



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**ENGENHARIA CIVIL**

**TÁLISSON CAVALCANTE RODRIGUES**

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ULTRASSÔNICOS PARA  
RECONHECIMENTO DE VAZIOS EM ALVENARIAS MACIÇAS**

**RUSSAS**  
**2021**

TÁLISSON CAVALCANTE RODRIGUES

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ULTRASSÔNICOS PARA  
RECONHECIMENTO DE VAZIOS EM ALVENARIAS MACIÇAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Monitoramento estrutural.

Orientadora: Profa. Dra. Rosineide Fernando da Paz

Coorientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- R617 Rodrigues, Tálisson Cavalcante.  
Análise exploratória de dados ultrassônicos para reconhecimento de vazios em alvenarias maciças /  
Tálisson Cavalcante Rodrigues. – 2021.  
-49 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Rosineide Fernando da Paz.  
Coorientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.
1. Ensaio de ultrassom. 2. Ensaio não destrutivo. 3. Alvenaria. 4. Análise estatística. 5. Construções  
históricas. I. Título.

CDD 620

---

TÁLISSON CAVALCANTE RODRIGUES

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ULTRASSÔNICOS PARA  
RECONHECIMENTO DE VAZIOS EM ALVENARIAS MACIÇAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil. Área de concentração: Monitoramento  
estrutural.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Rosineide Fernando da Paz  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Daiane Aparecida Zuanetti  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

A Deus.

E a minha Família.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela dádiva da vida, por estar sempre me dando forças e resguardando meus pensamentos que no final as coisas darão certo.

Aos meus pais José Otaciano e Maria Necineide, por sempre acreditarem no meu potencial e por garantirem que eu teria todo o subsídio para focar em minha educação, vocês são exemplos por me mostrarem que com trabalho duro tudo é possível.

À minha avó Maria Alice, por sempre estar ao meu lado e fazer tudo que estava seu alcance para que eu tivesse a melhor criação e condições de vida mais confortáveis que a que ela teve em sua juventude.

Agradecer a minha companheira de todas as horas Hévilla Souza, você é um dos motivos que me fazem querer vencer a cada dia, seu carinho e apoio foram fundamentais nessa conquista, saiba que ela também é sua.

Aos meus colegas da turma de Engenharia Civil 2016.1 que compartilharam comigo toda a caminhada que foi a graduação, juntos enfrentamos as disciplinas e tivemos nossos momentos de descontração. Saibam que vocês tornaram mais fácil a caminhada, em especial meus amigos Emanuel Carneiro, Matheus Martins, Matheus Viana e Douglas Goes.

A todos os professores que tive contato durante a minha formação acadêmica, em especial o professor Esequiel Mesquita que me deu a oportunidade de iniciar na pesquisa científica e repassou muito de seu conhecimento e vivências. Também agradeço a professora Rosineide da Paz, minha orientadora a quem serei eternamente grato pelo bom trabalho em equipe, por sempre estar disposta a tirar minhas dúvidas e também por contribuir com seus projetos e alunos, a senhora é um grande exemplo.

Por fim agradeço à CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio do projeto de nº 7623 do PIBIC cadastrado na plataforma Ícaro Moreira.

## RESUMO

Ao serem expostas às condições ambientais, as construções passam a apresentar níveis de degradação de seus materiais e componentes que crescem com o passar do tempo, gerando riscos à segurança. A preocupação com a estabilidade estrutural leva a busca por alternativas de caracterização e investigação de danos para eventuais intervenções. Em especial, as construções históricas, por sua elevada complexidade estrutural, tempo de uso e valor cultural, tem ganhado destaque nos estudos do meio científico. Para a caracterização dessas estruturas, os ensaios não destrutivos vêm surgindo como uma importante ferramenta, pois não danifica a estrutura analisada. Em especial, o ensaio de ultrassom vem sendo o foco de muitos pesquisadores. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo propor uma nova abordagem para exploração e interpretação de dados provenientes de ensaios de ultrassom, usando para isso técnicas da estatística. Assim, foram obtidos dados a partir de duas amostras de paredes de alvenaria (aqui denominadas painéis) que foram construídas e testadas em laboratório. Uma das paredes foi mantida em estado considerado de boa qualidade, enquanto na outra foram adicionados vazios em seu interior, com o objetivo de simular defeitos em sua estrutura. Na exploração dos dados foram utilizados gráficos obtidos com o emprego do método de *Lowess* (em que regressões locais são implementadas). Os gráficos obtidos a partir desse método *sugeriram* que a onda tem dificuldade de adentrar a parede na presença de vazios em seu interior. Além disso, o método foi aplicado em dados coletados *in situ*, a partir da igreja Nossa Senhora da Expectação do município de Icó, Ceará, Brasil. Nessa análise, foi possível observar que a largura da parede e altura da medição são variáveis que parecem influenciar no deslocamento da onda. Portanto, devido às importantes conclusões obtidas a partir da exploração dos dados, conclui-se que resultados relevantes podem ser obtidos a partir da exploração de dados obtidos em ensaios de ultrassom, por meio do emprego de ferramentas estatísticas. Portanto, estudos futuros com emprego desse tipo de metodologia podem contribuir, ou complementar métodos tradicionais, na caracterização desse tipo de estruturas.

**Palavras-chave:** Ensaio de ultrassom. Ensaio não destrutivo. Alvenaria. Análise estatística. Construções históricas.

## ABSTRACT

When exposed to environmental conditions, buildings start to show degradation levels of their materials and components that grow over time, generating safety risks. The concern with structural stability leads to the search for alternatives for characterization and damage investigation for eventual interventions. In particular, historical buildings, due to their high structural complexity, time of use and cultural value, have gained prominence in studies of the scientific environment. For the characterization of these structures, non-destructive tests have emerged as an important tool, as they do not damage the analyzed structure. In particular, the ultrasound test has been the focus of many researchers. In this scenario, the present work aims to propose a new approach for exploration and interpretation of data from ultrasound tests, using statistical techniques. Thus, data were obtained from two masonry wall samples (here called panels) that were built and tested in the laboratory. One of the walls was maintained in a state considered to be of good quality, while in the other, voids were added to its interior, in order to simulate defects in its structure. In the exploration of the data, graphs obtained using the *Lowess* method (where local regressions are implemented) were used. The graphs obtained from this method suggested that the wave has difficulty entering the wall in the presence of voids inside it. In addition, the method was applied to data collected in situ, from the Nossa Senhora da Expectação church in the municipality of Icó, Ceará, Brazil. In this analysis, it was observed that the width of the wall and height of the measurement are variables that seem to influence the displacement of the wave. Therefore, due to the important conclusions obtained from the exploration of the data, it is concluded that relevant results can be obtained from the exploration of data obtained in ultrasound tests, through the use of statistical tools. Therefore, future studies using this type of methodology can contribute, or complement traditional methods, in the characterization of this type of structures.

**Keywords:** Ultrasound test. Non-destructive tests. Masonry. Statistical analysis. Historical buildings.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Delineamento da Revisão sistemática de literatura. ....	13
Figura 2– Espécimes antigos de paredes usados nesta configuração experimental. ....	18
Figura 3 – Esquema das medições ultrassônicas indiretas. ....	19
Figura 4 – Parede com os quadros ultrassônicos atribuídos. ....	19
Figura 5 – Vista esquemática das medições ultrassônicas indiretas. ....	20
Figura 6 – Vista esquemática das medições ultrassônicas indiretas realizadas nos elementos da parede. ....	21
Figura 7 – Modelos de onda, sendo: a) longitudinais; b) transversais; c) superficiais; d) ondas de placa. ....	23
Figura 8 - Esquema dos modos de medição – a) direto, b) semidireto e c) indireto do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico com seus respectivos transdutores emissores (E) e receptores (R). ....	24
Figura 9 - Esquema do contato transdutor e material de estudo. ....	25
Figura 10 – Posicionamento dos painéis na estrutura. ....	40
Figura 11 – Esquema de posicionamento e distância a) dos transdutores no quadrante e b) das alturas de medição dos painéis. ....	41
Figura 12 – Fissuração e descolamento de revestimento da parede P19. ....	42

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Crescimento de estudos de caracterização de alvenarias. ....	13
Gráfico 2 - Perfis da estrutura das paredes plotados no tempo de propagação das ondas versus distância. ....	26
Gráfico 3- Curvas dos perfis ultrassônicos plotados com <i>Lowess</i> ao longo do tempo. ....	29
Gráfico 4 - Curvas suavizadas plotadas pelo método <i>Lowess</i> . ....	30
Gráfico 5 – Perfis de perturbadores identificados pela abordagem de <i>Lowess</i> ....	31
Gráfico 6 – Perfis separados por comportamento, sendo a) P1 b) quadrantes perturbadores de P2 c) P2 sem os quadrantes perturbadores. ....	31
Gráfico 7 – Perfis dos dados com réplicas relacionados por quadrante. ....	33
Gráfico 8 – Curva média dos dados com réplicas separados por parede. ....	34
Gráfico 9 – Curvas médias dos dados com réplicas separados por parede sobrepostas. ....	35
Gráfico 10 – Perfis dos dados com réplicas separados por elemento. ....	35
Gráfico 11 – Comparação do Quadrante Q1 de ambos os painéis. ....	36
Gráfico 12 – Comparação do Quadrante Q5 de ambos os painéis. ....	36
Gráfico 13 – Comparação do Quadrante Q6 de ambos os painéis. ....	37
Gráfico 14 – Comparação do Quadrante Q10 de ambos os painéis ....	37
Gráfico 15 – Comparação do Quadrante Q3 de ambos os painéis. ....	38
Gráfico 16 – Comparação do Quadrante Q8 de ambos os painéis. ....	38
Gráfico 17 – Curva média dos dados por faixa de altura. ....	41
Gráfico 18 – Curva média dos dados por largura da parede. ....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
LAREB	Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções
MSE	Monitoramento da Saúde Estrutural
NBR	Norma Brasileira Regulamentar

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Problemática .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
<i>1.3.1 Objetivo geral.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>15</i>
<b>1.4 Etapas da pesquisa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.5 Descrição dos capítulos .....</b>	<b>16</b>
<b>2 CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA CADA CONJUNTO DE DADOS... 18</b>	
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Ondas ultrassônicas.....</b>	<b>22</b>
<i>3.1.1 Tipos de ondas ultrassônicas.....</i>	<i>22</i>
<i>3.1.2 Atenuação.....</i>	<i>23</i>
<i>3.1.3 Impedância acústica.....</i>	<i>24</i>
<b>3.2 Ensaio de ultrassom.....</b>	<b>24</b>
<i>3.3.1 Base teórica do método Lowess.....</i>	<i>27</i>
<b>4 ESTUDO PRELIMINAR.....</b>	<b>29</b>
<b>5 ESTUDO COM RÉPLICAS.....</b>	<b>33</b>
<b>6 APLICAÇÃO EM CONSTRUÇÃO HISTÓRICA .....</b>	<b>40</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde sua execução, as construções e seus materiais já começam a apresentar graus de deterioração que crescem com o passar do tempo. De um modo geral, esses danos podem ser definidos como o conjunto de mudanças nos materiais e em suas propriedades que venham a afetar o sistema que estão inseridos, tanto no presente quanto no futuro (FARRAR e WORDEN, 2007). O crescimento dessas avarias leva à preocupação acerca da segurança das estruturas, sendo necessária a manutenção e inspeção para localizar pontos de fragilidade.

Uma das principais e mais atuais estratégias de inspeção de danos é o monitoramento da saúde estrutural (MSE), que segundo Raghavan (2007) é um componente chave para prover informações acerca das estruturas. Através de uma rede de sensores que colhem dados sobre o conjunto estrutural e seus materiais, o MSE acompanha e localiza alterações podendo até estimar a vida útil dos componentes. Para atingir esses objetivos várias áreas do conhecimento são utilizadas, uma delas são os ensaios não destrutivos que representam uma das bases para o MSE ser possível.

Os Ensaios Não Destrutivos (END) surgem como uma significativa ferramenta para analisar a estabilidade das construções, esta classe de ensaios pode ser definida por não causar dano durante a execução ou por causar danos mínimos reparáveis, além de manter a capacidade resistente do material (EVANGELISTA, 2002). Corroborando com a definição, Oliveira (2001) a descreve como uma avaliação que não modifica as propriedades finais de utilização.

Por esta característica de repetibilidade sem causar danos a estrutura, estes ensaios vêm ganhando destaque no que diz respeito a análise de construções históricas, obtendo resultados positivos. Na caracterização mecânica do Centro Histórico de Bragança (Portugal), os END foram realizados com recorrência à aplicação do teste de macaco plano apresentado por Roque e Lourenço (2003), e também o ensaio de ultrassom como no trabalho apresentado por Mesquita et al. (2018) no qual a igreja Nossa Senhora do Rosário dos Pretos foi caracterizada pelo método indireto.

