



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

EMANUEL HENRIQUE ADRIANO ARAUJO

**PARAMETRIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ONDAS
ULTRASSÔNICAS EM PAINÉIS DE ALVENARIAS HISTÓRICAS**

RUSSAS

2021

EMANUEL HENRIQUE ADRIANO ARAUJO

PARAMETRIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ONDAS
ULTRASSÔNICAS EM PAINÉIS DE ALVENARIAS HISTÓRIAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, Campus
Russas, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: 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)

- A688p Araujo, Emanuel.
Parametrização e interpretação do comportamento de ondas ultrassônicas em painéis de alvenarias históricas / Emanuel Araujo. – 2022.
60 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita..
1. Velocidade de Propagação Ultrassônica. 2. Caracterização não destrutiva. 3. Painéis de Alvenaria. 4. Argamassa de revestimento. 5. Construção Histórica. I. Título.
- CDD 620
-

EMANUEL HENRIQUE ADRIANO ARAUJO

PARAMETRIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ONDAS
ULTRASSÔNICAS EM PAINÉIS DE ALVENARIAS HISTÓRICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, Campus
Russas, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Mylene Melo Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Israel Nilton Lopes Sousa
Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB/UFC)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por permitir todas as demais dedicações abaixo. Dedico a minha família por todo o apoio e carinho em toda minha formação como pessoa, dedico também a todos meus amigos adquiridos durante a graduação, que tornaram essa jornada menos cansativa e mais prazerosa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por se mostrar presente em minha vida nos mais mínimos detalhes, por ter me dado o discernimento de entendê-lo em meio a todo o conhecimento científico que sempre me fascinou.

À minha família, por sempre ser um exemplo dos caminhos e atitudes a serem tomados, por tornarem a minha jornada acadêmica algo natural, sempre me apoiando para que seguisse até o fim.

Ao Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, pela oportunidade de aprender com um grande profissional e estudioso, sendo também um grande amigo e orientador.

As instituições de pesquisa FUNCAP, Fundação ASTEF e UFC, pelo apoio financeiro com o financiamento dos projetos de pesquisa desenvolvidos ao longo desses anos.

Ao Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB), pelo ambiente de pesquisa e amizades desenvolvidas no campus UFC de Russas. Por todas as oportunidades de trabalho e pesquisa, que foram essenciais para minha formação como Engenheiro Civil.

Aos meus amigos da graduação, por todos os trabalhos desenvolvidos em grupo, dias no sol, madrugadas em reuniões, discussões e muitas risadas.

Por último, gostaria de agradecer aos meus professores, tanto os que contribuíram na minha formação durante a graduação, que foram extremamente importantes com cada contribuição, quanto os meus demais professores ao longo da vida, que em cada ensinamento, desde os mais primários, como aprender a ler e somar, até aos demais que me possibilitaram chegar na graduação.

RESUMO

As edificações históricas apresentam valor cultural e simbolizam a identidade de um local e de seu povo. Conforme a Carta de Atenas em 1931, resultante do I Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos de Monumentos Históricos, a preservação dos patrimônios deve ser pautada em um conjunto de técnicas a fim de impedir a perda dos seus traços históricos e artísticos originais. Neste contexto os Ensaio Não Destrutivos (END) tornam-se uma ferramenta essencial, uma vez que causam pouco ou nenhum dano à estrutura, dentre estes destaca-se o ensaio de propagação do pulso ultrassônico. Como contribuição a preservação do patrimônio histórico, neste trabalho foram realizados um conjunto de estudos a fim de entender o comportamento das ondas ultrassônicas pelo método indireto em painéis de alvenaria argamassados, a fim de melhor entender como os padrões de Velocidade de Propagação Ultrassônica (VPU) podem indicar a presença de manifestações patológicas nestes sistemas. Para tal, inicialmente realizou-se uma modelagem numérica de uma parede, a fim de entender as tensões atuantes resultante do peso próprio e como estas se relacionam com as VPU's, em seguida foi construída um modelo real em alvenaria de tijolos maciços em laboratório, onde uma das faces foi executado a argamassa de revestimento e a outra permaneceu em estado natural, objetivando entender a interferência desta nos resultados obtidos na VPU's, por último os conhecimentos bibliográficos e os resultados adquiridos foram aplicado em um estudo de caso na Igreja de Nossa Senhora da Expectação, uma antiga estrutura de alvenaria do ano de 1709 pertencente a Icó, Ceará, Brasil. Baseado nos resultados obtidos dos modelos em laboratório e na posterior aplicação destes em um caso real, foi possível identificar alguns padrões de comportamento das VPU's para diferentes situações e presença de manifestações patológicas as quais seguem, fissuração superficial, descontinuidades de materiais, falta de aderência entre substrato e revestimento, assim como a identificação de padrões em arranjos de tensões na estrutura. Os resultados mostram que a utilização do ultrassom pelo método indireto é uma técnica promissora para detecção de danos, essencialmente na argamassa de revestimento das alvenarias.

Palavras-chave: Velocidade de Propagação Ultrassônica, Caracterização não destrutiva; Painéis de Alvenaria; Argamassa de revestimento; Construção Histórica.

ABSTRACT

Historic buildings have cultural value and symbolize the identity of a place and its people. According to the Charter of Athens in 1931, resulting from the First International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, the preservation of heritage must be based on a set of techniques to prevent the loss of its original historical and artistic features. In this context the Non Destructive Tests (NDT) become an essential tool, since they cause little or no damage to the structure, among which the ultrasonic pulse propagation test stands out. As a contribution to the preservation of the historical heritage, in this work a set of studies were conducted to understand the behaviour of ultrasonic waves by the indirect method in mortar masonry panels, to better understand how the patterns of Ultrasonic Propagation Velocity (UPV) can indicate the presence of pathological manifestations in these systems. For this, initially a numerical modelling of a wall was done in order to understand the acting stresses resulting from self-weight and how these relate to the UPV's, then a real model of solid brick masonry was built in the laboratory, where one of the faces was mortared and the other remained in its natural state, finally, the bibliographical knowledge and the acquired results were applied to a case study in the Church of Nossa Senhora da Expectação, an old masonry structure from the year 1709 in Icó, Ceará, Brazil. Based on the results obtained from the laboratory models and their subsequent application in a real case, it was possible to identify some patterns of UPV behaviour for different situations and presence of pathological manifestations which follow, surface cracking, discontinuities of materials, lack of adhesion between substrate and coating, as well as the identification of patterns in stress arrangements in the structure. The results show that the use of ultrasound by the indirect method is a promising technique for detecting damage, essentially in the mortar coating of masonry.

Keywords: Ultrasonic Propagation Velocity, Non-Destructive Characterization; Masonry Panels; Mortar Coating; Historic Construction.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de ondas geradas em um sólido: longitudinais, transversais e superficiais ...	16
Figura 2 - Métodos de ensaio de propagação do pulso ultrassônico; a) direto; b) semidireto; c) indireto.....	18
Figura 3 - Modo de transmissão indireto.....	19
Figura 4 - Determinação da velocidade pelo modo de transmissão indireto.....	20
Figura 5 - Fachada Igreja Nossa Senhora da Expectação.....	22
Figura 6 - Fachada frontal e Sudoeste da Igreja Nossa Senhora da Expectação	23
Figura 7 - Planta baixa da Igreja Nossa Senhora da Expectação.....	23
Figura 8 - Exemplo de elemento finito poliédrico.....	25
Figura 9 - Vista superior, arranjo transdutor transmissor e receptor	26
Figura 10 - Painel de alvenaria: a) face com revestimento; b) face sem revestimento	27
Figura 11 - Painéis do laboratório a) Distâncias entre o transmissor e os receptores; b) Distancias entre os quadrantes.....	28
Figura 12 - Painéis estudo de caso a) Distâncias entre o transmissor e os receptores; b) Distâncias entre os quadrantes.....	29
Figura 13 - Comparação mapa de cores a) painel com argamassa de revestimento; b) painel sem argamassa de revestimento	32
Figura 14 - Resumo das VPU's da fachada Nordeste da Igreja de Nossa Senhora da Expectação	34
Figura 15 - Resumo das VPU's da fachada Sudoeste da Igreja de Nossa senhora da Expectação	35
Figura 16 - Esforços normais do peso próprio em um painel de alvenaria	36
Figura 17 - Mapa de VPU's para o comportamento padrão.....	37
Figura 18 - Resumo visual dos comportamentos dos 16 painéis.....	39
Figura 19 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P3	40
Figura 20 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P4	40
Figura 21 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P6	41
Figura 22 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P7	42
Figura 23 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P8	43
Figura 24 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P9	43
Figura 25 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P10	44
Figura 26 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P11	45

Figura 27 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P12	45
Figura 28 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P13	46
Figura 29 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P14	46
Figura 30 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P16	47
Figura 31 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P17	48
Figura 32 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P18	48
Figura 33 - Painel P19 com presença de fissuração superficial	49
Figura 34 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P19.	50
Figura 35 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P20	51
Figura 36 - Seção de estudo, propagação da VPU	52
Figura 37 - Propagação da onda em um painel com argamassa de revestimento bem aderida	52
Figura 38 - Propagação da onda em um painel com argamassa de revestimento fissurada	53

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade do macro material.....	25
Tabela 2 - Comparação das velocidades ultrassônicas (m/s) em painel com e sem argamassa de revestimento	33
Tabela 3 - Resultados gerais das VPU's dos painéis de alvenaria da Igreja de Nossa Senhora da Expectação.....	38

