

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO**

FERNANDA CATARINA ROSSATTO

**REALIDADE AUMENTADA PARA POSICIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS EM
ENSAIOS DE ACÚSTICA EM CAMPO**

São Leopoldo

2023

FERNANDA CATARINA ROSSATTO

**REALIDADE AUMENTADA PARA POSICIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS EM
ENSAIOS DE ACÚSTICA EM CAMPO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Alessandra Teribele

Coorientador: Prof. Me. Rafael Ferreira Heissler

São Leopoldo

2023

R827r Rossatto, Fernanda Catarina.
Realidade aumentada para posicionamento de equipamentos em ensaios de acústica em campo / por Fernanda Catarina Rossatto. – 2023.
88 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2023.

Orientadora: Dra. Alessandra Teribele.

Coorientador: Me. Rafael Ferreira Heissler.

1. Desempenho acústico. 2. Ensaio em campo. 3. Realidade aumentada (RA). 4. Análise de variância (ANOVA). I. Título.

CDU: 72:534.84:004.932

FERNANDA CATARINA ROSSATTO

**REALIDADE AUMENTADA PARA POSICIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS EM
ENSAIOS DE ACÚSTICA EM CAMPO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Aprovado em 29 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Julian Grub – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Roberto Christ – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Aos meus pais, Helio Walter Rossato (em memória) e Catarina Juchnievski, agradeço pelo apoio e orientação ao longo da minha vida, pelo amor e por todo incentivo.

A minha irmã gêmea, Fabiana Maria Rossatto, minha companheira desde os primeiros minutos de vida, agradeço pelo apoio constante e por toda compreensão. Eu amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai Helio Walter Rossato (*in memorian*) que sempre me incentivou a buscar conhecimento e me deu forças com seus conselhos amorosos.

À minha mãe, Catarina Juchnievski pelo carinho e pelas palavras de incentivo.

À minha irmã gêmea, Fabiana Maria Rossatto, por quem tenho imensa admiração. Agradeço pelo amor, pela paciência e motivação, e por estar sempre presente. Você é minha inspiração.

Aos amigos Henrique Kramer e Vinícius Muller, que compartilharam comigo tardes de estudo. Ao amigo Rafael Aires, pelo apoio e por deixar os dias mais divertidos.

Aos amigos Ruslan Fulaneto e Julia Schultz, pelo auxílio na realização dos ensaios e por compartilharem ideias para agregar este trabalho. Vocês são incríveis.

Ao Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance), por todo o auxílio para a realização do mestrado, nos nomes de Roberto Christ, Hinoel Zamis e Fernanda Pacheco. Agradeço por contribuírem para o meu conhecimento e crescimento profissional. Vocês são exemplos de pessoas e profissionais.

Às professoras Dra. Maria Fernanda de Oliveira e Dra. Alessandra Teribele por toda orientação e pelos ensinamentos. Agradeço pelo incentivo na área da pesquisa e por serem esse exemplo de pessoas e profissionais.

Ao amigo e co-orientador prof^o Me. Rafael Ferreira Heissler, a quem tenho muita admiração e respeito, pelo apoio e orientação ao longo dessa jornada. Obrigada pelo conhecimento compartilhado e por ser uma inspiração.

Enfim, mas não menos importante, agradeço aos amigos que estiveram comigo durante todo o mestrado. Agradeço pelo carinho e por todo o auxílio no decorrer dessa dissertação.

*"De nuestros miedos nacen nuestros corajes y en nuestras dudas viven nuestras certezas [...] La identidad no es una pieza de museo, quietecita en la vitrina, sino la siempre asombrosa síntesis de las contradicciones nuestras de cada día."
(Eduardo Galeano, El Libro de Los Abrazos)*

RESUMO

Devido aos processos de urbanização e verticalização das cidades, o ruído urbano é um dos principais agentes de poluição das grandes cidades e é considerado um problema de saúde pública pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Na tentativa de minimizar os efeitos do ruído urbano, tem-se buscado aperfeiçoar os estudos no que se refere a acústica de fachadas, a fim de reduzir o impacto do ruído ambiental no interior das edificações. Para analisar esse impacto, a ABNT NBR ISO 16283-3:2021 determina requisitos para que se possa avaliar o desempenho dos sistemas de fachada em campo. Esse é um processo complexo que requer cuidadoso posicionamento dos equipamentos – fonte sonora e analisador sonoro -, e deve-se levar em conta todas as variáveis do local que possam influenciar na realização do ensaio, como o projeto e a implantação da edificação. Dado o uso crescente da tecnologia de realidade aumentada e suas vantagens em diversos setores, este trabalho visa explorar a viabilidade do uso da Realidade Aumentada como ferramenta auxiliar para a realização de ensaios de acústica em campo, com ênfase no auxílio ao posicionamento dos equipamentos. Para isso, foram analisados cinco estudos de caso, no qual foi medido a distância em relação a fachada de duas formas: modo manual (com o uso de equipamentos dimensionais) e utilizando o aplicativo Augin de realidade aumentada. Os resultados das medições de distância foram tratados estatisticamente através da análise de variância (ANOVA). Com isso, pode-se observar que não é recomendável somente o uso do aplicativo Augin para o ensaio completo de desempenho acústico, visto que não se mostrou muito preciso no que se refere a posição da fonte sonora, podendo não atingir o requisito mínimo de distância especificado na ABNT NBR ISO 16283-3:2021. Entretanto, a realidade aumentada permite fazer uma análise prévia de qualquer local de ensaio - utilizando o gabarito de geometria e uma via física do *Reference Tracker*. Essa visualização prévia do processo de ensaio é muito importante, visto que permite identificar e avaliar potenciais fontes que podem afetar os resultados do ensaio.

Palavras-chave: Desempenho acústico. Ensaio em campo. Realidade aumentada. ANOVA.

ABSTRACT

Due to the urbanization and verticalization processes of cities, urban noise is one of the main agents of pollution in large cities and is considered a public health problem by the World Health Organization (WHO). In an attempt to minimize the effects of urban noise, studies have been conducted to improve the understanding of facade acoustics, in order to reduce the impact of environmental noise inside buildings. To analyze this impact, ABNT NBR ISO 16283-3:2021 sets requirements for evaluating the performance of facade systems in the field. This is a complex process that requires careful placement of equipment - sound source and sound analyzer - and consideration of all variables at the site that may influence the test, such as the design and implementation of the building. Given the increasing use of augmented reality technology and its advantages in various sectors, this work aims to explore the feasibility of using Augmented Reality as an auxiliary tool for conducting acoustic tests in the field, with emphasis on assisting in equipment placement. For this purpose, five case studies were analyzed, in which the distance from the facade was measured in two ways: manually (using dimensional equipment) and using the Augin augmented reality app. The distance measurements were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA). It was observed that it is not recommended to use only the Augin app for the complete acoustic performance test, as it was not very accurate in terms of the sound source position, which could result in not meeting the minimum distance requirement specified in ABNT NBR ISO 16283-3:2021. However, augmented reality allows for a preliminary analysis of any test location - using the geometry template and a physical path of the Reference Tracker. This preview of the testing process is crucial as it enables the identification and evaluation of potential sources that could affect the test results.

Key-words: Acoustic performance. Field test. Augmented reality. ANOVA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caracterização das zonas de isolamento ao ruído aéreo	19
Figura 2 - Gráfico para determinação da frequência crítica	20
Figura 3 - Ilustração da incidência da fonte sonora na edificação.....	21
Figura 4 - Evolução do nível de pressão sonora	22
Figura 5 - Parâmetros a serem considerados para definir a diferença de nível sonoro	23
Figura 6 - Formas de proteger a edificação contra o ruído	24
Figura 7 - Incidência sonora de acordo com a geometria da fachada.....	25
Figura 8 - Geometria do método da fonte sonora.....	26
Figura 9 - Vista do edifício (a) e posicionamento dos microfones (b).....	29
Figura 10 - Sala com cômodo de esquina – posição da fonte sonora.....	30
Figura 11 - Desvios à norma analisados em planta (a) e axonometria (b)	31
Figura 12 - Método global de acordo com a ASTM E 966.....	33
Figura 13 - Inserção de objetos virtuais em ambiente real.....	35
Figura 14 - Representação contínua da Realidade Mista	36
Figura 15 - Integração da RA com modelo BIM	39
Figura 16 - Interfaces do aplicativo Augin	41
Figura 17 - Processo de medição.....	43
Figura 18 - Fontes de variação R&R	44
Figura 19 - Identificação da repetibilidade e da reprodutividade	45
Figura 20 - Exemplo gráfico de interação entre operador x peça.....	49
Figura 21 - Fluxograma do estudo	50
Figura 22 – Mapa do raciocínio	51
Figura 23 - 3D da geometria de posicionamento dos equipamentos	52
Figura 24 - Indicação do <i>Reference Tracker</i> na plataforma Augin Hub.....	52
Figura 25 - Esquema, em planta, do posicionamento dos dois pontos	54
Figura 26 - Amostra 01.....	55
Figura 27 - Amostra 02.....	56
Figura 28 - Amostra 03.....	57
Figura 29 - Amostra 04.....	58
Figura 30 - Amostra 05.....	59
Figura 31 - Imagens das amostras com o aplicativo Augin	60

Figura 32 - Imagens das amostras com o aplicativo Augin	61
Figura 33 - Histograma dos dados. Modo manual.....	65
Figura 34 - Histograma dos dados. Realidade aumentada	66
Figura 35 - Modo manual: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 1 ...	69
Figura 36 - Modo manual: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 2 ...	70
Figura 37 - RA: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 1	71
Figura 38 - RA: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 2.....	72
Figura 39 - Comparativo entre as médias de tempo	74
Figura 40 - Gráfico do índice R&R	77
Figura 41 - Gabarito para análise do ensaio em sistema de fachada	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de R&R	46
Tabela 2 - Modo manual: resultados das medições para o Ponto 1 (em metros)	62
Tabela 3 - Realidade Aumentada: resultados das medições para o Ponto 1	62
Tabela 4 - Modo manual: resultados das medições para o Ponto 2.....	63
Tabela 5 - Realidade Aumentada: resultados das medições para o Ponto 2	64
Tabela 6 - Modo manual: resultados do ANOVA para o Ponto 1	66
Tabela 7 - Modo manual: resultados do ANOVA para o Ponto 2	67
Tabela 8 - Realidade Aumentada: resultados do ANOVA para o Ponto 1	67
Tabela 9 - Realidade Aumentada: resultados do ANOVA para o Ponto 2	68
Tabela 10 - Análise de maior variância (modo manual – ponto 1)	69
Tabela 11 - Análise de maior variância (modo manual – ponto 2)	70
Tabela 12 - Análise de maior variância (realidade aumentada – ponto 1)	71
Tabela 13 - Análise de maior variância (realidade aumentada – ponto 2)	72
Tabela 14 - Modo manual: tempo para posicionamento da fonte sonora.....	73
Tabela 15 - Realidade aumentada: tempo para posicionamento da fonte sonora	74
Tabela 16 - GRR Modo manual: ponto 1.....	76
Tabela 17 - GRR Modo manual: ponto 2.....	76
Tabela 18 - GRR Realidade aumentada: ponto 1	76
Tabela 19 - GRR Realidade aumentada: ponto 2	76

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
BIM	Building Information Modeling
GRR	Gage R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade do Medidor)
MSA	Análise do Sistema de Medição
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NPS	Nível de Pressão Sonora
OMS	Organização Mundial da Saúde
RA	Realidade Aumentada
RE	Realidade Estendida
R&R	Repetibilidade e Reprodutibilidade
RM	Realidade Mista
RV	Realidade Virtual
TICs	Tecnologias de Informação e Comunicação
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Tema e delimitação	15
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo geral	16
1.4.2 Objetivos específicos.....	16
1.5 Justificativa	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Ruído aéreo em sistemas de fachada	18
2.2 Elementos volumétricos em fachadas	22
2.3 Ensaios em campo para avaliar o desempenho acústico da fachada	25
2.4 A tecnologia de Realidade Aumentada	34
2.4.1 O uso da tecnologia de Realidade Aumentada na área de Arquitetura Engenharia e Construção (AEC)	38
2.4.2 Aplicativo Augin – plataforma para Realidade Aumentada.....	40
2.5 Análise do processo de ensaio com a Realidade Aumentada	41
2.5.1 A análise do Sistema de Medição	42
2.5.2 O estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R)	44
2.5.3 O estudo de Gage R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade).....	45
2.5.4 O método da análise de variância (ANOVA)	47
2.5.5 Variabilidade associada a interação entre operador e peça.....	49
3 METODOLOGIA	50
3.1 Estudos de caso representativos	54
4 RESULTADOS	61
4.1.1 Verificação dos pontos de posicionamento da fonte sonora	61
4.1.2 Resultados da análise de variância entre operadores e amostras	64
4.1.3 Análise do tempo das medições.....	73
4.1.4 Estimativa do índice R&R (%)	75
4.1.4 Análise crítica do estudo	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Como consequência dos processos de urbanização e verticalização das cidades, o ruído urbano é considerado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) um problema de saúde pública por ser um dos maiores agentes de poluição das grandes cidades. Além de ser um problema ambiental, a poluição sonora também é a causa de alterações físicas e psicológicas nos seres humanos (OMS, 1998). Nesse contexto, um projeto adequado para isolamento acústico de fachadas de edifícios é de grande importância para a concepção de ambientes confortáveis. A fim de mitigar o impacto do ruído ambiental no interior das edificações, estudos indicam o uso de diferentes técnicas construtivas nas fachadas, como o emprego de materiais absorventes, inserção de novos elementos e alteração da forma da fachada (BUSA; SECCHI; BALDINI, 2010).

No Brasil, é exigido que edificações residenciais atendam à norma de desempenho, a ABNT NBR 15575-4:2021 (ABNT, 2021), que determina requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas, dentre eles o isolamento ao ruído aéreo, e classifica quanto ao desempenho mínimo, intermediário e superior.

Especificamente nos casos das fachadas, a ABNT NBR ISO 16283-3 estabelece requisitos para avaliação em campo do sistema e de seus componentes, indicando uma geometria para posicionamento dos equipamentos (fonte sonora e analisador sonoro). O ensaio é realizado por meio da medição do Índice de Redução Sonora (IRS), que é obtido através da comparação do nível sonoro externo (LAE) com o nível sonoro interno (LAI). A complexidade desse ensaio depende do número de pontos de medição necessários para representar adequadamente a fachada do edifício, bem como do ambiente em que o ensaio é realizado e das características da própria edificação (MASOVIC et al, 2013).

Essa geometria para posicionamento dos equipamentos é relativamente complexa e tem gerado discussões entre diversos autores, principalmente no que se refere ao posicionamento da fonte sonora (BERARDI, 2012; MULHOLLAND, 1971; BERARDI; CIRILLO; MARTELOTTA, 2011).

Estudos como de Asensio et al. (2018), indica a influência da posição dos equipamentos e cita, ainda, a importância da diretividade da fonte sonora para realizar as medições. Desse modo, torna-se imprescindível uma análise do processo de ensaio, a fim de verificar a geometria e evitar possíveis interferências. Nesse sentido,

pode-se citar o avanço das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) nos últimos anos, que tem auxiliado no desenvolvimento de diversas tarefas dentro do setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) (SILVA, 2022), (ARAÚJO, 2018), (MOREIRA, 2018).

Essas tecnologias permitem o acesso a ambientes fictícios, imersivos e de alta definição, capazes de nos transportar para realidades alternativas. O poder de processamento dos computadores, a redução de custos dos dispositivos, o aumento da velocidade da comunicação e a disponibilidade de aplicativos gratuitos – tanto em computadores quanto em dispositivos móveis – têm contribuído para a consolidação de várias destas tecnologias, dentre elas a Realidade Aumentada (RA) (TORI; HOUNSELL, 2018).

Estudos recentes apontam vantagens no uso da realidade aumentada nas mais diversas áreas do conhecimento. No setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), por exemplo, essa ferramenta tem ajudado a identificar problemas e a otimizar os processos, além de auxiliar na compatibilização de projetos (OLIVEIRA; CUPERSCHMID, 2019). Também chamadas de tecnologias de Realidade Estendida (RE), essas ferramentas de ambientes imersivos possibilitam a visualização prévia dos projetos e permitem uma análise mais detalhada dos sistemas e componentes construtivos, diminuindo a probabilidade de erros durante a construção. (ALIZADEHSALEHI, 2021).

Associada à comunicação móvel, a realidade aumentada permite experiências mais interativas e dinâmicas na apresentação de um conteúdo. Chalhoub e Ayer, (2019), conduziram uma pesquisa para avaliar a RA em quesitos como precisão, carga de trabalho cognitiva e percepção. Ao usar RA, os participantes foram capazes de completar tarefas 60% mais rápido e com significativamente menor carga de trabalho cognitiva em comparação com o uso de planos de papel.

Nesse contexto, a Realidade Aumentada pode ter um papel estratégico e auxiliar na percepção e visualização prévia do processo de ensaio de desempenho acústico em campo para determinar o isolamento de fachada a ruído aéreo, realizado de acordo com a ABNT NBR ISO 16283-3 (ABNT, 2021), principalmente no que se refere ao posicionamento da fonte sonora. Essa visualização prévia do processo de ensaio é importante porque permite identificar e avaliar potenciais fontes que podem afetar os resultados do ensaio (MASOVIC et al, 2013). Alguns dos fatores que devem ser considerados incluem:

- Ruídos externos: É importante avaliar a presença de ruídos externos que possam interferir nos resultados do ensaio. Como exemplo pode-se citar o tráfego de veículos, ruídos de equipamentos, ruídos de construção, ruídos de animais e ruídos de pessoas.
- Identificar a geometria do local: A geometria do local pode afetar a forma como as ondas sonoras se propagam. Ao avaliar o local do ensaio, é possível identificar a presença de obstáculos que possam interferir na propagação das ondas sonoras, como árvores, edifícios ou muros. Também é possível identificar a distância entre a fonte sonora e a fachada do edifício, o que pode afetar a intensidade do som que atinge a fachada.
- Tipo de superfície: As superfícies próximas ao edifício, como o solo, paredes e outros objetos, podem afetar a forma como o som é refletido e absorvido, o que pode influenciar os resultados do ensaio.
- Condições meteorológicas: Condições meteorológicas, como vento, temperatura e umidade, podem afetar a forma como o som se propaga e deve ser levado em consideração durante a avaliação prévia do local do ensaio.

Desse modo, será possível modelar a geometria de acordo com o ambiente e atendendo a norma de ensaio e, com o auxílio da RA em um dispositivo móvel, visualizar o posicionamento da fonte sonora em escala real. Essa análise prévia do local de ensaio permitirá identificar possíveis fontes de ruído e outros fatores que possam afetar os resultados, e com isso tomar medidas para minimizar esses efeitos e obter resultados mais precisos e confiáveis do ensaio.

1.1 Tema e delimitação

Os ensaios de acústica de fachada, realizados de acordo com a ABNT NBR ISO 16283-3 (ABNT, 2021), exigem maior complexidade para realizar o posicionamento dos equipamentos (BERARDI; MARTELOTTA, 2011), pois dependem da análise do projeto e da influência de variáveis do local de ensaio, tais como o próprio projeto e a implantação da edificação.

Nesse contexto e observando o crescente uso da tecnologia de realidade aumentada, aliado as inúmeras vantagens em diversos setores, esse trabalho tem como ideia central o estudo da viabilidade do uso da Realidade Aumentada como

auxílio para a realização de ensaios de acústica em campo, com foco na utilização dessa tecnologia para auxiliar no posicionamento dos equipamentos.

Motivado pela possibilidade de avaliar a tecnologia para uso em ensaios experimentais, esse trabalho tem como ideia central o estudo da viabilidade do uso da Realidade Aumentada como auxílio para a realização de ensaios de acústica em campo, com foco na utilização dessa tecnologia para auxiliar no posicionamento dos equipamentos. Dentre os possíveis ensaios de desempenho acústico a serem realizados em campo, optou-se por direcionar as análises nos ensaios de acústica de fachada, realizados de acordo com a ABNT NBR ISO 16283-3 (ABNT, 2021), visto que nesses ensaios exige maior complexidade para posicionar os equipamentos, pois depende da análise do projeto e da influência de variáveis do local de ensaio, tais como o próprio projeto e a implantação da edificação. Desse modo, a tecnologia de Realidade Aumentada será uma ferramenta que irá prever alguns arranjos espaciais de elementos e materiais, e irá antever como os equipamentos ficarão posicionados no espaço.

Vale destacar que não foram realizados ensaios de isolamento ao ruído aéreo nas amostras; foi realizado apenas o posicionamento dos equipamentos conforme descrito em norma, para posterior avaliação.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Analisar a utilização da tecnologia de realidade aumentada para posicionamento de equipamentos em ensaios de acústica em campo.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- a) Comparar os resultados dos dois modos de posicionamento dos equipamentos(modos manual e utilizando o aplicativo Augin);
- b) Investigar de que modo a tecnologia de RA pode ser implementada e validada para a realização dos ensaios;

- c) Analisar vantagens, desvantagens, dificuldades e potencialidades no uso da RA para posicionamento dos equipamentos;

1.5 Justificativa

As aplicações da RA têm ganhado cada vez mais notoriedade devido a sua capacidade de auxiliar na realização de tarefas do mundo real. Essas aplicações podem melhorar a interação e a percepção do usuário com o ambiente ao seu redor, pois fornecem informações que o usuário não consegue identificar espontaneamente com seus próprios sentidos (AZUMA, 1997).

A Gartner, uma empresa líder mundial em pesquisa e consultoria em tecnologia da informação, destaca a RA como uma tecnologia emergente nos próximos 5 a 10 anos. Segundo a pesquisa “*Gartner Top Strategic Technology Trends for 2021*”, a Realidade Aumentada, assim como a virtual, tem grande potencialidade para agregar qualidade e inovação em diversos setores. Desse modo, a perspectiva é que no ano de 2021 a RA conquiste cada vez mais visibilidade e oportunidade nos negócios (GARTNER TOP STRATEGIC TECHNOLOGY TRENDS FOR 2021, 2021).

Segundo a *Autodesk*, empresa de software de design e de conteúdo digital, a Realidade Aumentada é uma tecnologia que provou o seu valor em diversos setores, com um crescimento de mercado de cerca de 77% entre 2019 e 2023. (*Autodesk*, 2022).

Partindo desse contexto e considerando a possibilidade de incluir o uso da tecnologia de realidade aumentada no setor da AEC voltado a análises e ensaios em campo, torna-se fundamental um estudo sobre a viabilidade do uso dessa ferramenta no setor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O som e/ou ruído pode definir-se como qualquer variação de pressão atmosférica que o ouvido humano pode captar (MATEUS, D., 2008).

De acordo com seu posicionamento em relação as edificações, as fontes de ruído podem ser classificadas em internas ou externas. Simões (2011), identifica que as fontes internas usualmente encontradas em edificações habitacionais são decorrentes de conversas, equipamentos de áudio, passos, arrastar de móveis, entre outros. Já as fontes sonoras externas estão diretamente relacionadas com o fluxo de veículos automotores e demais formas de transporte de passageiros como, por exemplo, automóveis, ônibus, trens, aeronaves, entre outros.