De acordo com Binda et al. (2000), ensaios não destrutivos também podem ser muito úteis para determinar as características da alvenaria histórica. Pela correlação entre as velocidades das ondas sonoras e as propriedades mecânicas de amostras testadas experimentalmente em laboratório, é possível estimar parâmetros mecânicos da estrutura *in situ*. Dessa maneira o ensaio de ultrassom vem ganhando destaque para caracterizar este tipo de estrutura.

Todavia a análise desses dados ainda não emprega o uso de ferramentas estatísticas, que explore todo o seu potencial de informação sobre a estrutura. Além disso, esta prática de exploração dos resultados em busca de padrões nos perfis ultrassônicos, embora que promissora, ainda não é muito tratada na literatura. Dessa forma, como mostrado por Ribeiro (2017), uma das principais desvantagens do ensaio de ultrassom é necessitar de profissionais devidamente qualificados para interpretar os dados de forma assertiva, logo o emprego de métodos estatísticos pode ser uma ferramenta importante para amplificar a análise dos resultados e agilizar o processo de aplicação deste ensaio não destrutivo nas alvenarias.

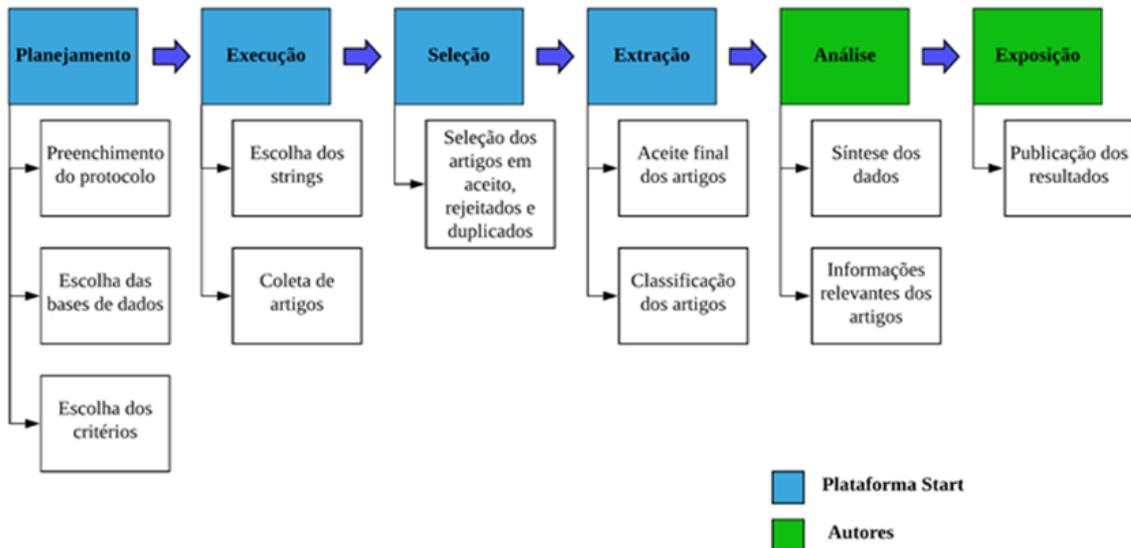
## 1.1 Problemática

Desde a década de 60 os materiais isotrópicos, como concreto e aço, vêm avançando em suas metodologias de avaliação de danos, porém em materiais anisotrópicos como as alvenarias, tais metodologias ainda não são muito encontradas na literatura (MESQUITA et al., 2016). Em paralelo a isto, a comunidade científica vem estimulando seu interesse no desenvolvimento de estratégias não destrutivas para caracterizar estruturas, sendo a heterogeneidade das alvenarias um desafio neste meio.

Embora seja desafiadora a tarefa de caracterizar as alvenarias, muitos avanços vêm sendo alcançados, como por exemplo, a NBR 16805 (ABNT, 2020), que trata da normatização do ensaio de velocidade do pulso ultrassônico pelo método indireto em alvenarias, e o trabalho de Araújo et al. (2020) no qual tijolos de alvenaria de diferentes períodos são analisados, a fim de entender suas propriedades, sendo uma delas a velocidade do pulso ultrassônico. Todavia esses avanços ainda não utilizam ferramentas estatísticas para a exploração dos dados provenientes do ensaio de ultrassom.

Para evidenciar essa lacuna existente na literatura, foi realizada uma revisão sistemática de literatura com o auxílio do *software State of the Art through Systematic Review (START)* em três bases científicas: *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. Como resultado, foram obtidos 942 artigos, nacionais e internacionais, publicados a partir de 1991. As palavras-chave determinadas para realizar as buscas foram: *data*, *masonry*, *non-destructive* e *ultrasonic*. Do total de artigos selecionados, 35 foram aceitos, e os demais rejeitados, por abordagem fora do tema buscado ou por serem duplicados. Após a etapa de seleção, os artigos foram avaliados de forma mais criteriosa na etapa de extração, em que dos 35 artigos selecionados, 15 foram aceitos e qualificados nesta etapa. A Figura 1 mostra o delineamento da revisão sistemática.

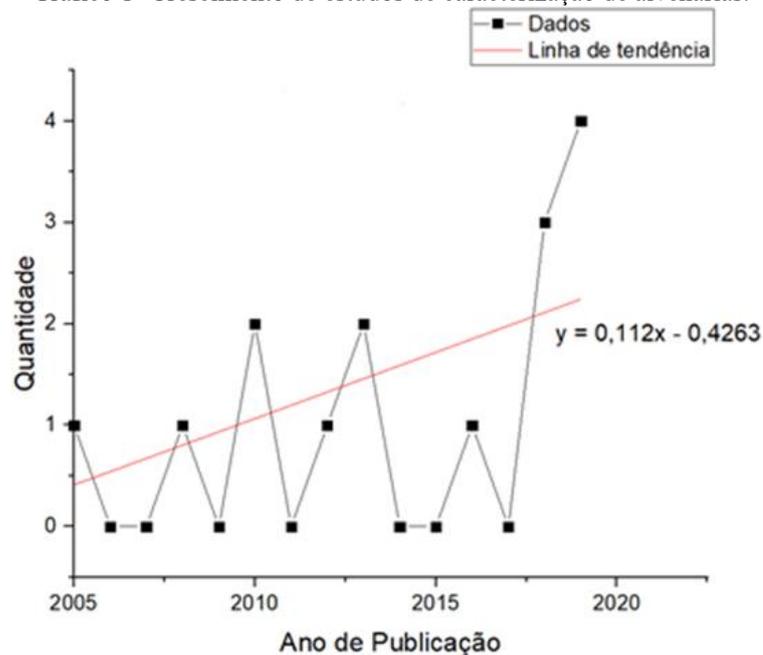
Figura 1- Delineamento da Revisão sistemática de literatura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A partir do levantamento foi possível notar um crescimento acerca dos estudos de caracterização das alvenarias maciças com o método não destrutivo de ultrassom (Gráfico 1) mostrando que a área vem ganhando destaque no meio acadêmico e ainda são muitos os avanços a serem alcançados.

Gráfico 1- Crescimento de estudos de caracterização de alvenarias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Cerca de 50% dos estudos com foco em aplicar o ensaio de ultrassom em alvenarias foram publicados nos dois últimos anos, fato que mostra o crescimento da aplicabilidade deste como uma alternativa para a caracterização destas estruturas. Com as evoluções citadas na área se faz também necessários novas abordagens de interpretação dos dados como a proposta nesse estudo para se estender as opções de análise dos profissionais da área.

Ao fim das etapas do delineamento, dentre os 15 artigos restantes, os que apresentaram maior relevância na caracterização das alvenarias com o ensaio de ultrassom, comparado ao que é proposto neste trabalho, mostram o direcionamento de pesquisas com interesse na análise de estruturas em campo, como visto em Tavukçuoğlu, Akevren e Grinzato (2010) e Camassa et al. (2019), que verificaram as condições de componentes de alvenaria. Dentre os artigos levantados, também foi constatado a aplicação do método indireto para entender o comportamento de ensaios *in situ* com a simulação das características de campo em laboratório como em Khodaverdian e Shomali (2010), em que um carregamento é aplicado em painéis de alvenaria durante o experimento de medição. Já em Zielińska e Rucka (2018) e Cotic et al. (2013) houve a simulação de vazios no interior das estruturas de alvenaria.

Embora estes trabalhos tenham contribuído propondo estudos importantes para a caracterização de alvenarias, nenhum deles aplicou ferramentas estatísticas mais robustas para identificação do comportamento dos perfis das ondas ultrassônicas, um caminho de interpretação diferente que pode ser útil tanto para melhor qualificar o estado das alvenarias históricas como para dar suporte ao MSE na aplicação de metodologias com o uso do ensaio não destrutivo de velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

## **1.2 Justificativa**

De acordo com a lista de bens tombados e processos de tombamento, atualizada em 25/11/2019 e produzida pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN, 2019), no Brasil já passam de 1100 o número de construções e conjuntos arquitetônicos tombados. O Ceará tem cerca de 18 com o processo efetivado e outras que ainda estão em andamento. Dada a importância que essas estruturas possuem para a identidade cultural brasileira é fundamental o desenvolvimento de estudos que visem ampliar o conhecimento acerca de seus materiais e processos construtivos (IPHAN, 2019).

Posto esse cenário o presente trabalho contribuirá com a análise da aplicação de uma técnica não destrutiva para inferir informações sobre o estado de conservação dessas

importantes estruturas, dando suporte para a realização de possíveis intervenções a fim de garantir a segurança da população e da cultura brasileira.

Ao fim da revisão de literatura foi possível observar um espaço de contribuição ainda pouco explorado e que pode ser útil para otimizar os estudos das alvenarias, ao fornecer interpretação das medições de forma totalmente guiada pelos dados. Além disso, conhecer mais do comportamento da onda nas alvenarias contribui como uma ferramenta auxiliar na preservação do patrimônio histórico brasileiro que são em grandes quantidades edificadas em alvenaria, visto a influência portuguesa (FIGUEIREDO, 2014). É sabido que essas estruturas apresentam complexo sistema estrutural, heterogeneidade e valor cultural, desafios estes que estimulam o interesse da comunidade técnico-científica (MESQUITA et al., 2018).

Desta forma o estudo da aplicação de um método estatístico serve como subsídio para o desenvolvimento de uma metodologia de interpretação dos resultados do ensaio de ultrassom, abrindo mais um caminho para a caracterização de danos em alvenarias.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo geral***

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma análise empírica guiada pela exploração dos dados do ensaio de propagação do pulso ultrassônico no interior de alvenarias de tijolos maciços.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Para alcançar o objetivo mencionado acima, os objetivos específicos estão delimitados a seguir:

- Verificar se a onda ultrassônica adentra no interior da parede quando há a presença de vazios.
- Estudar a influência da altura da medição na realização do ensaio.
- Examinar o comportamento da onda nos componentes da alvenaria.
- Identificar variáveis que venham a interferem no experimento.

## 1.4 Etapas da pesquisa

A pesquisa foi dividida em 4 etapas através das quais foi possível entender a contribuição do trabalho e estudar seus resultados por meio dos ensaios realizados. A primeira etapa foi a revisão de literatura, na qual foi levantado o estado da arte e observado a lacuna referente a exploração de dados ultrassônicos em alvenarias com o auxílio de métodos estatísticos.

Na segunda etapa foi delineado um experimento preliminar através do qual foi possível obter os primeiros resultados utilizando ferramentas estatísticas. A terceira etapa se sucedeu com uma análise mais aprofundada do mesmo experimento, porém desta vez foram obtidas réplicas para cada medição e também um estudo da onda percorrendo cada componente da alvenaria individualmente foi realizado.

Na quarta e última etapa foi proposta a análise de um conjunto de dados obtidos *in situ* de uma construção histórica do município de Icó, na qual padrões de comportamento da onda foram estudados, além de ter sido realizada uma comparação com as observações iniciais referentes ao comportamento da onda.

## 1.5 Descrição dos capítulos

O presente trabalho é composto de 7 capítulos, cujos conteúdos serão retratados sucintamente a seguir.

No capítulo 1 é apresentado uma introdução com a contextualização do tema, bem como o levantamento do estado da arte na literatura, seguido dos objetivos propostos na pesquisa.

No capítulo 2 é discorrido sobre os aspectos referentes ao experimento realizado, como tamanho dos painéis, marcações dos quadrantes (delimitação da área para realização do experimento), equipamentos utilizados e conjunto de dados produzidos.

No capítulo 3 são apresentadas as definições e fundamentações acerca das ondas ultrassônicas, do ensaio de ultrassom e do método estatístico aplicado.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com o estudo preliminar, que foi realizado para uma análise inicial dos dados experimentais. Foi tomada apenas uma medição de tempo de deslocamento da onda ultrassônica para cada quadrante.

No capítulo 5 é apresentada a análise do segundo experimento, dessa vez com 10 (dez) repetições para cada medição. Neste capítulo os resultados deste experimento são comparados com o estudo preliminar.

No capítulo 6 a aplicação do modelo foi realizada em dados colhidos *in situ*, a partir de uma igreja do município de Icó, com o objetivo de estudar o comportamento da onda em paredes antigas.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as considerações finais da pesquisa.