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
E	Módulo de Elasticidade
Ed	Módulo de elasticidade dinâmico
END	Ensaio não destrutivo
fc	Resistência  compressão
ft	resistência  tração
ICOMOS	International Council on Monument and Sites
l	Comprimento
m/s	Metros por segundo
NBR	Norma Brasileira
R	Transdutor Receptor
T	Transdutor Transmissor
t	Tempo
V	Velocidade
VPU	Velocidade de pulso ultrassônico
w	Peso Específico
v	Coefficiente de Poisson
RILEM	The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	13
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Ensaio não destrutivo	14
2.2	Ondas Ultrassônicas	14
2.3	Método de velocidade de pulso ultrassônico	16
2.4	Método indireto de propagação do pulso ultrassônico.....	17
2.5	Preservação do patrimônio histórico	20
2.6	Igreja Nossa Senhora da Expectação.....	21
3	METODOLOGIA	24
3.1	Primeira Etapa.....	24
3.2	Segunda Etapa	26
3.3	Terceira Etapa	28
4	RESULTADOS	31
4.1	Ensaio de caracterização das alvenarias experimentais	31
4.2	Estudo prático na igreja Nossa Senhora da Expectação	33
4.3	Propagação da VPU em painéis com presença de manifestações patológicas.....	51
5	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

O patrimônio histórico abrange as edificações que possuem valor histórico tanto em aspectos culturais quanto econômicos, sendo sua preservação de interesse social, uma vez que representa a história de uma sociedade. Dessa forma, a conservação de construções históricas é pertinente para a preservação da própria história de uma comunidade (MARTINI, 2019).

Assim como as edificações modernas, as construções históricas são formadas por materiais que quando em contato com o meio, sofrem ações que resultam na deterioração e, conseqüentemente, levam a uma redução do desempenho inicial, até atingir uma deficiência ou manifestação patológica, que venha a causar sérios danos à estrutura.

Por apresentarem incontestáveis valores culturais, todo trabalho de manutenção e reabilitação das construções históricas são indispensáveis para a valorização da história de uma sociedade. Mesquita (2018) destaca que embora venham sendo realizadas algumas restaurações em patrimônios históricos, nos últimos anos, nem sempre foram aplicadas técnicas apropriadas à restauração do sistema construtivo original, sendo constante o uso de técnicas e ferramentas intrusivas. Dessa forma, as principais falhas nos trabalhos de preservação estão na falta de conhecimento técnico das características dos materiais constituintes, seu histórico de origem, e seu comportamento estrutural, sendo este último bem divergente dos principais sistemas construtivos atuais.

No entanto, de acordo com o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios ICOMOS (2003), mesmo conhecendo características construtivas e materiais utilizados nas edificações históricas, estas informações não são suficientes para definir as técnicas de restauração, sendo necessário examinar a construção como um todo para se compreender os materiais, sistemas e condição cultural, física e histórica para então serem utilizadas as metodologias mais apropriadas e métodos de intervenção que melhor se adequem ao contexto da edificação.

Para o embasamento das ações necessárias à reabilitação das edificações, são realizadas profundas investigações sobre o estado de sua estrutura e, por questões de preservação da identidade, o método de avaliação deve ser o menos invasivo possível, preservando o máximo de características originais. Nesse sentido, há disponível na construção civil, uma série de testes denominados “ensaios não destrutivos” (END) que se caracterizam

como uma ótima ferramenta para avaliação da integridade de construções históricas, uma vez que causam pouco ou nenhum dano à estrutura analisada (ALVES, 2017).

Dentre os END existentes, destaca-se o ensaio de determinação de velocidade de pulso ultrassônico (VPU). Este método consiste em medir o tempo de propagação de uma onda ultrassônica através de um determinado material. Conhecendo-se a distância de propagação, é possível medir a velocidade da onda e fazer correlações com a qualidade e o tipo de material analisado.

Tendo como foco as edificações históricas brasileiras em tijolos maciços, o método de velocidade de pulso ultrassônico é útil para qualificação através da morfologia da secção da parede, para detectar a presença de espaços vazios e falhas e para encontrar padrões de fissura e danos (BINDA; SAISI; ZANZI, 2003). Entretanto, a caracterização de alvenarias é sempre uma tarefa difícil devido à sua variabilidade de tipologias e propriedades anisotrópicas (MIRANDA, 2011)

Uma das principais dificuldades encontradas ao realizar os ensaios com ultrassom é o manuseio do equipamento de maneira que a transmissão e recepção das ondas ultrassônicas possam ocorrer de maneira direta. Dessa forma a aplicação de medições de maneira indireta tem sido a solução para obter a caracterização de edificações. Mesquita *et al.* (2018), realizaram medidas de VPU para a caracterização de alvenarias, a partir do método indireto de velocidade pulso ultrassônico, indicando que o emprego do método de pulso ultrassônico indireto pode oferecer dados confiáveis para a caracterização de alvenarias de tijolo maciço, contribuindo para a compreensão das características estruturais das estruturas patrimoniais brasileiras.

Sabendo da escassez de trabalhos sobre caracterização de edificações históricas brasileiras, o presente trabalho pretende realizar um estudo a respeito do comportamento das ondas ultrassônicas em painéis de alvenaria, a fim de estabelecer parâmetros importantes que possam ser utilizados no monitoramento da saúde estrutural das edificações.

Nos últimos anos, uma série de avanços no âmbito da utilização de ensaios ultrassônicos com aplicações em alvenarias foram feitos, desde o emprego do ultrassom para se identificar a heterogeneidade de alvenarias históricas, conforme reportado em Mesquita (2018), como a aplicação para estimativa de parâmetros mecânicos das alvenarias, conforme reportado por Martini (2019) e Miranda (2011). Todavia, ainda há uma série de questões que precisam ser investigadas, a fim de parametrizar a interpretação destes dados, como o entendimento das maneiras que as manifestações patológicas interferem nas velocidades das VPU's, e como estas se apresentam em padrões ao longo do painel.

Desta forma o estudo do comportamento das ondas ultrassônicas pelo método indireto em painéis de alvenaria argamassada, 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.

Para tal, este trabalho realiza uma série de estudos, utilizando de modelo numéricos e estudos em laboratórios, para parametrização destes comportamentos para então realizar o ensaio em uma edificação histórica, a qual foi escolhida a Igreja Nossa Senhora da Expectação, uma antiga estrutura de alvenaria do ano de 1709, considerada a construção mais antiga de Icó, Ceará, Brasil. Além disso, busca-se também contribuir para ampliação da aplicação do teste ultrassônico indireto em painéis de alvenaria de tijolos maciços argamassados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de estratégias de caracterização de alvenarias histórica, a fim de entender e estabelecer parâmetros para avaliação da integridade de painéis argamassados de tijolos maciços, utilizando a propagação de ondas ultrassônicas pelo método indireto.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar como os ensaios ultrassônicos podem ser utilizados para avaliação da qualidade de revestimentos de alvenarias;
- Realizar uma modelagem numérica para entendimento das tensões atuantes em um painel de alvenaria submetido aos esforços de tensões normais.
- Entender como imperfeições, fissuras e carregamento podem influenciar a propagação das ondas ultrassônicas;
- Verificar a interferência da argamassa de revestimento na caracterização dos painéis de tijolos cerâmicos presente nos painéis de alvenaria;
- Estabelecer relações entre as VPU's e a presença de manifestações patológicas em painéis de alvenaria.
- Realizar a utilização do método estudado em uma edificação histórica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Ensaio não destrutivo

Ensaaios não destrutivos (END) são aqueles que causam pouco ou nenhum dano ao elemento ensaiado, incluem métodos capazes de obter informações das características tecnológicas de um material, ou ainda, monitorar a degradação de componentes e equipamentos da estrutura em serviço.

No âmbito da construção civil, os END podem ser usados tanto para avaliação de elementos em estruturas novas para se obter suas propriedades, como também em materiais com presença de manifestações patológicas e/ou com longo tempo de serviço. Para novas estruturas, as principais aplicações são relativas ao controle de qualidade, para estruturas já existentes, os END geralmente estão relacionados a uma avaliação da integridade ou adequação estrutural, principalmente quando, pelas questões de valor cultural, existem restrições de retirada de amostras para análise em laboratório.

Dentre os END atualmente difundidos na construção civil, um dos mais utilizados é o ensaio de determinação de velocidade de pulso ultrassônico, que a partir deste, podem ser obtidos uma série de propriedades adicionais dos materiais. Este método é preconizado no Brasil pela ABNT NBR 8802: 2013.

2.2 Ondas Ultrassônicas

Onda é uma perturbação que se propaga, de um ponto para outro, através de um meio, transmitindo energia sem transportar matéria. As ondas classificam-se quanto à sua natureza em ondas eletromagnéticas e mecânicas.

As ondas eletromagnéticas são originárias de perturbações em campos elétricos e magnéticos, que podem se propagar em meios materiais e no vácuo. Já as ondas mecânicas, necessitam de um meio material para se propagar. Neste caso enquadram-se as ondas sonoras, que se originam por uma perturbação em meio material sólido, líquido ou gasoso (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG,1993).

Ondas ultrassônicas são um tipo de onda mecânica, que tem a mesma natureza dos sons audíveis pelo homem, porém com frequências mais elevadas. O campo de frequência de ondas audíveis pelo homem é entre 20 Hz e 20 kHz. Qualquer onda com frequência abaixo

disso é chamada de infrassom, enquanto as ondas com frequência acima disso são chamadas de ultrassom (ANDREUCCI, 2011).