2.1 Ruído aéreo em sistemas de fachada

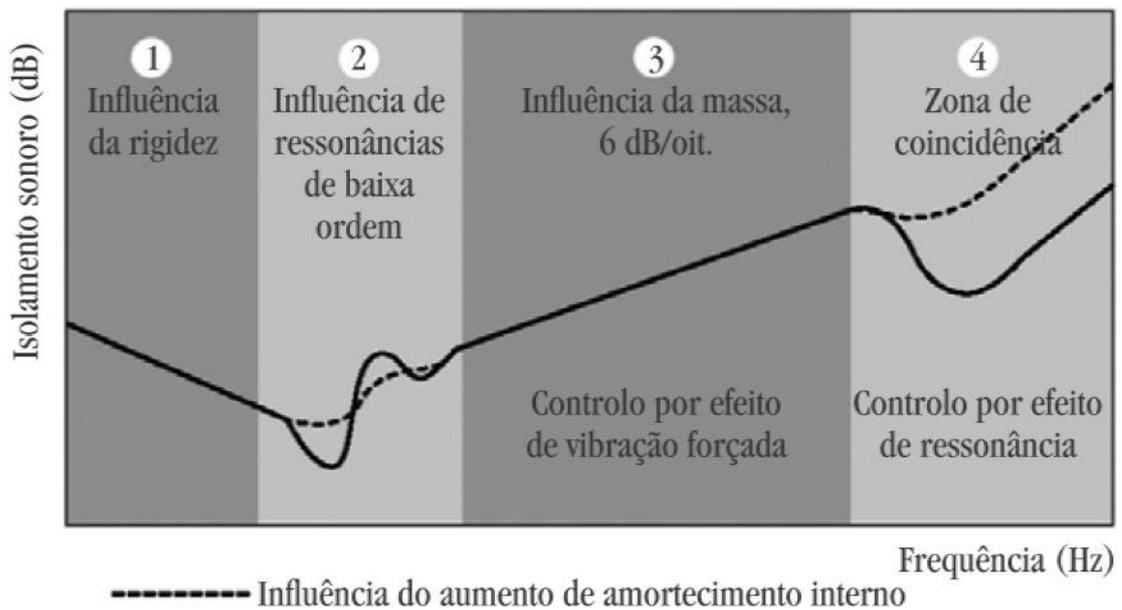
A acústica de fachadas é um tema que passou a ser ainda mais pesquisado a partir da década de 1990, e o interesse pelo assunto aumentou significativamente com o passar dos anos, indicando que tem sido um tema que tem recebido maior atenção dos pesquisadores, principalmente nas áreas de engenharia acústica e construção. (HU; ZAYED; CHENG, 2022).

O interesse pela acústica de fachadas também se deve ao fato de o problema do ruído ambiental ter se agravado nos últimos anos. Com isso, as pesquisas se aprofundaram no tema das fachadas a fim de investigar, também, o seu efeito na transmissão e reflexão do ruído ambiental (HU; ZAYED; CHENG, 2022).

A pesquisa sobre o desempenho do isolamento acústico de fachadas de edifícios concentra-se principalmente na previsão e avaliação do desempenho do isolamento acústico. Uma abordagem é encontrar um método numérico ou experimental específico para prever ou avaliar as propriedades acústicas de uma determinada estrutura de fachada; a outra é medir o índice de isolamento acústico da fachada de acordo com padrões normativos. (HU; ZAYED; CHENG, 2022).

Nesse contexto, Patrício (2018), considera que o isolamento do ruído aéreo está diretamente ligado à inércia, massa e características elásticas dos elementos utilizados para compartimentar os espaços. Deste modo, o autor divide esses parâmetros em quatro diferentes zonas, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Caracterização das zonas de isolamento ao ruído aéreo



Fonte: Patrício (2018, p.69).

Nesse aspecto, tem-se na Região 1 o parâmetro de rigidez do material, que irá controlar a perda de transmissão sonora nas baixas frequências. Hopkins (2012) comenta que é difícil prever de que modo o isolamento irá atuar nas baixas frequências, porém para sistemas de fachada, esse é um aspecto importante a ser verificado devido a componente espectral do ruído de tráfego veicular, visto que essa fonte sonora é muito utilizada para estudos do isolamento ao ruído aéreo de fachadas.

Também nas baixas frequências, tem-se a Região 2, que é controlada pela ressonância do sistema no movimento de flexão. As frequências de ressonância são originadas da combinação construtiva de ondas de flexão que se propagam através do sistema e se dispersam ao longo das bordas (BISTAFA, 2018).

Na Região 3 a perda de transmissão sonora é controlada pela Lei da Massa. Nessa região, o isolamento tem tendência a aumentar 6dB a cada acréscimo de banda de oitava (BISTAFA, 2018).

Por fim, na Região 4 tem-se a frequência de coincidência (ou frequência crítica). Nessa região ocorre a amplificação do movimento de flexão do sistema, sendo o som transmitido rapidamente e, conseqüentemente, tendo queda da perda de transmissão. A coincidência é a igualdade de comprimentos de onda, e a frequência crítica (f_c) é a menor frequência de coincidência, sendo definida pela Equação 1:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (1)$$

Sendo:

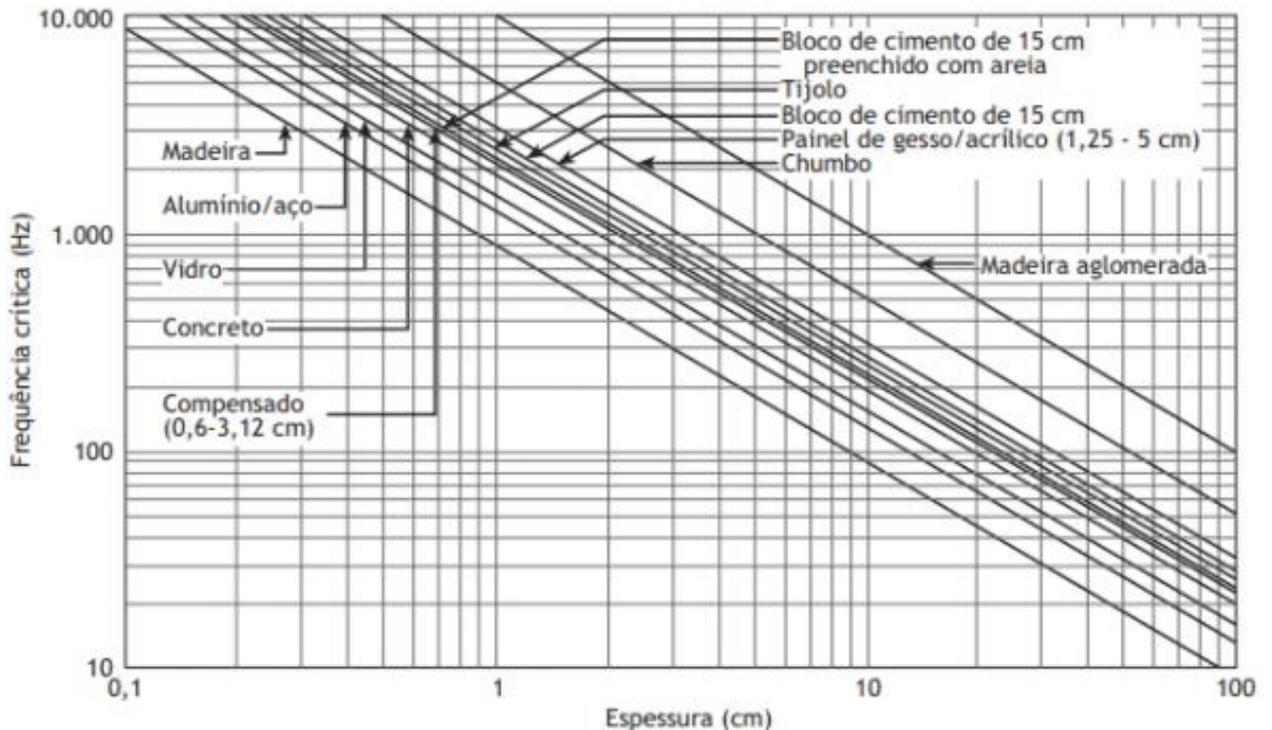
c - Velocidade de propagação da onda sonora no ar;

M - Densidade superficial;

B - Rigidez à flexão.

A partir dessa equação, Bistafa (2012), apresenta como encontrar a frequência crítica de cada material, de acordo com sua espessura (Figura 2).

Figura 2 - Gráfico para determinação da frequência crítica



Fonte: Adaptado de Bistafa (2012).

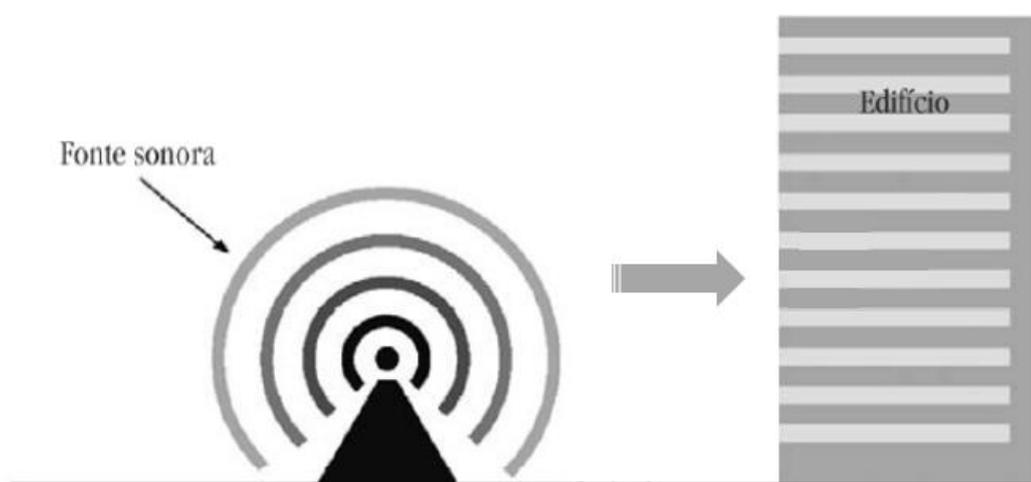
Embora o ruído seja caracterizado como um som que traz incômodo às pessoas, a diferença entre som e ruído é bastante subjetiva. O som geralmente está associado a sensações prazerosas e o ruído a sensações desagradáveis (MATEUS, D., 2008).

Estudos como de Salomons e Pont (2012), indicam que existe uma relação direta entre o efeito da densidade populacional e do número de veículos e o incômodo causado pelo excesso de ruído. Nesse estudo, realizado nas cidades de Amsterdã e

Roterdã, na Holanda, os autores concluíram que o posicionamento dos edifícios nas quadras tem uma influência direta no nível de ruído que incide nas fachadas.

Em locais onde não é possível controlar o ruído de forma adequada, no caso do ruído de tráfego, o ideal é investir em técnicas construtivas e materiais que auxiliem no isolamento da edificação (SIMÕES, 2011), principalmente da sua envoltória/fachada (Figura 3), pois é o elemento que irá receber diretamente as ondas sonoras (PATRICIO, 2018).

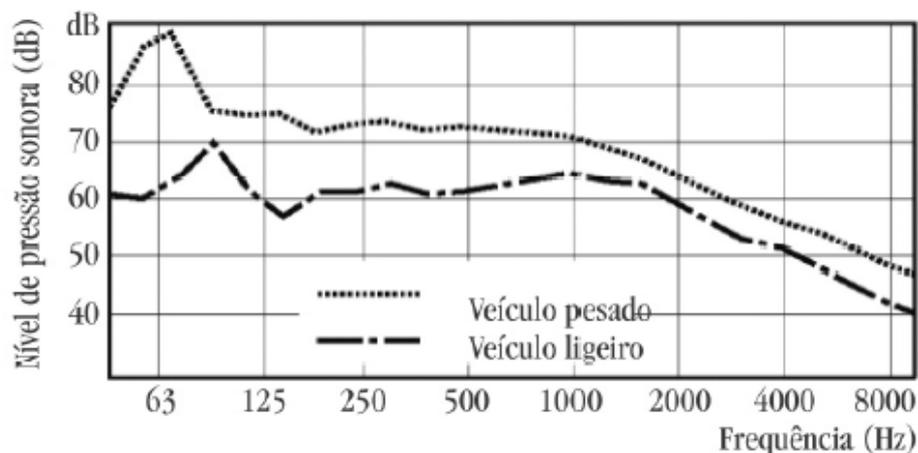
Figura 3 - Ilustração da incidência da fonte sonora na edificação



Fonte: Adaptado de Patrício (2018).

No caso do tráfego rodoviário, Patrício (2018), elencou as principais fontes de ruído, sendo: veículos leves, veículos pesados e motocicletas. Além disso, na Figura 4 tem-se a composição espectral do ruído emitido pelo tráfego veicular. É possível observar que o maior nível de pressão sonora se encontra nas baixas frequências, caracterizando como som grave. Além disso, percebe-se que o nível de pressão sonora é relativamente constante, podendo variar e atingir determinados picos principalmente devido a alguns tipos específicos de veículos.

Figura 4 - Evolução do nível de pressão sonora



Fonte: (PATRICIO, 2018).

As camadas do revestimento externo de uma edificação, bem como os elementos que a compõem, também influenciarão diretamente no seu desempenho ao isolamento do ruído aéreo. As aberturas na fachada, como as esquadrias, são componentes com alto grau de interferência no isolamento sonoro devido, principalmente, às características do vidro utilizado (GOIS, 2020).

2.2 Elementos volumétricos em fachadas

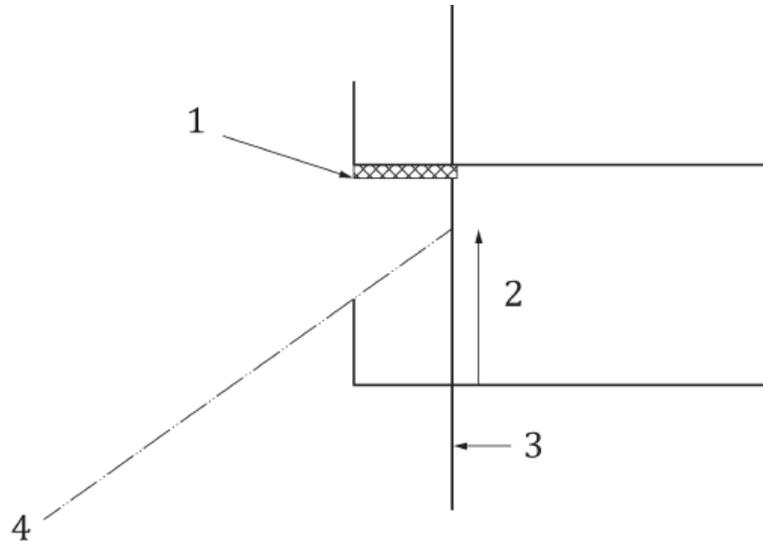
Pequenas alterações feitas na fachada podem oferecer uma melhor proteção acústica sem comprometer outros requisitos arquitetônicos ou de design. Ao estudar a fachada como um sistema integrado, considerando toda a morfologia (saliências, reentrâncias, tipo de parapeito, materiais de revestimento etc.), é possível analisar a influência da forma no desempenho acústico da edificação (BUSA; SECCHI; BALDINI, 2010).

A norma ISO 12354-3 (ISO, 2017) prevê, através de um modelo de cálculo, a estimativa das sacadas nas medições do isolamento ao ruído aéreo em campo. O cálculo é baseado na geometria da sacada, através da diferença no nível de pressão sonora do campo sonoro de entrada (altura da linha de visão da fonte no plano da fachada) e o som na superfície da fachada. Conforme a norma, o nível de pressão sonora irá depender da forma da fachada, da absorção da parte inferior de qualquer varanda e da direção do som que entra no ambiente (PEREIRA *et al.*, 2017).

A Figura 4 ilustra os parâmetros relevantes a serem considerados para estimar a diferença de nível devido à forma da fachada, sendo (1) material de absorção; (2)

altura do plano de visão (campo sonoro de entrada); (3) plano da fachada e (4) direcionalidade da fonte sonora.

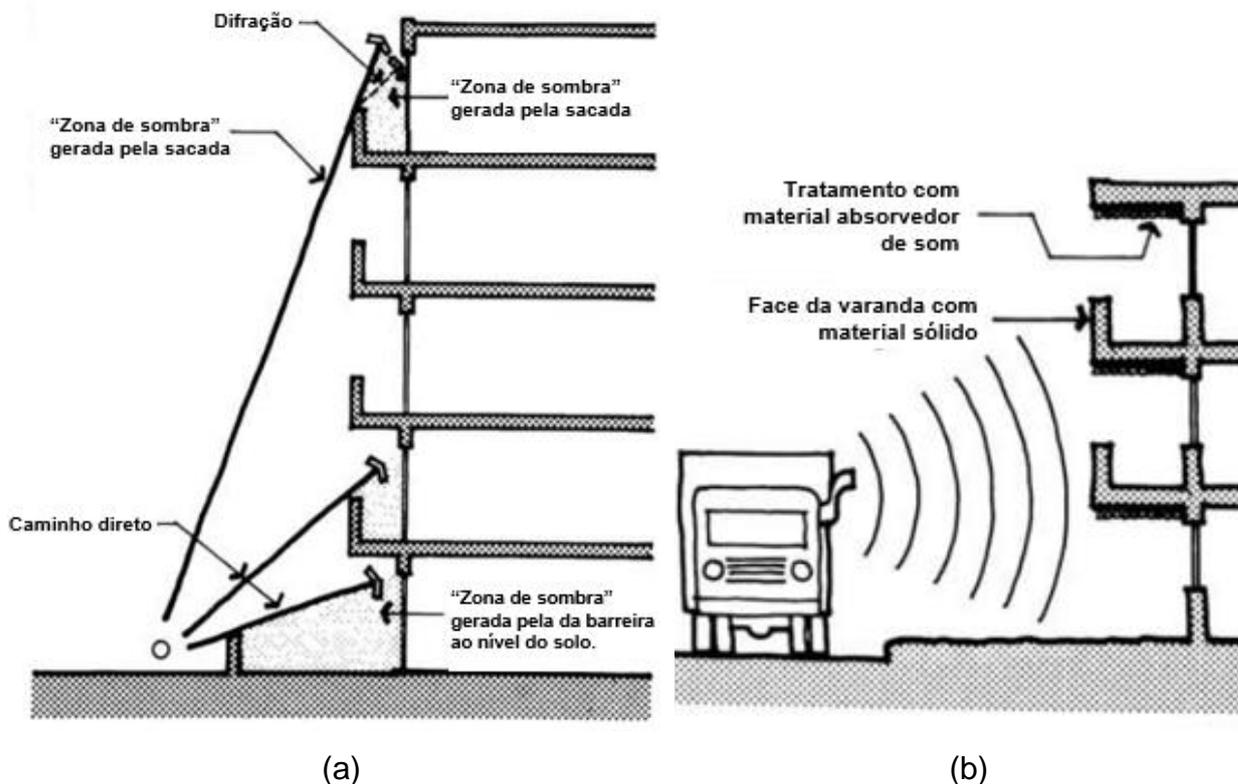
Figura 5 - Parâmetros a serem considerados para definir a diferença de nível sonoro



Fonte: ISO 12354-3 (ISO, 2017).

Egan (2007), considera que a geometria e os elementos da fachada podem atuar como autoproteção da edificação, além de servir como proteção a outros componentes mais frágeis no que se refere ao isolamento sonoro, como portas e janelas. Nesse sentido, as varandas e os beirais (Figura 6a) contribuem para barrar a edificação, principalmente, do ruído de tráfego. Além disso, é possível melhorar o desempenho ao adicionar material de absorção sonora na parte inferior das sacadas (Figura 6b).

Figura 6 - Formas de proteger a edificação contra o ruído

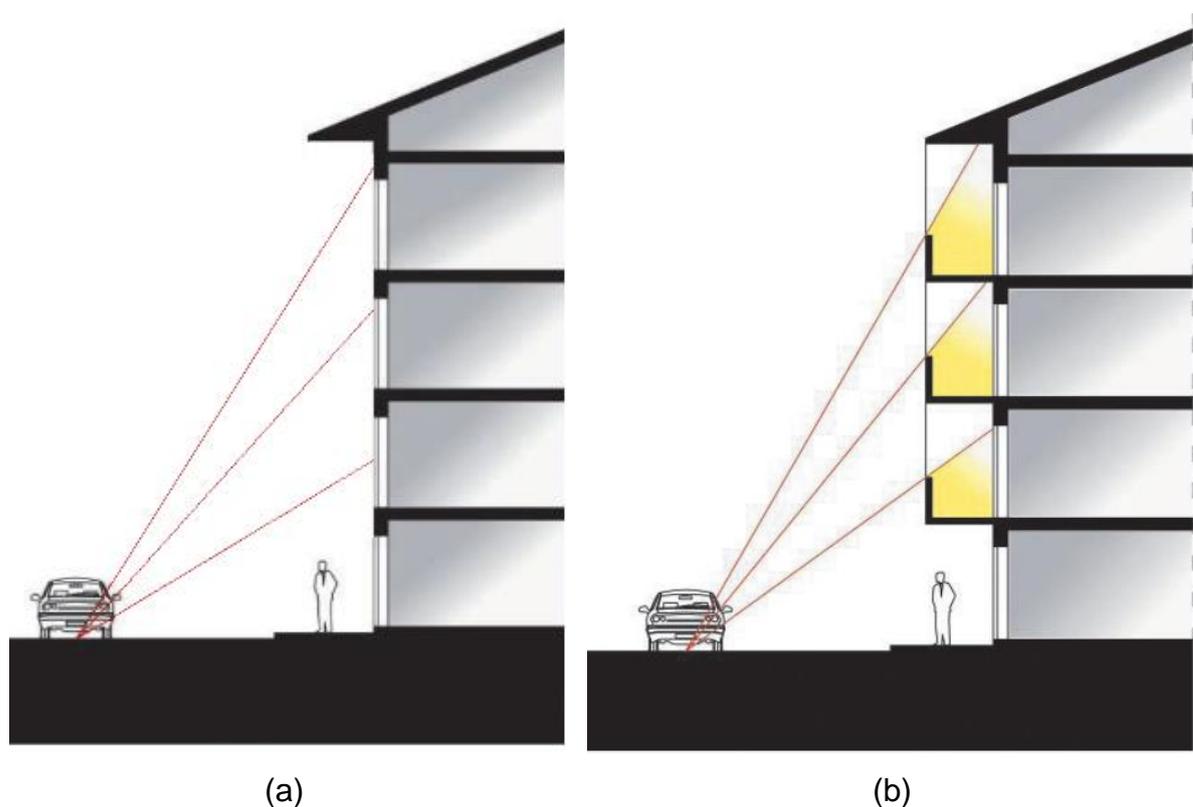


Fonte: Adaptado de Egan (EGAN, 2007).

Pereira et al. (2017), fizeram um estudo da influência de diferentes tipologias de forros instaladas em uma sacada, com o intuito de analisar o desempenho do sistema de fachada de acordo com o tipo de forro utilizado, sendo ensaiados os seguintes: chapa de aço perfurada com lã de PET, forro mineral, placas de PVC, madeira e placa de gesso acartonado. Comparando à fachada sem a utilização de forro, pôde-se observar um ganho de isolamento somente para as tipologias de chapa de aço com lã de PET e forro mineral, ambos materiais com capacidade de absorção sonora. Desse modo, observa-se que é fundamental avaliar o tipo de som incidente na fachada e as bandas de frequência predominantes, para que seja feito um tratamento adequado da superfície.

Nesse aspecto, há estudos como de Busa, Secchi e Baldini (2010), que reforçam que as características da geometria da fachada podem contribuir no desempenho acústico no interior da edificação. Uma fachada plana, sem saliências (Figura 7a), ficará completamente exposta ao ruído, enquanto uma fachada com elementos salientes ou recuados (Figura 7b) produzirá áreas de sombra acústica que aumentam com a altura do edifício.

Figura 7 - Incidência sonora de acordo com a geometria da fachada



Fonte: Adaptado de Busa, Secchi e Baldini (2010).

El-Dien (2003), teve conclusões similares ao analisar o desempenho acústico de edifícios altos, a partir da forma das sacadas. Os resultados mostraram que as varandas podem ser empregadas para proteger os pontos fracos das fachadas contra a propagação do ruído do tráfego.

Busa, Secchi e Baldini (2010), analisaram, através de simulações, a influência da forma em diferentes tipologias de fachadas. No caso de uma fachada plana, completamente exposta ao ruído, o nível de pressão sonora tende a ser mais elevado. Isso ocorre devido ao fato de a fachada não possuir nenhuma geometria ou elemento com propriedades de absorção sonora. Já fachadas com profundidade (escalonadas) ou algum elemento (como guarda corpos, não vazados) produzem um efeito positivo e resultam em um desempenho acústico mais eficiente.