## 2 CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA CADA CONJUNTO DE DADOS

Dois espécimes de paredes antigas típicas do estado do Ceará foram construídos no Laboratório de Reabilitação e Durabilidade de Edifícios (LAREB) da Universidade Federal do Ceará. A primeira parede, aqui designada como P1, foi construída sem nenhuma anomalia e foi tomada como parede de referência, enquanto a segunda parede, aqui designada como P2, foi construída de modo semelhante a primeira e posteriormente danificada com a inclusão de vazios em seu interior. Essas paredes podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2– Espécimes antigos de paredes usados nesta configuração experimental.

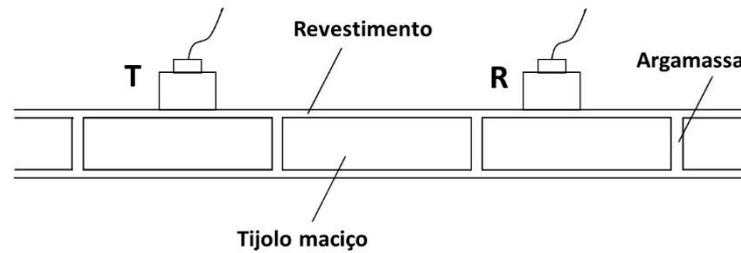


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Cada parede foi construída nas dimensões de 1,50m de altura, 1,00m de largura e 0,135m de espessura. Na construção foram usados tijolos antigos de argila com dimensões de 4,60cm x 24,70cm x 12,30cm e massa específica de 2.000 kg / m<sup>3</sup>, unidos por uma argamassa de cal na proporção 1: 1 (cal: agregado fino, em massa). Finalmente, as espécies foram recobertas por argamassa de 15 mm de cal na proporção de 1: 6 (cal: agregado fino, em massa), em seguida foram deixadas 40 dias em processo de secagem para então serem usadas no experimento.

Aqui, foi usado o método ultrassônico indireto na coleta dos dados, usando o equipamento modelo Pundit® 200 PROCEQ, com transdutores de 54 kHz. Neste método, como descrito anteriormente, ambos os transdutores, emissor (E) e receptor (R) são posicionados alinhados na mesma superfície, como mostra os esquemas da Figura 3. Este método para medição do tempo de deslocamento da onda é usado quando as medições diretas não são possíveis, por exemplo, por limitação devido às dimensões do elemento avaliado.

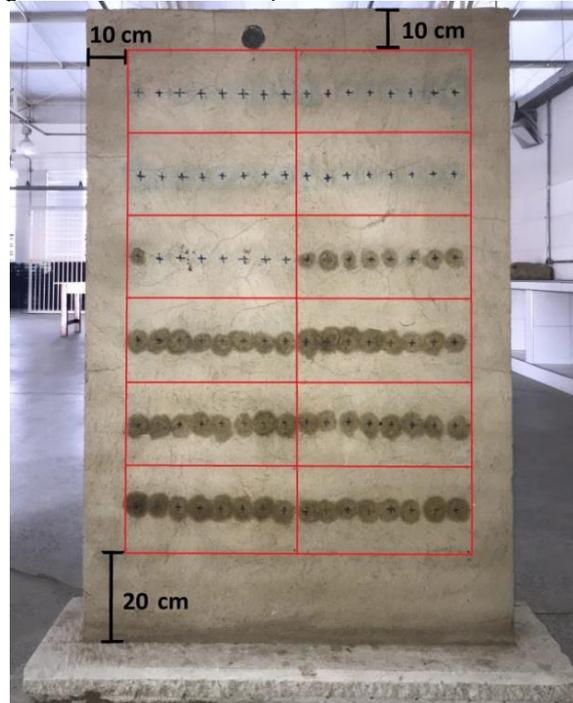
Figura 3 – Esquema das medições ultrassônicas indiretas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As medições ultrassônicas foram realizadas na superfície das paredes, sobre o revestimento, na direção horizontal (eixo X) e vertical (eixo Y). Para isso, as paredes foram divididas em 12 quadros com 20 cm x 40 cm e, em cada quadro, foram realizadas 6 medições ultrassônicas distribuídas ao longo da região central do quadro. Para evitar influências nos limites das paredes, uma distância de 10 cm das bordas da parede não foi considerada durante a divisão dos quadros. Também foram deixados 20 cm na região inferior das paredes, conforme exemplificado por uma das paredes na Figura 4.

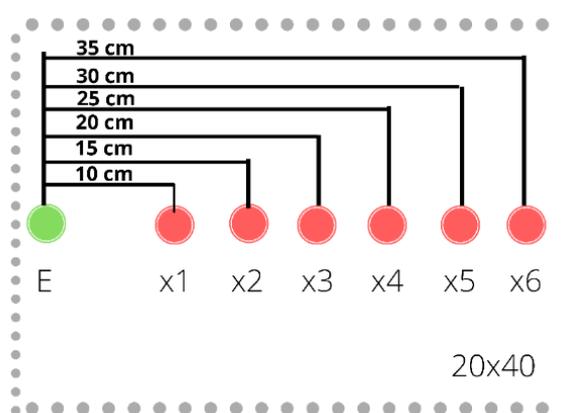
Figura 4 – Parede com os quadros ultrassônicos atribuídos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O emissor foi posicionado em um ponto inicial,  $x_0$ , e o transdutor do receptor em cada um dos pontos  $x_1, x_2, \dots, x_6$ , marcados sobre uma reta horizontal. O emissor é estático durante as medições ultrassônicas, enquanto o receptor varia de acordo com as distâncias que aumentam linearmente a cada 5 cm, até cada ponto  $x_1, x_2, \dots, x_6$ . Assim, para cada distância entre o ponto  $x_0$  e um ponto  $x_1, x_2, \dots, x_6$ , o tempo de propagação de ondas ultrassônicas foi medido. A Figura 5 mostra a vista esquemática das medidas indiretas ultrassônicas realizadas nos quadros.

Figura 5 – Vista esquemática das medições ultrassônicas indiretas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O método para medições ultrassônicas indiretas adotado neste trabalho foi baseado nas recomendações da NBR 16805 (ABNT, 2020) e no trabalho apresentado por Mesquita et al. (2018).

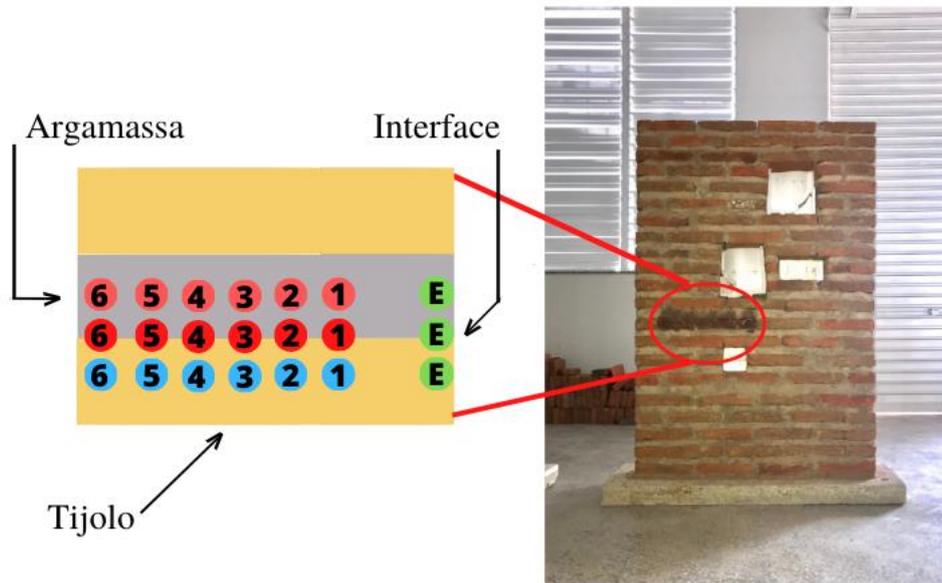
Após o término dos ensaios foram formados três conjuntos de dados. O primeiro denominado “conjunto de dados 1”, foi obtido de uma experimentação preliminar e cada quadrante foi ensaiado uma única vez, sem réplicas das medidas de tempo de deslocamento da onda.

Posteriormente, em um novo ensaio, foi obtido o “conjunto de dados 2”. Para cada quadrante 10 repetições foram realizadas a fim de garantir maior confiança dos resultados e delinear melhor o experimento, reduzindo a interferência de possíveis erros de operação de equipamento, por exemplo.

Finalmente, o “conjunto de dados 3” foi obtido de uma experimentação a parte, em que as medições foram aplicadas nos elementos que compõem as alvenarias, com o intuito de entender como se dava o comportamento da onda nas situações em que os transdutores estavam posicionados nos tijolos, argamassa de ligação e interface. Para isso, esses componentes foram

ensaiados isoladamente no painel com 10 (dez) réplicas por elemento, a Figura 6 ilustra a aplicação.

Figura 6 – Vista esquemática das medições ultrassônicas indiretas realizadas nos elementos da parede.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são discutidos os aspectos físicos referentes às ondas ultrassônicas, seguido da apresentação do ensaio de propagação do pulso ultrassônico, bem como o método estatístico utilizado na exploração dos dados.

#### 3.1 Ondas ultrassônicas

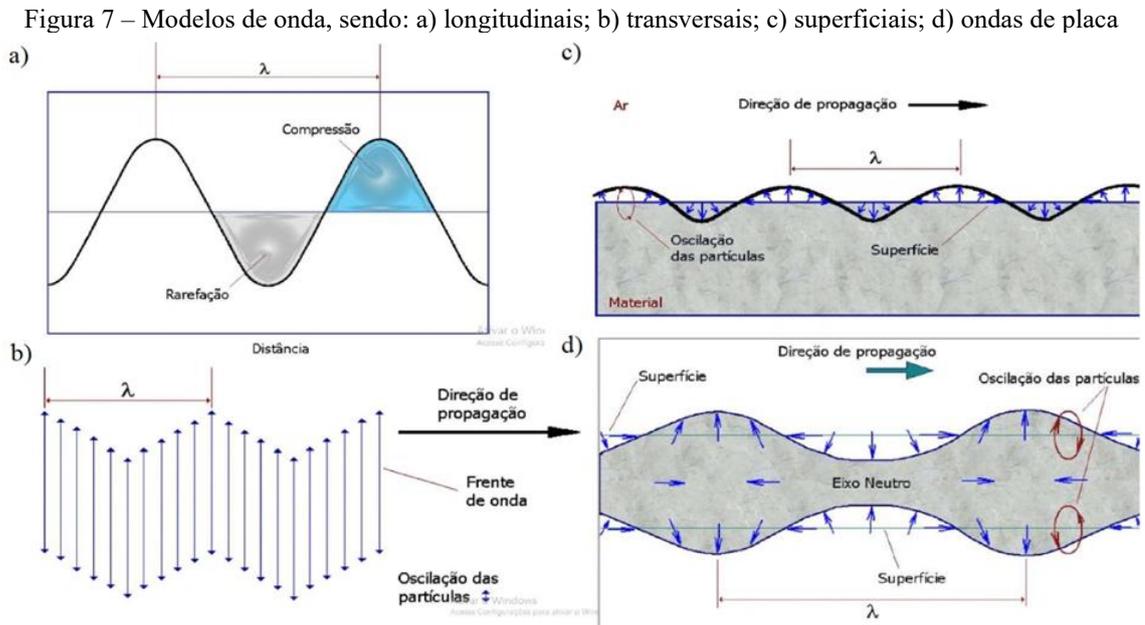
As ondas ultrassônicas são ondas sonoras mecânicas compreendidas no intervalo de alta frequência que varia entre 20 a 20000 kHz. Segundo Silva Neto (2014) essas ondas são originadas da deformação de um meio elástico e para se propagarem necessitam de um meio material, por isso não se propagam no vácuo. Ainda de acordo com o autor, a onda se propaga através de quaisquer forças externas, causando o deslocamento subatômico de um elemento que por sua vez desloca o elemento adjacente promovendo um desenvolvimento infinitesimal da onda. Esta propagação é bastante sensível ao meio, sendo o seu tempo de percurso afetado pelo que for encontrado no caminho e tornando possível a determinação do estado do material pela análise desse deslocamento.

##### 3.1.1 Tipos de ondas ultrassônicas

Segundo Berutti (2004) as ondas ultrassônicas podem ser divididas em longitudinais, transversais, superficiais e ondas de placa:

- Longitudinais: também chamadas de compressão, é o tipo de onda mais usado na inspeção de materiais, e se caracteriza por apresentar uma série de alternância entre compressão e rarefação.
- Transversais: caracterizadas pela oscilação da onda, onde as partículas vibram de cima para baixo necessitando de uma forte interação entre as mesmas.
- Superficiais: também chamadas de ondas de *Rayleigh* se propagam em superfícies planas ou curvas, onde a oscilação das partículas segue normalmente uma órbita elíptica.
- Ondas de Placa: também chamadas de ondas *Lamb*, se propagam em materiais que tenham apenas alguns comprimentos de onda de espessura, possui uma vibração complexa e seu movimento ainda não foi determinado com exatidão.

