participante no ambiente virtual da sala de aula.



Fonte: Autora (2023).

Figura 3 - Equipamentos utilizados pelos participantes durante o experimento.



Fonte: Autora (2023).

Figura 4 - Participante realizando experimento e tela mostrando o que é visto pelo participante.



Fonte: Autora (2023).

O teste consiste em memorizar números que aparecem e somem rapidamente da tela em ordem aleatória, em um total de nove dígitos. Após uma breve pausa de 10 segundos, o participante deve apertar botões reproduzindo a mesma ordem mostrada na tela. Esse

processo se repete por 12 vezes em cada uma das condições acústicas. O modelo foi programado para rodar as condições acústicas em ordem aleatória a fim de evitar efeitos de fadiga ou tentativas de suposição de como soará a condição seguinte (mais ou menos ruidosa).

Resultados e discussão

O teste foi aplicado com 17 participantes, dos quais mais de 70% eram do sexo masculino e mais de 60% possuíam mais de 33 anos. Quanto ao grau de escolaridade, mais da metade possuía ensino superior completo e cerca de 35% dos participantes apresentava algum nível de pós-graduação concluído. Foi perguntado aos participantes se já haviam realizado testes audiométricos alguma vez na vida e aproximadamente 75% responderam que sim, alegando, todos eles, não possuírem qualquer perda auditiva diagnosticada ou percebida por eles.

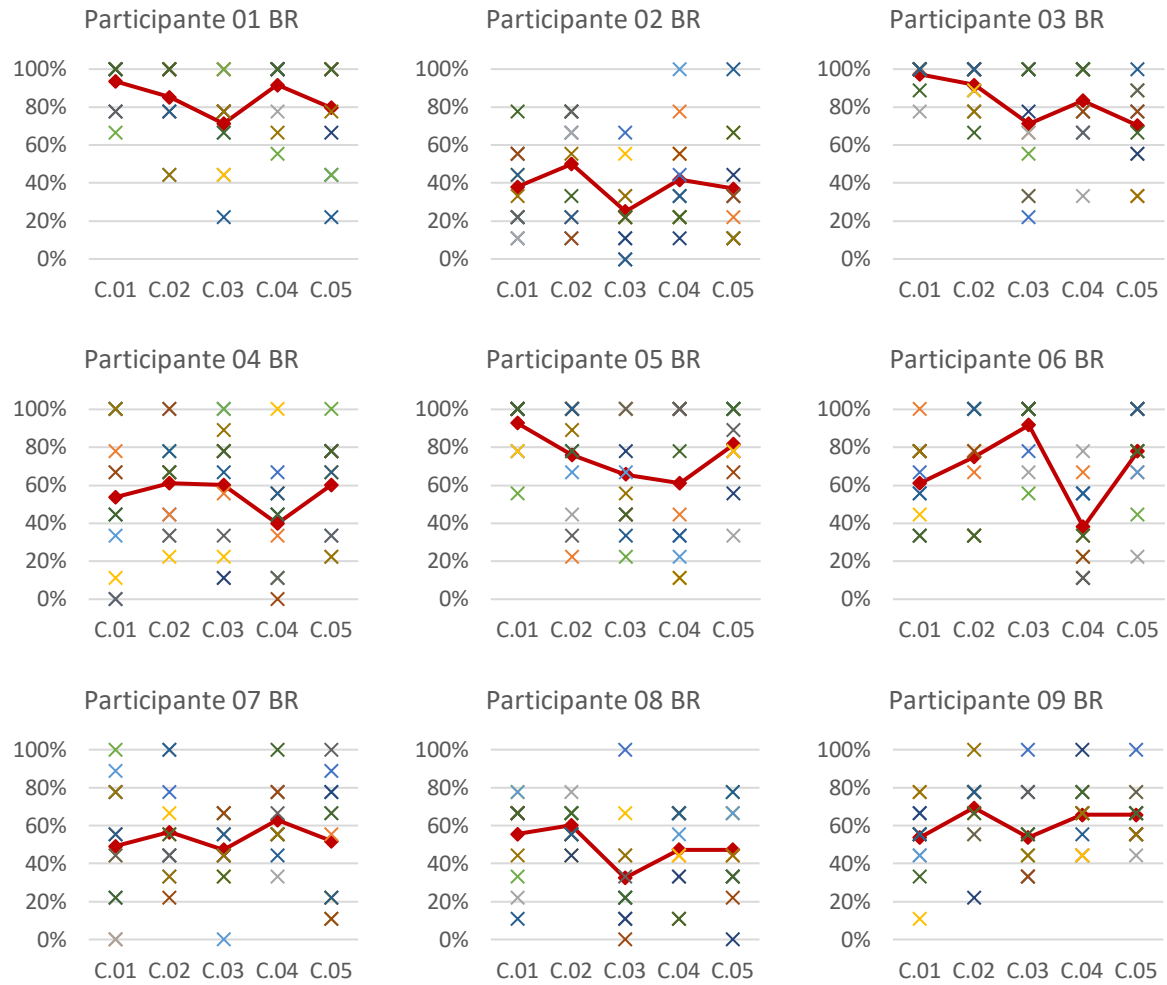
Os resultados individuais de cada participante (Figura 5) foram avaliados a fim de detectar, *a priori*, possíveis tendências nas respostas de cada participante. A média de acertos em cada condição acústica foi marcada com um losango vermelho, ligados por uma linha que mostra a tendência entre acertos por condição acústica. A quantidade de acertos em cada uma das 12 rodadas foi marcada com um X, indicando a taxa de acerto percentual. Quanto menos X aparecem em uma condição, mais concordante foram as respostas do participante naquela condição acústica. Quanto mais X, mais divergência nas respostas do participante, indicando que houve uma maior perturbação da concentração deste naquela condição acústica.