2.3 Ensaios em campo para avaliar o desempenho acústico da fachada

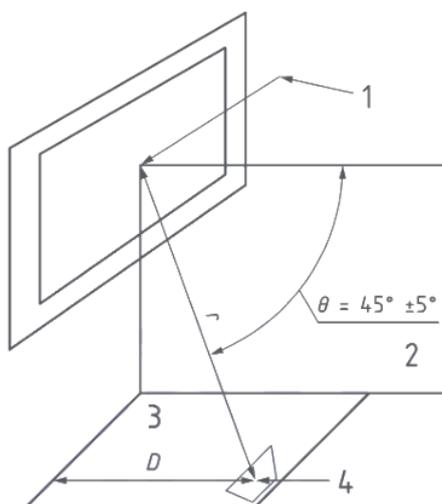
No que se refere ao isolamento acústico de fachadas, no Brasil há uma normativa que define os requisitos para isolamento ao ruído aéreo de sistemas de vedações verticais externas (fachadas). A norma ABNT NBR 15575-4:2021 (ABNT,

2021) estabelece diferentes classes de ruído, bem como valores mínimos, intermediários e superiores de desempenho para ensaios em laboratório e em componentes, elementos e sistemas construtivos utilizados em fachadas. Além disso, a norma também define níveis de desempenho para vedações externas quando a avaliação é realizada em campo.

Ainda, para avaliar o desempenho acústico da fachada, é fundamental a realização de ensaios em campo. Para isso, a norma ABNT NBR ISO 16283-3 (ABNT, 2021) estabelece procedimentos para determinar o isolamento acústico de elementos da fachada (método por elemento) e de fachadas completas (métodos globais) por meio de medições de pressão sonora.

Esses métodos consistem na medição do nível de pressão sonora médio em ambiente externo. Para isso, a fonte emissora de ruído é posicionada do lado externo da edificação, a uma distância em que o ângulo de incidência sonora seja de 45° ($\pm 5^\circ$), sendo no mínimo, 5 m de distância da fachada para ensaios em elementos e 7 m para o método global, e as medições para avaliar o isolamento ocorrem no interior. A Figura 8 ilustra a geometria desse método, para medições em fachada, onde (1) normal à fachada; (2) plano vertical; (3) plano horizontal; (4) fonte sonora.

Figura 8 - Geometria do método da fonte sonora



Fonte: ABNT NBR ISO 16283-3:2021.

No caso dos métodos para elemento, a norma tem como objetivo estimar o índice de redução sonora de um único elemento da fachada, como uma porta, e o método mais preciso utiliza uma fonte sonora artificial com alto-falantes. Também é possível utilizar o ruído de tráfego para as medições (ABNT, 2021).

Já o método global estima a diferença padronizada de nível ponderado, sendo realizada em ambiente externo e, caso possível, utilizando o tráfego real como fonte sonora. Caso o ruído de tráfego no interior da sala for insuficiente, pode-se utilizar uma fonte sonora com alto-falantes como fonte sonora artificial. Desse modo, é possível avaliar o comportamento acústico do sistema como um todo, considerando também todos os componentes (ABNT, 2021).

Além do ruído de tráfego e fonte sonora artificial, outras duas fontes de som podem ser utilizadas para as medições: tráfego ferroviário ou ruído de tráfego aéreo. Essas podem ser utilizadas desde que o som emitido seja constante e suficientemente alto (ABNT, 2021). As medições geralmente são expressas em um número único, calculados de acordo com os procedimentos estabelecidos na ISO 717-1 (ISO, 2020).

Hopkins (2012), comenta que o nível de pressão sonora próximo a fachada irá depender de inúmeros fatores, tais como a posição do microfone, os efeitos da difração na fachada e nos elementos externos (salientes ou recuados, como sacadas), a forma de propagação do som, a orientação e o ruído de fonte utilizada.

Nesse contexto, um projeto adequado para isolamento acústico de fachadas de edifícios é de grande importância para a concepção de ambientes confortáveis. Alguns estudos relatam a importância da fachada no isolamento, tratando-a como um elemento chave para alcançar um bom nível de desempenho.

Estudos recentes têm discutido a respeito de desvios à norma NBR ISO 16283-3, visto que as configurações para realização das medições nem sempre são possíveis de serem atendidas (GOMES, 2018). A norma especifica que a fonte sonora deve estar posicionada a, pelo menos, 7m da fachada e respeitar um ângulo de incidência de 45°, com limite de $\pm 5^\circ$ (ABNT, 2021).

O fato de a norma não conceder margem para situações em que não é viável atender aos requisitos geométricos de ensaio, faz com que sejam necessários estudos a respeito dos desvios possíveis e a influência destes no resultado final de ensaio (GOMES, 2018). Granzotto e Piana (2020), fizeram medições em uma sala de canto, ou seja, com um cômodo de esquina. Um fator importante deste estudo é que, dependendo da posição da fonte sonora durante as medições, há diferentes resultados para o isolamento acústico padronizado.

Berardi e Martellotta (2011), fizeram um estudo comparando as posições da fonte sonora em relação ao ângulo determinado na norma. Os autores realizaram medições do método global e avaliaram os resultados para o ângulo de 45° e os seus

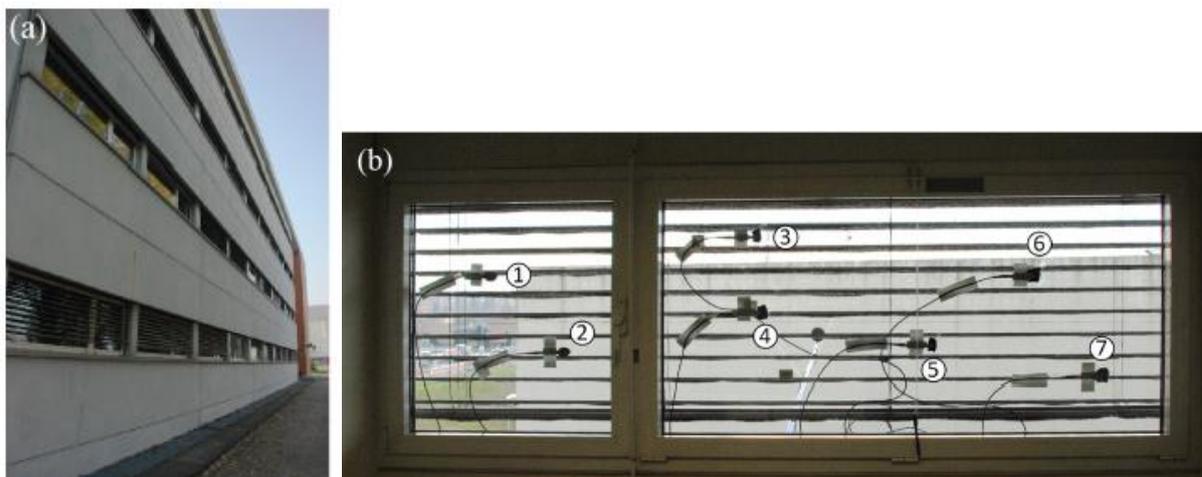
limites, 40° e 50°. Embora encontrassem resultados significativos em algumas bandas de frequência (de cerca de 4 a 6dB), o resultado da medição do isolamento não teve grandes interferências. Isso, de certo modo, confirma a coerência dos valores previstos em norma, de modo que os limites permitam uma flexibilidade no ângulo e, ao mesmo tempo, não causem interferências nos resultados. Olafsen (2015) fez um estudo analisando estes mesmos parâmetros e encontrou resultados semelhantes.

Brutel-Vuilmet (2005), caracterizou o isolamento acústico da fachada também considerando a influência dos ângulos de incidência. Por meio de ensaios de laboratório, medições em campo e análise em *software*, foram avaliados cinco ângulos de incidência na fachada, sendo 0°, 30°, 50°, 70° e 80° e pode-se observar que o desempenho acústico pouco eficiente pode ser resultado do ângulo de incidência e das características da edificação.

Asensio et al. (2018), também analisou a influência da posição dos equipamentos e cita, ainda, a importância da diretividade da fonte sonora para realizar as medições. Além disso, o autor destaca que alguns pontos frágeis da edificação, como dutos de ventilação e componentes com falhas na vedação, irão influenciar diretamente no resultado do ensaio. Desse modo, o autor sugere que a localização da fonte e do microfone deveria levar em conta esses pontos mais fracos da fachada, fazendo com que esses pontos definissem a geometria dos equipamentos durante o ensaio.

Considerando que o isolamento acústico da fachada pode ser melhorado usando elementos de construção de alto desempenho, design inteligente e autoproteção contra ruído (obtida pela própria forma do edifício), Martello et al. (2015), analisaram o comportamento acústico de um sistema de brise-soleil e avaliaram, alocando os microfones na superfície do vidro, a possibilidade de melhorar seu desempenho. A Figura 9 ilustra a adaptação do método utilizada pelos autores.

Figura 9 - Vista do edifício (a) e posicionamento dos microfones (b)

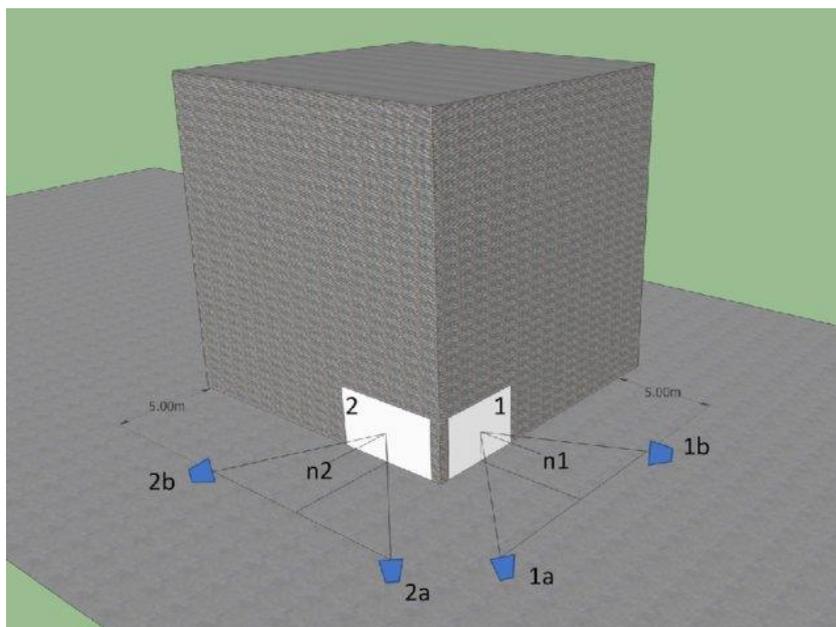


Fonte: Adaptado de (MARTELLO et al., 2015).

Através de medições realizadas de acordo com a ISO 16283-3, para posicionamento da fonte sonora, o autor analisou os níveis de pressão sonora (NPS) medidos em cada posição do microfone. As medições foram bastante distintas e isso se deve ao efeito de difração criado pelas venezianas e da proximidade do microfone ao vidro (MARTELLO et al., 2015).

Granzotto (2020), buscou analisar os resultados do isolamento ao ruído aéreo quando se tem uma fachada com aberturas de canto, ou seja, um cômodo de esquina, haja vista que a norma não especifica a posição da fonte sonora para uma edificação com estas características. Para realizar as medições, o autor sugeriu quatro posições para a fonte sonora, de modo que tivesse maior uniformidade no campo gerado. A Figura 10 ilustra o estudo de caso, considerando duas paredes perpendiculares.

Figura 10 - Sala com cômodo de esquina – posição da fonte sonora



Fonte: Adaptado de (GRANZOTTO; PIANA, 2020).

Através desse estudo, também se observou a diferença no isolamento acústico padronizado de acordo com a posição da fonte sonora. Os resultados foram comparados com simulações no *software* Ramsete, que realiza simulações acústicas baseadas no esquema de computação *Pyramid Tracing*, e foi sugerido um novo método para o cálculo de isolamento ao ruído aéreo, a fim de considerar a atenuação sonora devido a difração do canto da edificação. O algoritmo *Pyramid Tracing* é capaz de resolver os problemas de propagação do som em grandes recintos ou ao ar livre, seguindo os pressupostos da acústica geométrica.

Gomes (2018), analisou os resultados do isolamento ao ruído aéreo de fachada fazendo algumas alterações no método de ensaio. Primeiramente, o ensaio foi realizado conforme o procedimento da ISO 16283-3 e, em seguida, foram consideradas as seguintes alterações:

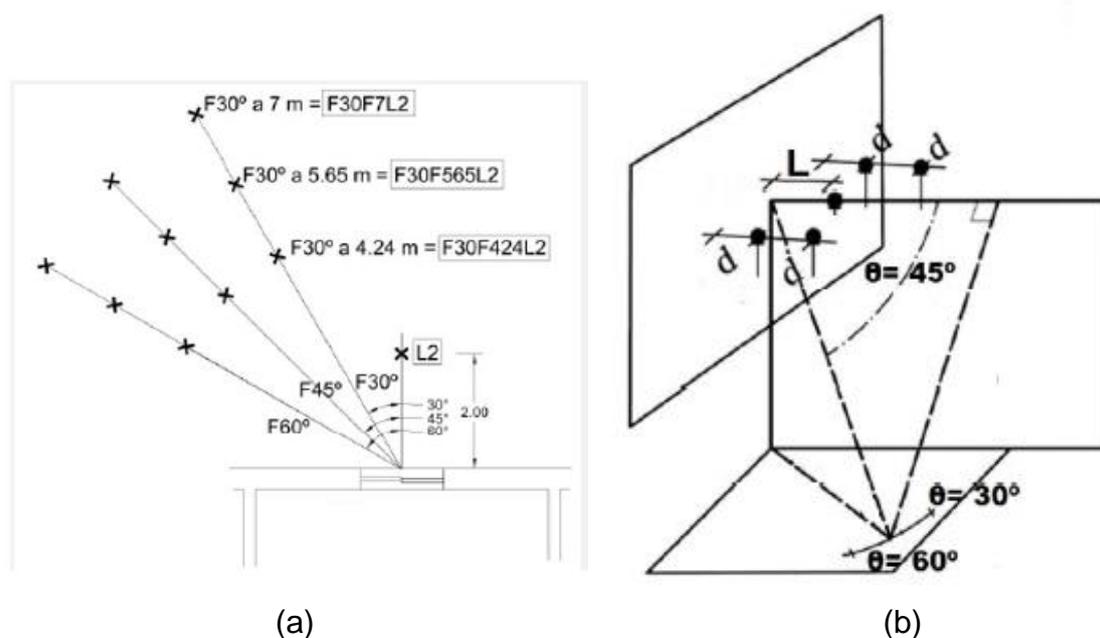
- Duas posições de fonte – a 5,65 m e 4,24 m;
- Duas leituras próximas a fachada, a distâncias de 1,0 m e 0,5 m;

Com essas definições, os ensaios foram novamente realizados e observou-se resultados muito próximos para todas as configurações – variando entre 31 e 33 dB, e na média dos resultados obteve-se uma variação de apenas 0,1 dB em relação ao método global pela ISO 16283. Após estas análises, outras alterações à norma foram consideradas no estudo:

- Determinação do NPS por meio da média de cinco posições em relação a fachada: 2,0 m; 1,0 m; 0,5 m; 0,0 m;
- Variação do ângulo de incidência em 30°, 45° e 60°;
- Distâncias da fonte sonora da fachada: 7,0 m; 5,65 m, 4,24 m.

Com base nestes estudos, o autor identificou resultados semelhantes ao método normativo e tendências nos desvios à norma. Com isso, sugeriu uma metodologia alternativa para a ISO 16283-3, para que seja aplicada em situações em que não é possível respeitar os requisitos estabelecidos, como por falta de espaço ou condicionantes externas que trazem limitações ao local de ensaio (GOMES, 2018). A Figura 11 ilustra a geometria proposta pela ISO 16283-3, com os desvios analisados, em planta e axonometria.

Figura 11 - Desvios à norma analisados em planta (a) e axonometria (b)



Fonte: Adaptado de (GOMES, 2018).

Além dos pontos citados, um item importante a ser considerado é o fator de correção devido a reflexão direta na fachada, quando realizadas medições mais próximas desta. A norma ASTM E966 (ASTM, 2011) tem este ponto bem definido, enquanto a ISO 16283-3 (ABNT, 2021) é um pouco vaga neste sentido. Esse fator de correção é estudado por alguns autores e pôde-se observar que:

“A diferença é da mesma ordem de grandeza que a sugerida na norma, estando compreendida num intervalo de confiança entre 4,9 dB e 6,5 dB, com um nível de confiança de 95%. Para a situação de montagem do microfone

sobre uma janela, esta diferença situa-se fora desse intervalo de confiança, tendo-se obtido valores entre 3,7 dB e 4,5 dB". (MATEUS; SILVA, 2012).

Já a norma ASTM E996 indica um fator de correção de 2dB quando feitas medições com o microfone próximo da fachada, e de 5dB quando o microfone estará posicionado diretamente na fachada (ASTM, 2011).

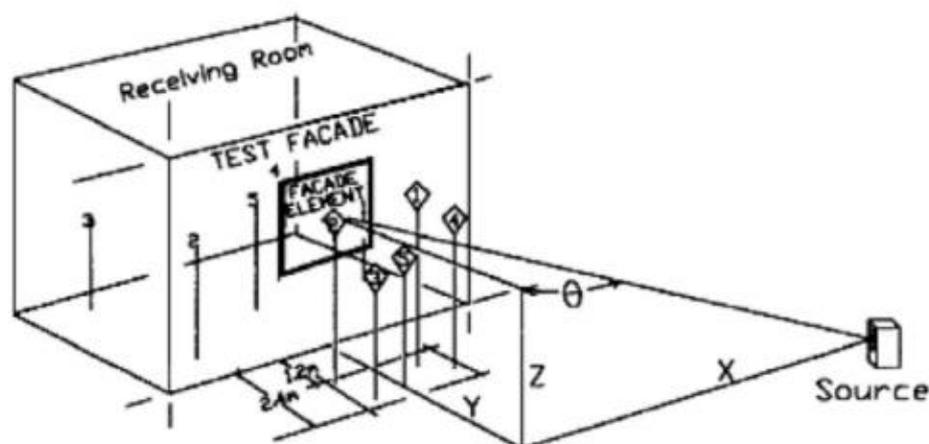
Muito se tem discutido a respeito do posicionamento dos equipamentos, mais especificamente a fonte sonora (BERARDI, 2012; MULHOLLAND, 1971; BERARDI; CIRILLO; MARTELOTTA, 2011), para os ensaios de acústica em campo para medições do isolamento ao ruído aéreo. No caso das fachadas, estudos comentam sobre a diferença padronizada de nível ponderado encontrada para diferentes composições de equipamentos.

Em 1971, já se discutia alguns aspectos relacionados ao método de ensaio para medir o ruído aéreo em campo. Mulholland (1971), fez uma análise detalhada das possíveis formas de medir o isolamento acústico de fachadas. Ele comenta que para medições utilizando uma fonte sonora artificial, é necessário considerar a complexidade da fonte a ser usada – no que se refere a emissão do ruído - e a posição (distância e ângulo de incidência em relação ao centro geométrico da fachada). Além disso, deve-se analisar e considerar as condicionantes do terreno, como a natureza da superfície, e as limitações causadas por edifícios próximos.

Segundo Gilbert (1969, apud Mulholland, 1971), a mudança no ângulo de incidência também tende a alterar os resultados de isolamento ao ruído aéreo. Através de estudos, ele observou que um aumento no ângulo de incidência pode aumentar o isolamento em baixas frequências e reduzir nas altas, sendo o ângulo entre 40 e 60°.

O posicionamento da fonte, quando analisado de acordo com três métodos de ensaio - ISO 140-5 (ISO,1998); ASTM E 966 (EUA) (ASTM, 2011) e JIS A 1430 (Japão) (JIS, 2009) – destaca as diferenças e as interferências existentes entre os métodos de medição. Nesse contexto, um dos itens pontuados é a quantidade de pontos de medição, a fim de aumentar a confiabilidade nas medições. É sugerido que o cálculo da média para o Nível de Pressão Sonora (NPS) seja realizado de acordo com os requisitos da norma ASTM E 966, que considera a medição em cinco pontos, tanto para o método global quanto para o método de elemento, e posiciona a fonte sonora em diferentes ângulos em frente a fachada (BERARDI, 2012). A Figura 12 ilustra o método global de acordo com a ASTM E 966:

Figura 12 - Método global de acordo com a ASTM E 966



Fonte: (BERARDI, 2012).

Além disso, a configuração do local de estudo também irá influenciar no posicionamento dos equipamentos. Berardi (2012), comenta que a medição da fachada em um canto da edificação, com a presença de elementos como esquadrias, deve ser analisada, pois tende a influenciar nos resultados visto que a transmissão do som pode ocorrer em várias direções.

De acordo com Berardi (2011), posições distintas entre fonte e receptor podem causar interferências entre as ondas sonoras em diferentes bandas de frequência. O autor comparou, através de modelos teóricos e ensaios em campo, diferentes combinações entre fonte e receptor e indicou as circunstâncias que poderiam causar interferência nos resultados, tais como reflexões na fachada e a altura da fonte sonora. Com isso, pode-se observar que para avaliação de sistema de fachada, o ideal é ter definida de quatro a seis posições de fonte e microfone, pois uma única medida pode levar a erros. Atualmente, a NBR 16283-3 (ABNT, 2021) adota apenas duas posições de fonte sonora, e dez posições de microfone.

Outro detalhe a ser avaliado é referente as características da edificação. Uma configuração de ambientes, por exemplo, sobre pilotis, pode influenciar nas medições, visto que o som poderá ser refletido no chão e ser transmitido com maior intensidade. Deste modo, é indispensável uma análise do local e uma avaliação do real objetivo da medição – como por exemplo, medir o isolamento da fachada tendo como referência o efeito sobre os ocupantes em determinado ambiente. Esse estudo faz-se necessário pelo fato de as normas não especificarem as configurações de ensaio para ambas as situações (BERARDI, 2012).

Berardi (2012), ainda comenta sobre a orientação em um plano inclinado do ângulo de 45°, quando a fonte sonora está posicionada a uma altura diferente do centro da fachada. O autor cita também estudos que discutem o erro resultante desta configuração, quando comparado com a posição normativa do equipamento. Ele também observa que esses resultados obtidos com diferentes geometrias de equipamentos, contribuem para a incerteza de medição (IM) quando analisada em ensaios em campo.

2.4 A tecnologia de Realidade Aumentada

A Realidade Aumentada é uma tecnologia que permite a inserção de elementos virtuais no espaço do usuário, mantendo referências ao ambiente real ao seu redor. Dessa forma, possibilita interações mais intuitivas entre os ambientes e os elementos virtuais. Essa interação pode ocorrer de forma direta, como por exemplo, usando o próprio corpo do usuário, ou de forma indireta, utilizando equipamentos ou dispositivos auxiliares (TORI; HOUNSELL, 2018).

De acordo com Cardoso et al. (2007):

"Pode-se definir Realidade Aumentada (RA) como a amplificação da percepção sensorial por meio de recursos computacionais. Assim, associando dados computacionais ao mundo real, a RA permite uma interface mais natural com dados e imagens geradas por computador. Um sistema de RA deve prover ao usuário condições de interagir com estes dados de forma natural."

Diferente da Realidade Virtual, que faz com que o usuário fique imerso em um ambiente sintético, a RA permite que o usuário permaneça no ambiente real e ao mesmo tempo visualize elementos e objetos virtuais adicionados a esse ambiente. Portanto, a RA complementa a realidade e não a substitui completamente (AZUMA, 1997). A Figura 13 ilustra os objetos inseridos no ambiente real com o uso da tecnologia de RA.

Figura 13 - Inserção de objetos virtuais em ambiente real



Fonte: (RIBEIRO; ZORZAL, 2011).

Ainda, Azuma (1997), comenta que a Realidade Aumentada enriquece o ambiente real ao associá-lo com o virtual, sendo um sistema que apresenta três características fundamentais: a integração entre o ambiente real e o virtual, a interatividade em tempo real e a utilização de objetos virtuais no espaço tridimensional (3D). A RA traz benefícios ao usuário, uma vez que o auxilia a visualizar informações que não podem ser percebidas diretamente com seus próprios sentidos.