As ondas mecânicas dependem de um meio para propagação, e a velocidade de propagação dessas ondas também dependerá, entre outros fatores, deste meio. Essencialmente, os materiais são compostos por partículas, que no nível mais elementar são o Bóson de Higgs (P. W. Higgs 1966), com uma quantidade definida de energia que é transportada pelas ondas causando movimentos vibracionais. Nos sólidos, essas partículas apresentam um arranjo mais organizado devido ao fato de estarem quase juntas umas das outras, mas ainda apresentando movimentos vibracionais. Verifica-se que a velocidade do som nos sólidos é maior que nos líquidos, que por sua vez é maior que a velocidade do som nos gases. Desta forma, pode-se estabelecer a seguinte relação:

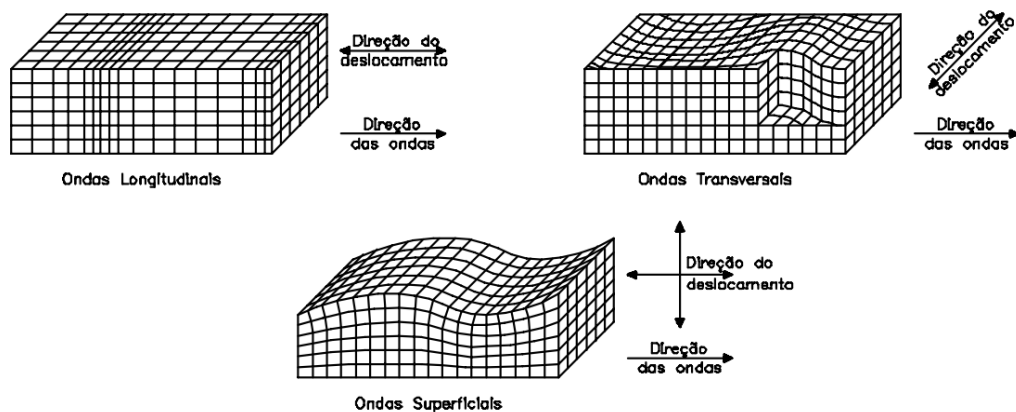
$$V_{\text{som nos sólidos}} > V_{\text{som nos líquidos}} > V_{\text{som gases}}$$

Esta observação será bastante importante para as análises que serão realizadas a partir da propagação das ondas ultrassônicas em diferentes materiais.

Os tipos de onda são geralmente conhecidos como longitudinal (também chamadas de ondas de compressão), transversal (também chamadas de ondas de cisalhamento) e de superfície (também chamadas ondas Rayleigh) (NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004). As ondas longitudinais propagam-se através de um meio sólido de maneira análoga à propagação de ondas sonoras no ar. Cada tipo de onda tem sua velocidade característica. Para um dado sólido, como o concreto, ondas longitudinais têm maiores velocidades e ondas de superfície têm menores velocidades.

De acordo com Bungey (1989) a diferença entre as ondas se dá pelo tipo de movimento provocado pelas partículas. As ondas longitudinais são aquelas em que o deslocamento das partículas ocorre na mesma direção em que se propagam. Nas ondas transversais o percurso da onda é perpendicular ao movimento das partículas. Enquanto as ondas superficiais têm as partículas se deslocando elipticamente ao longo da superfície do elemento, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de ondas geradas em um sólido: longitudinais, transversais e superficiais



Fonte: Filipczynski, Pawloswki e Wehr (1966).

Para replicar ondas ultrassônicas, é utilizado um aparelho de ultrassom específico para transmissão e recepção destas ondas, como será aprofundado no próximo tópico. Os transdutores dos aparelhos de ultrassom são projetados em geral para gerar ondas longitudinais, entretanto também são geradas algumas ondas transversais e de superfície, mas estas não chegam a causar interferência considerável nos ensaios. Por serem as mais rápidas, apenas as ondas longitudinais são captadas pelo transdutor receptor (BUNGEY, 1989).

2.3 Método de velocidade de pulso ultrassônico

O desenvolvimento do método da propagação de ondas ultrassônicas na engenharia civil, iniciou-se na década de 40, sendo aplicado para estudos em concretos, tendo como propulsores Leslie e Cheesman no Canadá, com um instrumento chamado Soniscópio, e com Jones na Inglaterra, desenvolvendo o UCT (Ultrasonic Concrete Tester), (HAMASSAKI, 1986).

O método de ensaio de propagação do pulso ultrassônico consiste na transmissão e recepção de ondas sonoras de alta frequência (superior a 20.000 Hz) através do material que se deseja analisar. Para um material homogêneo, isotrópico em meio infinito, esta velocidade de propagação depende da densidade e das propriedades elásticas desse material, conforme Equação 01 (BUNGEY, 1989; PUNDIT MANUAL, 1994; NAIK, MALHOTRA e POPOVICS, 2004).

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (01)$$

Com:

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (02)$$

Onde:

- V = velocidade de propagação de onda ultrassônica, m/s;
- Ed = módulo de elasticidade dinâmico, N/m² ou Pa;
- ρ = densidade, kg/m³;
- ν = coeficiente de Poisson dinâmico.

Diante disso, o método consiste em emitir a onda ultrassônica por dentro do material, medindo-se o tempo de sua propagação entre dois pontos determinados. Conhecida a distância entre os pontos dos quais foram realizados a transmissão e recepção da onda, é possível então determinar a velocidade média no trecho de propagação. Para tal utilizamos a Equação 03, onde V é a velocidade de propagação da onda ultrassônica em m/s, L é a distância entre a emissão e recepção da onda, em metros, e t é o tempo em segundos.

$$V = \frac{L}{t} \quad (03)$$

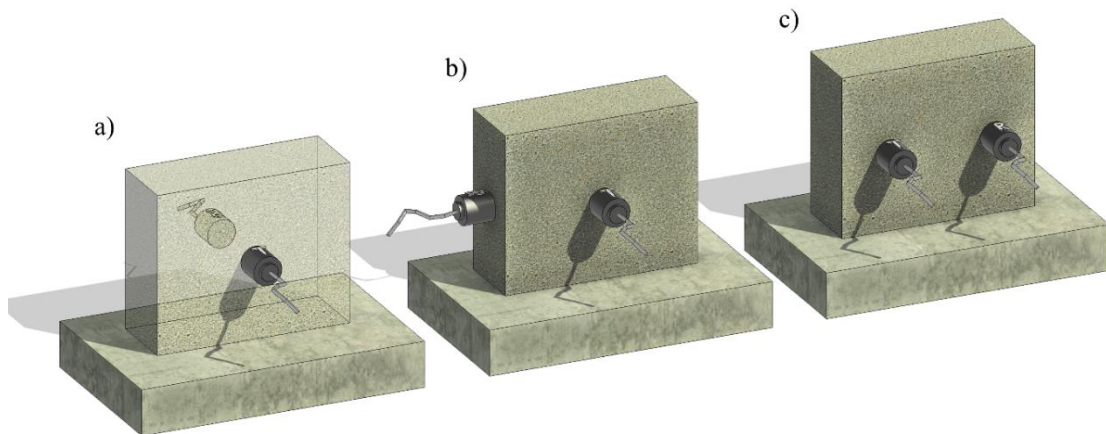
A velocidade do ultrassom nos painéis de alvenaria dependerá das estruturas de alvenaria em conjunto com as argamassas e os possíveis elementos nela incorporados. Como a velocidade decresce rapidamente ao se propagar por meios líquidos, e mais ainda, em meios gasosos, é possível usar a velocidade média de propagação como estimativa da quantidade de vazios e, conseqüentemente, da densidade do material (FIGUEIREDO, 2005).

2.4 Método indireto de propagação do pulso ultrassônico

A NBR 8802 (1994) descreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto, entretanto a mesma metodologia pode ser aplicada para demais elementos, como paredes de alvenaria. Esta norma indica três modos possíveis de realização do

ensaio, de acordo com o posicionamento dos transdutores transmissor e receptor, como está apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Métodos de ensaio de propagação do pulso ultrassônico; a) direto; b) semidireto; c) indireto



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Transmissão direta, com transdutores em faces opostas;
- Transmissão semidireta, com transdutores em faces adjacentes;
- Transmissão indireta, com transdutores na mesma face.

O modo de transmissão direta é o mais utilizado quando realizado em elementos de concreto, pois é nesta posição que a máxima energia é transmitida, porém necessita de duas faces para detecção, estando estas opostas entre si, o que em muitas situações não é possível.

O modo de transmissão semidireta é menos utilizado, porém é indispensável ao longo da realização de ensaios em campo, pois nesta configuração é possível evitar regiões de concentração de armaduras como cantos de pilares e vigas.

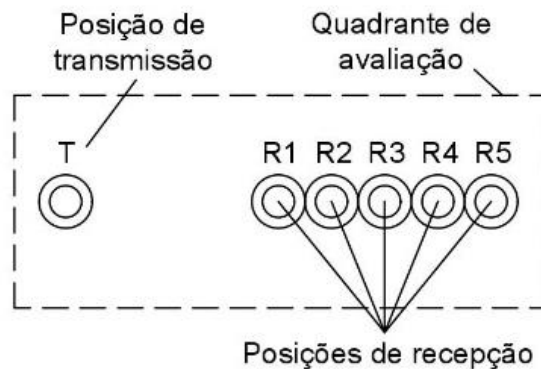
Já o modo de transmissão indireta é o menos utilizado, pois a intensidade do sinal recebido é significativamente menor do que a recebida no modo direto. Este modo é utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo-de-prova ou componente estrutural, como no caso de lajes, paredes, pavimentos de concreto ou barragens, dentre outros elementos de grande extensão.