Dependendo da aplicação que se deseja, deve-se escolher uma forma de propagação diferente que melhor se adeque ao objetivo. Neste trabalho, pela disposição dos transdutores, as ondas superficiais foram utilizadas, visto que o objetivo era fazer a onda percorrer toda a camada do quadrante.



Fonte: Adaptado de Berutti (2004).

### 3.1.2 Atenuação

Ao se propagar em um meio material, as ondas sofrem uma diminuição de sua amplitude à medida que a distância ao ponto de emissão aumenta, este fenômeno é conhecido como atenuação. Dentre os principais mecanismos geradores encontram-se o espalhamento e absorção (HEADRICK et al., 2000). O primeiro deles está relacionado a convergência de feixes de ondas com velocidades ou direções diferentes e o segundo a perda de energia através de conversão com o efeito de desaceleração das partículas, como exposto por Hofmann (2015).

Essa característica inerente ao processo se mostra como um parâmetro importante por algumas razões, entre elas, pode ser citado o fato de que à medida que a atenuação varia com a frequência, outras propriedades, como a velocidade do pulso ultrassônico, podem ser afetadas (LANDIS; SHAH, 1995). A partir das alterações na velocidade da onda é possível estimar o estado do meio de propagação.

### 3.1.3 Impedância acústica

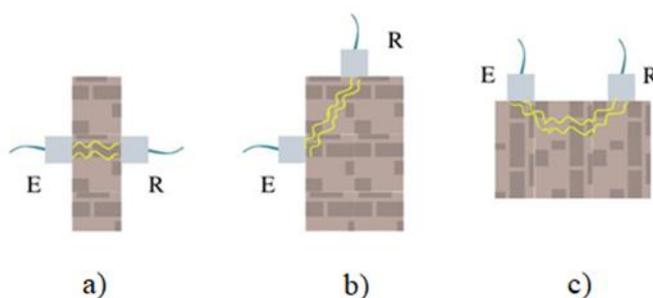
Esta propriedade está diretamente associada ao meio de propagação e pode ser definida como a resistência do material à passagem de um feixe de ondas em seu interior. De acordo com Silva (2011), a densidade do material influencia na impedância e, em situações de interface entre dois materiais diferentes, uma parte da onda seria refletida e outra parte passaria para o segundo material adjacente.

### 3.2 Ensaio de ultrassom

Por meio do uso da propagação de ondas, o ensaio de velocidade do pulso ultrassônico é bastante aplicado na caracterização de estruturas, destacando-se entre os ensaios não destrutivos, como comentado em Antonaci et al. (2013). Esta técnica consiste na emissão de um pulso ultrassônico produzido através de um cristal piezoelétrico dentro dos transdutores do equipamento. Este cristal, segundo Khairi et al. (2019), trabalha como um conversor de energia elétrica em energia mecânica, produzindo a onda que, ao chegar no outro transdutor, se transforma em pulso elétrico pelo processo inverso, e a partir desta segunda recepção se processa o tempo.

A aplicação do ensaio se dá por meio de três configurações de posicionamentos diferentes, sendo estas o método direto, indireto e semidireto. As normalizações que aplicam o método ultrassônico, por exemplo as normas NBR 8802 (ABNT, 2019), ASTM C 597 (ASTM, 2016) e BS EN 12504-4 (BS, 2004) para o concreto, e recentemente NBR 16805 (ABNT, 2020) para alvenarias, falam do uso destes com relação a como se encontra o objeto de análise e qual a aplicação requerida. A Figura 8 mostra o esquema dos posicionamentos citados.

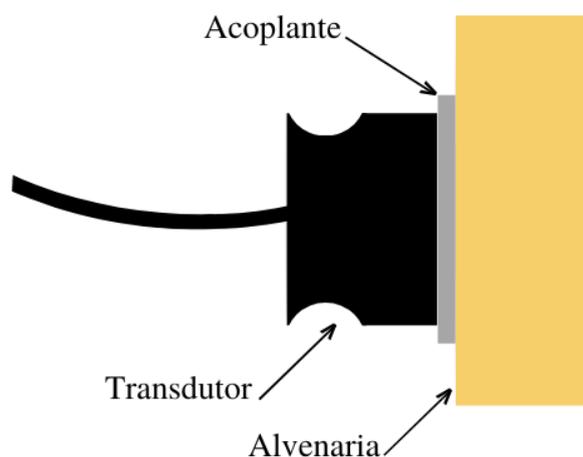
Figura 8 - Esquema dos modos de medição – a) direto, b) semidireto e c) indireto do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico com seus respectivos transdutores emissores (E) e receptores (R)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para preencher o ar entre os transdutores e a superfície da amostra é feito o uso das substâncias conhecidas como acoplantes. Segundo Ribeiro (2017) entre os mais usados estão a água, o óleo, a glicerina e as graxas de silicone. A impedância do ar peculiar frente aos materiais sólidos compromete a medição por isso se justifica o uso dessas substâncias. Um dos detalhes mais críticos de se assegurar durante o ensaio é o contato entre os transdutores e a superfície (HOFMANN, 2015), como demonstra a Figura 9.

Figura 9 - Esquema do contato transdutor e material de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao se executar o ensaio em alvenarias, utiliza-se de uma metodologia de seccionamento da parede em regiões denominadas de quadro ou quadrantes, de forma que nesses elementos se realizam as medições que serão utilizadas para a análise da condição da parede. Com base na extensão da parede se definem a quantidade e dimensão dos quadrantes.

Uma das principais vantagens do ensaio de ultrassom é sua possibilidade de reaplicação sem afetar a integridade do objeto em estudo. Além disso, é possível identificar falhas e descontinuidades internas que poderiam não ser encontradas por outros métodos, e os ensaios em si não apresentam insalubridade para o operador (RIBEIRO, 2017). Entretanto, ainda segundo o autor, o ensaio apresenta limitações por necessitar de boa qualificação do profissional envolvido para interpretar os resultados, além de uma preparação prévia da superfície para que os ensaios sejam de melhor aproveitamento.

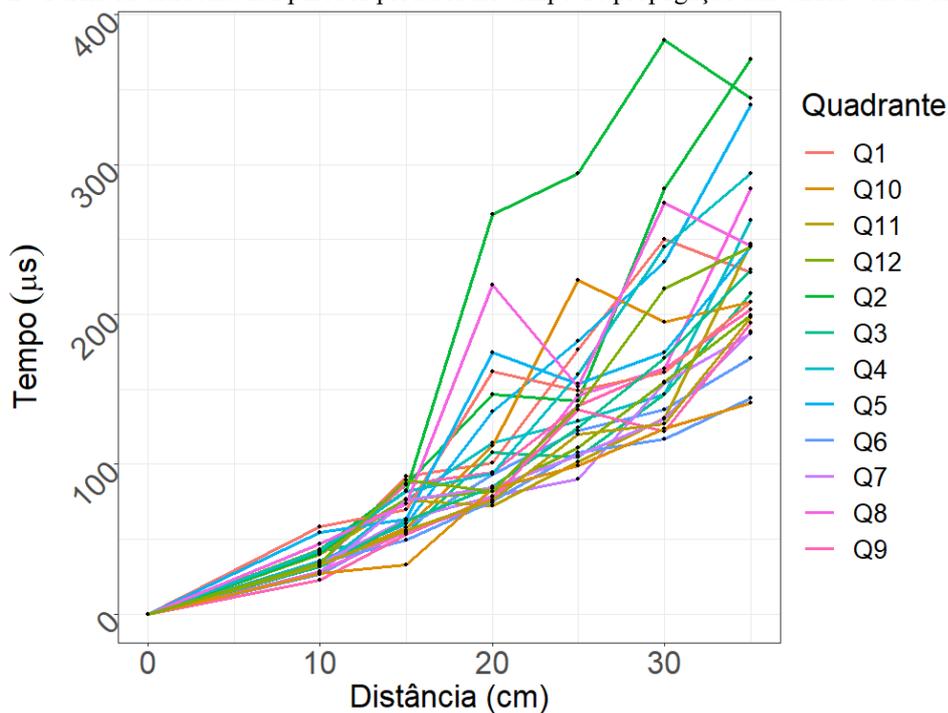
Como os ensaios de ultrassom podem produzir uma grande quantidade de dados, métodos estatísticos podem ser usados para complementar estudos já consolidados na literatura. Com isso, esses ensaios podem ser ainda mais bem aproveitados, sendo possível extrair

informações que muitas vezes não são possíveis usando abordagens usuais. A seguir, é exposto um método estatístico que pode ser usado para exploração de dados de ultrassom.

### 3.3 Método Estatístico

O método proposto neste trabalho para a exploração e interpretação de dados ultrassônicos consiste, inicialmente, em representar em um gráfico os dados em função do tempo de propagação das ondas *versus* distância. O Gráfico 2 mostra as 24 curvas (12 curvas de P1 e 12 curvas de P2), aqui chamado "perfil" do comportamento das ondas. Na estatística, esses tipos de curvas são frequentemente usadas para analisar o comportamento de dados coletados por medidas repetidas na mesma unidade amostral.

Gráfico 2 - Perfis da estrutura das paredes plotados no tempo de propagação das ondas versus distância.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Neste trabalho, também foram realizados ensaios com réplicas, considerando 10 medições por quadrante. Os dados se referem ao tempo que uma onda ultrassônica leva para ir de um ponto  $x_0$  até as posições  $x_1, x_2, \dots, x_6$  em cada quadro. Devido à metodologia de coleta de dados e considerando que o material apresenta propriedades semelhantes, espera-se uma tendência crescente linear para cada um dos perfis. Com base nisto, algumas questões foram destacadas neste trabalho:

1. É possível observar alguma mudança na tendência de crescimento linear dos perfis das paredes ultrassônicas?
2. Supondo que seja possível observar desvios da linearidade na tendência dos perfis ultrassônicos da parede, os perfis podem ser usados para identificar uma anomalia em uma parede de alvenaria?

### 3.3.1 Base teórica do método Lowess

O método de *Lowess* foi inicialmente proposto por Cleveland et al (1981), e usa regressões locais para descrever o comportamento dos dados. Nesta abordagem, para cada distância considerada  $D$ , uma regressão linear é ajustada na vizinhança de  $D$ . Para uma explicação deste método, considere para cada distância  $D$  um modelo de regressão linear ajustado em um conjunto de pontos na vizinhança de  $D$  determinado por uma constante  $h$  como:

$$T_i(D) = \beta_0(D) + \beta_1(D)D_i + \epsilon_i; \text{ para } D_i \in [D - h; D + h]. \quad (1)$$

Aqui,  $T_i$  é o tempo gasto pela onda para percorrer na  $i$ -ésima distância  $D_i$  e  $\epsilon_i$  é o termo de erro da regressão assumido ter média zero e variância constante para todos  $\epsilon_i$ . Os pontos que cercam  $D$  nos dados podem ser escolhidos subjetivamente ou de forma objetiva a partir dos dados observados. Observe que, nesta abordagem, várias regressões lineares podem ser ajustadas nos dados considerando apenas dois parâmetros ( $\beta_0(D)$  e  $\beta_1(D)$ ) para cada regressão. Assim, o conjunto dos pontos considerados em cada regressão pode ser visto como uma janela em torno de  $D$  no plano cartesiano.