Outra característica importante da tecnologia de RA é a alteração do foco de interação entre homem e computador. Nesse contexto, a RA propicia uma melhor percepção do usuário e sua interação, pois faz uma combinação do ambiente real com o virtual (CARDOSO et al., 2007).

Di Serio, Ibáñez, e Kloos (2013), também comentam que a realidade aumentada é uma tecnologia que permite a criação de um ambiente misto. Os elementos virtuais são inseridos em um ambiente real, enriquecendo a experiência do usuário e possibilitando a criação de novas formas de interação.

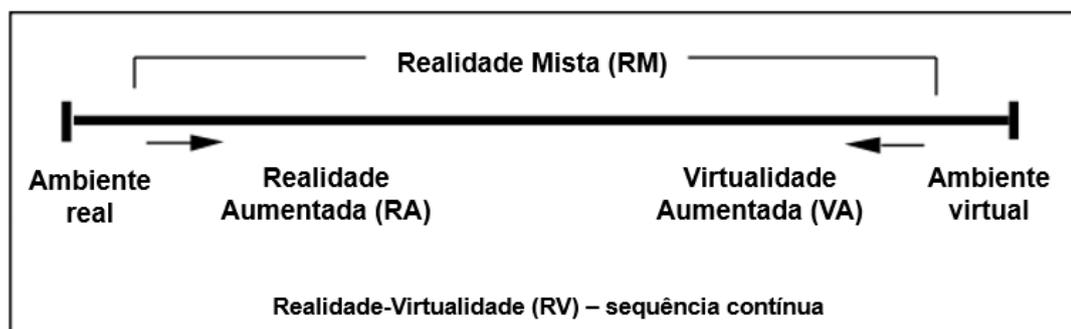
A RA pode ser considerada uma variação da RV, entretanto as tecnologias divergem em alguns conceitos:

“Tecnologias RV mantém o usuário completamente imersivo em um ambiente sintético. Enquanto imerso, o usuário não pode ver o mundo real ao seu redor. Em contraste, RA permite o usuário visualizar o mundo real, com objetos virtuais concomitantemente com o mundo real.” (AZUMA, 1997, p. 2)

Embora Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV) sejam definições um tanto quanto distintos, Milgram et al. (1994), comenta que se torna ideal considerar esses dois conceitos juntos. Ainda, comenta que é conveniente analisá-los em uma

sequência contínua, chamada de Realidade-Virtualidade (RV). A virtualidade aumentada, entre o ambiente real e a realidade virtual, se caracteriza pela adição de elementos reais em um ambiente virtual. Já a Realidade Aumentada, trata da inserção de objetos virtuais no ambiente real. Na Figura 14 tem-se uma representação da RV, também chamada, de modo mais genérico, de Realidade Mista.

Figura 14 - Representação contínua da Realidade Mista



Fonte: Adaptado de Milgram et al. (1995).

No caso da RA, há um ambiente real, com objetos reais onde é possível adicionar inúmeros elementos e visualizá-los por meio de uma interface, como um monitor ou dispositivo móvel. Já a RV, possui apenas objetos virtuais e é baseada em uma tecnologia imersiva. Sendo assim, o conceito de Realidade Mista une as duas extremidades dessa estrutura, e pode apresentar elementos do mundo real e do virtual de modo simultâneo.

Deste modo, tem-se que (KIRNER e KIRNER, 2011, p.11):

“Realidade Virtual, Realidade Aumentada e suas variações representam técnicas de interface computacional que levam em conta o espaço tridimensional. Nesse espaço, o usuário atua de forma multissensorial, explorando aspectos deste espaço por meio da visão, audição e tato. Conforme a tecnologia disponível, é possível também explorar o olfato e o paladar. Percepções corpóreas, como frio, calor e pressão, estão incluídas no tato, através da pele.”

Nesse contexto, Kirner e Tori (2006), comentam que a RA pode ser definida de acordo com o modo que o usuário visualiza os elementos no ambiente. Tem-se caracterizada por visão direta dos objetos (imersiva) quando o usuário vê os objetos em suas posições reais, através de um vídeo ou uma cena. Já a visão indireta (não imersiva) acontece quando a cena visível ao usuário não está alinhada com a posição

real do objeto, sendo necessário que o usuário visualize essa cena através de um monitor/projetor.

Com o avanço da Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, há um foco contínuo no desenvolvimento e aprimoramento dos processos tecnológicos. A Realidade Aumentada (RA), que faz parte do conceito da Indústria 4.0 (NETO et al., 2018; KAYIKCI, 2018), emerge como uma das tecnologias que oferece novas possibilidades de visualização e interação entre o usuário e o ambiente real. Além disso, a RA tem o potencial de auxiliar na visualização de informações de maneira intuitiva e facilitar a compreensão dos processos. Nesse contexto, muitos estudos se desenvolveram na intenção de analisar os mais variados usos da RA em inúmeros setores. Cardoso et al. (2007), cita as principais áreas de utilização desta tecnologia:

“1. Treinamento e apoio a tarefas complexas; 2. Visualização de elementos construtivos, objetos ocultos, sinalização de ambientes; 3. Prospeção e mapeamento de dados por estimativa em ambientes reais; 4. Visualização de dados; 5. Simulação; 6. Conferência com participantes remotos; 7. Entretenimento, como jogos; 8. Arqueologia; 9. Educação.”

Azuma (1997), fez uma relação dos possíveis usos da RA e suas vantagens. Por exemplo, na área médica, é possível utilizar a RA para aperfeiçoar cirurgias, realizar treinamentos e orientar tarefas. Na indústria, torna-se mais efetivo o conserto de máquinas complexas, possibilitando a visualização do equipamento em 3D e suas possíveis falhas. Ainda, na área de Arquitetura, é possível visualizar o modelo tridimensional de uma edificação, por exemplo.

Na educação, o uso da tecnologia pode melhorar o engajamento dos alunos, aumentar a colaboração em sala de aula, auxiliar a compreensão do conteúdo e a memorizar novos assuntos, reduzir a distração e ter mais eficiência no processo de aprendizagem (VÁSQUEZ-CARBONELL, 2022).

A Realidade Aumentada também pode fazer parte da experiência do consumidor através do seu uso no setor de marketing, melhorando a interação com as marcas e permitindo uma experiência mais dinâmica aos usuários. Neste cenário, clientes podem experimentar produtos de modo totalmente on-line, sem interagir fisicamente com eles (DU; LIU; WANG, 2022). Deste modo, destaca-se a importância dos estudos a respeito da Realidade Aumentada em diversos setores. Na indústria

AEC, essa ferramenta mostra-se muito promissora e tende a otimizar muitos dos processos (ARAÚJO, 2018; LINHARES; GROETELAARS, 2021).

2.4.1 O uso da tecnologia de Realidade Aumentada na área de Arquitetura Engenharia e Construção (AEC)

Segundo a *Autodesk*, no setor de AEC é possível utilizar a RA nas mais variadas etapas, desde o projeto inicial, acompanhamento e comunicação a respeito da progressão da obra, aprimorar a segurança no local de trabalho e até mesmo ensinar os trabalhadores a usarem determinado equipamento ou máquinas (*Autodesk*, 2022).

Silva et al. (2022), pontuaram os usos e os benefícios da utilização da RA na Indústria 4.0 em diversos setores: Resolução de problemas, redução de erros (possibilidade de revisar processos), correção de erros através de simulação, redução de custos e aumento de produção, otimização do tempo e facilitação de processos, aumento da segurança, possibilidade de qualificar a mão de obra.

Silva (2020), fez uma análise da inserção da RA no canteiro de obras, na fase de execução, utilizando dois aplicativos para dispositivos móveis - Augin e Augment. Por meio de análise de dois estudos de caso e coleta de dados através de um questionário, foi possível observar uma boa aceitação no uso dos aplicativos de RA. Esta tecnologia, quando associada a treinamentos, permite aos usuários identificar falhas de projeto e detalhes necessários. Além disso, a RA permite uma melhor visualização e entendimento dos projetos, minimizando a probabilidade de erros.

O surgimento do BIM (Modelagem da Informação da Construção) permitiu a melhoria de muitos processos na área de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), dentre eles a compatibilização de projetos. Nesse contexto, a Realidade Aumentada (RA) pode contribuir com a integração de informações de modelos BIM, com uma interface que possibilita discussões.

Araújo (2018), utilizou a RA associada ao BIM (*Building Information Modeling*) no setor da educação, como ferramenta para auxiliar na concepção e apresentação de projetos arquitetônicos. O autor optou pelo uso do BIM pelo fato de o *software* integrar outras disciplinas, além do projeto arquitetônico, como projeto hidrossanitário, elétrico, estrutural etc., e analisou as potencialidades e dificuldades no uso de ambas as tecnologias. Ele constatou que a tecnologia de RA pode auxiliar na visualização

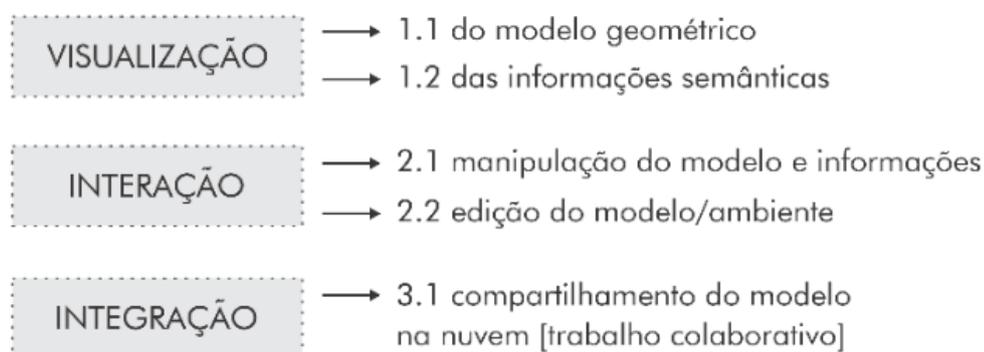
dos projetos, principalmente em decisões finais e, com o avanço das tecnologias, a RA poderia ser aplicada em outros campos da AEC.

“Realidade Virtual Aumentada (RA, *Augmented Reality*) e Realidade Virtual Melhorada (RM, *Enhanced Reality*) são duas áreas da RV que utilizam tecnologias específicas para aumentar o desempenho humano na realização de tarefas. A RA permite combinar imagens geradas no mundo virtual com imagens do mundo real por meio de um capacete parcialmente transparente provido de sensores. O objetivo é suplementar um cenário real com informações geradas pelo computador.” (NETTO, MACHADO e OLIVEIRA, 2000, p19).

Com o crescimento do BIM, muitos aplicativos buscaram a integração com essa plataforma, desenvolvendo *plugins* para serem utilizados nos softwares, com destaque para o Autodesk Revit, e possibilitando a visualização dos modelos em RA através de dispositivos móveis e computadores (ARAÚJO, 2018; OLIVEIRA; CUPERSCHMID, 2019).

Silva e Groetelaars (2021), através de um mapeamento, elencaram as possibilidades de interação da RA com o modelo BIM (Figura 15):

Figura 15 - Integração da RA com modelo BIM



Fonte: (LINHARES; GROETELAARS, 2021).

Moreira (2018), buscou avaliar a possibilidade de inserção da RA no meio da AEC através do Manual de Operação, Uso e Manutenção das Edificações. Através de um modelo BIM, foram desenvolvidas propostas para incorporar a RA no modelo do manual. Com isso, a autora identificou as potencialidades e limitações da tecnologia nesse cenário. O manual impresso, assistido pela RA e visualizado em *tablet* teve a maior aceitação e, de um modo geral, apresentou grande potencial no que se refere a orientação dos usuários.

Oliveira (2019), fez a modelagem de um edifício (já construído) no software Revit 2019, e utilizou o *software* Navisworks 2019 para detecção automática de conflitos e o aplicativo BIM Server Center RA para visualizar o projeto em realidade aumentada. O aplicativo de RA foi utilizado para discutir as inconsistências, bem como analisar a utilização desta tecnologia para compatibilização dos projetos. Foram encontrados vários conflitos, sendo eles na compatibilização de esgoto, água fria e água pluvial, e entre estrutura e instalações hidráulicas. O uso da RA possibilitou a visualização do edifício em escala real, oferecendo uma visualização realista das interferências, além de facilitar a compreensão e discussão do projeto e, assim, identificando os conflitos para buscar soluções.

Nesse contexto, é possível observar o emprego da RA em diversas etapas de projeto, desde a concepção e análise das condicionantes e da viabilidade, passando pela compatibilização de projetos e identificação de erros, gerenciamento da obra com informações precisas no canteiro, até a construção final da edificação. Além disso, outra vantagem da RA é a apresentação do modelo 3D ao cliente ainda na fase de projeto, possibilitando modificações mais rápidas e evitando alterações durante o processo de construção, o que demanda tempo e custo (OLIVEIRA et al., 2019).

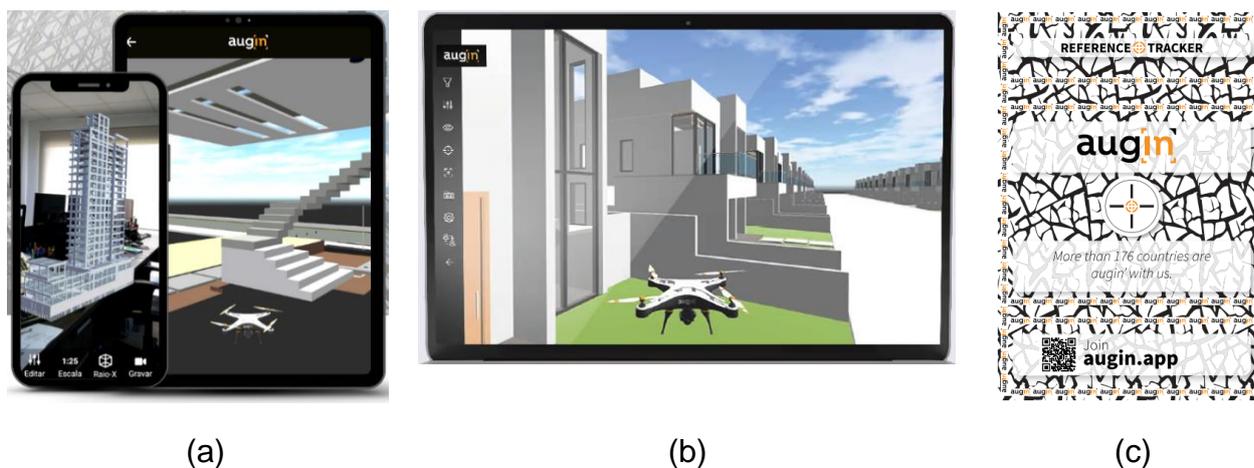
Além disso, com essa ascensão da RA na indústria de AEC (SILVA; GIESTA, 2020), (OLIVEIRA; CUPERSCHMID, 2019), e a contínua evolução dos dispositivos móveis (*tablets* e *smartphones*), muitos aplicativos têm se destacado no que se refere ao acesso a ambientes de RA e RV. Os aplicativos são desenvolvidos, em sua grande maioria, para atender os sistemas Android e IOS e oferecem uma experiência interativa e dinâmica para muitas áreas (CUPERSCHMIND; FREITAS, 2013).

2.4.2 Aplicativo Augin – plataforma para Realidade Aumentada

O Augin é um aplicativo de realidade aumentada que permite aos usuários visualizar objetos e informações adicionais sobre o mundo ao seu redor através da câmera do smartphone ou tablet. Com o Augin, é possível explorar espaços em 3D em tamanho real, visualizar e compartilhar modelos em realidade aumentada, além de interagir com os objetos virtuais para obter mais informações. Para utilizá-lo, é necessário fazer o upload do arquivo na plataforma, no formato IFC, ou por meio de *plug-ins* que permitem o *upload* direto de softwares como Revit, SketchUp e outros (AUGIN, 2023).

Para gerenciar o conteúdo do aplicativo Augin, há a plataforma Augin Hub, que oferece recursos avançados de análise de dados, permitindo que seja possível avaliar o desempenho das experiências de realidade aumentada e fazer ajustes para melhorar a eficácia. O Augin Hub permite interagir com os projetos através de um avatar e drone, explorar categorias individualmente, confirmar dados e parâmetros, e inserir o *Reference Tracker*, que é uma ferramenta visual que auxilia na referência automática de um modelo 3D em escala 1:1 na Realidade Aumentada, utilizando um ponto de referência como base. Assim, deve-se inserir o *Reference Tracker* no projeto e imprimir uma via física, que deve ser posicionada no espaço exatamente onde foi posicionada no Augin Hub. Com o aplicativo Augin, é só apontar o dispositivo móvel para o Reference Tracker que o projeto estará localizado corretamente no espaço (AUGIN, 2023). A Figura 16 apresenta a interface gráfica do aplicativo (a), a interface do Augin Hub (b) e o Reference Tracker (c).

Figura 16 - Interfaces do aplicativo Augin



Fonte: AUGIN, 2023

2.5 Análise do processo de ensaio com a Realidade Aumentada

Para que um novo processo ou sistema de medição seja implementado ou alterado, é necessário seguir alguns passos para realizar a sua análise, visto que a decisão de alterar ou não um processo deve sempre se basear em dados e fatos. Desse modo, por meio de análises estatísticas, é possível compreender se o sistema de medição está além do esperado e/ou requer algum tipo de correção (AIAG, 2010).

O Manual MSA – Análise dos Sistemas de Medição - indica diretrizes para avaliar um sistema ou processo. Essas diretrizes são muito utilizadas no âmbito

industrial, porém podem ser utilizadas para avaliar qualquer sistema de medição (AIAG, 2010). Esse trabalho utilizou as diretrizes do manual MSA para realizar a análise do posicionamento dos equipamentos nos ensaios de acústica de fachada em campo, quando utilizada a tecnologia de realidade aumentada, e comparando com o modo manual. Abaixo seguem fatores importantes a serem compreendidos para a realização dessa análise.

2.5.1 A análise do Sistema de Medição

A competitividade de uma empresa no mercado é um fator determinante para o seu sucesso, que é influenciado por diversos elementos. Para que as empresas se mantenham competitivas, devem aprimorar seus sistemas, de modo a torná-los mais eficientes e com maior confiabilidade em seus resultados. Entre esses processos estão os processos de metrologia, cuja demanda aumenta com o advento de novas tecnologias (KLAPUT et al., 2016).

O principal objetivo de um sistema de medição é realizar medições precisas e confiáveis. Para isso, o sistema de medição deve ser corretamente calibrado e as medições realizadas de acordo com procedimentos padronizados (AIAG, 2010).

Os sistemas de medição são usados em diversos setores, como engenharia, ciência, medicina, indústria e comércio. Eles são essenciais para o desenvolvimento de novas tecnologias, controle de qualidade de produtos e serviços e pesquisas científicas (KLAPUT et al., 2016).

Nesse contexto, a análise do sistema de medição (MSA) - método baseado em conceitos estatísticos para determinar se os dados obtidos com um sistema de medição são aceitáveis - é uma importante ferramenta de qualidade que melhora significativamente a produtividade, a qualidade do produto e dos processos (AIAG, 2010).

A Figura 17 apresenta o que é um processo de medição, sendo possível observar que é apenas uma etapa do processo geral. Através da análise dos dados coletados durante o processo de medição, se obtém uma decisão final.

Figura 17 - Processo de medição



Fonte: adaptado de Manual MSA (AIAG, 2010).

Vale ressaltar que a capacidade do sistema de medição é influenciada pela habilidade dos operadores em realizar as medições. Além disso, efeitos associados a fontes aleatórias de variação também tendem a afetar as medições (BURDICK; BORROR; MONTGOMERY, 2012).

O Manual da MSA (AIAG, 2010) corrobora essa informação, indicando que as fontes mais importantes de variação são ferramentas/equipamentos de medição, pessoas (avaliador) e método (procedimento de medição). Desse modo, são conduzidos estudos de sistemas de medição para quantificar essas fontes de variabilidade para auxiliar na tomada de decisões. Entre esses estudos estão estabilidade, linearidade, repetibilidade e reprodutibilidade.

A estabilidade é a capacidade do sistema de manter a sua precisão e confiabilidade ao longo do tempo. Esse parâmetro pode ser afetado por diversos fatores, como a qualidade dos materiais utilizados na fabricação dos instrumentos de medição, a manutenção adequada dos equipamentos, a calibração regular dos instrumentos e a qualidade do ambiente em que as medições são realizadas (AIAG, 2010).

Já a linearidade refere-se à capacidade do sistema de produzir leituras que são proporcionais às variações da grandeza que está sendo medida. Um sistema de medição linear é aquele em que a relação entre as leituras e as variações da grandeza é uma linha reta (AIAG, 2010).

Ainda, a repetibilidade se refere a variabilidade do operador ou do medidor usado para medir uma peça; essa variação é observada quando um operador avalia a amostra várias vezes. Já a reprodutibilidade se refere a variabilidade resultante de diferentes operadores (AIAG, 2010).

2.5.2 O estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R)

De acordo com Pedott e Fogliatto (2013):

“O estudo de repetitividade & reprodutividade (R&R) é uma ferramenta da Engenharia de Qualidade usada na análise de Sistemas de medição. Nos estudos de R&R, o instrumento de medição é usado para medir repetidas vezes as amostras de um produto. A repetitividade se refere à variabilidade característica do instrumento de medição, e decorre da sua capacidade de fornecer leituras repetidas muito próximas, sob as mesmas condições.”

Os estudos de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) podem ser realizados de três formas diferentes (PEDOTT, 2010; COSTA, 2012; VIEIRA, 2012):

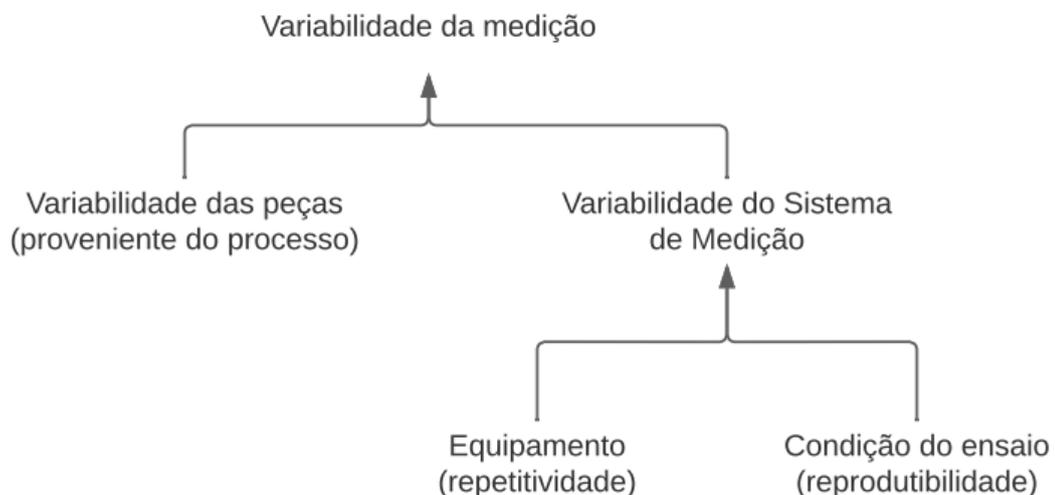
a) Método da amplitude – mais simples, não permite que a repetibilidade e a reprodutibilidade sejam mostradas separadamente.

b) Método de amplitude e média – mais completo, permite a distinção entre repetibilidade e reprodutibilidade.

c) Método de Análise de Variância (ANOVA) – Além de diagnosticar inter-relações que afetam os resultados, também pode distinguir entre repetibilidade e reprodutibilidade.

Delgado et al (2018) pontuam que o R&R é uma importante ferramenta da qualidade, e que seu impacto de aplicação pode se desdobrar em melhoramentos na produtividade, qualidade e processos. Os autores apresentam através da Figura 18 os parâmetros de influência em uma análise do tipo R&R.