Para este trabalho, os elementos estudados serão painéis de alvenaria maciças com revestimento em argamassa, o método de propagação do pulso ultrassônica utilizado será o indireto, dessa forma será abordado com mais detalhes apenas este método.

Embora o método indireto seja o menos indicado, várias normas descrevem procedimentos específicos para o modo indireto, como a NBR 16805: 2020, RILEM NDT1 (1972), BS 1881: Part 203 (1986) e a norma EN-ISO 8047 (1994).

Conforme a NBR 16805: 2020, este procedimento consiste em fixar o transdutor-emissor e caminhar o transdutor-receptor ao longo do material por distâncias pré-definidas fazendo leituras sucessivas, como apresentado na Figura 3.

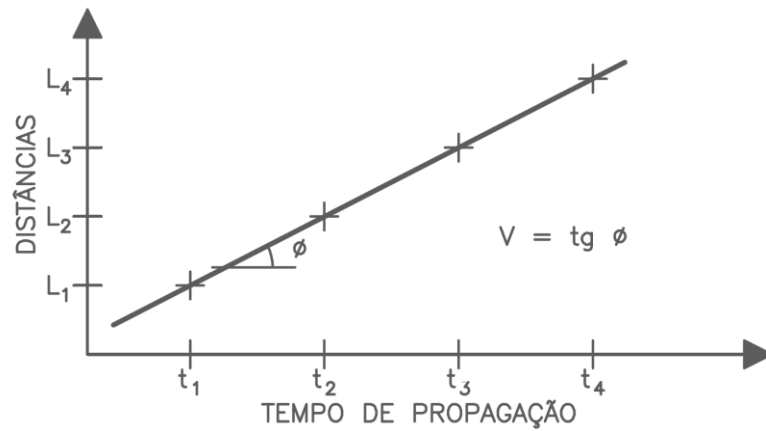
Figura 3 - Modo de transmissão indireto



Fonte: NBR 16805 (2020).

Para encontrar a velocidade de propagação do pulso, as leituras sucessivas de tempo de propagação e as distâncias entres os transdutores, são plotados em um gráfico Tempo de Propagação versus Distância marcando os pontos para cada distância lida, conforme apresentado na Figura 4. Os pontos obtidos, são aproximados por uma reta que melhor se ajusta a eles, a reta pode ser obtida com o auxílio de uma ferramenta computacional, o coeficiente angular desta reta será a velocidade da onda ultrassônica, pelo modo de transmissão indireto.

Figura 4 - Determinação da velocidade pelo modo de transmissão indireto



Fonte: NBR 16805: 2020.

2.5 Preservação do patrimônio histórico

Patrimônios culturais possuem grande relevância na identidade cultural de um determinado grupo de pessoas e sua região, neles estão representadas as tradições e costumes daquele povo, permitindo resgatar a origem que fazem parte dos costumes atuais, sendo essencial no entendimento da sociedade, logo a preservação do Patrimônio Histórico é uma questão urbana.

A conservação de bens patrimoniais de uma região, abrange edificações que tenham um significado coletivo para uma determinada comunidade, que perpetua a memória de uma sociedade, logo, preservar estes patrimônios é manter vivo a memória da construção de sua história (TOMAZ, 2010).

O Patrimônio Histórico além de manter a função cultural de manter a memória de uma região, também pode contribuir para a manutenção e até mesmo o crescimento econômico e social desta. O motivo é a potencial movimentação turística proveniente das mais variadas origens, em que os visitantes buscam conhecer e aprofundar-se nas tradições e costumes locais (ARAÚJO, 2018).

Embora o patrimônio histórico tenha tanta importância, como já mencionado, muitos destes acabam sendo negligenciados por parte da população e de órgãos governamentais, para impedir essa degradação do patrimônio, um importante instrumento na

luta pela preservação destes é o processo de tombamento, instituído no Brasil inicialmente pelo Decreto de Lei nº 25, de 1937.

O tombamento garante que o patrimônio seja preservado, definindo limites para realização de intervenções no mesmo, assim como estabelece os órgãos de proteção e âmbito de guarda que será instaurado sobre o bem, cada um desses órgãos possui autarquias encarregadas de preservar os patrimônios a ela delegada.

Outro órgão importante no que se diz respeito a preservação do patrimônio histórico nacional, é o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), criado em 1937 e pertencente ao Governo Federal, tem por finalidade a preservação dos patrimônios culturais materiais e imateriais em todo território nacional.

Essa necessidade de preservação do Patrimônio, é um assunto discutido e estudado em todo o mundo, um dos primeiros documentos internacionais realizados com o objetivo de estabelecer conceitos de proteção aos patrimônios históricos foi abordado na Carta de Atenas em 1931, resultante do I Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos de Monumentos Históricos, promovido pelo Escritório Internacional dos Museus (OIM). Neste documento foi estabelecido alguns princípios relacionados à preservação dos patrimônios, impedindo que intervenções realizadas de maneira inadequada pudessem causar a perda dos seus traços históricos e artísticos.

Posteriormente, em 1964, foi realizado na cidade de Veneza o II Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos dos Monumentos Históricos, que elaborou a Carta de Veneza, que por sua vez foi adotada pelo Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) uma organização não governamental global associada à UNESCO. Na ocasião, foram revisados e aprofundados os conceitos estabelecidos na Carta de Atenas no que diz respeito à preservação de patrimônios históricos.

2.6 Igreja Nossa Senhora da Expectação

A Igreja de Nossa Senhora da Expectação, primeira edificação do município de Icó, cidade localizada a 366 km da capital do estado do Ceará, Brasil, integra um dos mais de 300 imóveis tombados como patrimônio histórico pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) em 1998, é pertencente ao Conjunto Arquitetônico e Urbanístico de Icó – CE. Construída em 1709, originalmente com o nome de Capela de Nossa Senhora do Ó, a edificação destaca-se por ser o templo mais antigo do município de Icó e por sua

importância histórica, uma vez que a partir de 1709, a cidade teve seu início, com o crescimento do povoado em torno desta Igreja. Em 1736, a então Capela de Nossa Senhora do Ó, foi escolhida como Igreja Matriz, título que detém até hoje; e como consequência disto, o então Arraial da Ribeira dos Icós elevou-se à categoria de vila (VIANA, 2011).

Figura 5 - Fachada Igreja Nossa Senhora da Expectação



Fonte: <https://mapio.net/pic/p-11060499/>.

A Igreja passou por algumas ampliações e intervenções em sua estrutura ao longo dos anos, entretanto algumas destas mudanças, as anteriores ao seu tombamento, não são possíveis determinar, devido à escassez de documentos históricos que descrevessem tais intervenções. Já as mudanças posteriores ao tombamento, podem ser apresentadas com uma melhor veracidade.

Um ano após seu tombamento, 1999, a Igreja passou por uma grande reforma, onde foram restauradas suas cores originais, as quais eram, paredes brancas e esquadrias verde colonial, assim como a restauração da escada de acesso ao coro e do madeiramento da cobertura.

Já em 2004, uma nova intervenção foi realizada, desta vez o foco foi nos pilares devido a infiltração causada pela alta concentração de salitre na composição do solo, também foi renovada a pintura das paredes externas, portas principais e substituição do sistema de iluminação.

A Igreja possui um cruzeiro à sua frente e sua fachada é composta por uma única torre à sua esquerda, Figura 6, medindo 18,07m de altura, com sino, base octogonal e terminação piramidal, também octogonal. As três portas principais, correspondentes à nave central, são almofadadas e as superiores são guarnecidas por balcões de ferro e os vãos das portas principais possuem arco abatido. Os frontões do corpo central e da área correspondente

à circulação lateral direita são triangulares, com cimalthas encurvadas e alteradas, volutas e coruchéus diversos (NETO, 2007).

Figura 6 - Fachada frontal e Sudoeste da Igreja Nossa Senhora da Expectação

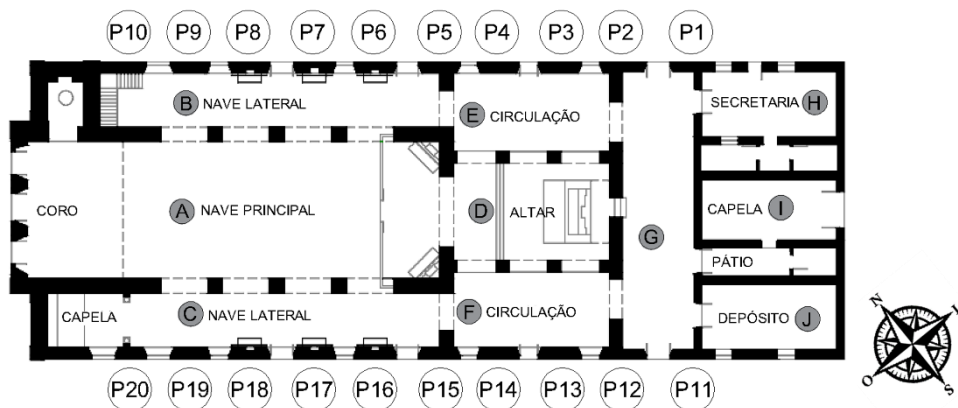


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Igreja da Expectação possui uma nave principal, com bancos de madeira voltados para o altar, e duas naves laterais, cada uma separada com quatro aberturas em arco da nave principal, além de portas e janelas que dão acesso ao exterior.