Para reduzir o peso da contribuição de um determinado ponto  $D_i$  distante de  $D$ , em comparação com outros pontos da vizinhança, pesos podem ser associados aos modelos de regressão local, dados por (1). Com essa inclusão, a metodologia consiste basicamente em estimar  $\beta_0$ ;  $\beta_1$  e  $\sigma^2$  em cada regressão linear, a fim de minimizar a soma:

$$\sum \{ \omega_D(D_i) [T_i - \beta_0(D) - \beta_1(D)D_i]^2 \}; \text{ for } D_i \in [D - h; D + h]. \quad (2)$$

Para definir os pesos  $\omega_D(D_i)$  em (2), uma função Kernel é assumida como segue:

$$K_D(u) = (1 - |u|^3)^3, \text{ para } -1 \leq u \leq 1, \quad (3)$$

E os pesos  $\omega_D(D_i)$  são calculados como:

$$\omega_D(D_i) = K_D (D_i / (D+h)). \quad (4)$$

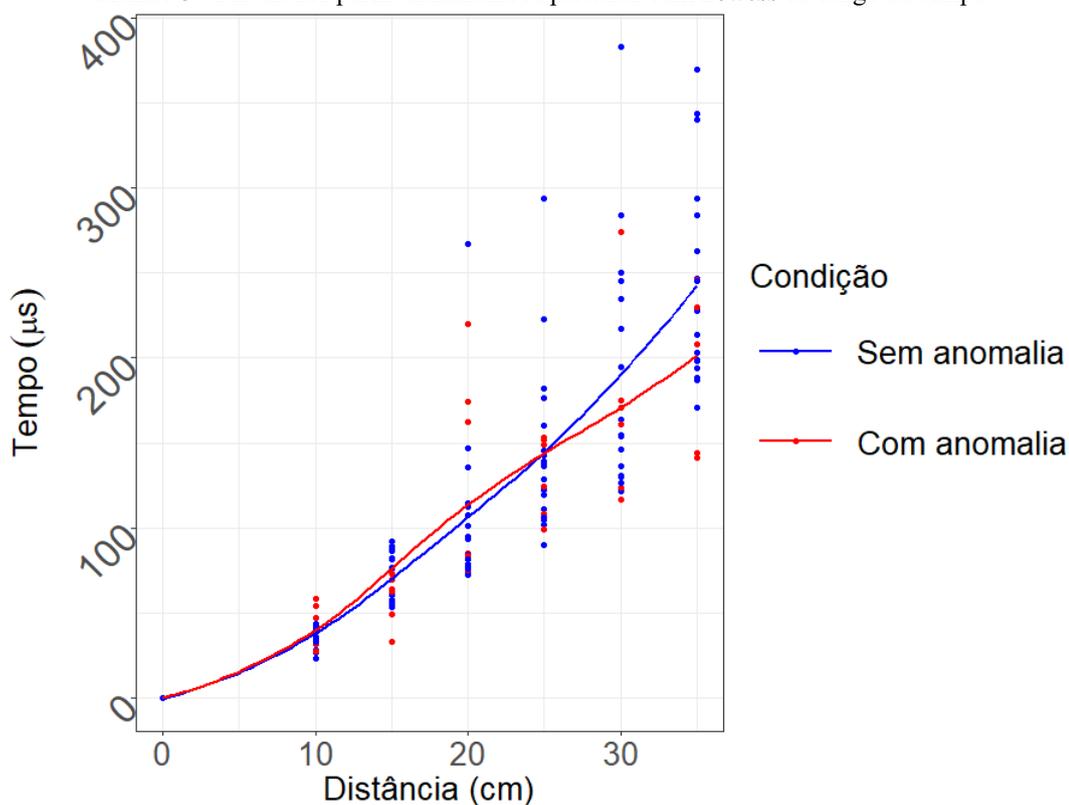
Para usar este modelo em dados ultrassônicos, o pacote “ggplot2” do R Development Core Team (2011) é usado, veja Wilkinson (2011) para detalhes.

#### 4 ESTUDO PRELIMINAR

Para dar início a verificação do método proposto para interpretação do ultrassom, um ensaio prévio foi realizado para gerar dados para uma exploração preliminar. Em cada quadrante dos espécimes de parede foram realizadas medições nos pontos descritos na Seção 3. Inicialmente é possível observar uma tendência crescente linear nos dados, mas não é possível identificar se as medições de todos os quadrantes seguem esse comportamento.

Prosseguindo com a análise dos dados ultrassônicos, o método de *Lowess* foi utilizado no processamento e com o uso desta ferramenta foi possível gerar as curvas suavizadas das paredes com e sem vazios (Gráfico 3).

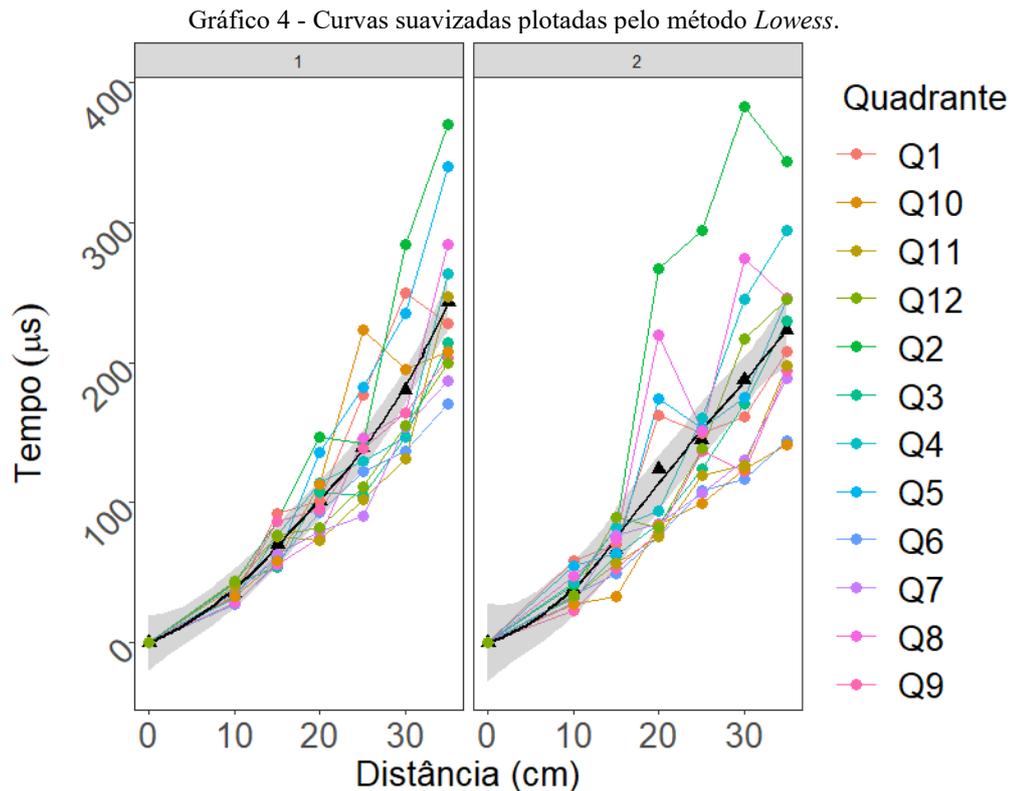
Gráfico 3- Curvas dos perfis ultrassônicos plotados com *Lowess* ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

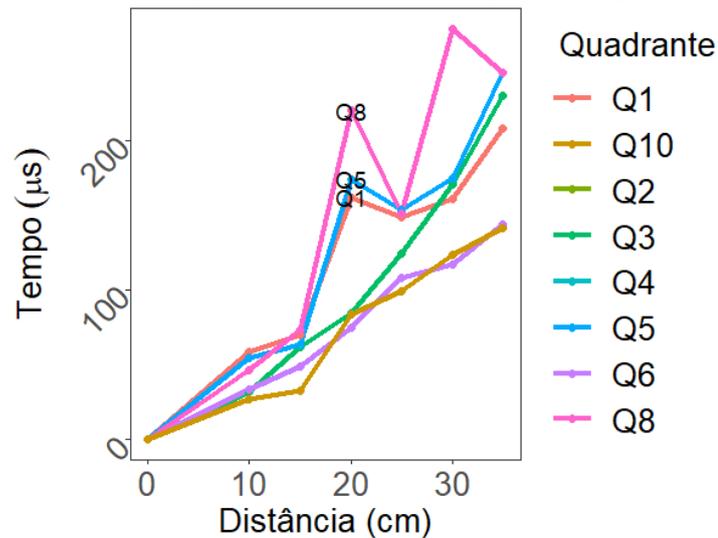
Como esperado, pode ser observado que existe tendência de crescimento nos dados, não só por fazerem parte do mesmo quadrante, mas também por serem medidos a partir do mesmo ponto de emissão. De tal forma, pontos de diferentes quadrantes tem uma relação menor devido a onda ser diferente em termos de ponto de emissão e também pela densidade do material.

Ainda analisando a curva média dos perfis com o método de *Lowess* é notável a diferença do comportamento da tendência global de cada painel. Para a parede sem anomalias (P1) observamos um comportamento mais linear, já quando temos a presença de anomalias (P2) podemos ver uma perturbação na curva média, a qual é representada no gráfico por uma linha preta, bem como uma maior dispersão dos dados, como é visto no Gráfico 4.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

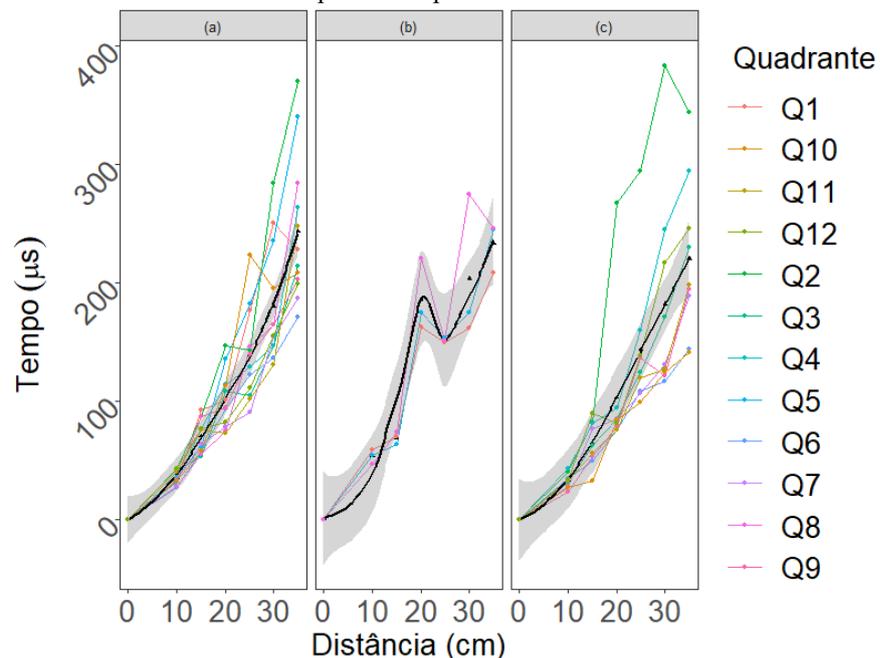
Para identificar quais medições estão perturbando a curva média, o Gráfico 5 foi construído. Ao analisar o gráfico, observa-se que os perfis de Q1, Q5 e Q8 têm um comportamento com potencial de causar um desvio na média, por destoarem das demais curvas exatamente no ponto da perturbação identificada, esses quadrantes possuem vazios.

Gráfico 5 – Perfis de perturbadores identificados pela abordagem de *Lowess*

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para evidenciar se realmente são esses quadrantes que estão causando o fenômeno e verificar se o desvio pode ser realmente causado por estes, o Gráfico 6 traz três curvas, sendo a primeira delas referente a parede sem vazios, a segunda aos três quadrantes identificados como possíveis influenciadores da tendência global e a terceira representando o grupo restante de quadrantes de P2. Podemos observar que a retirada dos referentes quadros mencionados promove uma suavização e deixa a curva de P2 mais similar à de P1.

Gráfico 6 – Perfis separados por comportamento, sendo a) P1 b) quadrantes perturbadores de P2 c) P2 sem os quadrantes perturbadores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

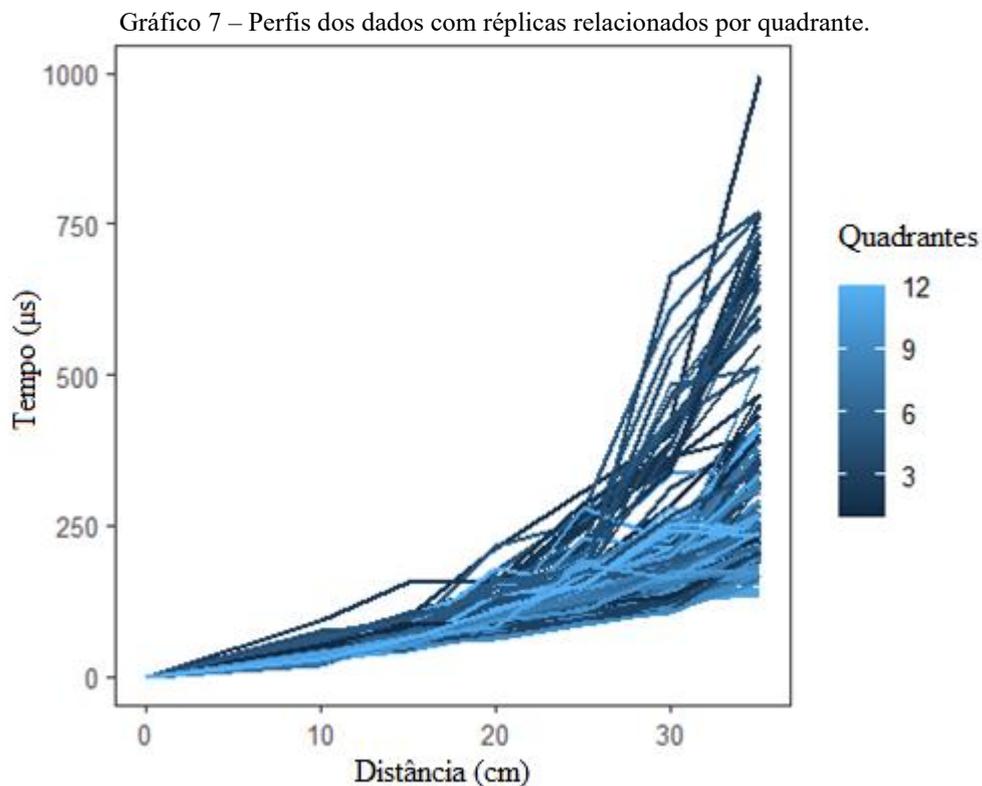
Considerando os dados das medições ultrassônicas nas paredes de tijolos de barro, a observação sobre os perfis perturbadores mostra que os vazios podem alterar o comportamento das ondas de maneira localizada, permitindo, assim, a identificação local de um vazio, mesmo que a parede apresente uma camada de cobertura com argamassa, com 15 mm de espessura.