Idealmente, o comportamento esperado seria semelhante ao do participante 13, cuja média de acertos cresceu à medida que a condição acústica da sala melhorava. No entanto, é possível perceber que a tendência de acertos variou consideravelmente entre os participantes, incluindo o oposto do esperado, desempenhado pelo participante 05, que teve a taxa de acerto diminuída à medida que a qualidade acústica e o isolamento sonoro melhoravam. Isso pode indicar tanto um esforço maior quando há um distrator (ruído mais elevado) ou um comportamento cultural, em que a pessoa se acostuma com o ruído para estudar ou trabalhar e se distrai com o silêncio ou ruído residual muito fraco.

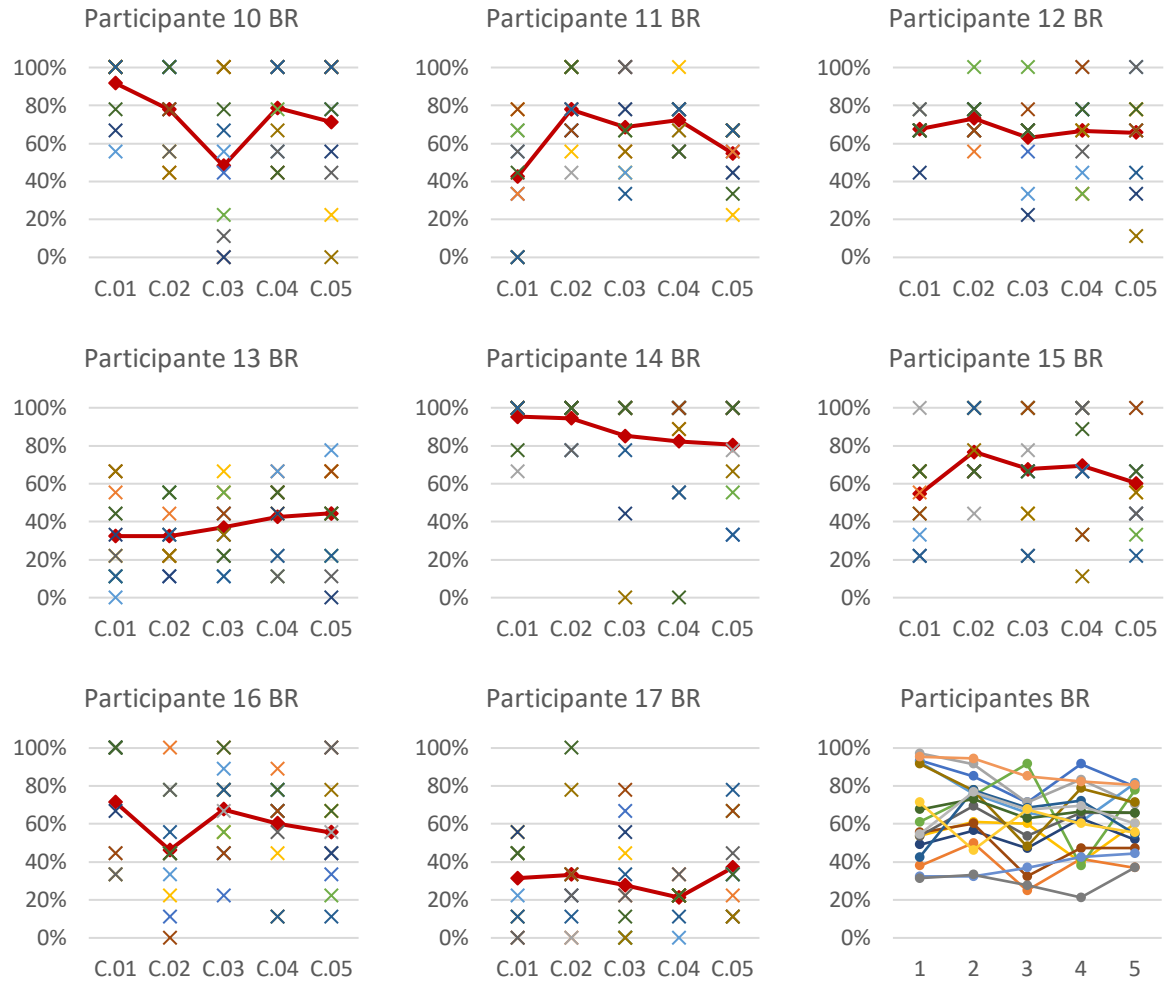
O último gráfico da Figura 5 representa as médias de acerto de todos os participantes por condição a fim de avaliar agrupamentos em uma ou outra condição acústica. Pode-se perceber que na condição 01 (RI_ruim_IS_ruim) a maior concentração de acertos foi entre 50 e 71%, desempenhado por 9 dos 17 participantes. Essa faixa de acerto também foi predominante na

condição 03 (RI_ruim_IS_bom), com 11 participantes desempenharam nessa faixa. Para a melhor condição acústica, a condição 04 (RI_boa_IS_boa), dez participantes tiveram média de acertos entre 60 e 82%, enquanto 3 participantes tiveram média acima de 82%, indicando que houve uma concentração de pessoas que desempenharam bem em mais da metade da tarefa. A condição 05 (RI_silêncio) foi a que apresentou maior congruência de resultados.