A Igreja possui 45,47 m de comprimento e 16,64 m de largura, internamente, pode-se dividi-la em dez ambientes, de acordo com a Figura 7. São eles: nave central (A), naves laterais (B) e (C), altar (D), áreas de circulação (E) e (F), sacristia (G), secretaria (H), capela (I) e depósito (J).

Figura 7 - Planta baixa da Igreja Nossa Senhora da Expectação



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura da igreja é composta por alvenaria de tijolos maciços com espessuras variando entre 46 cm e 90 cm e foi construída utilizando-se técnicas vernaculares, com blocos de tijolos com valores dimensionais médios de 50 x 25 x 5 cm unidos entre si por uma argamassa de cal variante entre 1cm e 1,50 cm de altura (C. Garcia, 2019).

3 METODOLOGIA

Diante da proposta deste trabalho de realizar uma parametrização e interpretação dos dados obtidos a partir da propagação de ondas ultrassônicas pelo método indireto, a metodologia deste trabalho será dividido em 3 etapas, as duas primeiras, serão voltadas para estudos em laboratório em conjunto com um estudo de literatura incluindo uma modelagem numérica e uma análise em um modelo real, a fim de entender propriedades básicas da propagação das ondas pelo método indireto, estudando como diferentes fatores interferem nas velocidades obtidas e como utilizar estes valores, já terceira etapa consistirá na aplicação dos resultados obtidos em um estudo de caso na edificação Igreja Nossa Senho da Expectação em Icó Ceará.

3.1 Primeira Etapa

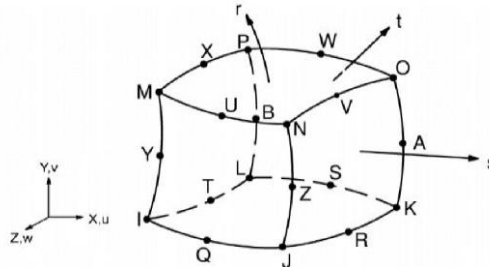
A primeira etapa para realização deste trabalho, consiste em executar uma modelagem numérica de uma parede de alvenaria de tijolos maciços, a fim de entender como é a propagação de tensões em uma parede de alvenarias exposta apenas aos esforços normais do peso próprio da edificação, para que estes esforços sejam comparados as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas.

A modelagem numérica, é muitas vezes utilizada para realização de análises estruturais, sendo realizadas computacionalmente com o uso de métodos numéricos, nos quais resolvem um sistema de equações diferenciais parciais, obtendo soluções sobre o estado de tensão e deformação de um determinado corpo.

O método utilizado foi o MEF (Método dos Elementos Finitos), que devido aos avanços computacionais se tornou uma importante ferramenta para caracterização estrutural. O método consiste em criar um modelo estrutural no computador e dividir esse modelo em uma malha com pequenos elementos finitos, nos quais são baseados em teorias estruturais, como a teoria das vigas, e formulações matemáticas apropriadas. Assim, para cada caso de análise

poderá ser empregado um elemento finito apropriado, como os mostrados na Figura 8 - Exemplo de elemento finito poliédrico.

Figura 8 - Exemplo de elemento finito poliédrico



Fonte: Ansys 2016.

A geometria foi elaborada seguindo os conceitos da macro modelagem, a qual consistiu na representação de uma parede de alvenaria por um único material. Recorreu-se a literatura para a definição das propriedades mecânicas do material. Foi consultado o NTC 2008- Decreto Ministeriale 14/1/2008 de onde obtive os valores do módulo de elasticidade (E) e peso específico (w), e resistência à compressão (fc), já para o coeficiente de Poisson (v), seguiu-se os valores adotados no estudo realizado por (F. Brandão,2016) e para a resistência à tração (ft) os valores adotados por Delgado (2013). Tais valores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedade do macro material

Propriedades adotadas na modelagem numérica				
E (GPa)	w (kN/m ³)	v	fc (MPa)	ft (Mpa)
1,50	18,00	0,20	3,20	0,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

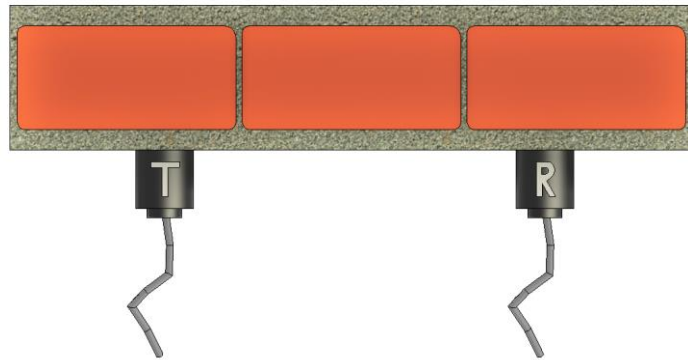
O Pannel modelado consiste em uma parede de 1m de largura por 2m de altura, a área estudada será até apenas 1,5m de altura, entretanto escolheu-se realizar uma modelagem da parede com altura de 2m para a melhor visualização das tensões normais. Para a malha, uma vez que a geometria é simétrica e regular, optou-se por um sólido hexaédrico, correspondendo a cubos de 10 cm de arestas. A parede foi fixada em um dos lados de menor dimensão é aplicado a força gravitacional causando uma reação apenas pelo peso próprio.

3.2 Segunda Etapa

A segunda etapa deste trabalho consistiu em construir painéis de alvenaria em laboratório a fim de representar os componentes construtivos reais, e simular a aferição das velocidades ultrassônica sem a interferências de agentes externos.

O método de transmissão do pulso ultrassônico indireto seguiu-se conforme a norma a NBR 16805: 2020, consistiu no modo de arranjo do transdutor-transmissor (T) e do transdutor-receptor (R), onde estes ficam posicionados na mesma face do material analisado, como pode ser observado na Figura 9.

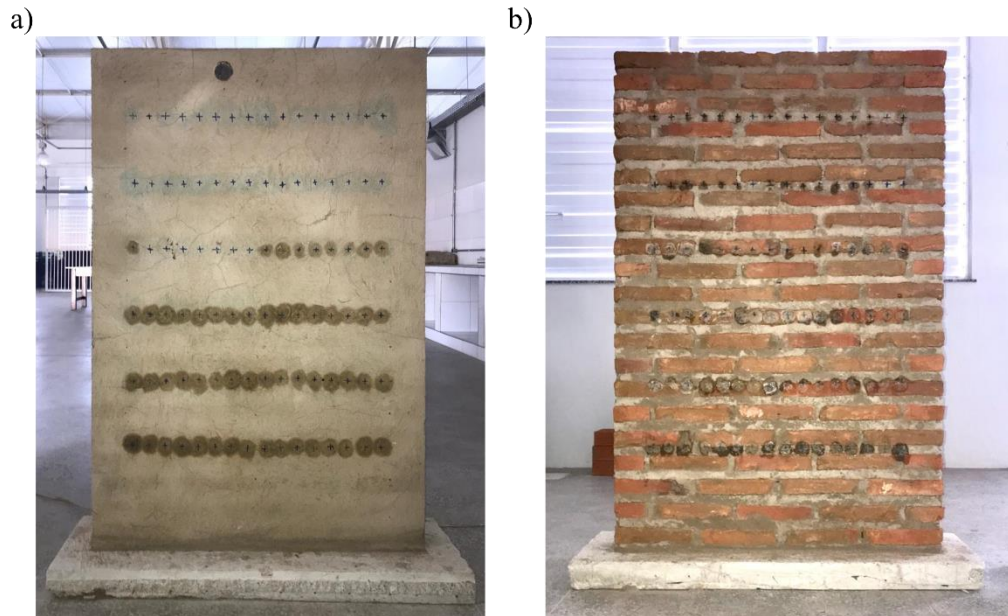
Figura 9 - Vista superior, arranjo transdutor transmissor e receptor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para isso, foi então construído uma parede modelo de 150 x 100 x 13,5 cm, com tijolos de dimensões de 4,60 cm x 24,70 cm x 12,30 cm e massa específica de 2.000 kg / m³, unidos por uma argamassa de cal na proporção 1: 1 (cal: agregado fino, em massa). Finalmente, os painéis foram recobertos por argamassa de cal com espessura de 1,5 cm de espessura, na proporção de 1: 6 (cal: agregado fino, em massa), em seguida foram deixados 40 dias em processo de secagem para então serem usadas no experimento. O painel construído ainda apresentou uma das faces revestidas completamente com argamassa de cal, como pode ser verificado na Figura 10 (a), enquanto na outra face os tijolos permaneceram aparentes Figura 10 (b).