Uma vantagem adicional sobre a aplicação da abordagem *Lowess* para analisar dados ultrassônicos é a possibilidade de visualização de maneira panorâmica, sendo possível identificar como as medidas individuais de um quadro estão influenciando os resultados globais. Este procedimento pode fornecer, por exemplo, a classificação dos diferentes comportamentos entre os dados analisados.

## 5 ESTUDO COM RÉPLICAS

A fim de obter resultados mais confiáveis, reduzindo influências de possíveis erros de operação e equipamento, um ensaio posterior foi realizado. Neste ensaio, em cada quadrante, as medições foram executadas como descritas na Seção 3, com um total de 10 réplicas por quadrante, resultando em 720 elementos no conjunto de dados de cada parede.

Primeiramente no processamento dos dados se deu a construção do gráfico com os perfis referentes a cada quadrante (Gráfico 7), formando a relação distância *versus* tempo, semelhante ao que foi obtido no estudo preliminar. Também foi possível perceber a característica ascendente com tendência crescente dos dados.



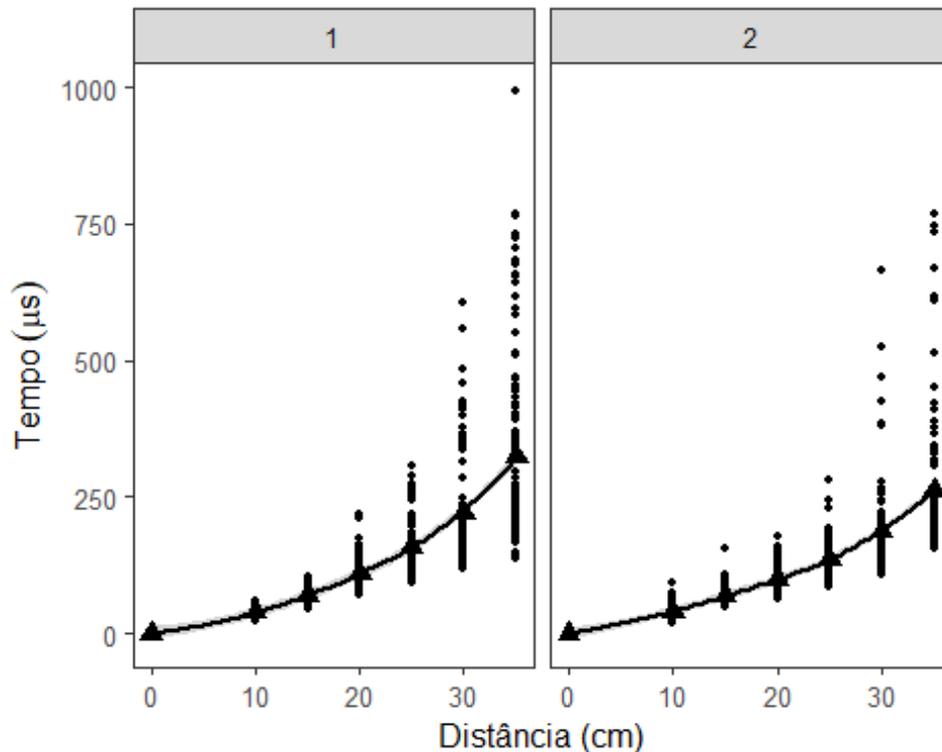
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O gráfico apresentado acima dá indícios que os quadrantes que estão nas partes mais inferiores das paredes, representados pela tonalidade de azul mais clara, possuem tempos de propagação inferiores, se comparados aos quadrantes posicionados mais acima no painel. Este fato possivelmente advém do efeito de compressão do peso próprio da estrutura e acaba conferindo nos quadrantes inferiores uma tensão maior, promovendo um contato mais direto

entre as partículas e facilitando a passagem da onda. Este fenômeno de influência da altura do ensaio também foi verificado em Miranda et al. (2010).

Analisando a curva média dos perfis com o método de *Lowess* (Gráfico 8), foi observado que, diferentemente do estudo preliminar onde foi encontrado uma anomalia na curva, nos dados com repetições foi obtida uma suavização da curva média. Além disso, foi notado que a parede P2 apresenta valores de tempo inferiores a P1, o que é um comportamento diferente ao apresentado em trabalhos como os de Wendrich et al. (2006) e Mesquita et al. (2018). Nestes trabalhos, regiões com vazios ou heterogeneidades apresentam velocidades mais baixas, conseqüentemente a onda teria que levar mais tempo para percorrer esse tipo de alvenaria.

Gráfico 8 – Curva média dos dados com réplicas separados por parede.

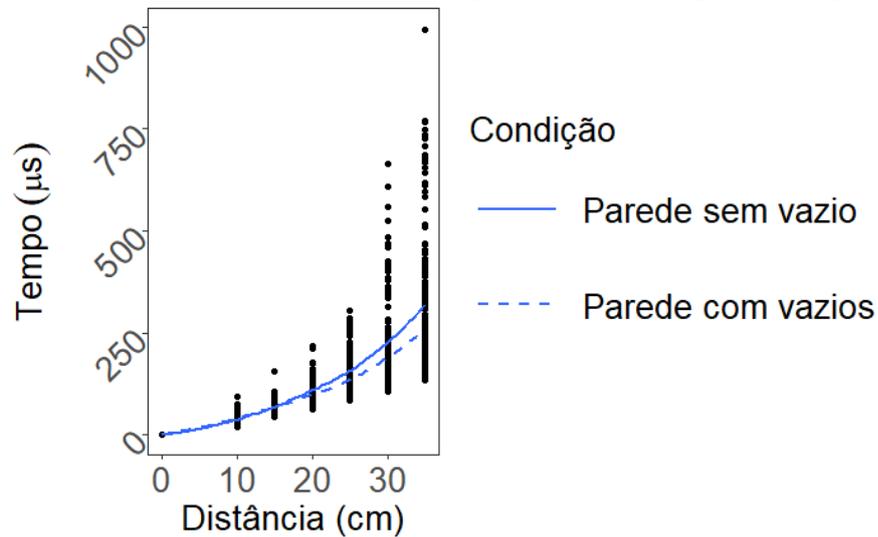


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Sobrepondo os dois gráficos (Gráfico 9) podemos perceber que a parede com vazios começa a obter medições menores próximo a posição de 20 cm, dentro do quadrante, e se mantém mais rápida que a parede de referência com um crescimento suave à medida que a distância aumenta. Para identificar as possíveis causas deste fenômeno buscou-se discriminar de maneira mais aprofundada os dados da parede com vazios. Desta maneira, estudou-se o

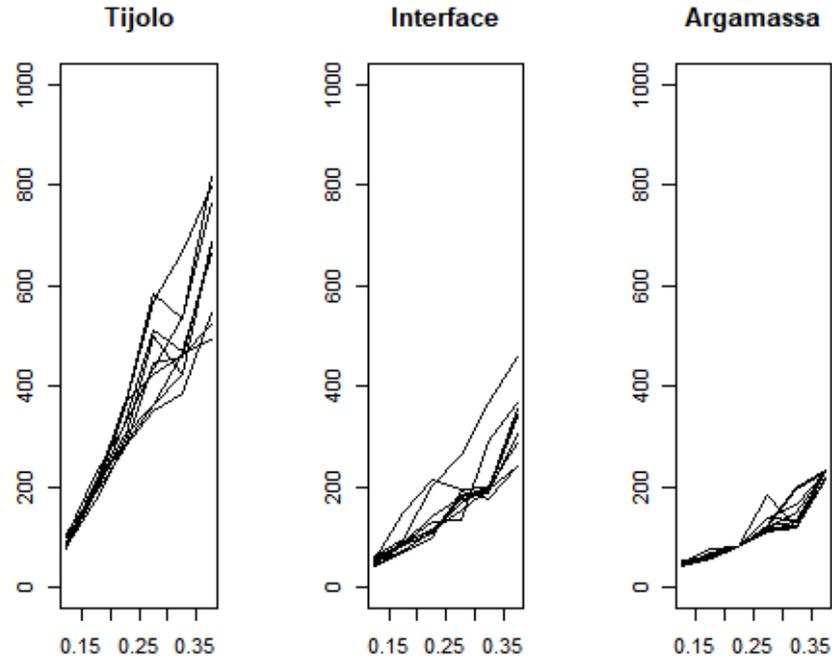
conjunto de dados 3, e realizou-se o estudo do comportamento da onda por elemento da alvenaria conforme visto no Gráfico 10.

Gráfico 9 – Curvas médias dos dados com réplicas separados por parede sobrepostas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 10 – Perfis dos dados com réplicas separados por elemento.



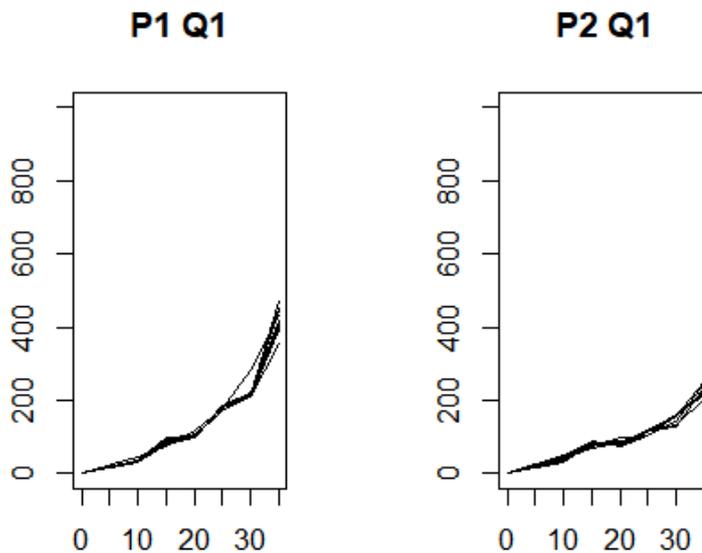
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por meio do Gráfico 10 é possível notar que o comportamento de propagação da onda em diferentes materiais não é o mesmo, sendo nas argamassas onde se obtém os menores

tempos medidos. Esta informação nos dá indícios de que a parede P2 obteve velocidades maiores, provavelmente devido a onda não adentrar ao vazio e se propagar pela camada de argamassa de revestimento existente na face de execução do ensaio.

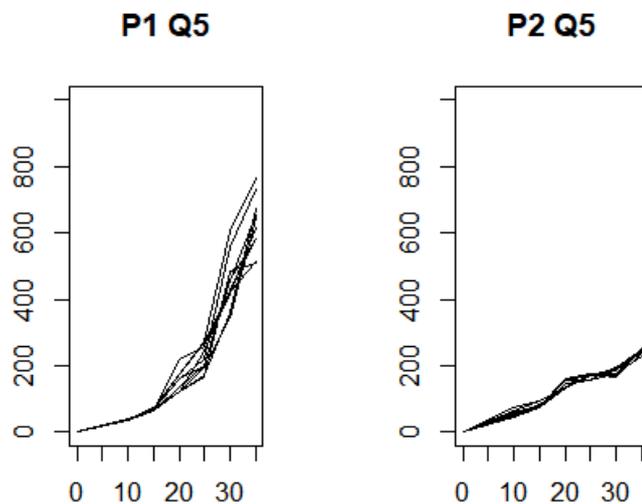
Para investigar mais profundamente os resultados, foram construídos os gráficos dos quadrantes que continham vazios em suas delimitações, sendo estes Q1, Q3, Q5, Q6, Q8 e Q10. Ao comparar os mesmos com a parede de referência P1, os quadrantes que possuem vazios onde os transdutores tocam diretamente sua localização (Q1, Q5, Q6 e Q10) apresentaram tempos menores (Gráfico 11 ao Gráfico 14).

Gráfico 11 – Comparação do Quadrante Q1 de ambos os painéis.



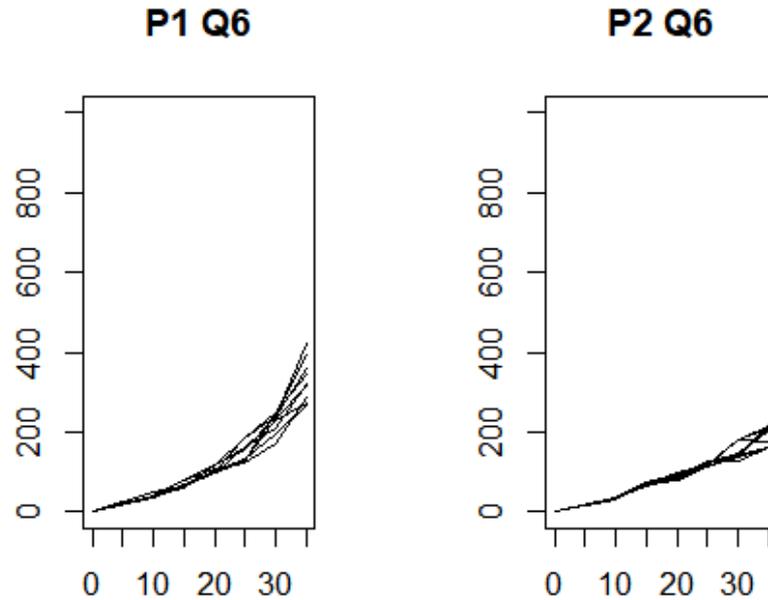
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 12 – Comparação do Quadrante Q5 de ambos os painéis.