Figura 5 - Gráficos de taxas de acerto e médias por condição acústica por participante.



(continuação)



Os resultados foram avaliados estatisticamente a partir da média de acertos em cada condição acústica de cada participante, de modo a identificar quais participantes tinham resultados com diferenças estatisticamente significativas entre condições acústicas. Sete, entre os 17 participantes, obtiveram p-valor ≤ 0,05, indicando que os resultados mostram diferença significativa entre as médias de acertos por condição acústica. Esses sete participantes foram, portanto, impactados de alguma forma pela qualidade acústica e isolamento sonoro de cada uma das condições acústicas. Esses valores estão destacados em amarelo na Tabela 2. Em laranja, estão destacados o p-valor ≤ 0,10, obtido por dois participantes.

Tabela 2 - Média de acertos e p-valor de cada participante.

Participante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Média C.01	93,5	38,0	97,2	53,7	92,6	61,1	49,1	55,6	53,7	91,7	42,6	67,6	32,4	95,4	54,6	71,3	31,5
Média C.02	85,2	50,0	91,7	61,1	75,9	75,0	56,5	60,2	69,4	77,8	77,8	73,1	32,4	94,4	76,9	46,3	33,3
Média C.03	71,3	25,0	71,3	60,2	65,7	91,7	47,2	32,4	53,7	48,1	68,5	63,0	37,0	85,2	67,6	67,6	27,8
Média C.04	91,7	41,7	83,3	39,8	61,1	38,0	63,0	47,2	65,7	78,7	72,2	66,7	42,6	82,4	69,4	60,2	21,3
Média C.05	79,6	37,0	70,4	60,2	81,5	77,8	51,9	47,2	65,7	71,3	54,6	65,7	44,4	80,6	60,2	55,6	37,0
p-valor	0,03	0,10	0,01	0,33	0,05	0,01	0,39	0,02	0,10	0,00	0,00	0,51	0,54	0,43	0,21	0,14	0,60

Nota: valores das médias em porcentagem.