Figura 10 - PAINEL DE ALVENARIA: a) face com revestimento; b) face sem revestimento

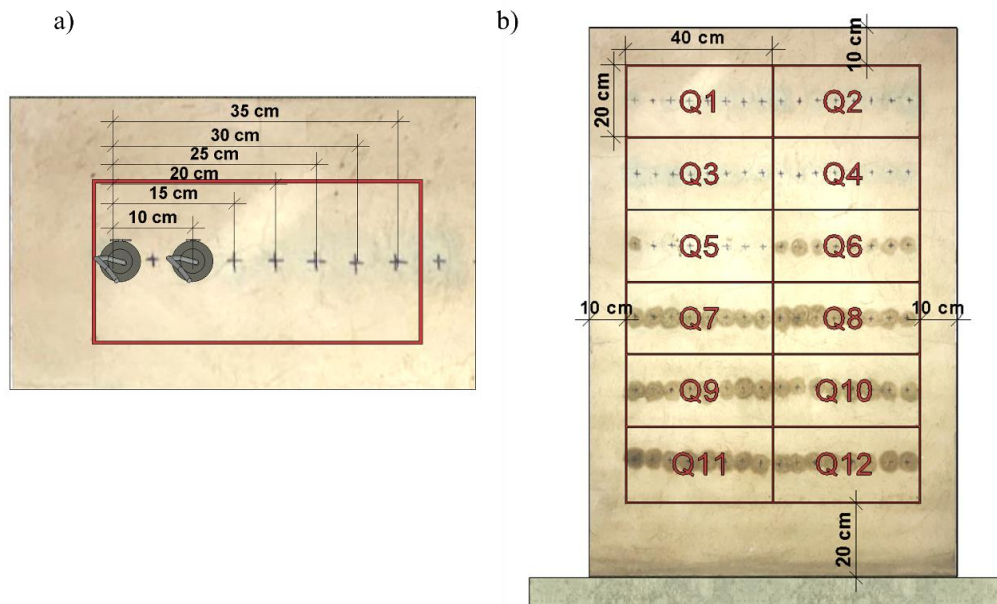


Fonte: Elaborado pelo autor.

O principal objetivo dessa análise foi entender como a argamassa de revestimento interfere na caracterização do painel de alvenaria pelo método ultrassônico indireto, logo os painéis foram ensaiados em suas duas faces, conforme podem ser apresentados na Figura 10.

Para a aplicação do método, foram selecionados 12 quadrantes de 40 x 20 cm, espaçados 20 cm da base e 10 cm das demais extremidades, como mostra a Figura 11. Dessa forma para a aplicação do método indireto, foram realizadas 6 medições posicionando-se o transdutor transmissor no primeiro ponto de maneira fixa e variando o transdutor receptor em 5cm. No entanto, para a implementação do método indireto, seguiu-se as determinações de (MESQUITA et al., 2018), em que inicialmente o transdutor transmissor foi espaçado em 10 cm do transdutor receptor, e posteriormente variou-se a posição do segundo em 5 cm até a obtenção de 6 medições.

Figura 11 - Painéis do laboratório a) Distâncias entre o transmissor e os receptores; b) Distâncias entre os quadrantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização do ensaio de ultrassom, foi utilizado o equipamento Proceq® PUNDIT 2000® 54 KHz, acoplado a dois transdutores, transmissor e receptor, permitindo a mensuração das velocidades de pulso ultrassônico.

3.3 Terceira Etapa

A terceira etapa consiste em aplicar os resultados observados nas etapas anteriores, assim como o conjunto de informações que podem ser obtidas pela literatura, a fim de realizar a aplicação em um estudo de caso. Para o estudo escolheu-se a Igreja Nossa Senhora da Expectação, uma antiga estrutura de alvenaria do ano de 1709, considerada a construção mais antiga de Icó, Ceará, Brasil.

O equipamento de ultrassom utilizado foi o mesmo da segunda etapa, Proceq® PUNDIT 2000® 54 KHz. O processamento de dados foi realizado com base nas recomendações da NBR 16805: 2020, e o método de transmissão das ondas também foi o indireto, assim como o realizado na segunda etapa da metodologia.

Foram selecionados 20 painéis para análise, dessa forma os painéis foram identificados de P1 a P20, nas laterais da igreja, de maneira que entre os painéis P1 a P10, estão localizados a Nordeste da igreja, enquanto os painéis de P11 a P20 estão situados na lateral

Sudoeste. Durante a realização do procedimento experimental apenas 16 dos 20 painéis foram de fato ensaiados, uma vez que alguns destes estavam intercomunicados com demais estruturas, tal arranjo interferiria na leitura dos resultados. A numeração utilizada pode ser vista na Figura 7.

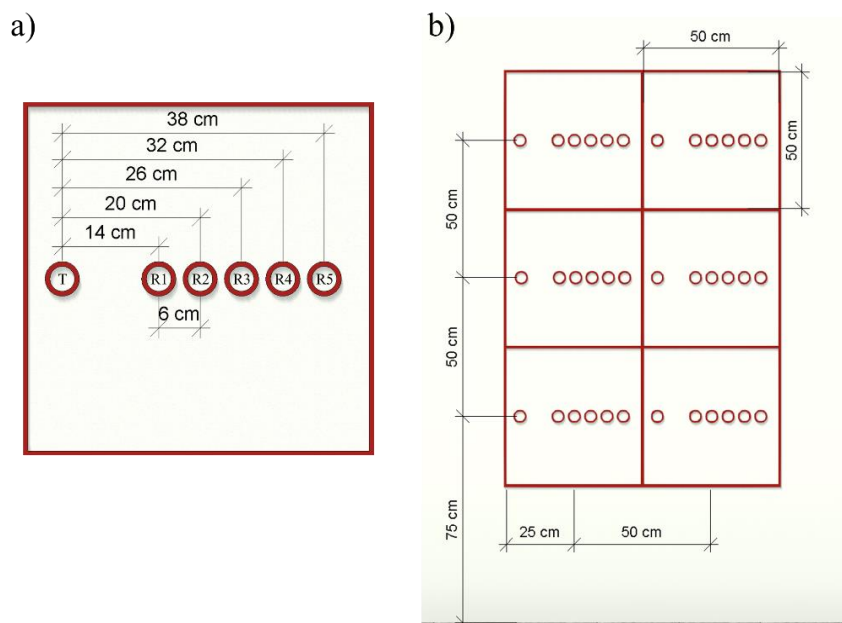
Para cada parede foram realizados testes ultrassônicos considerando as direções horizontal (X) e vertical (Y) sempre com quadros de aquisição de 0,50 m x 0,50 m. Os painéis P11 e P12 foram compostos por malhas de 3×3 quadrantes, já para os demais foram divididos em malhas com quadrantes de 2×3 , tais distribuição foram realizadas de acordo com a disponibilidade de espaço para a realização do ensaio.

Para a direção horizontal foi considerado o canto inferior esquerdo de cada quadro como ponto 0, enquanto para a direção vertical, foi considerado o nível da calçada como ponto 0, de modo que todos os painéis foram iniciados a 0,5 m.

A distância entre o transdutor (T) e o primeiro receptor (R1) foi de 14 cm e, sequencialmente, 6 cm ser adicionado a cada ponto de recepção do sinal (R2, R3, R4 e R5), conforme mostrado na Figura 12 – a), fazendo uma distância total entre o transdutor T e o receptor R5 de 38 cm.

Cada quadro de aquisição de dados foi composto por 5 medidas distribuídas no centro de cada quadrante, nas alturas 0,75 m, 1,25 m e 1,75 m, como mostra a Figura 12 – b).

Figura 12 - Painéis estudo de caso a) Distâncias entre o transmissor e os receptores; b) Distâncias entre os quadrantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois de cinco velocidades ultrassônicas registradas, em cada quadro, os dados coletados foram submetidos a tratamento estatístico e os valores máximo e mínimo de cada uma das paredes foram identificados, bem como as médias de velocidades e seu respectivo desvio padrão, de acordo com o trabalho realizado por Mesquita *et al.* (2018).

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio de caracterização das alvenarias experimentais

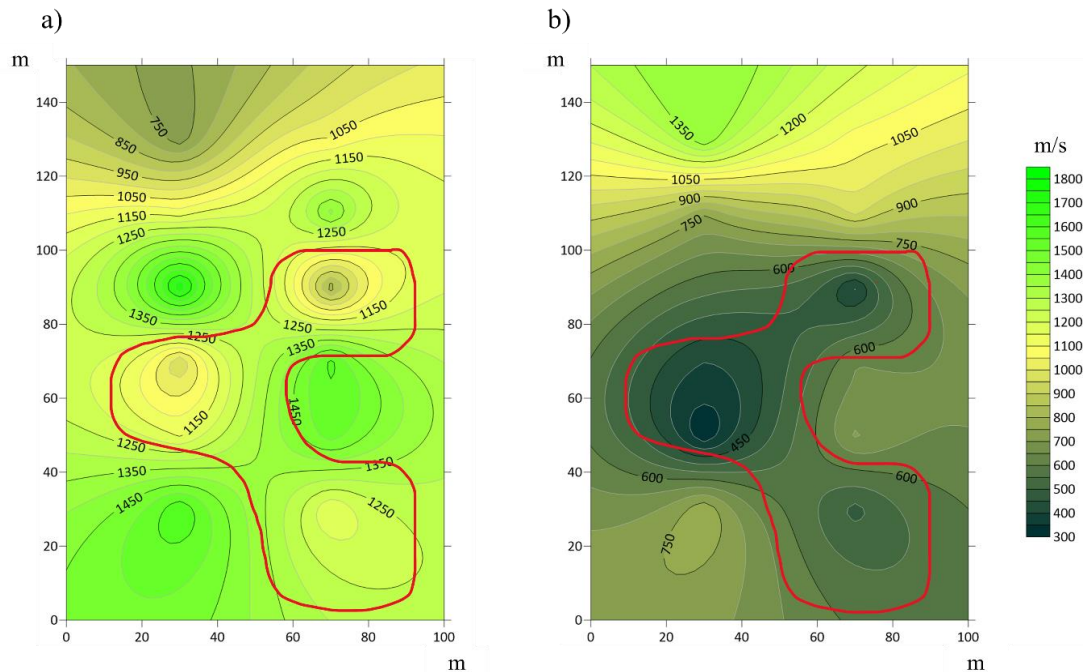
Os resultados encontrados das VPU's foram processados pelo software SURFER®, permitindo a montagem do mapa de cores, de modo a contribuir na visualização das alterações das velocidades no painel, assim como realizado nos trabalhos de (MESQUITA et al., 2018).