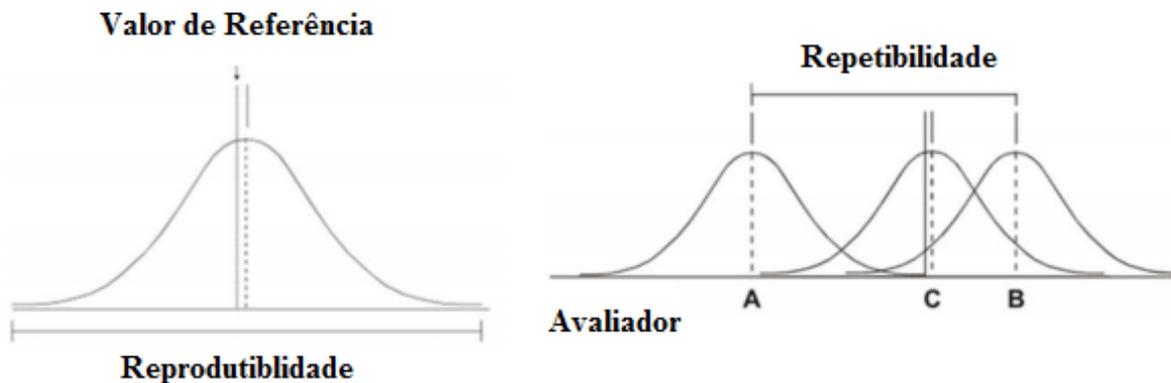
Figura 18 - Fontes de variação R&R



Fonte: Adaptado de Delgado et al (2018)

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia VIM, (2012), a repetibilidade é definida como a variação nas medições feitas na mesma quantidade pelo mesmo operador e equipamento de medição. A reprodutibilidade, por outro lado, é definida como a variação do valor médio de uma mesma quantidade medida por diferentes funcionários usando o mesmo equipamento de medição. A Figura 19 ilustra a diferenciação entre estas variáveis.

Figura 19 - Identificação da repetibilidade e da reprodutibilidade



Fonte: AIAG (2010) adaptado por Delgado et al (2018)

Conforme AIAG (2010) e Dolezal, Burdick e Birch (1998), a estimativa da variação entre a repetibilidade e a reprodutibilidade de um sistema de medição é o resultado da variância total do sistema, expressa pela fórmula (3):

$$\sigma_{\text{Sistema de medição}}^2 = \sigma_{\text{Repetibilidade}}^2 + \sigma_{\text{Reprodutibilidade}}^2 \quad (3)$$

2.5.3 O estudo de Gage R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade)

Os estudos de R&R provaram ser muito úteis para validar o instrumento e a capacidade do operador de distinguir entre a variabilidade peça a peça. Portanto, ao analisar o sistema de medição, é essencial comparar os valores de R&R calculados em cada experimento com a variabilidade permitida no processo, a fim de validar sua capacidade de detectar resultados com confiabilidade (DELGADO et al, 2018). A Tabela 1 apresenta as diretrizes gerais para aceitabilidade do sistema de medição.

Tabela 1 - Critérios de R&R

GRR	Decisão	Comentários
Abaixo de 10%	Geralmente considerado um sistema de medição aceitável.	É altamente recomendado e especialmente útil ao tentar ordenar ou classificar peças, bem como em situações que demandam um controle de processo mais rigoroso.
10% a 30%	Pode ser aceitável para algumas aplicações.	A decisão deve ser fundamentada em vários fatores, como a importância da medição para a aplicação, o custo do dispositivo de medição e o custo de retrabalho ou reparo. Além disso, é necessário que seja aprovada pelo cliente.
Mais de 30%	Considerado inaceitável.	É crucial fazer todos os esforços para aprimorar o sistema de medição. Uma abordagem adequada para lidar com essa situação é utilizar uma estratégia de medição, como o cálculo da média de várias leituras da mesma característica da peça, a fim de reduzir a variação na medição final.

Fonte: Adaptado de MAS (Análise dos Sistemas de Medição – 4ª edição).

Para a análise do valor de R&R é realizado um estudo, chamado de *Gage R&R* (Repetibilidade e Reprodutibilidade), que é uma técnica estatística utilizada para avaliar a confiabilidade e precisão de um sistema de medição ou instrumento de medição. O objetivo do estudo é determinar quanto da variação total em um conjunto

de dados pode ser atribuído a diferentes fontes, incluindo o próprio instrumento de medição e o operador que realiza a medição (AIAG, 2010).

Esse estudo é geralmente realizado em três etapas: repetibilidade, reprodutibilidade e análise de variação. Na repetibilidade, são feitas várias medições do mesmo item usando o mesmo instrumento e o mesmo operador para determinar a variação de medição causada pelo instrumento em si. Na etapa de reprodutibilidade, vários operadores usam o mesmo instrumento para medir o mesmo item, a fim de determinar a variação de medição causada por diferentes operadores. Na análise de variação, os resultados das etapas de repetibilidade e reprodutibilidade são analisados estatisticamente para determinar a quantidade de variação total que pode ser atribuída a cada fonte (MONTGOMERY, 2012).

Soares et al. (2022), realizaram uma revisão da literatura a respeito de estudos sobre Sistemas de Medição, e indicaram que a maioria utiliza porcentagem de variação devido à repetibilidade e reprodutibilidade (%GR&R) para avaliar a aceitabilidade de um sistema de medição. Além disso, é comum realizar comparações entre métodos, entre avaliadores e avaliar a eficácia de um novo método. Os autores também identificaram a repetibilidade é a principal fonte de erro de medição.

É possível, também, observar algumas utilizações recentes do método de GR&R na literatura em diversos setores, como indústria de aço e alumínio, controle de qualidade de alimentos, indústria automotiva, manufatura aditiva, entre outros (SOARES et al, 2022).

2.5.4 O método da análise de variância (ANOVA)

O processamento e a interpretação de dados qualitativos e quantitativos por engenheiros e pesquisadores dependem, principalmente, de métodos estatísticos. De acordo com Montgomery e Runger (2014), a realização de experimentos planejados é fundamental para garantir que todas as variáveis que afetam os experimentos sejam completamente analisadas.

Nesse contexto, um método estatístico amplamente utilizado é a Análise de Variância (ANOVA), que serve para analisar resultados de um único fator ou ainda realizar comparações entre três ou mais grupos. (AIAG, 2010). O ANOVA é aplicado em inúmeras áreas da ciência, como engenharia (OLIVEIRA, A. M. da S.; RIBEIRO; GONZAGA, 2022), tecnologia (N. SILVA; SAQUI, 2022) e saúde (AZEVEDO, 2020).

É comum utilizar a Análise de Variância e o método de Média e Amplitude para avaliar a capacidade de um sistema de medição nos estudos chamados de GR&R (*Gage Repeatability and Reproducibility*). No entanto, devido à interação entre o operador e a peça, o método ANOVA é o mais indicado, pois pode estimar a variância com mais precisão e obter mais informações (AIAG, 2010)

Dentro desse contexto, Pedott e Fogliatto (2013) ressaltam que a análise de variância (ANOVA) é amplamente utilizada nos estudos de R&R. A ANOVA permite descompor a variabilidade de um sistema de medição e avaliar as interações entre seus componentes. As estimativas da variabilidade sistemática são obtidas a partir da variância do erro aleatório, que é determinada pelas réplicas. O erro de medição engloba a dispersão do instrumento, os efeitos do avaliador e o erro aleatório decorrente das repetições.

Ainda, segundo Pedott e Fogliatto (2013), o teste tradicional considera a ANOVA de dois fatores, sendo o primeiro fator a peça (P) e o outro o avaliador (A). A equação (2) apresentada pelos autores é:

$$x_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, \dots, l \\ j = 1, \dots, j \\ k = 1, \dots, k \end{cases} \quad (2)$$

Ainda segundo os autores:

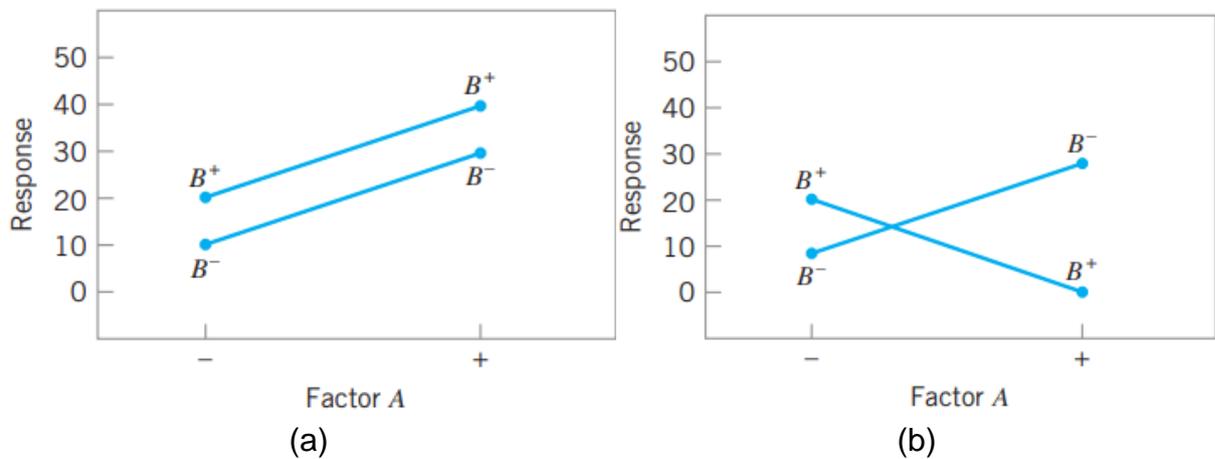
“Na Equação 1, x_{ijk} é o valor da variável de resposta para a observação da k -ésima repetição feita pelo i -ésimo avaliador sobre a j -ésima peça, μ é o valor da média geral, τ_i é o efeito do i -ésimo avaliador, β_j é o efeito da j -ésima peça, $(\tau\beta)$ é o efeito da interação entre o avaliador i e a peça j , e ϵ_{ijk} é o resíduo ou erro aleatório, normalmente distribuído e com média zero. O resíduo é dado pela diferença entre os valores observados e esperados para a variável de resposta, onde x_{ijk} é o valor observado e $\mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij}$ representa o valor médio da variável de resposta da j -ésima peça medida pelo i -ésimo avaliador. A ANOVA pressupõe observações normalmente e independentemente distribuídas, com idêntica variância nos diferentes níveis dos fatores.”

Desse modo, o fator de significância encontrado pelo método ANOVA resume o resultado final da análise de variância do problema, dada a probabilidade de erro quando indica que a fonte de variância ou a interação em questão tem efeito significativo na variância do processo (ALBERTAZZI; SOUSA, 2018)

2.5.5 Variabilidade associada a interação entre operador e peça

Além da repetibilidade e da reprodutividade, outro fator interessante a ser avaliado é a variabilidade associada a interação entre operador e peça. Essa interação é explicada graficamente na Figura 20. Na imagem (a) observa-se que as retas estão próximas e são paralelas, o que indica que operador e peça não interagem. Já na imagem (b) as retas não são paralelas e se cruzam, expressando a interação entre os fatores (operador x peça) (MONTGOMERY, 2012).

Figura 20 - Exemplo gráfico de interação entre operador x peça



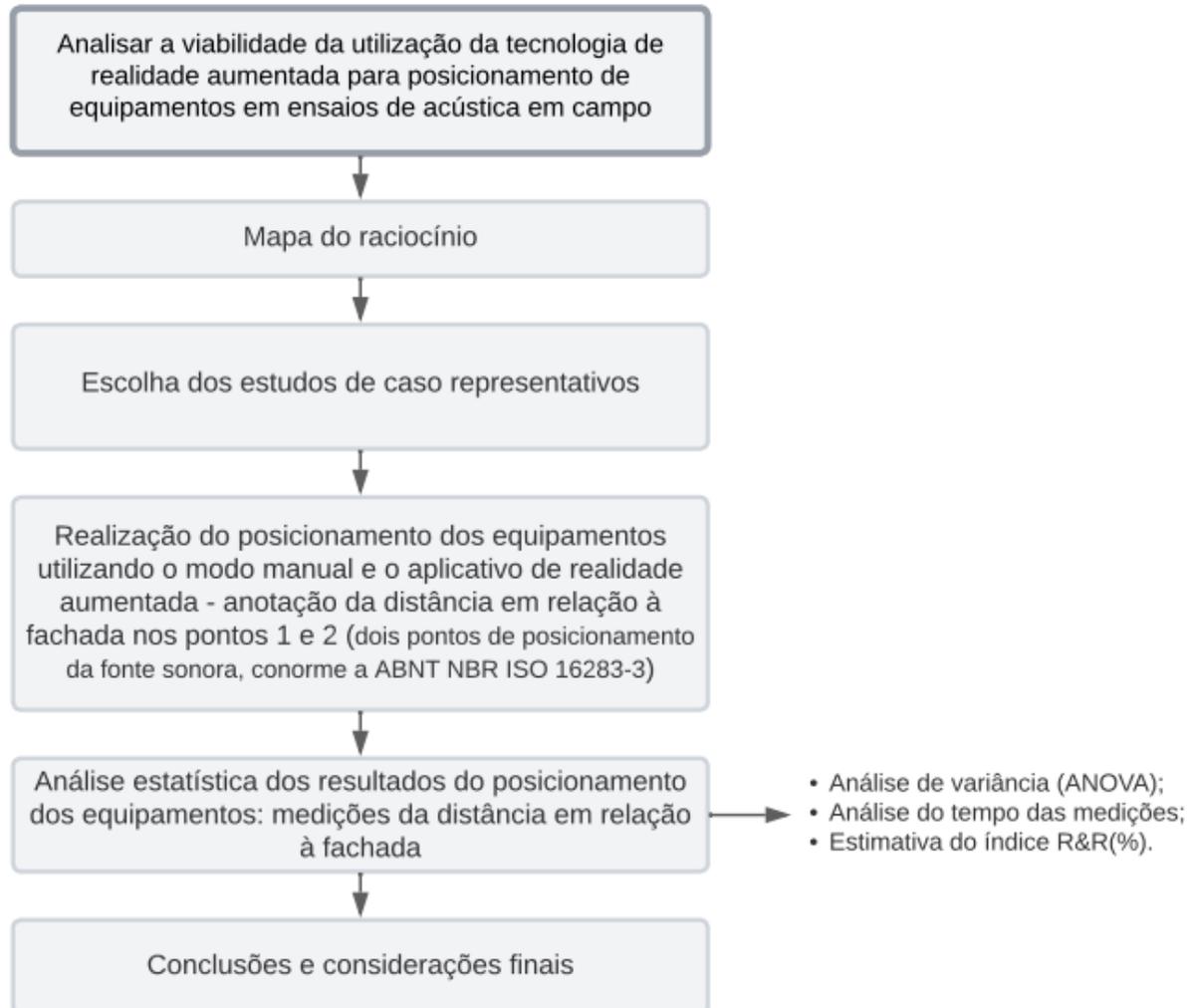
Fonte: Adaptado de Montgomery (2012, p.571)

Essa variabilidade associada à interação ocorre por diferenças entre os operadores e às variações nas propriedades das peças/amostras trabalhadas. Essa interação pode levar a diferenças na qualidade do trabalho que cada operador executa, mesmo que sigam o mesmo procedimento e usem os mesmos equipamentos. Tais diferenças podem ser causadas por diversos fatores, como o nível de habilidade e experiência do operador, a forma como são manuseados os equipamentos, diferenças nas propriedades físicas das peças/amostras e fatores ambientais, como temperatura e umidade (MONTGOMERY, 2012), (AIAG, 2010).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada seguindo o fluxo conforme a Figura 21:

Figura 21 - Fluxograma do estudo



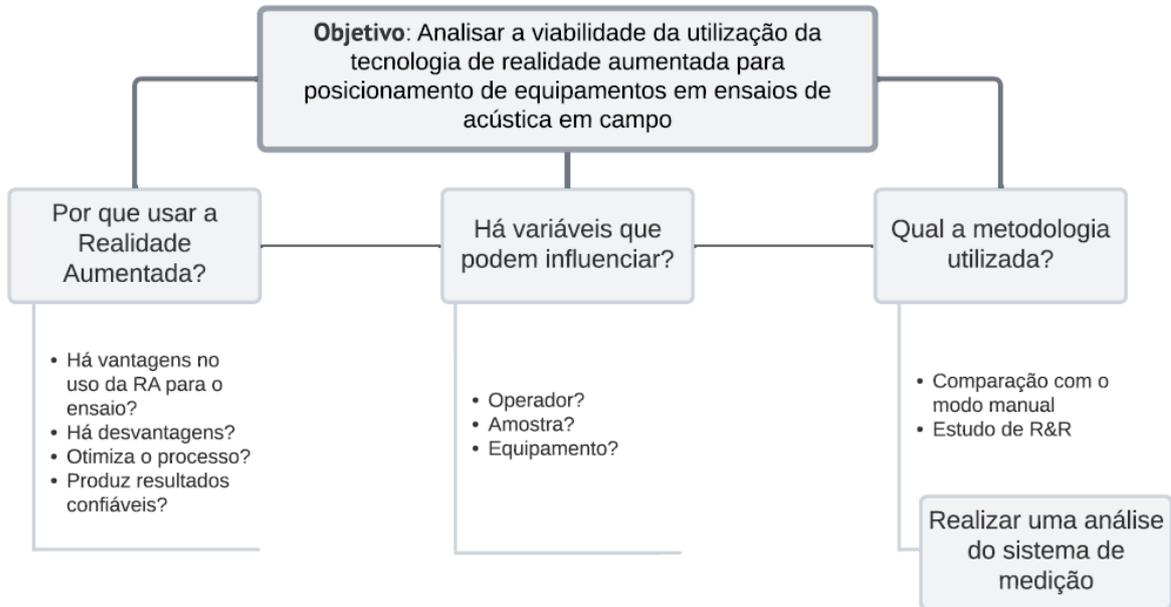
Fonte: a autora (2023).

Para que seja possível avaliar a viabilidade do uso da tecnologia de Realidade Aumentada nos ensaios de acústica em campo, foi proposta, em um primeiro momento, a realização do Mapa de Raciocínio, a fim de direcionar o trabalho e centralizar os principais objetivos, bem como ter um registro de todo o processo (WERKEMA, 2002).

Ainda, Werkema (2002), comenta que a ideia do Mapa de Raciocínio é funcionar como um planejamento do estudo, respondendo às questões levantadas inicialmente, até finalizar o projeto. Macalli (2021), pontua que o Mapa auxilia na

visualização geral do estudo e sobre todo o conhecimento gerado. Abaixo segue a imagem do Mapa de Raciocínio elaborado (Figura 22).

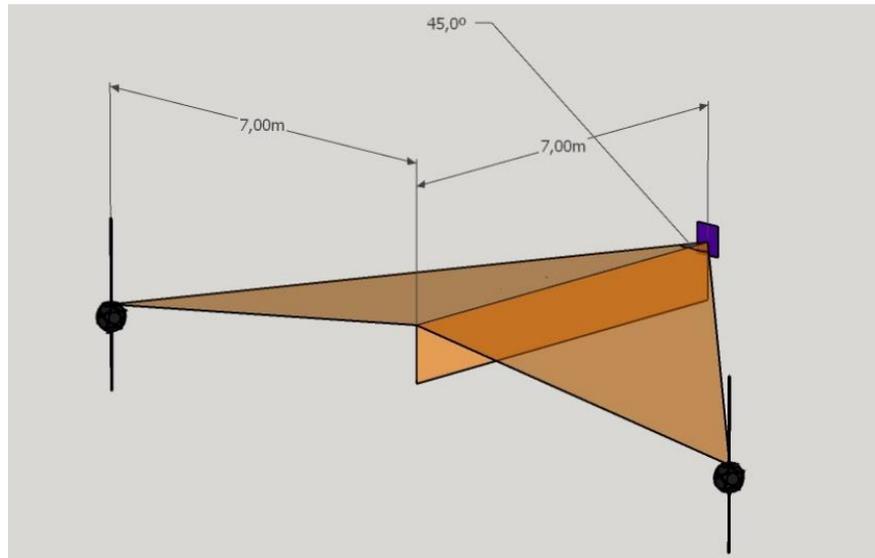
Figura 22 – Mapa do raciocínio



Fonte: a autora (2023).

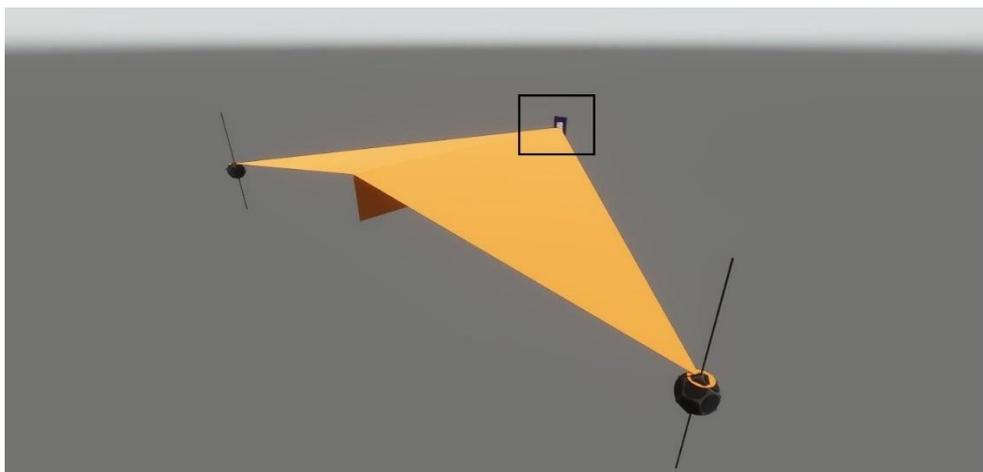
Para isso, foi feita a modelagem em 3D da geometria de posicionamento dos equipamentos conforme a norma ABNT NBR ISO 16283-3 (2021), com o software SketchUp, e a previsão de localização da fonte sonora. Em seguida, o modelo foi exportado para o aplicativo Augin, via *plugin* disponibilizado pelo próprio Augin para plataformas 3D, e utilizado como um gabarito no local de ensaio. A Figura 23 ilustra o 3D da geometria.

Figura 23 - 3D da geometria de posicionamento dos equipamentos



Fonte: a autora (2023)

Após, através da plataforma Augin Hub, foi inserido o *Reference Tracker*, que é um apoio visual para referenciar automaticamente um modelo 3D na escala 1:1 em realidade aumentada, baseado em um ponto de referência. Nesse caso, o *Reference Tracker* ficou localizado no centro geométrico da fachada, conforme indicado na Figura 24.

Figura 24 - Indicação do *Reference Tracker* na plataforma Augin Hub

Fonte: a autora (2023).

Após a exportação do modelo para o aplicativo no dispositivo móvel, será possível visualizar o arquivo 3D em escala real e analisar se houve perda de informações no processo de exportação. Após essa análise e verificação do modelo, será feito o posicionamento dos equipamentos no local de ensaio de duas formas:

- Modo atual (modo manual, com a utilização de equipamentos de medição dimensional – trena metálica e trena a laser);
- e quando auxiliados pela tecnologia de RA no dispositivo móvel.

Vale destacar que não foram realizados ensaios de isolamento ao ruído aéreo nas amostras; foi realizado apenas o posicionamento dos equipamentos conforme descrito em norma, para posterior avaliação.

Após, com o ensaio de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) é feita uma comparação entre o modo de ensaio padrão e o modo de ensaio utilizando a tecnologia de realidade aumentada para posicionar os equipamentos. Optou-se pela realização do teste comparativo, pois assim é possível identificar qual é a opção mais eficiente em termos de tempo, recursos e resultados. Além disso, pode ser útil para entender melhor como cada opção se compara em relação a outras e para avaliar quais são as melhores escolhas.

Desse modo, a avaliação através do ensaio de R&R permitirá analisar parâmetros de precisão, tempo, possibilidade de implementação, vantagens, desvantagens, dificuldades e potencialidades. A análise dessas variáveis será feita através do método ANOVA de dois fatores.

Na análise de variância (ANOVA), o valor da estatística F é comparado com um valor crítico de F, o qual depende do número de grupos analisados, do tamanho da amostra e do nível de significância selecionado. Se o valor da estatística F for maior do que o valor crítico de F, a hipótese nula é rejeitada, o que indica que há uma diferença significativa entre os grupos. Por outro lado, se o valor da estatística F for menor ou igual ao valor crítico de F, a hipótese nula não é rejeitada, não havendo evidências suficientes para concluir que há diferenças significativas entre os grupos (STAHLE, 1989).