Entre os sete participantes que obtiveram p-valor ≤ 0,05, seis deles tiveram resultado significativo quando comparadas as condições 01 e 03, ou seja, a duas condições com resposta impulsiva ruim e variação no isolamento acústico. Quando a variação é a oposta, isto é, mantem-se o isolamento sonoro e varia-se a resposta impulsiva, houve resultado significativo somente com um participante quando o isolamento sonoro é ruim e com dois participantes quando o isolamento sonoro é bom. Dito isto, pode-se inferir que o isolamento sonoro teve maior impacto na resposta dos participantes do que o condicionamento acústico (resposta impulsiva) neste caso. Considerando que o ruído de tráfego veicular utilizado na pesquisa é constante, o efeito de reverberação pode ser mais difícil de ser identificado e, portanto, menos incomodativo.

Considerações finais

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do ruído de tráfego veicular no desempenho cognitivo de usuários de salas de aula ao executar tarefas de memória de curto prazo em diferentes condições acústicas. O teste foi realizado com 17 participantes, que configura uma amostra pequena, porém foi validado ao avaliar o desempenho dos participantes individualmente. O efeito do isolamento sonoro ruim, ou seja, ruído residual mais elevado, teve mais influência na memorização dos participantes que tiveram resultados estatisticamente significativos. Estima-se que a influência do condicionamento sonoro (resposta impulsiva) não foi significativa em razão do áudio ser de um ruído contínuo e de ser um conceito mais difícil de assimilar para pessoas não especialistas.

De modo geral, os resultados foram diversos, com variabilidade nas respostas mesmo sob mesma condição acústica, sendo a condição "IR_silêncio" a que apresentou menor variabilidade entre participantes. Por se tratar de uma condição em que o áudio escutado era somente de ruído rosa e, portanto, constante, pode-se inferir que os participantes se acostumavam com o áudio e o efeito perturbador ou incomodativo era menor. A metodologia pode ser replicada para diversos tipos de testes ou de ambientes e pode ser explorada como recursos preditivos para arquitetos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos ao Professor Michael Vorländer e à doutoranda Anne Heimes pela colaboração para execução da pesquisa.

Referências

ALVES, Luciana da Rocha. **Avaliação da interferência do ruído e da qualidade acústica no desempenho cognitivo do usuário de sala de aula com uso da realidade virtual**. 2023. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

DEPARTMENT FOR EDUCATION. Building Bulletin 93, "Acoustic design of schools - performance standards". United Kingdom, 2015. p. 1–43. DOI: 10.1016/j.jns.2003.09.014.

KLATTE, Maria; LACHMANN, Thomas; MEIS, Markus. Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting. **Noise and Health**, v. 12, n. 49, p. 270–282, 2010. DOI: 10.4103/1463-1741.70506.

KOWALTOWSKI, Doris C. C. K.; MOREIRA, Daniel C.; DELIBERADOR, Marcella S. O Programa Arquitetônico No Processo De Projeto: Discutindo a Arquitetura Escolar, Respeitando O Olhar Do Usuário. *Em*: SALGADO, Mônica Santos; RHEINGANTZ, Paulo Afonso (org.). **O programa arquitetônico no processo de projeto: discutindo a arquitetura escolar, respeitando o olhar do usuário**. 1. ed. Rio de Janeiro: Antac, 2012. p. 160–185.

SEEP, Benjamin; GLOSEMEYER, Robin; HULCE, Emily; LINN, Matt; AYTAR, Pamela. Acústica de salas de aulas. **Acústica e Vibrações**, Florianópolis, p. 2–22, 2002.

VORLÄNDER, Michael. **Auralization**. 2. ed. Cham: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-51202-6. Disponível em: http://www.springer.com/series/7858.