Iniciando pelos resultados obtidos nos painéis modelo de alvenaria, foi destacada a influência da argamassa de revestimento nos resultados obtidos de VPU, o principal questionamento devia-se a interferência da argamassa de revestimento para caracterização dos painéis de alvenaria, verificando se a camada de revestimento teria influência significativa ao ponto de que as ondas se propagassem apenas em sua superfície, impedindo que as ondas penetrassem mais profundamente e percorressem a camada constituída pelos tijolos de alvenaria.

Como as duas faces estudadas referem-se a mesma parede, só que em lados opostos, foi necessário realizar o espelhamento dos resultados em uma das faces horizontalmente, a fim de que ambas as faces pudessem ser comparadas lado a lado, dessa forma os resultados VPU's para a face sem argamassa de revestimento foram espelhados horizontalmente.

Ao comparar o mapa de cores entre as duas faces do modelo em estudo, Figura 13, é possível estabelecer semelhanças no comportamento das ondas, podendo-se verificar o mesmo padrão em velocidades mais baixas conforme indicado em vermelho, este padrão destacado evidencia que mesmo com a presença da argamassa de revestimento, é possível identificar o mesmo comportamento em padrão das ondas no painel, o que indica que mesmo com a presença da argamassa de revestimento, as ondas ultrassônicas ainda conseguem penetrar nas camadas mais profundas da alvenaria, conseguindo caracterizar o painel como um todo.

Figura 13 - Comparação mapa de cores a) painel com argamassa de revestimento; b) painel sem argamassa de revestimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este resultado tem fundamental importância no que se diz respeito à caracterização de painéis de alvenaria com argamassa de revestimento, utilizando o método de propagação ultrassônica pelo método indireto, uma vez que a maioria das edificações apresentam seus painéis revestidos com algum tipo de argamassa de revestimento.

Ainda a fim de entender como estas velocidades são alteradas, realizou-se uma comparação por quadrantes para as VPU's encontradas para ambas as faces do painel. Esta comparação encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação das velocidades ultrassônicas (m/s) em painel com e sem argamassa de revestimento

Quadrantes	Com argamassa	Sem argamassa	Diferença
Q1	722	1075	-353
Q2	1053	1397	-344
Q3	1124	965,84	158,16
Q4	1421	754,43	666,57
Q5	1755	391,51	1363,49
Q6	812	572,52	239,48
Q7	951	647,09	303,91
Q8	1565	401,57	1163,43
Q9	1143	706,87	436,13
Q10	1528	307,13	1220,87
Q11	1598	483,19	1114,81
Q12	1149	794,44	354,56
Média	1235,08	708,05	527,03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando os resultados é possível identificar que a face com argamassa de revestimento apresentou maior média de VPU com 1235,08 m/s enquanto para a face sem argamassa de revestimento apresentou média de 708,05 m/s. Analisando as diferenças individuais é possível perceber que a grande maioria dos quadrantes tiveram uma diferença na velocidade, de maneira que o painel com argamassa de revestimento apresentou um incremento médio de VPU de 527,03 m/s. Este resultado vai de encontro com as propriedades do material uma vez que a argamassa de revestimento tende a apresentar o uma densidade maior do que os tijolos de alvenaria maciça, sabe-se que as ondas sonoras se propagam mais velozmente em meios densos, favorecendo assim o aumento da velocidade da onda ultrassônica propagada na face com argamassa de revestimento.

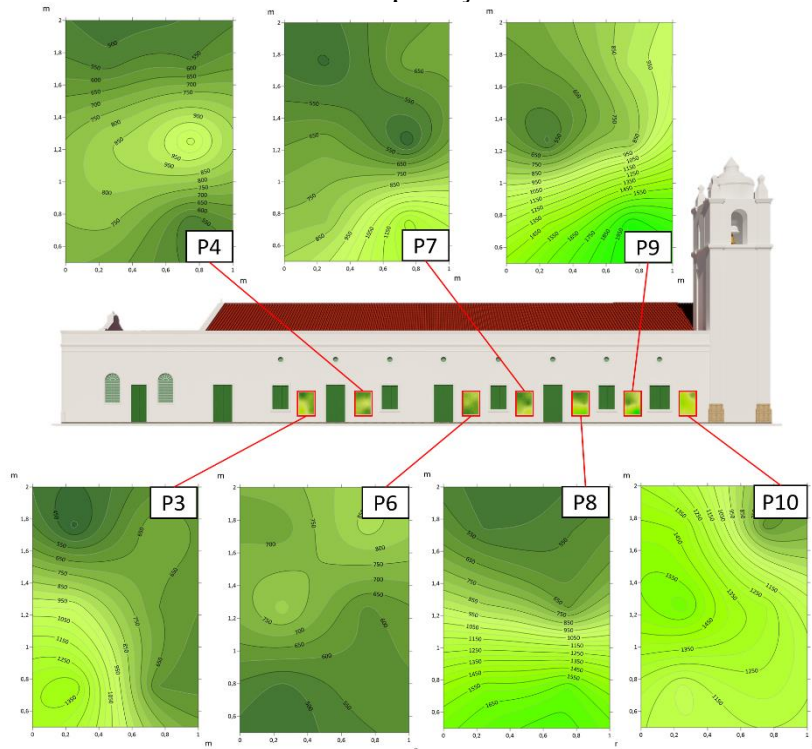
Este resultado permite inferir que esse incremento de velocidade dependerá das propriedades da argamassa de revestimento, que podem estar relacionados ao traço utilizado, os materiais constituintes e ainda à espessura desta.

4.2 Estudo prático na igreja Nossa Senhora da Expectação

Para o estudo de caso, foi realizado o mesmo procedimento aplicado nos painéis do laboratório, mudando apenas as dimensões dos quadrantes, a fim de possibilitar a execução em um maior número de painéis, o que possibilitou a realização do ensaio em grande parte das laterais da edificação, como podem ser verificadas nas Figuras 14 e 15 abaixo. Os valores das

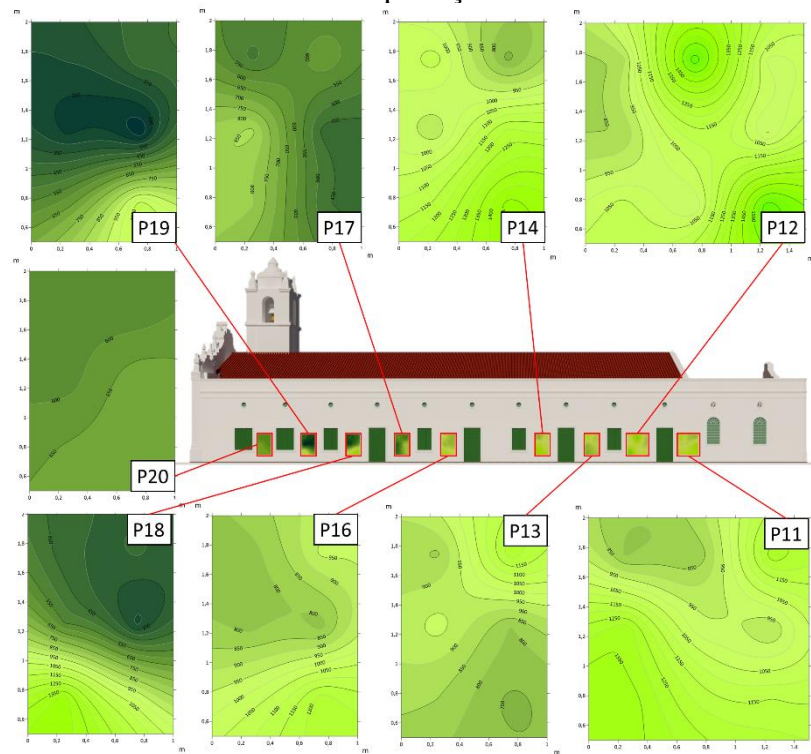
VPU também foram representados na forma de mapa de cores, com isolinhas, esta técnica foi empregada utilizando o software SURFER®, em que realiza uma interpolação dos valores de velocidades pontuais, e distribui estas a fim de se obter uma região com valores das VPU, possibilitando uma comparação mais visual dos comportamentos desta na superfície do painel.

Figura 14 - Resumo das VPU's da fachada Nordeste da Igreja de Nossa Senhora da Expectação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Resumo das VPU's da fachada Sudoeste da Igreja de Nossa senhora da Expectação



Fonte: Elaborado pelo autor.

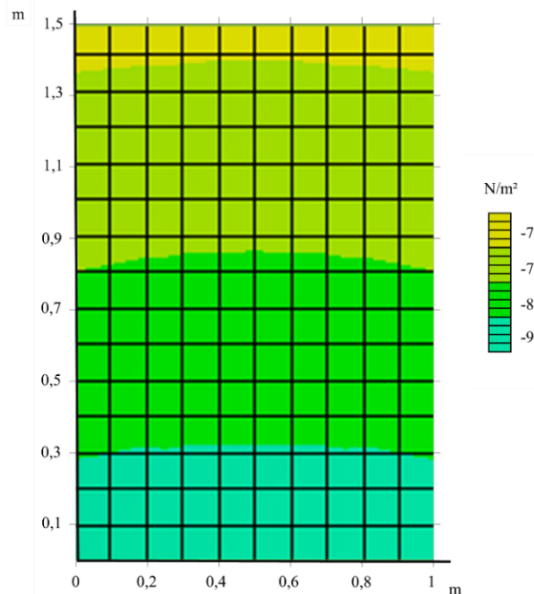
De forma geral, a média das VPU's realizadas em todos os 16 painéis a 0,75 m de altura foi de 1052,16 m/s, enquanto as médias das alturas de 1,25 m e 1,75 m foram 786,72 m/s e 726,31 m/s, respectivamente. Tendo como referência a média da velocidade ultrassônica em 0,75 m, os valores das VPU's em 1,25 m e 1,75 m apresentaram uma redução média de 25,23% e 30,97% respectivamente. Comportamento semelhante das velocidades ultrassônicas observadas em (MESQUITA et al., 2018) e (BINDA et al., 2001).