Para proceder com o estudo, é necessário assumir alguns pressupostos: as amostras são aleatórias e independentes entre si e a distribuição é normal.

Foram, também, elaboradas as seguintes hipóteses para esse estudo:

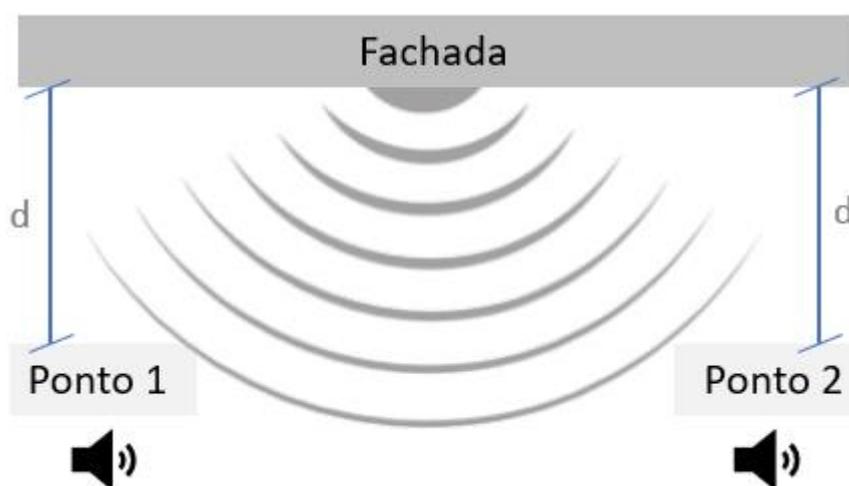
- Hipótese nula (H_0): não há diferenças significativas entre as médias dos grupos;
- Hipótese alternativa: a média de um grupo é maior ou menor do que a média dos outros grupos, ou pelo menos um dos grupos tem uma média diferente dos demais;
- $\alpha = 0,05$

3.1 Estudos de caso representativos

Os estudos de caso escolhidos para análise da viabilidade da RA seguiram os seguintes critérios:

- Fachada térrea e de fácil acesso, para que não se tenham interferências no estudo e seja possível realizar o posicionamento dos equipamentos corretamente;
- Com espaço hábil para a realização do trabalho;
- Cinco amostras e, no mínimo, três operadores conforme requisito do Manual de Referência para Análise dos Sistemas de medição (AIAG, 2010).
- Posicionamento da fonte sonora em dois pontos na fachada, conforme a ABNT NBR ISO 16283-3, para medição da distância (d) nos dois pontos (Figura 25).

Figura 25 - Esquema, em planta, do posicionamento dos dois pontos



Fonte: a autora (2023).

Nas amostras em que há um peitoril na esquadria, a dimensão (em cm) do peitoril foi somada aos resultados das medições de cada ponto medido com a realidade aumentada, para que se tivesse uma comparação coerente com o ponto manual, visto que é considerada a distância em relação a fachada e as medições foram realizadas tendo como referência a base inferior da fachada (e não a esquadria).

Abaixo seguem as informações referentes a cada amostra:

▪ Amostra 01 (Figura 26): A amostra está inserida dentro do campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e trata-se de uma fachada que abriga um escritório. A fachada é construída em alvenaria, com esquadria com altura de 1,65m e largura de 2,96m, perfis metálicos e vidro simples, abertura do tipo basculante e peitoril de 0,04 cm. Possui colunas de tijolos sem revestimento e pintura no restante da fachada. No entorno tem uma calçada de cerca de 70 cm de largura e gramado com árvores nas proximidades, além de uma via de acesso de veículos, porém não são elementos que interferem na realização das medições.

Figura 26 - Amostra 01



Fonte: a autora (2023).

▪ Amostra 02 (Figura 27): Também está inserida dentro do campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e trata-se de uma fachada que abriga salas de laboratório. A fachada é construída em alvenaria e com adição de

brises metálicos, com esquadria com altura de 1,72m e largura de 4,52m, e um peitoril de 25 cm de espessura, além de perfis metálicos e vidro insulado. No entorno há uma calçada de 2,10 m e uma área de jardim com árvores, que não interferem na realização das medições.

Figura 27 - Amostra 02



Fonte: a autora (2023).

- Amostra 03 (Figura 28): Também está inserida dentro do campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e trata-se de uma fachada que abriga salas de escritório. A fachada é em alvenaria, com esquadria com altura de 1,95m e largura de 1,80m, e peitoril com 14 cm de espessura; perfis metálicos e vidro simples, abertura do tipo basculante. Há uma calçada de cerca de 80 cm de largura e

no entorno há uma área de jardim e algumas árvores nas proximidades, que não interferem na realização das medições.

Figura 28 - Amostra 03



Fonte: a autora (2023).

- Amostra 04 (Figura 29): Também está inserida dentro do campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e trata-se de uma fachada que abriga uma sala de escritório. A fachada é em alvenaria e sem revestimento; possui uma esquadria com altura de 2,0m e largura de 2,26m, do tipo basculante e com vidro simples, e um peitoril de 13cm de espessura. No entorno há apenas pavimentação e não há vegetação e nem elementos volumétricos nas proximidades que possam interferir nas medições.

Figura 29 - Amostra 04



Fonte: a autora (2023).

- Amostra 05 (Figura 30): Também está inserida dentro do campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e trata-se de uma fachada que abriga uma sala multiuso. A fachada é em alvenaria, com esquadria com altura de 2,45m e largura de 3,66m, do tipo basculante e com vidro simples, e um peitoril de 0,4 cm de espessura. No entorno há vegetação (árvores e grama) e calçadas para trânsito de pedestres/alunos. Não há elementos volumétricos nas proximidades que possam interferir nas medições.

Figura 30 - Amostra 05



Fonte: a autora (2023).

Após escolhidos os estudos de caso, iniciaram-se as análises em cada amostra, conforme as etapas abaixo:

- Verificação do centro geométrico da esquadria na fachada;
- Colocação do *Reference Tracker* no centro geométrico da esquadria;
- Posicionamento da fonte sonora no modo padrão (manualmente, utilizando trena metálica) nos dois pontos (ponto 1 e ponto 2), conforme a ABNT NBR 16283-3;

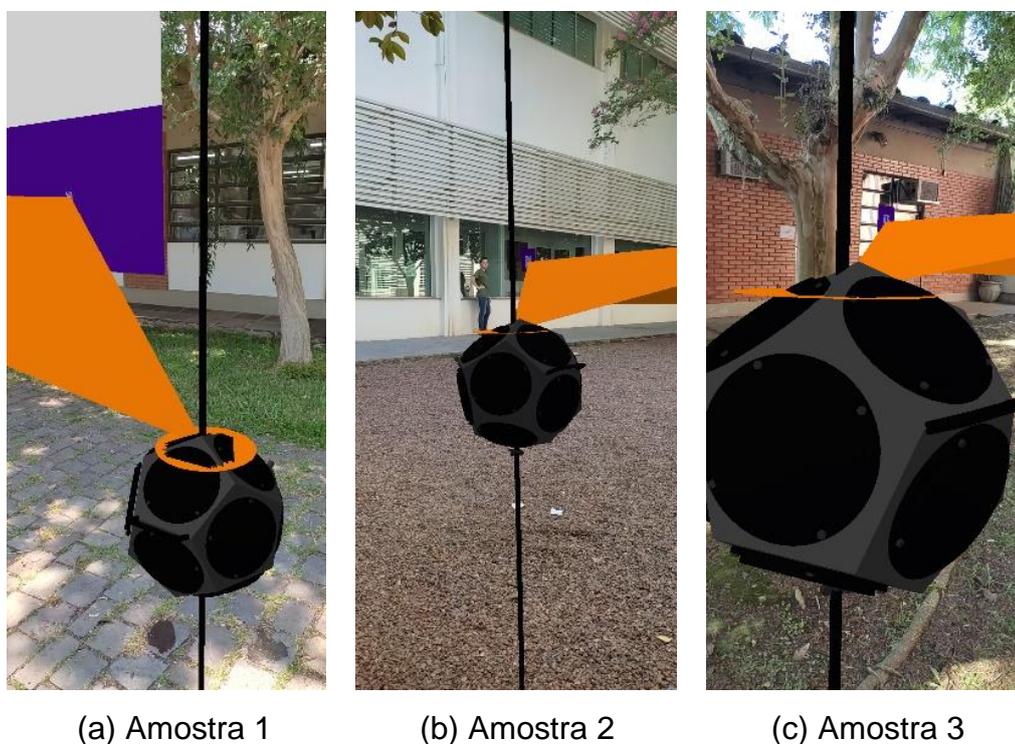
- Medição da distância em relação à fachada, nos dois pontos, utilizando trena a laser;
- Posicionamento, novamente, da fonte sonora nos dois pontos, utilizando o aplicativo de Realidade Aumentada Augin;
- Medição, novamente, da distância em relação à fachada, nos dois pontos, utilizando trena a laser;

Equipamentos utilizados: trena metálica, trena a laser, giz para marcação da localização da fonte sonora.

O posicionamento de fonte sonora, nos dois pontos, foi realizado três vezes pelos operadores, tanto no modo manual quanto utilizando o aplicativo Augin. Após, foi medida a distância em relação a fachada e os valores anotados na “Folha de Coleta de Dados”. O posicionamento da fonte era marcado diretamente no chão, com auxílio de um giz.

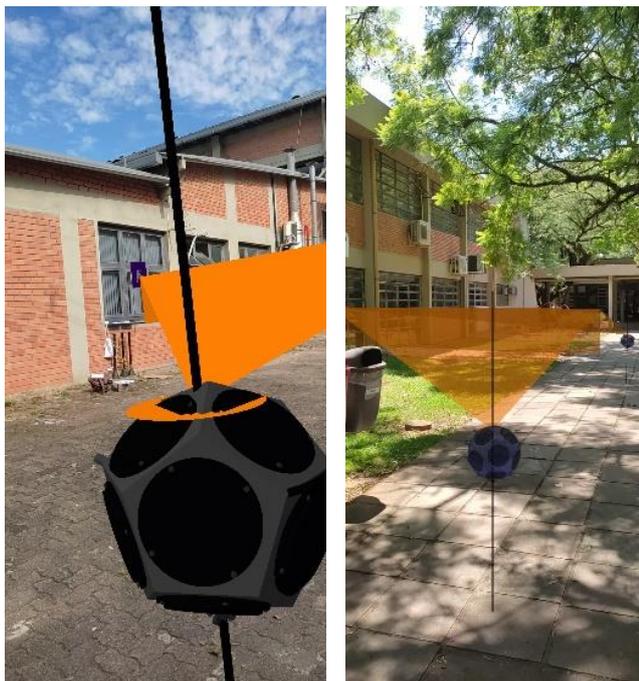
As Figura 31 e 32 apresentam as imagens das medições de cada amostra quando utilizado o aplicativo Augin para realidade aumentada:

Figura 31 - Imagens das amostras com o aplicativo Augin



Fonte: a autora (2023).

Figura 32 - Imagens das amostras com o aplicativo Augin



(d) Amostra 4

(e) Amostra 5

Fonte: a autora (2023).

4 RESULTADOS

Abaixo são apresentados os resultados das medições em campo da distância em relação a fachada, com as medições expressas em metros para o ponto 1 e para o ponto 2, no modo manual e utilizando o aplicativo Augin. Em seguida é apresentada a análise de variância pelo método ANOVA, análise do tempo das medições e a estimativa do índice R&R(%).

4.1.1 Verificação dos pontos de posicionamento da fonte sonora

As tabelas 2 a 5 apresentam os resultados (em metros) das medições da distância em relação a fachada de cada ponto onde a fonte sonora deve estar posicionada (ponto 1 e ponto 2).

Desse modo, abaixo segue uma análise comparativa entre o modo manual e a realidade aumentada, para o ponto 1 e para o ponto 2. Os pontos destacados em **negrito** são as medidas que atenderam ao requisito da ABNT NBR ISO 16283-3, no que se refere a distância mínima em relação à fachada – 7m, e os pontos destacados em *itálico* são os que não atenderam a esse requisito. Ainda, os pontos destacados

em cinza se referem a valores discrepantes nas medições. Primeiramente, seguem as tabelas 2 e 3 referentes às medições no ponto 1.

Tabela 2 - Modo manual: resultados das medições para o Ponto 1 (em metros)

Modo manual						
Amostra – ponto 1						
Avaliador/ Medição n°		1	2	3	4	5
A	1A	7,102 m	7,070 m	7,255 m	7,028 m	7,107 m
	2A	7,334 m	7,008 m	7,074 m	7,100 m	7,201 m
	3A	7,190 m	7,324 m	7,070 m	7,227 m	7,313 m
B	1B	6,980 m	6,988 m	6,978 m	7,015 m	7,072 m
	2B	7,204 m	7,110 m	7,060 m	7,235 m	7,150 m
	3B	7,201 m	7,152 m	7,283 m	7,207 m	7,067 m
C	1C	7,089 m	7,226 m	7,146 m	7,071 m	7,241 m
	2C	7,580 m	6,998 m	7,110 m	7,304 m	7,321 m
	3C	7,316 m	7,139 m	7,259 m	7,025 m	7,344 m

Fonte: a autora (2023).

Tabela 3 - Realidade Aumentada: resultados das medições para o Ponto 1

Realidade Aumentada						
Amostra – ponto 1						
Avaliador/ Medição n°		1	2	3	4	5
A	1A	7,567 m	7,287 m	7,110 m	7,153 m	7,238 m
	2A	6,707 m	7,700 m	7,422 m	6,379 m	7,327 m
	3A	7,380 m	7,088 m	7,304 m	7,359 m	7,331 m
B	1B	6,744 m	6,630 m	7,340 m	7,010 m	7,211 m
	2B	6,800 m	7,474 m	7,248 m	7,644 m	6,771 m
	3B	6,770 m	7,493 m	7,078 m	6,342 m	6,420 m
C	1C	6,366 m	7,631 m	7,341 m	7,628 m	7,701 m
	2C	6,577 m	7,542 m	7,270 m	7,274 m	7,487 m
	3C	7,141 m	7,281 m	7,274 m	7,565 m	7,430 m

Fonte: a autora (2023).

Avaliando as tabelas referentes as medições no ponto 1, é possível observar que os valores entre o posicionamento no modo manual e com o aplicativo de realidade aumentada são bem semelhantes, salvo alguns valores discrepantes destacados em cinza; que tiveram a diferença superior a 0,5 cm. Esse valor se baseou no estudo de Endres, Brião e Fernandes (2021), que testaram a precisão do aplicativo

Augin através de alguns testes e chegaram a conclusão que este pode ter uma variação de cerca de 0,5 cm. Entretanto, vale destacar que outros fatores podem influenciar nessa variação, como o *software* utilizado e as configurações do próprio dispositivo móvel (SANTOS et al., 2021). Além disso, outra fonte de variação é devido a resolução do equipamento utilizado para medir a distância (trena a laser) e a percepção do operador, pois ambos os processos (modo manual e realidade aumentada) dependem do operador para fazer a medição das distâncias e realizar o posicionamento dos equipamentos.

No que se refere ao atendimento ao requisito da ABNT NBR ISO 16283-3 de distância em relação a fachada – 7 m, o ponto 1 no modo manual teve quatro medições que não atingiram esse requisito, enquanto que com o aplicativo de realidade aumentada foram 11 medições. Essas diferenças podem ser justificadas pela precisão do aplicativo, bem como do modo como o operador realizou o processo de posicionamento e medição das distâncias.

As tabelas 4 e 5 apresentam os resultados das medições da distância em relação a fachada para o ponto 2:

Tabela 4 - Modo manual: resultados das medições para o Ponto 2

Modo manual						
		Amostra – ponto 2				
Avaliador/ Medição n°		1	2	3	4	5
A	1A	7,383 m	7,058 m	7,485 m	7,015 m	7,111 m
	2A	7,155 m	7,356 m	7,154 m	7,420 m	7,145 m
	3A	7,070 m	7,279 m	7,210 m	7,395 m	7,252 m
B	1B	7,003 m	7,272 m	7,150 m	7,281 m	7,053 m
	2B	7,301 m	6,920 m	6,997 m	7,377 m	7,068 m
	3B	7,032 m	7,066 m	7,093 m	7,258 m	6,997 m
C	1C	7,386 m	7,001 m	7,080 m	7,290 m	7,158 m
	2C	6,994 m	7,003 m	7,203 m	7,248 m	7,265 m
	3C	7,188 m	6,988 m	7,237 m	7,418 m	7,307 m

Fonte: a autora (2023).

Tabela 5 - Realidade Aumentada: resultados das medições para o Ponto 2

Realidade Aumentada						
		Amostra – ponto 2				
Avaliador/ Medição n°		1	2	3	4	5
A	1A	7,608 m	7,669 m	7,956 m	6,219 m	6,646 m
	2A	7,241 m	7,785 m	7,426 m	7,427 m	6,917 m
	3A	7,108 m	7,410 m	7,304 m	7,023 m	7,098 m
B	1B	6,938 m	7,030 m	6,946 m	7,318 m	7,100 m
	2B	6,920 m	6,988 m	7,280 m	6,598 m	7,270 m
	3B	7,210 m	7,140 m	7,216 m	7,839 m	7,370 m
C	1C	7,147 m	7,093 m	7,341 m	6,590 m	7,154 m
	2C	7,211 m	7,454 m	7,580 m	7,493 m	6,942 m
	3C	6,667 m	7,379 m	7,395 m	6,752 m	7,169 m

Fonte: a autora (2023).

Para o ponto 2 também avaliou-se os pontos discrepantes, com resultados da diferença entre as medições superiores a 0,5 cm. No que se refere ao atendimento ao requisito da ABNT NBR ISO 16283-3 de distância em relação a fachada – 7 m, o ponto 2 do modo manual teve quatro medições que não atingiram esse requisito, enquanto que com o aplicativo de realidade aumentada foram 11 medições. Essas diferenças podem ser justificadas pela precisão do aplicativo, bem como do modo como o operador realizou o processo de posicionamento e medição das distâncias.

4.1.2 Resultados da análise de variância entre operadores e amostras

Para interpretar os resultados do ANOVA de dois fatores, é necessário observar as estatísticas fornecidas pela análise. Nesse caso, a estatística F é calculada para cada fator e para a interação entre os fatores. É importante lembrar que um valor significativo de F não necessariamente significa que há uma diferença significativa entre todos os grupos, mas sim que pelo menos um dos grupos é significativamente diferente dos demais (QUEIROZ, 2019).

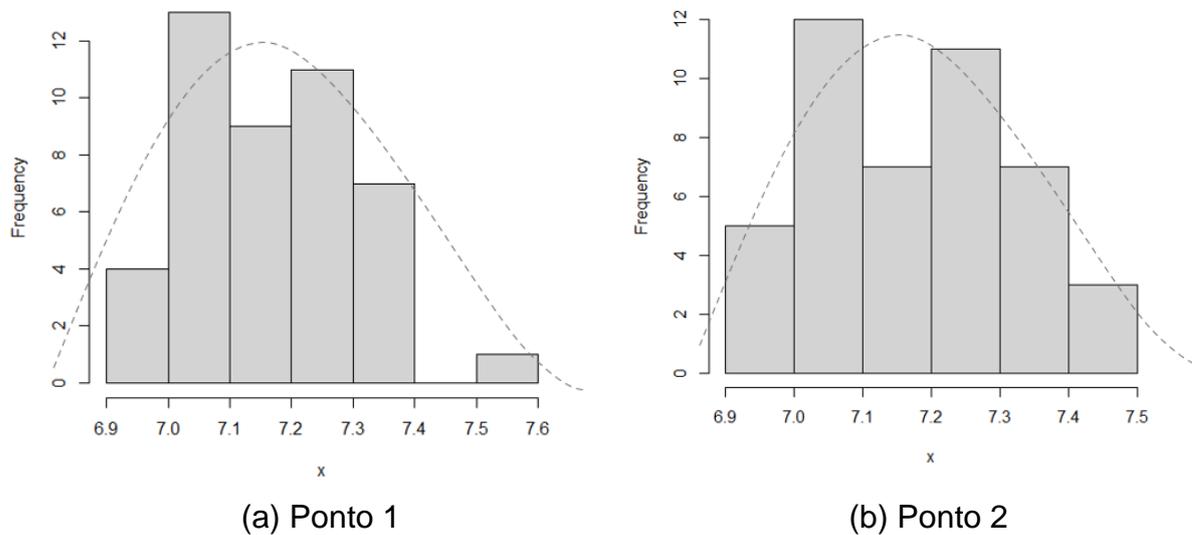
Nesse contexto, esse estudo foi utilizado para analisar se teve variação significativa entre os pontos de medição e os operadores, assim, para aqueles resultados que obtiverem um resultado de p-valor menor que 0,05 considera-se sua variabilidade como significativa dentro da análise (BILGIN, 2015).

A partir dessa coleta de dados, foi realizado a avaliação da variância para cada tabela, e os resultados descritos abaixo. Conforme o Manual MSA (AIAG, 2010), a análise ANOVA é composta pelos seguintes fatores:

“Coluna Fonte é a causa da variação;
 Coluna GL são os *graus de liberdade* associados com a fonte;
 Coluna SQ ou *soma dos quadrados* são os desvios em torno da média da fonte;
 Coluna QM ou *quadrado médio* é a soma dos quadrados dividida pelos graus de liberdade;
 Coluna do *quociente F*, calculada para determinar a significância estatística do valor da fonte (AIAG, 2010).”

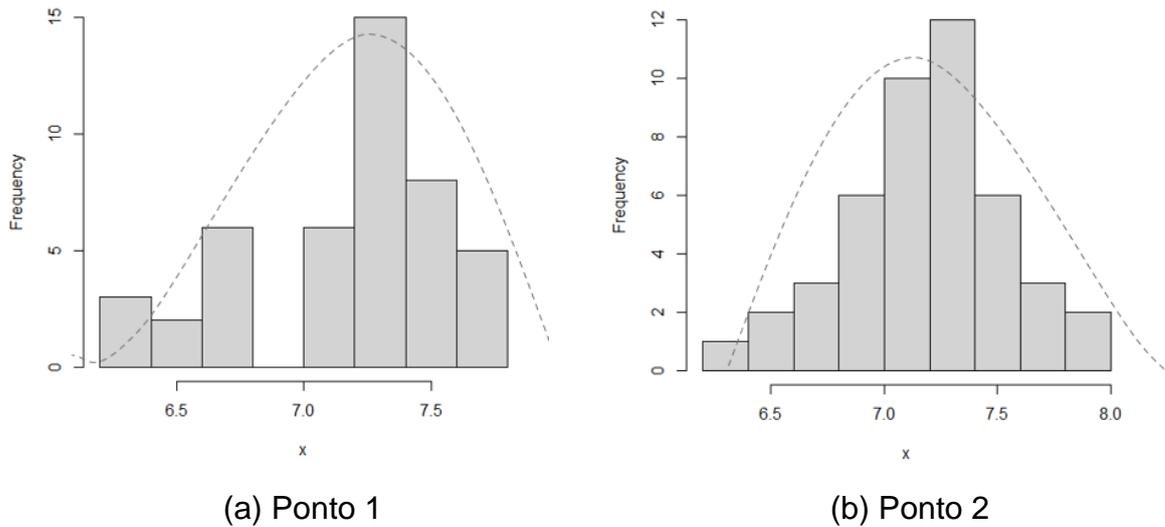
Primeiramente, foram plotados os histogramas dos dados (Figura 33 e Figura 34) para verificar a distribuição dos dados coletados, sendo o “x” os pontos medidos. É possível observar que todos possuem uma distribuição normal e não seguem uma tendência, conforme o pressuposto do estudo. Os histogramas foram plotados através do *software R*.

Figura 33 - Histograma dos dados. Modo manual



Fonte: a autora (2023).

Figura 34 - Histograma dos dados. Realidade aumentada



Fonte: a autora (2023).