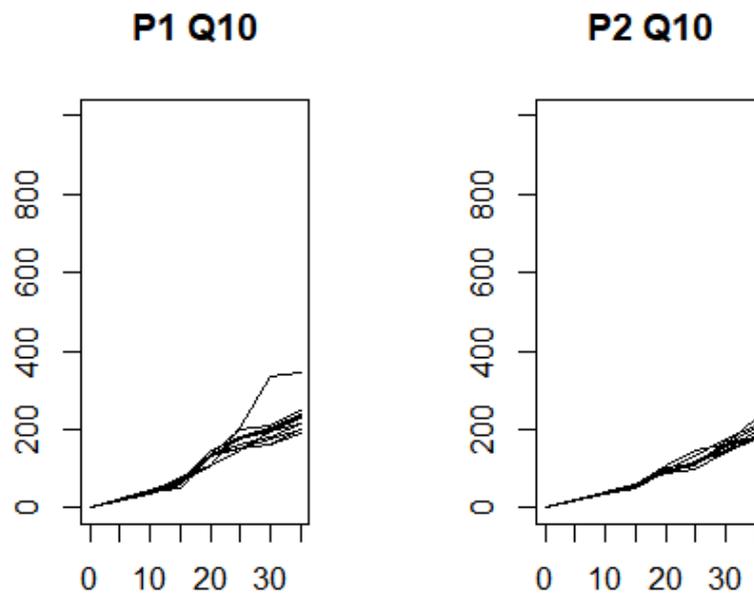
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 13 – Comparação do Quadrante Q6 de ambos os painéis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

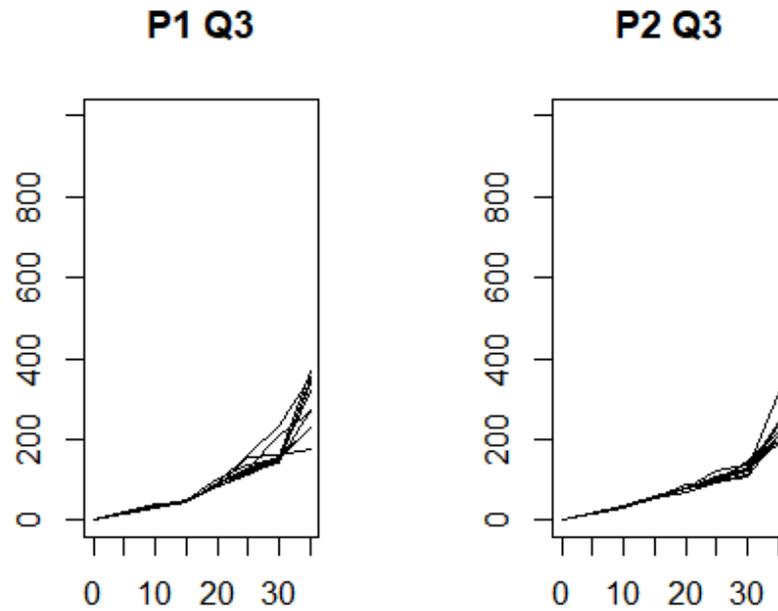
Gráfico 14 – Comparação do Quadrante Q10 de ambos os painéis



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

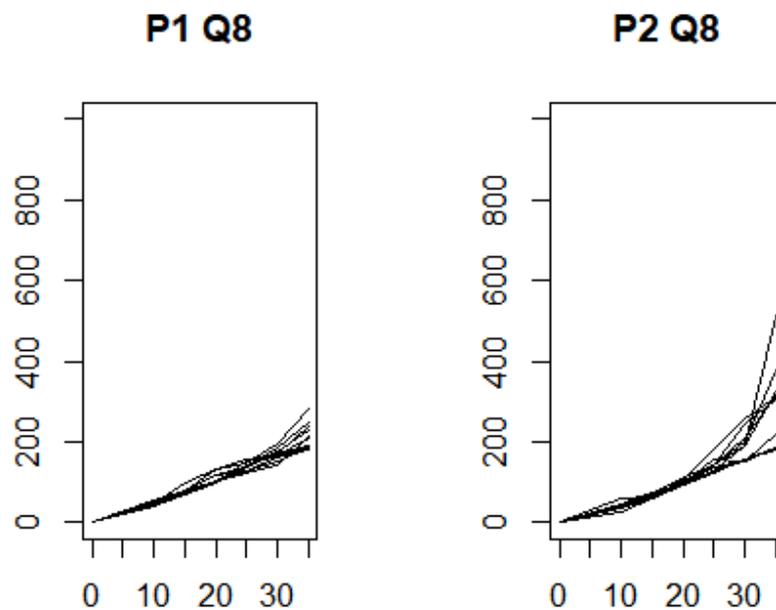
O que obteve o comportamento mais próximo nas duas paredes foi o quadrante Q10, porém este quadrante tem a peculiaridade de ter contido nele o vazio de menor dimensão do painel, fato que pode ter contribuído para tal proximidade de comportamentos. Nos demais quadrantes, onde o vazio não estava efetivamente sob a medição, (Q3 e Q8) a onda teve perfis semelhantes (Gráfico 15 e Gráfico 16).

Gráfico 15 – Comparação do Quadrante Q3 de ambos os painéis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 16 – Comparação do Quadrante Q8 de ambos os painéis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Dado as observações expostas nesta seção, foi possível observar nos painéis replicados em laboratório características evidenciadas em outros trabalhos com relação a influência da altura de realização do ensaio, bem como a influência do material onde a onda

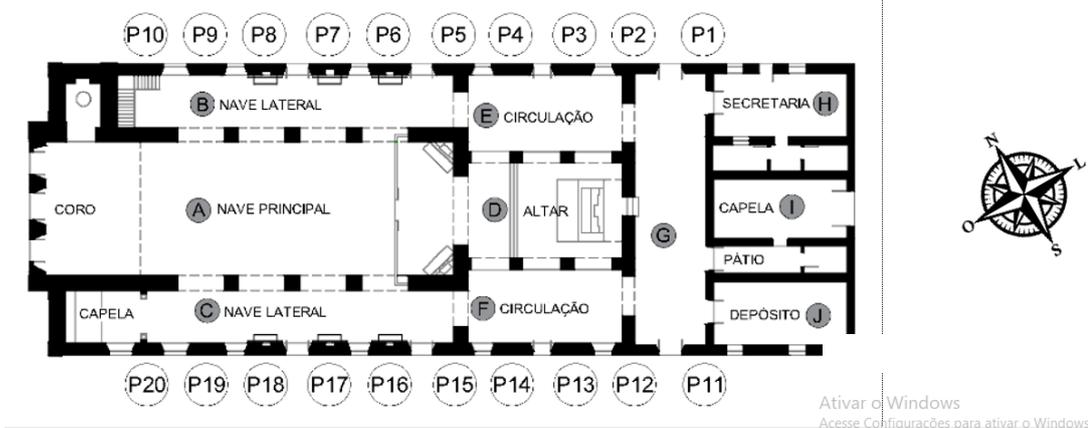
está sendo propagada, de modo que com a aplicação do método foi possível evidenciar os comportamentos diferenciados e levantar indícios sobre a condição da alvenaria.

## 6 APLICAÇÃO EM CONSTRUÇÃO HISTÓRICA

A fim de verificar se as observações levantadas a partir dos experimentos também se aplicam em dados colhidos *in situ*, um conjunto de dados cedido pelo Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB), também usado no trabalho de Araújo et al. (2021), foi submetido a exploração com o método visto neste trabalho. A base de dados é referente aos ensaios de pulsos ultrassônicos realizados na igreja da Nossa Senhora da Expectação, construída no ano de 1709 no município de Icó-CE, a construção mais antiga do município.

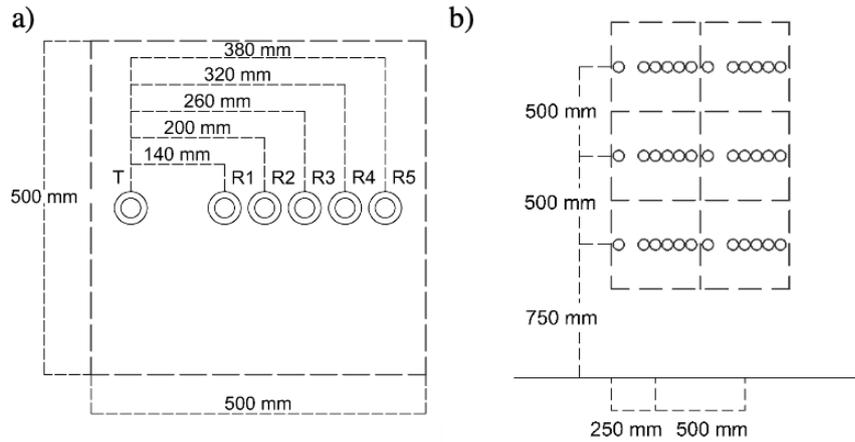
Semelhante aos experimentos tratados nas seções anteriores, a configuração de posicionamento dos transdutores foi a indireta e os mesmos também possuíam frequência de 54 kHz. As paredes exteriores da edificação foram o foco do ensaio e foram obtidos 20 painéis, porém ao total apenas 16 estavam no conjunto de dados. A Figura 10 mostra a localização dos painéis. O ensaio foi executado em três faixas de altura com quadrantes de 50 cm x 50 cm (Figura 11) e não foram realizadas réplicas nas medições dentro dos quadrantes.

Figura 10 – Posicionamento dos painéis na estrutura.



Fonte: Araújo et al. (2021).

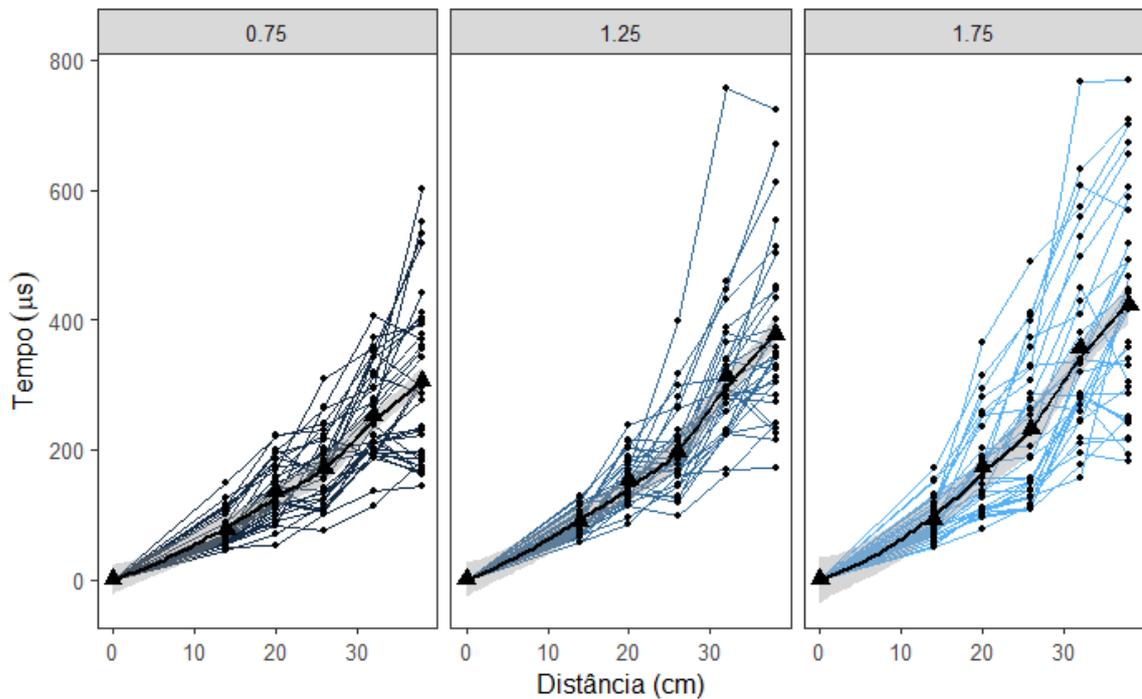
Figura 11 – Esquema de posicionamento e distância a) dos transdutores no quadrante e b) das alturas de medição dos painéis.



Fonte: Araújo et al. (2021).

Aplicando o método de *Lowess* para o conjunto de dados foi possível observar, como visto na seção anterior, que há indícios de que os quadrantes mais inferiores do painel possuem menor dispersão e tempos de propagação menores que os superiores (Gráfico 17) corroborando com as observações em laboratório.