No método ANOVA uma estatística F é calculada para um parâmetro – nesse caso, as medições da distância da fachada em relação às amostras e aos operadores – e comparada a um valor crítico a um certo nível de confiança, dependendo dos graus de liberdade. Para esse estudo admitiu-se um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Desse modo, se o valor de F for maior do que o F crítico, conclui-se que o parâmetro é significativo (QUEIROZ, 2019) (MONTGOMERY, 2012). As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados da análise de variância para as medições no modo manual.

Tabela 6 - Modo manual: resultados do ANOVA para o Ponto 1

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Operador	0,071783244	2	0,035891622	2,207755123	0,127498662	3,315829501
Amostra	0,080450089	4	0,020112522	1,237155671	0,316280756	2,689627574
Interações OxA	0,064810978	8	0,008101372	0,498329274	0,84761662	2,266163274
Dentro (erro aleatório)	0,487712	30	0,016257067			
Total	0,704756311	44				

Fonte: a autora (2023).

Tabela 7 - Modo manual: resultados do ANOVA para o Ponto 2

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Operador	0,087824178	2	0,043912089	2,4658138	0,101985046	3,315829501
Amostra	0,190048578	4	0,047512144	2,667969218	0,051376796	2,689627574
Interações OxA	0,138743822	8	0,017342978	0,973867448	0,474720652	2,266163274
Dentro (erro aleatório)	0,534250667	30	0,017808356			
Total	0,950867244	44				

Fonte: a autora (2023).

Através da análise de F e F crítico ($F < F_{\text{crítico}}$) foi possível observar que os resultados das amostras e dos operadores não possuem uma diferença significativa entre si. Essa informação é confirmada pelo valor-P, que possui resultados superiores a 0,05 em todos os parâmetros analisados. Desse modo, pode-se também afirmar que, por não haver interações entre operador e amostra, cada operador mediu a amostra especificamente. Devido ao fato de os resultados não terem valores significativos, não foi necessário fazer o Teste de Tukey, comumente realizado, que serve para detalhar quais parâmetros diferem estatisticamente (SOUZA; JUNIOR; FERREIRA, 2012).

Em seguida, as tabelas 8 e 9 apresentam os resultados da análise de variância para as medições utilizando a realidade aumentada.

Tabela 8 - Realidade Aumentada: resultados do ANOVA para o Ponto 1

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Operador	0,739745644	2	0,369872822	3,282426139	0,051387971	3,315829501
Amostra	1,066141778	4	0,266535444	2,365361436	0,075274493	2,689627574
Interações OxA	1,240460356	8	0,155057544	1,376053893	0,246782584	2,266163274
Dentro (erro aleatório)	3,380482667	30	0,112682756			
Total	6,426830444	44				

Fonte: a autora (2023).

Tabela 9 - Realidade Aumentada: resultados do ANOVA para o Ponto 2

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Operador	0,1112176	2	0,0556088	0,551228128	0,581967191	3,315829501
Amostra	0,907071022	4	0,226767756	2,247859428	0,087401325	2,689627574
Interações OxA	1,255142844	8	0,156892856	1,555217071	0,180437539	2,266163274
Dentro (erro aleatório)	3,026449333	30	0,100881644			
Total	5,2998808	44				

Fonte: a autora (2023).

Da mesma forma que o modo manual, os resultados utilizando a tecnologia de realidade aumentada também não tiveram valores significativos, sendo $F > F_{crítico}$. Além disso, o p-valor manteve-se superior a 0,05, confirmando os resultados do parâmetro F em todas as fontes avaliadas. Pode-se também afirmar que, por não haver interações entre operador e amostra, cada operador mediu a amostra especificamente. Também não foi necessário fazer o Teste de Tukey, comumente realizado, que serve para detalhar quais parâmetros diferem estatisticamente (SOUZA; JUNIOR; FERREIRA, 2012).

Na análise com o método ANOVA, a realidade aumentada teve resultados semelhantes ao modo manual, o que indica que as medições não tiveram grandes diferenças.

Ainda, foi analisado qual amostra e qual operador teve o maior desvio, sendo destacados em cinza nas tabelas 10, 11, 12 e 13.

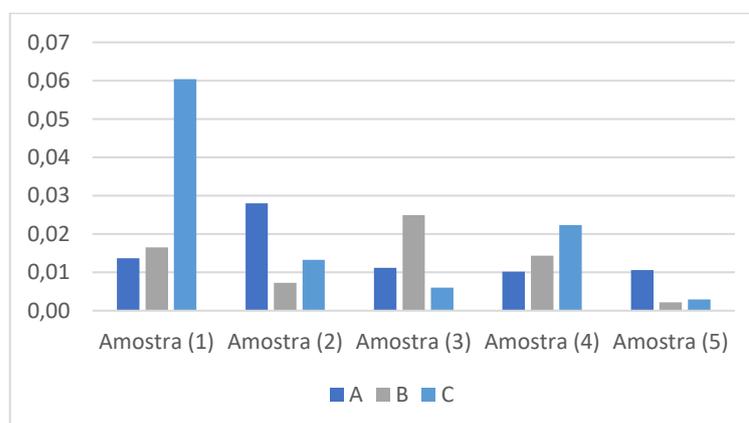
Tabela 10 - Análise de maior variância (modo manual – ponto 1)

RESUMO	Amostra (1)	Amostra (2)	Amostra (3)	Amostra (4)	Amostra (5)	Total
<i>1ª</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,626	21,402	21,399	21,355	21,621	107,403
Média	7,209	7,134	7,133	7,118	7,207	7,1602
Variância	0,013717	0,028036	0,011167	0,010152	0,010636	0,012184
<i>1B</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,385	21,25	21,321	21,457	21,289	106,702
Média	7,128	7,083	7,107	7,152	7,096	7,113
Variância	0,016504	0,007257	0,024913	0,014341	0,002166	0,009949
<i>1C</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,985	21,363	21,515	21,4	21,906	108,169
Média	7,328	7,121	7,172	7,133	7,302	7,211
Variância	0,060384	0,013239	0,006044	0,022374	0,002923	0,023079
<i>Total</i>						
Contagem	9	9	9	9	9	
Soma	64,996	64,015	64,235	64,212	64,816	
Média	7,222	7,113	7,137	7,135	7,202	
Variância	0,030248	0,012652	0,011325	0,011935	0,011878	

Fonte: a autora (2023).

A Figura 35 apresenta o gráfico com a variação entre os operadores no ponto 1 para o modo manual. Observa-se que a maior variação aconteceu na Amostra 1 e com o operador C.

Figura 35 - Modo manual: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 1



Fonte: a autora (2023).

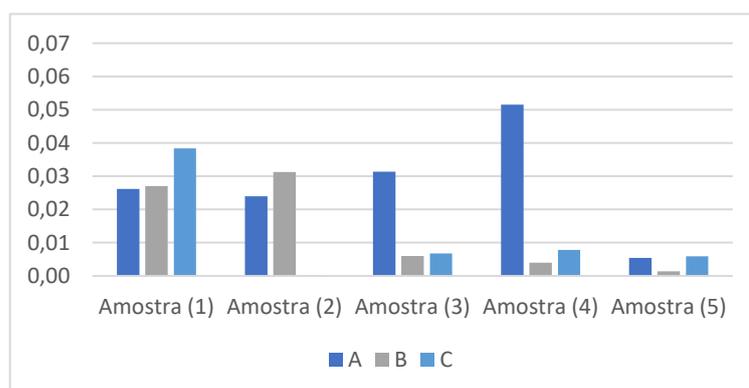
Tabela 11 - Análise de maior variância (modo manual – ponto 2)

RESUMO	Amostra (1)	Amostra (2)	Amostra (3)	Amostra (4)	Amostra (5)	Total
<i>1ª</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,608	21,693	21,849	21,83	21,508	108,488
Média	7,203	7,231	7,283	7,277	7,169	7,233
Variância	0,026196	0,023929	0,031387	0,051508	0,005414	0,021787
<i>1B</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,336	21,258	21,24	21,916	21,118	106,868
Média	7,112	7,086	7,08	7,305	7,039	7,125
Variância	0,027001	0,031276	0,005979	0,003984	0,001400	0,019286
<i>1C</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,568	20,992	21,52	21,956	21,73	107,766
Média	7,189	6,997	7,173	7,319	7,243	7,184
Variância	0,038417	6,633E-05	0,006822	0,007841	0,005902	0,020573
<i>Total</i>						
Contagem	9	9	9	9	9	
Soma	64,512	63,943	64,609	65,702	64,356	
Média	7,168	7,105	7,179	7,300	7,151	
Variância	0,024701	0,024254	0,018790	0,016179	0,011178	

Fonte: a autora (2023).

A Figura 36 apresenta o gráfico com a variação entre os operadores no ponto 2 para o modo manual. Observa-se que a maior variação aconteceu na Amostra 4 e com o operador A.

Figura 36 - Modo manual: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 2



Fonte: a autora (2023)

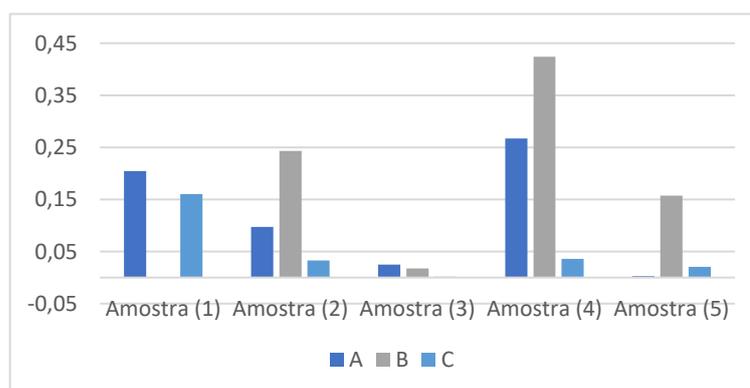
Tabela 12 - Análise de maior variância (realidade aumentada – ponto 1)

RESUMO	Amostra (1)	Amostra (2)	Amostra (3)	Amostra (4)	Amostra (5)	Total
<i>1ª</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,654	22,075	21,836	20,891	21,896	108,352
Média	7,218	7,358	7,279	6,964	7,299	7,223
Variância	0,204583	0,097452	0,024817	0,266985	0,002764	0,105461
<i>1B</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	20,314	21,597	21,666	20,996	20,402	104,975
Média	6,771	7,199	7,222	6,999	6,801	6,998
Variância	0,000785	0,242911	0,017668	0,423897	0,157080	0,159098
<i>1C</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	20,084	22,454	21,885	22,467	22,618	109,508
Média	6,695	7,485	7,295	7,489	7,539	7,301
Variância	0,160540	0,033090	0,001591	0,035661	0,020414	0,141661
<i>Total</i>						
Contagem	9	9	9	9	9	9
Soma	62,052	66,126	65,387	64,354	64,916	
Média	6,895	7,347	7,265	7,150	7,213	
Variância	0,151386	0,108733	0,012120	0,246339	0,151509	

Fonte: a autora (2023).

A Figura 37 apresenta o gráfico com a variação entre os operadores no ponto 2 para o modo manual. Observa-se que a maior variação aconteceu na Amostra 4 e com o operador B.

Figura 37 - RA: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 1



Fonte: a autora (2023)

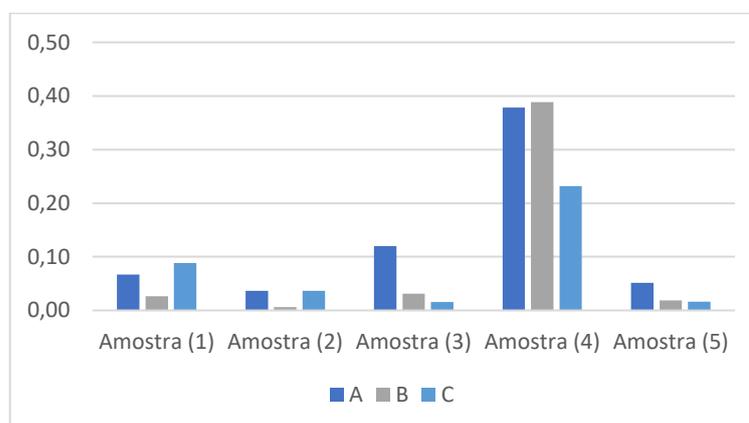
Tabela 13 - Análise de maior variância (realidade aumentada – ponto 2)

RESUMO	Amostra (1)	Amostra (2)	Amostra (3)	Amostra (4)	Amostra (5)	Total
<i>1ª</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,957	22,864	22,686	20,669	20,661	108,837
Média	7,319	7,621	7,562	6,890	6,887	7,256
Variância	0,067063	0,036860	0,120148	0,378149	0,051751	0,200875
<i>1B</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,068	21,158	21,442	21,755	21,74	107,163
Média	7,023	7,053	7,147	7,252	7,247	7,144
Variância	0,026401	0,006161	0,031425	0,388320	0,018633	0,076965
<i>1C</i>						
Contagem	3	3	3	3	3	15
Soma	21,025	21,926	22,316	20,835	21,265	107,367
Média	7,008	7,309	7,439	6,945	7,088	7,158
Variância	0,088405	0,036290	0,015710	0,231789	0,016116	0,092779
<i>Total</i>						
Contagem	9	9	9	9	9	9
Soma	64,05	65,948	66,444	63,259	63,666	63,666
Média	7,117	7,328	7,383	7,029	7,074	7,074
Variância	0,068534	0,080663	0,075825	0,278083	0,045996	0,045996

Fonte: a autora (2023).

A Figura 38 apresenta o gráfico com a variação entre os operadores no ponto 2 para o modo manual. Observa-se que a maior variação aconteceu na Amostra 4 e com o operador B.

Figura 38 - RA: gráfico referente a variação dos operadores – ponto 2



Fonte: a autora (2023).

Analisando os resultados das tabelas 10, 11, 12 e 13 observa-se que os maiores desvios aconteceram:

- na amostra 1:
 - com o operador C, no modo manual;

Nesse caso, pode-se citar a geometria da fachada como uma possível influência na medição, pois havia uma saliência (detalhe da fachada). Além disso, o espaço com vegetação bem em frente a fachada pode ter contribuído para esse maior desvio.

- na amostra 4:
 - com o operador A, no modo manual
 - com o operador B, com a realidade aumentada.

No caso da amostra 4, observou-se uma variância maior tanto no modo manual quanto com o uso da realidade aumentada. Uma possível influência nas medições se deve a geometria da fachada e a pavimentação nas proximidades, que possuíam superfícies irregulares.

4.1.3 Análise do tempo das medições

Outro parâmetro analisado no estudo foi o tempo para posicionar a fonte sonora nos dois pontos (tabela 14 e tabela 15), no modo manual e com o aplicativo Augin para realidade aumentada.

Tabela 14 - Modo manual: tempo para posicionamento da fonte sonora

Modo manual						
		Amostra				
Avaliador/ Medição n°		1	2	3	4	5
		Ponto ½				
A	1 ^a	01:46:15	00:58:07	00:49:29	01:07:15	00:59:00
	2 ^a	00:47:19	00:56:28	00:51:33	01:28:53	00:49:38
	3 ^a	01:05:00	00:50:18	00:48:36	00:51:57	00:48:21
B	1B	01:36:00	01:30:22	01:26:15	01:29:25	01:12:00
	2B	01:55:00	01:49:41	01:02:06	01:29:41	01:10:07
	3B	01:08:47	01:24:22	01:23:28	01:02:09	01:02:09
C	1C	01:14:08	01:04:50	01:12:47	01:01:40	00:49:19
	2C	01:13:12	01:03:08	00:59:02	01:19:00	00:57:59
	3C	01:09:47	01:08:03	00:57:34	00:55:09	00:44:15

Fonte: a autora (2023).

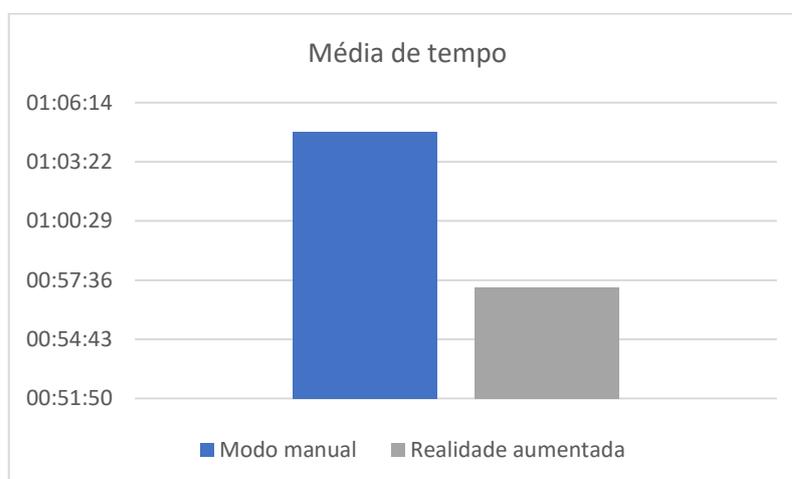
Tabela 15 - Realidade aumentada: tempo para posicionamento da fonte sonora

Realidade Aumentada						
Avaliador/ Medição n°		Amostra				
		1	2	3	4	5
		Ponto ½				
A	1ª	00:49:29	00:47:32	00:44:09	00:42:12	00:45:25
	2ª	01:00:18	00:47:11	00:52:35	01:03:00	00:57:15
	3ª	00:51:07	00:54:05	00:50:34	00:46:07	00:37:00
B	1B	00:56:00	00:58:31	00:58:37	01:00:37	00:52:19
	2B	01:09:00	00:55:28	01:06:34	00:55:28	00:55:19
	3B	01:03:27	00:59:44	00:59:34	00:57:53	01:10:52
C	1C	00:55:25	00:53:59	00:57:19	01:02:50	01:00:05
	2C	01:05:21	00:56:50	00:52:22	01:07:00	01:00:25
	3C	01:03:47	00:52:21	00:53:28	00:52:47	00:57:21

Fonte: a autora (2023).

Através dos resultados, é possível observar que a média de tempo para realizar o posicionamento dos equipamentos no modo manual foi de 01:04:50, enquanto utilizando o aplicativo de realidade aumentada foi de 00:57:15, ou seja, cerca de 12% mais rápido. O fato de a tecnologia de realidade aumentada otimizar o tempo para execução de atividades tem sido alvo de estudo de diversos autores (CHALHOUB; AYER; OLIVEIRA; CUPERSCHMID, 2019) e confirma que o uso dessa tecnologia tem se mostrado eficaz. A Figura 39 apresenta um comparativo da média de tempo entre os dois modos de posicionamento.

Figura 39 - Comparativo entre as médias de tempo



Fonte: a autora (2023).

. Embora tenha sido observada pouca diferença de tempo entre os métodos, é possível, futuramente, realizar estudos para otimizar ainda mais o tempo quando fazer o uso da realidade aumentada. Fatores como a precisão do aplicativo e o treinamento dos operadores devem ser considerados para aumentar a agilidade no uso da ferramenta.

4.1.4 Estimativa do índice R&R (%)

O índice GRR (*Gage Repeatability and Reproducibility*) é uma medida estatística usada para avaliar a variação em um processo de medição. É comumente utilizado em estudos de sistemas de medição para avaliar a confiabilidade de um sistema de medição ou instrumento de medição, sendo uma medida da variação que ocorre devido a dois componentes principais: a repetibilidade e a reprodutibilidade. (AIAG, 2010).

Um índice GRR baixo indica que o processo de medição é confiável e produz resultados consistentes e precisos. Por outro lado, um índice GRR alto indica que o processo de medição é menos confiável e produz resultados inconsistentes. O índice GRR é calculado como uma proporção da variação total de medição para a variação total da peça; geralmente é considerado aceitável se estiver abaixo de 30%, porém depende de sua aplicação específica (AIAG, 2010).

O cálculo do índice GRR envolve a coleta de dados de medição de um conjunto de peças e a análise desses dados usando uma análise de variância (ANOVA). Existem várias fórmulas diferentes usadas para calcular o índice GRR, dependendo do número de avaliadores e repetições que são usados no estudo de sistema de medição (TEIXEIRA, 2022). A equação (3) abaixo apresenta o cálculo utilizado neste estudo, além da análise pelo método ANOVA:

$$R\&R(\%) = \frac{\sigma_{\text{Sistema de medição}}}{\sigma_{\text{Total}}} \times 100 \quad (3)$$

Através dos cálculos, foi realizado o índice de GRR do modo manual e com a realidade aumentada para os dois pontos de posição da fonte, conforme descrito abaixo (Tabela 16, 17, 18 e 19):

Tabela 16 - GRR Modo manual: ponto 1

% GageR&R	Repetib.	SQ_O	10%
		SQ_O*P	9%
	Reprod.	SQ_E	69%
Total (%)			89%

Fonte: a autora (2023).

Tabela 17 - GRR Modo manual: ponto 2

% GageR&R	Repetib.	SQ_O	9%
		SQ_O*P	15%
	Reprod.	SQ_E	56%
Total (%)			80%

Fonte: a autora (2023).

Tabela 18 - GRR Realidade aumentada: ponto 1

% GageR&R	Repetib.	SQ_O	12%
		SQ_O*P	19%
	Reprod.	SQ_E	53%
Total (%)			83%

Fonte: a autora (2023).

Tabela 19 - GRR Realidade aumentada: ponto 2

% GageR&R	Repetib.	SQ_O	2%
		SQ_O*P	24%
	Reprod.	SQ_E	57%
Total (%)			83%

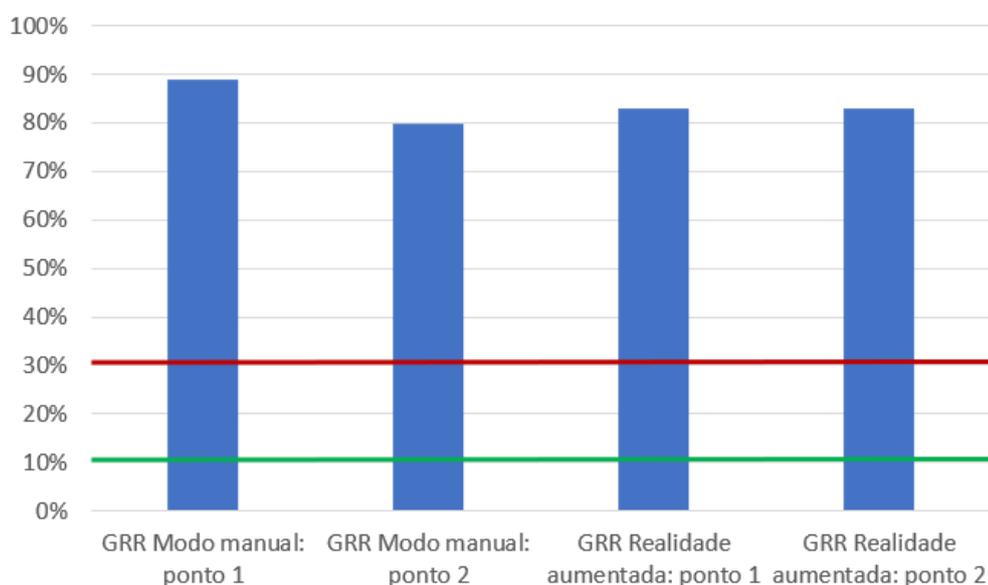
Fonte: a autora (2023).

Os resultados do índice GRR tiveram valores acima de 80% indicando, segundo o Manual MSA (AIAG, 2010) que o sistema de medição é considerado inaceitável. Esse resultado é semelhante ao obtido por DELGADO et al.(2018), no qual os autores calcularam o índice R&R (%) para o sistema de medição de uma empresa de embalagens e obtiveram um valor de 95,73% para o R&R. Esses resultados levaram à mesma conclusão de inadequação do sistema de medição.

Outro valor que contribuiu nessa variação foi a reprodutibilidade, referente aos operadores, também se assemelhando ao estudo de DELGADO et al. (2018). Isso indica que um ponto a ser trabalhado é a diferença de resultados entre os diferentes funcionários. Foi analisado o que poderia ter causado essa discrepância e o fator principal foi devido ao fato de essas medições acontecerem em campo, o que tem

influência de fatores externos e até da própria geometria da edificação. A Figura 40 apresenta os índices GR&R (%) e os limites conforme o Manual MSA.

Figura 40 - Gráfico do índice R&R



Fonte: a autora (2023).

Entretanto, embora não atenda aos requisitos de aceitação do Manual, o sistema de medição atende aos requisitos da ABNT NBR ISO 16283-3 no que se refere a distância da fonte sonora em relação a fachada – pelo menos 7m para o método da fonte sonora com alto falantes global. No caso do modo manual, cerca de 90% das medições atingiram os 7m, sendo possível corrigir os pontos que tiveram valores inferiores a esse mínimo. Utilizando o aplicativo de realidade aumentada esse percentual foi de cerca de 77%, podendo ser justificada pela precisão do aplicativo e pelas configurações do dispositivo móvel. Embora não seja possível fazer a correção da distância no ato do ensaio utilizando somente a realidade aumentada, o aplicativo se torna muito útil no que se refere a visualização prévia do local de ensaio.

4.1.4 Análise crítica do estudo

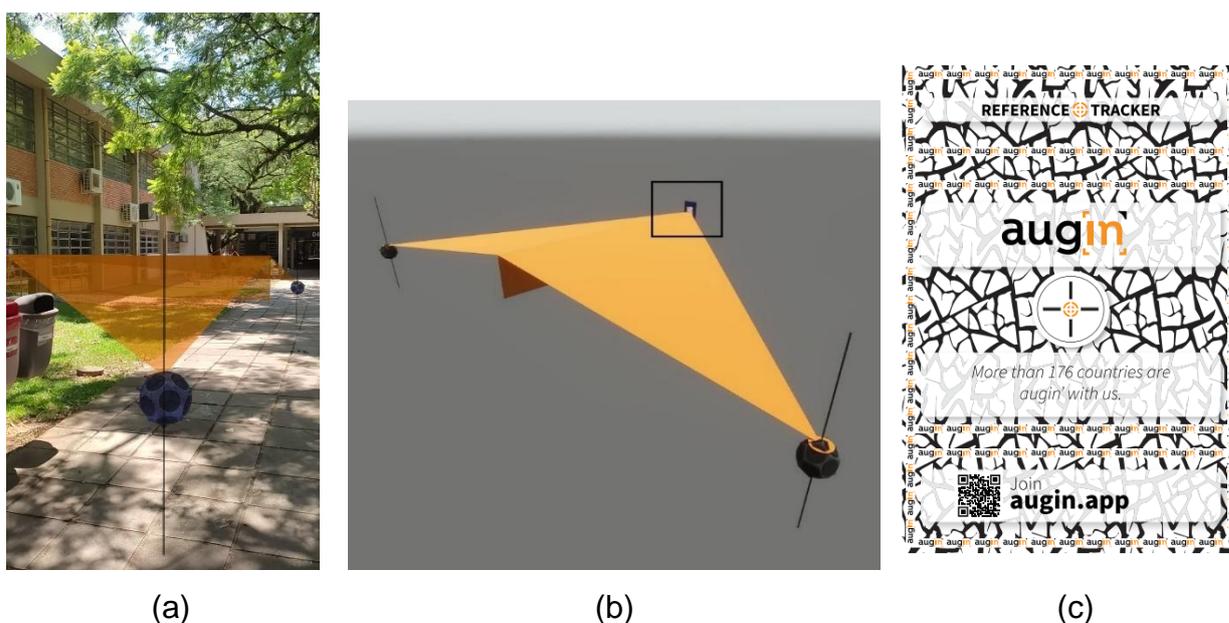
Através das análises, foi possível observar que o uso da realidade aumentada demanda menos tempo para o posicionamento dos equipamentos e permitiu visualizar previamente onde a fonte sonora ficaria localizada no espaço de ensaio, sendo uma vantagem no uso da tecnologia.

. Entretanto, não seria aplicável para a realização do ensaio de acústica de fachada, visto que não se mostrou muito precisa no que se refere a posição da fonte sonora, podendo não atingir o requisito mínimo de distância em relação à fachada especificado em norma.

Com o auxílio da realidade aumentada é possível situar a fonte sonora em uma posição relativamente próxima quando comparada com o modo manual. Porém, as significâncias na variação estatística indicam que utilizando somente a RA pode-se estar, em função do tempo e do operador, colocando a fonte em uma posição incorreta.

Embora não seja aplicável para a completa realização do ensaio de acústica de fachada, a realidade aumentada permite fazer uma análise prévia de qualquer local - utilizando o gabarito de geometria (Figura 41a e Figura 41b) e com uma via física do *Reference Tracker* (Figura 41c) – visto que na análise prévia não é necessário ter um posicionamento tão rigoroso. Desse modo, o uso do gabarito permitirá identificar interferências que podem influenciar no posicionamento dos equipamentos e até mesmo no resultado final do ensaio. Além disso, é uma ferramenta que contribui para a compreensão do método, podendo ser utilizada pelos próprios operadores, na realização de treinamentos em equipe e na comunicação com os clientes.

Figura 41 - Gabarito para análise do ensaio em sistema de fachada



No que se refere às desvantagens e dificuldades, pode-se citar a precisão da tecnologia para esse tipo de estudo, sendo observada uma inconsistência no momento de posicionar a fonte sonora em cada ponto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho buscou analisar a viabilidade de inserir a tecnologia de Realidade Aumentada em ensaios experimentais. Dentre os possíveis ensaios a serem estudados, optou-se pelo ensaio de desempenho acústico em sistema de fachada, realizados em campo e com requisitos definidos na norma ABNT NBR ISO 16283-3 (ABNT, 2021). Em seguida foram avaliados os parâmetros de análise e como a realidade aumentada poderia auxiliar nesse processo.

Desse modo, optou-se por utilizar a realidade aumentada como auxílio para realizar o posicionamento dos equipamentos no ensaio, mais especificamente da fonte sonora, visto que é um assunto que tem gerado discussão entre diversos autores devido a complexidade de posicionamento da fonte sonora, bem como possíveis interferências externas.

Foram avaliadas cinco amostras distintas e as medições foram realizadas por três operadores, sendo que cada operador realizou a medição três vezes para cada amostra, conforme indicado no Manual MSA (AIAG, 2010). Os operadores posicionaram a fonte sonora de duas formas: manualmente (com auxílio de trena metálica) e utilizando o aplicativo Augin para realidade aumentada. Após, com trena a laser, era medida a distância do ponto até a fachada, para verificar o atendimento ao requisito da ABNT NBR ISO 16283-3 (ABNT, 2021) que indica que deve-se ter, pelo menos, 7m.

Observou-se que as duas formas de posicionamento (manual e com auxílio da RA) não tiveram resultados significativos no que se refere a influência das amostras e dos operadores nas medições, entretanto, analisando individualmente as medições da distância da fachada foi possível observar pontos que não atingiram o requisito mínimo da ABNT NBR ISO 16283-3, que é de 7 m. Além disso, não houve resultado significativo para a interação entre amostra e operador, o que indica que cada operador mediu a amostra especificamente. Vale destacar que as cinco amostras analisadas ficam localizadas no pavimento térreo e fazendo uso desse método, a RA poderá contribuir para análises em andares superiores.

No que se refere ao tempo, o posicionamento utilizando o aplicativo de realidade aumentada foi cerca de 12% mais rápido do que realizando no modo manual. Embora tenha sido observada uma pequena diferença de tempo entre os métodos, há potencial para futuros estudos visando otimizar ainda mais o tempo de

uso da realidade aumentada. Aspectos como a precisão do aplicativo e o treinamento dos operadores devem ser considerados para aumentar a eficiência e agilidade no uso dessa ferramenta.

Apesar de a ferramenta de RA otimizar o tempo de ensaio, não apresentou resultados tão precisos para atender ao requisito mínimo de distância da norma. Porém, o aplicativo é uma ferramenta com grande potencial para avaliar previamente o local e identificar possíveis interferências externas (como geometria da edificação, elementos volumétricos nas proximidades, etc) que podem influenciar no momento do ensaio.

Ademais, o uso do aplicativo Augin também apresentou erros elevados no que se refere a reprodutibilidade, podendo-se justificar pelo fato de os ensaios acontecerem em campo e terem influência de outras variáveis (como a geometria da edificação e do próprio espaço).

Desse modo, para que o aplicativo possa ser efetivo para auxiliar no posicionamento dos equipamentos, sugerem-se estudos futuros onde sejam verificadas formas de minimizar os erros devido as fontes de influência externas, dos equipamentos dimensionais e dos operadores, além de analisar o comportamento do aplicativo quando utilizado em andares superiores e na realização completa do ensaio de isolamento ao ruído aéreo em fachada – realizar o posicionamento dos equipamentos e verificar o desempenho acústico do sistema de fachada, tanto no pavimento térreo quanto em andares superiores.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 16283-3**: Acústica - Medição de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações. Parte 3: Isolamento de fachada a ruído aéreo. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT NBR 15575-4: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 5. ed. Barueri, São Paulo: Manole, 2018.

ALIZADEHSALEHI, S.; HADAVI, A.; HUANG, J.C. Assessment of AEC Students' Performance Using BIM-into-VR. **Applied Sciences** 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11073225>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E966**. Standard Guide for Field Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Facades and Facade Elements. 10e1, 2011.

ARAÚJO, A. N. D. **Uso De Realidade Aumentada Como Auxílio Para Concepção De Projetos Arquitetônicos**. João Pessoa, Paraíba. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Paraíba, UFPB, 2018.

AUGIN. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://augin.app/>. Acesso em: 20 set. 2021.

AUGIN. [S. l.], 2021. Disponível em: https://cdn.wikitudo.com/static-website/2021/04/19152616/2021_Image_Showcase_Augin-Hero-1.png. Acesso em: 20 set. 2021.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). **Measurement systems analysis Reference Manual**. 4ed. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force, 2010

AZEVEDO, Eduardo Rubio. **Correlação entre diferentes métodos de avaliação clínica da classe funcional e da qualidade de vida relacionada à saúde com o resultado do teste cardiopulmonar em pacientes com insuficiência cardíaca**. 2020. Dissertação (Mestrado em Clínica Médica) - Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2020. doi:10.11606/D.17.2020.tde-08022021-143406.

BERARDI, U.; MARTELLOTTA, F. "Interference effects in field measurements of airborne sound insulation of building facades Article in Noise Control. **Engineering Journal**, 2011.

BERARDI, U.; CIRILLO, E.; MARTELLOTTA, F. Interference effects in field measurements of airborne sound insulation of building facades. **Noise Control**

Engineering Journal, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 165–176, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3397/1.3544303>

BERARDI, U. **A Comparison of Measurement Standard Methods for the Sound Insulation of Building Façades**. Bari - Itália: [s. n.], 2012.

BILLINGHURST, M.; CLARK, A.; LEE, G. A survey of augmented reality. **Foundations and Trends in Human-Computer Interaction**, [s. l.], v. 8, n. 2–3, p. 73–272, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1561/11000000049>

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. Editora Blucher, 2018. 9788521212843. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521212843/>. Acesso em: 02 out. 2021.

BRUTEL-VUILMET, C. **Prise en compte de l'angle d'incidence dans la caracterisation en laboratoire de la transmission acoustique des elements de facade**. França. 2005. Tese (Doutorado em Mecânica, Energética, Engenharia Civil e Acústica) - Instituto Nacional de Ciências Aplicadas, 2005.

BUSA, L.; SECCHI, S.; BALDINI, S. Effect of façade shape for the acoustic protection of buildings. **Building Acoustics**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 317–338, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/1351-010X.17.4.317>

CARDOSO, A.; JÚNIOR, E. L.; KIRNER, C.; KELNER, J. Tecnologias e Ferramentas para o Desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual e Aumentada. **UFPE, Recife**, [s. l.], p. 1–19, 2007. Disponível em: https://150.161.192.17/svn/repositorioGPRT/2007/Public/SVR/AlexandreCardoso_TecnologiasFerramentasDesenvolvimentoSistemasRealidadeVirtualAumentada.pdf

CHALHOUB, J.; AYER, S. K. Exploring the performance of an augmented reality application for construction layout tasks. **Multimedia Tools and Applications**, [s. l.], v. 78, n. 24, p. 35075–35098, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08063-5>

CUPERSCHMIND, A. R. M.; FREITAS, M. R. Possibilidades de uso de realidade aumentada móvel para AEC. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3.; ENCONTRO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 6., 2013, Campinas**, [s. l.], n. July, p. 1–12, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/2.1.4005.2006>

Di-Serio, á., Ibáñez, M. B., & Kloos, C. D. (2013). Impact of an Augmented Reality System on Students' Motivation for a Visual Art Course. **Computers & Education**, 68, 586-596. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.03.002>

DOLEZAL, K. K.; BURDICK, R. K.; BIRCH, N. J. *Analysis of a two-factor R&R study with fixed operators*. **Journal of Quality Technology**, v. 30, n. 2, p. 163-170, 1998.

DU, Zhao; LIU, Jun; WANG, Tianjiao. Augmented Reality Marketing: A Systematic Literature Review and an Agenda for Future Inquiry. **Frontiers in Psychology**, [s. l.], v. 13, n. June, p. 1–18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.925963>

EGAN, M. D. **Architectural acoustics**. New York: J. Ross, 2007.

EL-DIEN, H. H.. Acoustic performance of high rise building façades due to its balconies form. **Acta Acustica (Stuttgart)**, [s. l.], v. 89, n. SUPP., 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/2.1.4322.0006>

ENDRES, João Pedro; BRIÃO, Vandrê; FERNANDES, Vera Maria. REALIDADE AUMENTADA EM SISTEMAS HIDROSSANITÁRIOS RESIDENCIAIS Augmented Reality In Residential Plumbing Systems Realidade aumentada A realidade aumentada (RA) é a imagem do mundo real com introdução de elementos virtuais. [s. l.], n. Sispred, 2021.

GARTNER TOP STRATEGIC TECHNOLOGY TRENDS FOR 2021. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: [https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strategic-technology-trends-for-2021/?utm_source=Post Blog - Tendencias de Tecnologia 2021 - link pesquisa Gartner&utm_medium=organic&utm_campaign=Post Blog - Tendencias de Tecnologia 2021](https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strategic-technology-trends-for-2021/?utm_source=Post+Blog+-+Tendencias+de+Tecnologia+2021+-+link+pesquisa+Gartner&utm_medium=organic&utm_campaign=Post+Blog+-+Tendencias+de+Tecnologia+2021). Acesso em: 7 maio 2021.

GOIS, P. F. **Estudo da influência do sistema de revestimento no desempenho térmico, acústico e lumínico de edifícios**. Recife, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UNICAP, Recife, 2020.

GOMES, A. F. N. **Isolamento acústico de fachadas pela NP EN ISO 16283-3:2017: Análise da influência de desvios à norma**. Coimbra, Portugal. Dissertação (Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável) – Departamento de Engenharia Civil, FCTUC, 2018.

GRANZOTTO, N.; PIANA, E. A. Evaluation Method for Façade Acoustic Insulation for a Corner Room - Discussion on the Results Obtained as a Function of the Source Position.pdf. **Applied Sciences**, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10217434>

HOPKINS, C. **Sound Insulation**. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2007.

HU, Zhongyu; ZAYED, Tarek; CHENG, Li. A critical review of acoustic modeling and research on building façade. **Building Acoustics**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 107–134, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1351010X211022736>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO 140: 1998**. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 5: Field Measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades. Second Edition, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 717-1**: Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 12354-3: Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.** 2017.

INTRODUCING OUR NEW APPLICATION: SMARTREALITY. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://jbknowledge.com/introducing-our-new-application-smartreality>. Acesso em: 20 set. 2021.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS - JIS A 1430. Acoustics – Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades, Japanese Industrial Standard, 2009.

KAYIKCI, Y. Sustainability impact of digitization in logistics. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 21, p. 782–789, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.184>

KIRNER, C.; KIRNER, G., Livro do Pré-Simpósio. **Evolução e Tendências da Realidade Virtual e da Realidade Aumentada.** Livro do Pré-Simpósio XIII Simpósio de Realidade Virtual E Aumentada. Uberlândia, 2011.

Klaput, Pavel & Vykydal, David & Tošenovský, Filip & Halfarová, Petra & Plura, Jiří. (2016). Problems of application of measurement system analysis (MSA) in metallurgical production. **Metalurgija**. 55. 535-537.

MACHADO, A. V. N.; SANTOS, L.; OLIVEIRA, M. C. F. Realidade Virtual: Definições, Dispositivos e Aplicações. **Revista Eletrônica de Iniciação Científica da SBC**, [s. l.], p. 1–33, 2002.

MARTELLO, N. Z.; FAUSTI, P.; SANTONI, A.; SECCHI, S. The use of sound absorbing shading systems for the attenuation of noise on building façades. An experimental investigation. **Buildings**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 1346–1360, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings5041346>

MASOVIC, Drasko *et al.* Analysis of façade sound insulation field measurements - Comparison of different performance descriptors and influence of low frequencies extension. **42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013, INTER-NOISE 2013: Noise Control for Quality of Life**, [s. l.], v. 2, n. September, p. 1383–1391, 2013.

MATEUS, D. **Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído.** Coimbra, Portugal: [s. n.], 2008. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~earpe/conteudos/ARE/Apontamentosdadisciplina.pdf>

MATEUS, M.; SILVA, M. G. Estudo sobre o factor de correcção acústica nas medições de ruído ambiental com microfone aplicado directamente em elementos de fachada. **Acústica 2012**, [s. l.], n. March, 2012. Disponível em: http://www.spacustica.pt/acustica2012/pdfs/programa_detalhado1.pdf

MILGRAM, P.; UTSUMI, A.; TAKEMURA, H.; KISHINO, F. Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. **Telem manipulator and**

Telepresence Technologies, [s. l.], v. 2351, n. January, p. 282–292, 1995.
Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.197321>

MOREIRA, L. C. S. **O manual do proprietário da edificação assistido pela realidade aumentada**. Campinas, 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2018.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 7. ed. [S. l.: s. n.], 2012. v. 2012 Disponível em: <https://doi.org/10.1109/DELTA.2006.62>

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. Trad. Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MULHOLLAND, K. A. Method for measuring the sound insulation of facades: Factors to be considered. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 279–286, 1971. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(71\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(71)90007-7)

N. SILVA, João Pedro do; SAQUI, Diego. **Avaliação de diferentes estruturas de camadas ocultas em algoritmos de deep learning usando ANOVA**. Muzambinho/MG - 14ª Jornada Científica e Tecnológica, 2022.

NETO, A. A.; PEREIRA, G. B.; DROZDA, F. O.; SANTOS, A. P. L. A busca de uma identidade para a indústria 4.0. [s. l.], v. 4, p. 1379–1395, 2018.

OLAFSEN, S.; BARD, D.; STRAND, M. K.; ESPEJO, T. F. Methods of field measurements of facade sound insulation. **Noise Control Engineering Journal**. Volume 63, Número 5, 1 de setembro de 2015, pp. 467-477.

OLIVEIRA, Antônio Marcos da Silva; RIBEIRO, Diego Fernandes; GONZAGA, Lourdiane Gontijo das Mercês. Utilização Do Método Anova Em Amostras De Concreto Leve Com Pérolas De Eps: Uma Abordagem Didática Voltada Para O Ensino De Estatística Nos Cursos De Graduação Em Engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, [s. l.], n. 1, p. 3–15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.37702/ree2236-0158.v41p3-15.2022>

OLIVEIRA, A. D.; SILVA, J. G. P.; SILVA, J. V. L.; BAVOSA, J. A. M; PIRES, P. F. **Realidade Virtual e Aumentada na Engenharia Civil: viabilidade e economia em empresas pela adoção dessas tecnologias**. Goiás, Goiânia: [s. n.], 2019.

OLIVEIRA, G. S. CUNHA, A. M. O.; CORDEIRO, E. M.; SAAD, N. S. Grupo Focal: Uma Técnica De Coleta De Dados Numa Investigação Qualitativa? **Cadernos da Fucamp**, [s. l.], v. 19, n. 41, p. 1–13, 2020. Disponível em: <http://fucamp.edu.br/editora/index.php/cadernos/article/view/2208/1365>

OLIVEIRA, R. R.; CUPERSCHMID, A. R. M. BIM ASSOCIADO À REALIDADE AUMENTADA NO PROCESSO DE COMPATIBILIZAÇÃO DE PROJETOS BIM associated with Augmented Reality to assist the design coordination process. **2º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção**, [s. l.], n. September, 2019. Disponível em: <https://antaceventos.net.br/index.php/sbtic/sbtic2019/paper/view/192>

ORGANIZATION, World Health. Environmental health criteria. **Environmental Health Criteria**, [s. l.], n. 204, 1998.

PANETTA, K. Trends emerge in the gartner hype cycle for emerging technologies, 2018. **Retrieved November**, v. 4, p. 5, 2018.

PEREIRA, M. C.; KLIPPEL FILHO, S.; LABRES, H. S.; OLIVEIRA, M. F. Influência das sacadas no desempenho acústico de fachadas. **Sobrac**, [s. l.], v. 3, n. February 2018, p. 8, 2017.

QUEIROZ, Letícia Bezerra. **Uso do método ANOVA para análise de estruturas de pontes**. 66pg. 2019. - Universidade Federal de Alagoas, [s. l.], 2019.

RIBEIRO, M. W; ZORZAL, E. R. **Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências**. Uberlândia - Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Computação - SBC, 2011. *E-book*.

SALOMONS, E. M.; BERGHAUSER PONT, M. Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 108, n. 1, p. 2–16, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.017>

SANTOS, A. S., SANTOS, F. E., CARVALHO, M. D. R., SILVA, W. R., SANTIN, K. R. S. (2020). **Realidade aumentada na construção civil, aplicada para solucionar problemas e prever falhas de projetos e execução**.1-28.

SILVA, G. L.; GROETELAARS, N. J. Uso de modelos BIM em realidade virtual e aumentada: panorama de aplicações e ferramentas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, **Anais [...]**.Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1-13. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/565>. Acesso em: 4 ago. 2021.

SILVA, F. H. L.; GIESTA, J. P; CÂMARA, R. R. D. AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DA INSERÇÃO DA REALIDADE AUMENTADA EM CANTEIRO DE OBRAS. **3º Congresso Português de 'Building Information Modelling' (ptBIM 2020)**, [s. l.], n. December, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.24840/978-972-752-272-9>SIMÕES, F. M. **Acústica arquitetônica**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2011.

SILVA, Marcelo Pereira da *et al*. USOS E BENEFÍCIOS DA REALIDADE AUMENTADA NA INDÚSTRIA 4.0. **Revista brasileira de mecatrônica**, [s. l.], p. 48–64, 2022.

SOARES, Williane de Oliveira Silva *et al*. Gage R&R studies in measurement system analysis: A systematic literature review. **Quality Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 382–403, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08982112.2022.2069505>

SOUZA, Clayton Albuquerque de; JUNIOR, Mario Andrade Lira; FERREIRA, Rinaldo Luiz Caraciolo. Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2012, p. 350–354, 2012.

Stilhle, L. and Wold, S., 1989. Analysis of variance (ANOVA). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, 6: 259-272.

TEIXEIRA, Camila Cristina. **Metodologia GAGE R&R: uma abordagem de estimação intervalar via método delta multivariado**. Viçosa/MG. 2022.

THE POWER OF AUGMENTED REALITY (AR) IN CONSTRUCTION - DIGITAL BUILDER. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://constructionblog.autodesk.com/augmented-reality-ar-construction/>. Acesso em: 14 fev. 2023.

TORI, R.; HOUNSELL, M. S. **Introdução a Realidade Virtual e Aumentada**. Porto Alegre: Editora SBC, 2018. ISSN 1098-6596.

UTILIDADES E BENEFÍCIOS DA REALIDADE AUMENTADA NO SETOR AEC - BIMSERVER.CENTER BLOG. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://blog.bimserver.center/br/utilidades-e-beneficios-da-realidade-aumentada-no-setor-aec-2/>. Acesso em: 20 set. 2021.

Vásquez-Carbonell, Mauricio. (2022). A Systematic Literature Review of Augmented Reality in Engineering Education: Hardware, Software, Student Motivation & Development Recommendations. **Digital Education Review**. 249-267. 10.1344/der.2022.41.249-267.

WERKEMA, MCC. **Criando a cultura do Seis Sigma**. v. 1. Belo Horizonte: Werkema Editora., 2002