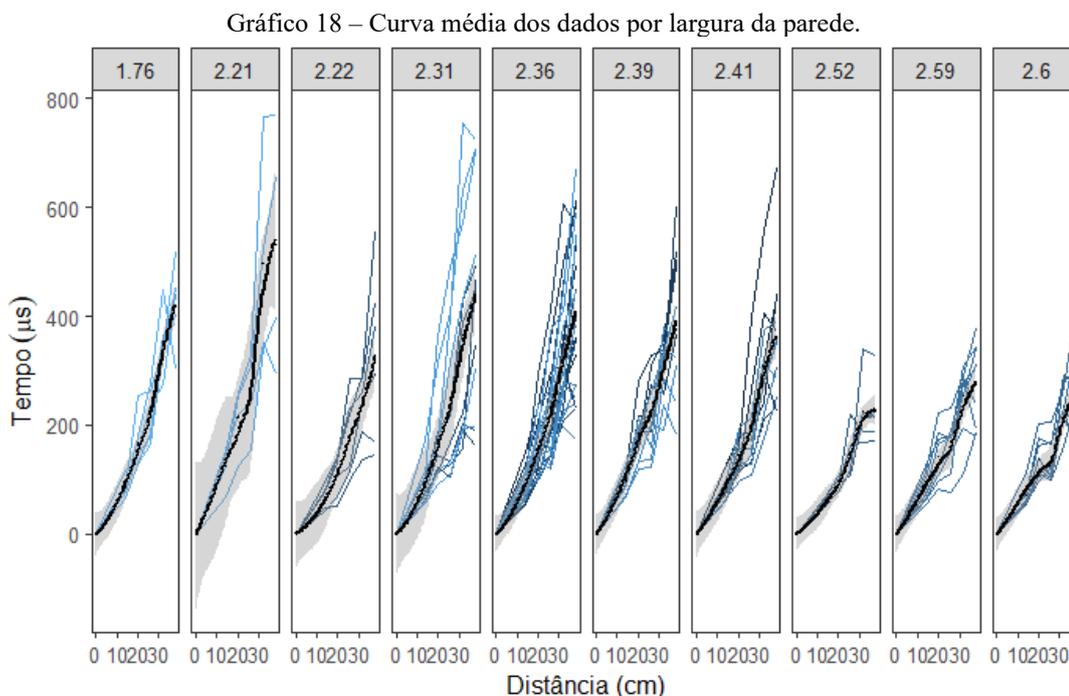
Gráfico 17 – Curva média dos dados por faixa de altura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com o intuito de avaliar mais variáveis que influenciam no ensaio em campo, os dados foram organizados considerando a largura da parede onde estavam sendo demarcados os

painéis. Conforme mostra o Gráfico 18, é possível perceber que à medida que a largura da parede cresce, menor a dispersão dos dados e menor o tempo médio de deslocamento da onda. Uma possível causa é a influência das tensões de borda advindas das esquadrias da edificação que quanto menor a parede mais próximas ficam das medições, porém não se pode afirmar ao certo com apenas uma repetição isolada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Outra peculiaridade observada foi a alta dispersão das medições na parede, podendo ser notada uma alta variabilidade dos valores no painel P19 com largura de 2,21m, possivelmente associado as observações feitas neste local, onde em especial foi encontrado um descolamento visível do revestimento (Figura 12) que pode ter provocado alterações na propagação da onda.

Figura 12 – Fissuração e descolamento de revestimento da parede P19.



Fonte: Araújo et al. (2021).

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como proposta apresentar uma abordagem para interpretação de dados ultrassônicos baseada no uso de ferramentas estatísticas. A partir de uma revisão sistemática de literatura foi possível identificar uma lacuna quanto ao uso de métodos estatísticos para exploração dos dados. Desta forma os ensaios realizados em laboratório e a análise de dados de uma construção histórica foram propostos para contribuir com futuras aplicações do MSE e com os estudos das alvenarias a partir do uso de ensaios não destrutivos.

Com um estudo preliminar foi possível perceber que, para o conjunto de dados analisado, os vazios causam o que foi chamado de perturbação da curva média da tendência do tempo de propagação da onda no interior da parede, para algumas distâncias preestabelecidas. Já ao realizar o segundo ensaio com réplicas, houve uma atenuação do desvio de linearidade, corroborando com a suposição inicial de que as ondas do painel com vazios foram mais rápidas do que as do painel intacto. Este fato dá indícios de que, no cenário com a presença de vazios, a onda não penetrou na parede, mas percorreu apenas no revestimento de argamassa.

Outro fator observado foi a influência da altura das medições na velocidade da onda, pois foi possível constatar que quanto mais elevado é o quadrante em relação ao chão, maiores são os valores e a dispersão dos dados, relação observada tanto em laboratório quanto no ensaio na construção histórica. Ao ser realizada a análise dos dados da igreja do município de Icó também observamos indícios da influência da largura da parede no tempo de propagação da onda, onde o tamanho da parede tende a diminuir esse tempo à medida que são mais largas.

Quanto ao comportamento da onda nos componentes das alvenarias, foi possível identificar a partir da exploração dos dados que as medições em argamassas tendem a ser mais rápidas do que as executadas nas interfaces da alvenaria ou tijolos, sendo este último componente o que demanda mais tempo na propagação. Todavia, por ser uma aplicação nova, ainda não se pode identificar tais padrões em dados de campo, necessitando de mais aplicações e estudos para reconhecer o que está sendo avaliado.

Assim, este trabalho busca contribuir para os avanços na caracterização de paredes antigas, introduzindo uma abordagem para análise e interpretação de dados de ultrassom coletados a partir de paredes de alvenaria. Uma vez que cada alvenaria apresenta seu próprio padrão de assentamento e pode variar de acordo com a composição, geometria e disposição dos materiais de alvenaria, entender como as ondas ultrassônicas por medições indiretas se comportam em seu interior é uma maneira de identificar se ocorre presença de vazios,

descolamentos de argamassas e outras anomalias, ou mesmo heterogeneidades entre uma junção de paredes do mesmo edifício.

Dado este cenário, os trabalhos futuros propostos são relacionados a mais aplicações desse e outros métodos em outros conjuntos de dados. Outros experimentos seriam úteis para reconhecer e distinguir os diversos padrões de comportamento que a onda pode assumir nas alvenarias. Novas metodologias estatísticas podem ser estudadas e aplicadas a fim de complementar o processo de interpretação dos dados, além disso podem contribuir de maneira mais pormenorizada com a caracterização das alvenarias sem causar danos a suas estruturas.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 597-16**. Standard test method for pulse velocity through concrete. Pensilvânia, 2016.
- ANTONACI, P.; FORMIA, A.; GLIOZZI, A. S.; SCALERANDI, M.; TULLIANI, J. M. Diagnostic application of nonlinear ultrasonics to characterize degradation by expansive salts in masonry systems. **NDT and E International**, vol. 55, p. 57–63, 2013. DOI 10.1016/j.ndteint.2013.01.013. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.01.013>.
- ARAÚJO, Emanuel et al. Physical and mechanical characterization of traditional Brazilian clay bricks from different centuries. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2020.
- ARAÚJO, E. et al. A New Approach for Assessment of the Coating Mortar Adherence in Ancient Masonries Through Ultrasonic Data. In: Delgado J. (eds) **Case Studies in Building Constructions. Building Pathology and Rehabilitation**, vol 15. Springer, Cham, 2021 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55893-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55893-2_4)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16805**: Ensaio não destrutivo - Ultrassom - Caracterização de painéis por velocidade de propagação ultrassônica. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 11 p.
- BERUTTI, Felipe Amorim. Aplicação de métodos de Ultra-som para avaliação e caracterização de microestrutura de materiais cerâmicos à base de alumina e sua associação com propriedades mecânicas, p. 152, 2004.
- BINDA, Luigi; SAISI, A.; TIRABOSCHI, Claudia. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. **Construction and Building materials**, v. 14, n. 4, p. 199-233, 2000.
- BRITISH STANDARD. **BS EN 12504**: Part 4. Determination of ultrasonic pulse velocity London, British Standards Institution. 2004
- CAMASSA, Domenico; CASTELLANO, Anna; FRADDOSIO, Aguinardo; PICCIONI, Mario Daniele. **Improvements of the Ultrasonic Tomography for Applications to Historical Masonry Constructions**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2019. vol. 18, . DOI 10.1007/978-3-319-99441-3. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-99441-3>.
- CLEVELAND, William S. LOWESS: A program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. **American Statistician**, v. 35, n. 1, p. 54, 1981.
- COTIC, Patricia; JAGLICIC, Zvonko; NIEDERLEITHINGER, Ernst; EFFNER, Ute; KRUSCHWITZ, Sabine; TRELA, Christiane; BOSILJKOV, Vlatko. Effect of moisture on the reliability of void detection in brickwork masonry using radar, ultrasonic and complex resistivity tomography. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, vol. 46, no.

10, p. 1723–1735, 2013. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-0011-3>.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. **PhD thesis in Civil Engineering—Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.**

FARRAR, Charles R.; WORDEN, Keith. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365, n. 1851, p. 303-315, 2007.

FIGUEIREDO, Margareth Gomes de. **Margareth Gomes de Figueiredo Valorização do sistema construtivo do património edificado.** 2014. 2014.

HEADRICK, Robert H. et al. Acoustic normal mode fluctuation statistics in the 1995 SWARM internal wave scattering experiment. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 1, p. 201-220, 2000.

HOFMANN, Mateus de Assunção et al. Atenuação da energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto. 2015.

IPHAN, Lista dos Bens Tombados e Processos em Andamento (1938 - 2019), 2019

Disponível em:

<http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Lista%20de%20bens%20tombados%20e%20processos%20de%20tombamento%2025-11-2019.xlsx>. Acesso em: 10 jan. 2021

KHAIRI, Mohd Taufiq Mohd; IBRAHIM, Sallehuddin; YUNUS, Mohd Amri Md; FARAMARZI, M.; SEAN, Goh Pei; PUSPPANATHAN, Jaysuman; ABID, A. Ultrasound computed tomography for material inspection: Principles, design and applications. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, vol. 146, p. 490–523, 2019. DOI 10.1016/j.measurement.2019.06.053. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.06.053>.

KHODAVERDIAN, Alireza; SHOMALI, Behzad. The actions of axial loads on masonries - Ultrasonic verifications and statistical analysis of obtained data. **Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas**, p. 886–887, 2010. <https://doi.org/10.2749/222137810796064246>.

LANDIS, Eric N.; SHAH, Surendra P. Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 121, n. 6, p. 737-743, 1995.

MESQUITA, Esequiel et al. Global overview on advances in structural health monitoring platforms. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 6, n. 3, p. 461-475, 2016.

MESQUITA, Esequiel et al. Heterogeneity detection of Portuguese–Brazilian masonries through ultrasonic velocities measurements. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 8, n. 5, p. 847-856, 2018.

MIRANDA, L. et al. Stone masonry characterization through sonic tests. In: **Cinpar 2010—VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras.** 2010.

OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa de. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultra-som**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RAGHAVAN, Ajay. Guided-wave structural health monitoring. 2007. Tese de Doutorado.

R DEVELOPMENT CORE TEAM, RFFSC et al. R: A language and environment for statistical computing. 2011.

RIBEIRO, Lucas Contiero. **CARACTERIZAÇÃO DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO HP FUNDIDO POR CENTRIFUGAÇÃO UTILIZANDO O ENSAIO DE ULTRASSOM. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.**

ROQUE, João C. Almendra; LOURENÇO, Paulo B. **Caracterização mecânica de paredes antigas de alvenaria: um caso de estudo no centro histórico de Bragança**. 2003.

SILVA, Bruno Pacheco da. Avaliação de falhas em revestimentos anticorrosivos pelo método de ensaio não-destrutivo por ultra-som. 2011.

SILVA NETO, Ramiro José. **Avaliação de técnica de medida do tempo de percurso de ondas ultrassônicas baseado no espectro de frequência**. 2014. Tese de Doutorado.

TAVUKÇUOĞLU, A.; AKEVREN, S.; GRINZATO, E. In situ examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing. **Journal of Modern Optics**, vol. 57, no. 18, p. 1779–1789, 2010.  
<https://doi.org/10.1080/09500340.2010.484553>.

WILKINSON, Leland. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis by WICKHAM, H. **Biometrics**, v. 67, n. 2, p. 678-679, 2011.

WENDRICH, Astrid; TRELA, Christiane; KRAUSE, Martin; MAIERHOFER, Christiane; EFFNER, Ute; WÖSTMANN, Jens. Location of voids in masonry structures by using radar and ultrasonic traveltime tomography. **Proc. 9th European Conference on NDT, 25-29 Sept. 2006, Berlin**, no. January, p. 1–11, 2006. Available at:  
<http://212.8.206.21/article/ecndt2006/doc/Tu.3.2.5.pdf>.

ZIELIŃSKA, Monika; RUCKA, Magdalena. Non-destructive assessment of masonry pillars using ultrasonic tomography. **Materials**, vol. 11, no. 12, p. 1–16, 2018.  
<https://doi.org/10.3390/ma11122543>.