De modo geral, quando os painéis de alvenarias maciças de blocos cerâmicos estão com sua camada de revestimento bem aderidas, e quando estes não apresentam efeitos de confinamento, aberturas ou de elementos rígidos em sua proximidade, às VPU's tendem a apresentarem valores maiores na região da base da parede, diminuindo gradativamente à medida em que o painel avança em altura. Esse comportamento ocorre diante de uma maior quantidade de esforços atuando sobre as partes mais baixas dos painéis, grande parte desses esforços é resultante do próprio peso da estrutura, resultando em uma zona com maior rigidez, e conseqüentemente, VPU's mais elevadas, similarmente ao trabalho de Manning (2014).

A fim de melhor entender esta variação progressivas das velocidades, e a correlação desta com a variação das tensões atuantes, foi realizada uma modelagem numérica de uma

parede de alvenaria submetida aos esforços normais, o resultado das tensões encontrados encontram-se na Figura 16.

Figura 16 - Esforços normais do peso próprio em um painel de alvenaria

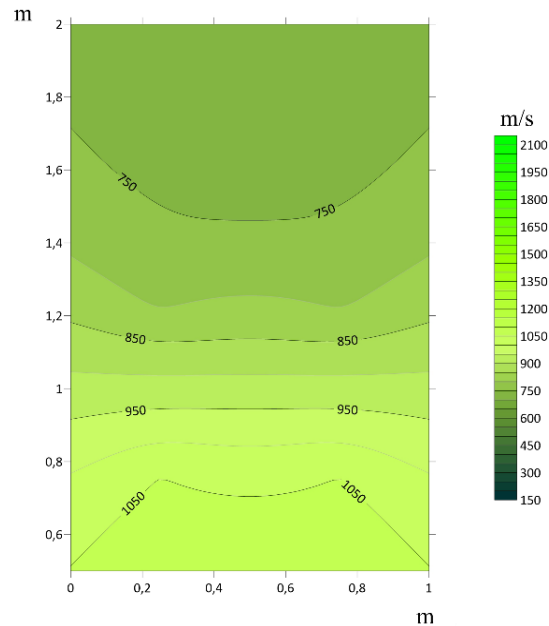


Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível notar a variação de tensões atuantes entre as alturas de 0 a 1,5 m, onde na base do modelo, as tensões são próximas de 95 N/m² de compressão, enquanto na altura 1,5 m essas tensões reduzem para 70 N/m². É importante ressaltar que a parede de alvenaria modelada tinha altura total de apenas 2 m, para situações reais, com adição de carregamentos de telhado e demais estruturas presentes na edificação, essas tensões são ainda mais altas, e a variação destas também são alteradas.

Diante deste resultado, é esperado uma diminuição das velocidades médias à medida em que os pontos de medição se elevam em altura. Este mesmo comportamento foi verificado por Mesquita (2018), com o auxílio do modelo numérico, torna-se ainda mais visível este padrão de comportamento. O mapa de cores para o comportamento característico das VPU para um painel bem aderido pode ser identificado na Figura 17, foi elaborado, calculando-se a média das VPU's para as alturas de 0,75, 1,25 e 1,75m dos 16 painéis. Logo, é possível identificar as velocidades médias presentes nos painéis, assim como a variação destas.

Figura 17 - Mapa de VPU's para o comportamento padrão



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destes resultados e confrontando os trabalhos de Mesquita (2018), Manning et al. (2014) e Turgut et al. (2008), de maneira geral, para painéis argamassados, admitindo-se que o revestimento esteja bem aderido, as VPU tendem a apresentar uma faixa de variação entre 1200,00 m/s e 3000,00 m/s nas alvenarias, variando nesta faixa de acordo com a densidade do material. Em alvenarias que utilizam cal em sua composição, estes valores tendem a estar mais próximos de 1200m/s, enquanto em alvenarias de blocos maciços com argamassas de cimento, as VPU tendem a apresentar uma velocidade mais elevadas, próxima dos 3000,00 m/s. No entanto, nas argamassas de cal, as VPU tendem a se propagarem de modo mais devagar, entre 600,00 e 1000,00 m/s. Portanto, à medida em que a onda ultrassônica se propaga ao longo de um painel de alvenaria com revestimento bem aderido, maiores serão suas VPU's, enquanto nos pontos em que há um destacamento do revestimento, a onda ultrassônica tende a ter velocidade de propagação mais próxima da faixa de variação da argamassa. Ainda há que notar, que a irregularidade nas camadas de argamassa de assentamento e presença de fissuras atenua ainda mais esta velocidade, sendo possível a obtenção de valores mais baixos ainda que os 600,00 m/s.

Considerando o conjunto de valores das velocidades ultrassônicas coletadas em cada painel de tijolo durante os ensaios experimentais, e para indicar valores globais de cada um deles, foram calculadas e comparadas as VPU's máximas e mínimas entre elas. Além disso,

também foram obtidas as médias das velocidades ultrassônicas e seus respectivos desvios padrões. A comparação entre todos os valores obtidos é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados gerais das VPU's dos painéis de alvenaria da Igreja de Nossa Senhora da Expectação

Velocidades em m/s				
	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão
P3	1400,5	388,29	788,4	356,43
P4	1073,8	503,71	708,19	228,18
P6	871,36	466,5	666,77	153,78
P7	1268,6	417,47	713,69	309,46
P8	1706,2	493,4	974,33	539
P9	2017,6	490,19	1059,81	570,16
P10	1629,2	621,41	1214,55	344,75
P11	1387,4	794,74	1094,97	227,09
P12	1700,5	854,29	1135,14	330,92
P13	1229,7	737,8	904,49	177,04
P14	1471,3	735,12	1096,09	253,97
P16	1230,2	776,96	925	182,1
P17	863,33	425,65	612,53	187,51
P18	1425,3	290,65	682,75	438,19
P19	1093,4	159,49	478,19	344,69
P20	688,54	565,09	626,11	58,92
Média	1316,06	545,05	855,06	293,89

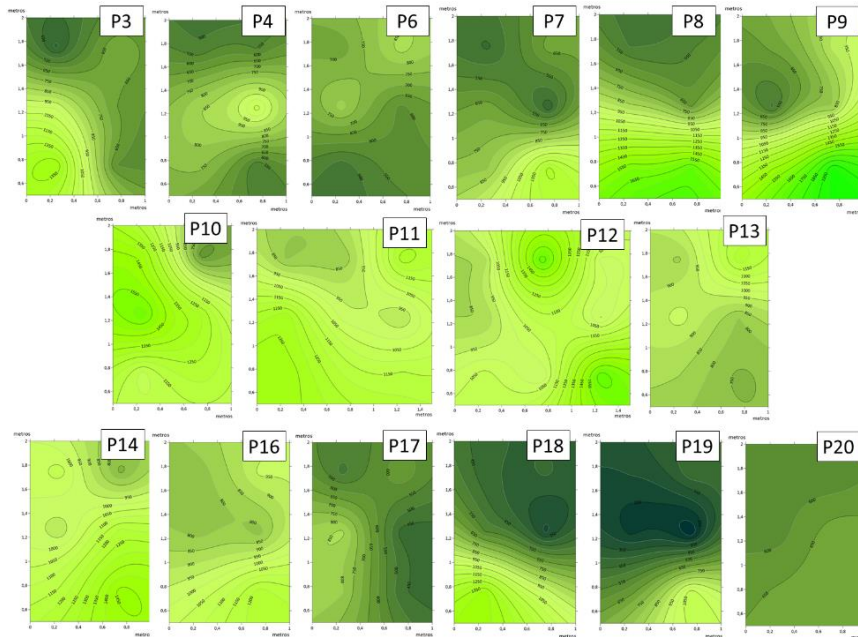
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da tabela acima é possível estabelecer alguns pontos importantes a serem analisados. A VPU máxima encontrada para os painéis foi de 2017,60 m/s enquanto a velocidade mínima foi de 159,49 m/s, analisando os valores de desvio padrão pode-se destacar que os painéis P8, P9 e P18 apresentaram os maiores desvios padrão o que indica para a necessidade de uma maior atenção na análise dos resultados destes. Os painéis P6, P17, P19 e P20 apresentaram velocidades abaixo da média, indicando possíveis danos nos mesmos. Por último outra seção que apresentou um comportamento destoante em relação aos demais foi o painel P20, que apresentou um baixo desvio padrão, enquanto a média dos valores de desvio padrão foi de 293,89 m/s a seção P20 apresentou apenas 58,92m/s valor esse que se difere bastante dos demais e deve ser investigado.

Todavia, através apenas destas métricas estatísticas, não é possível realizar um estudo completo das VPU's no painel, para tal, faz-se necessário uma análise da distribuição

dos padrões de comportamento por meio dos mapas de cores, analisando estes de maneira global, percebe-se que apresentam grande heterogeneidades como pode ser notado na Figura 18.

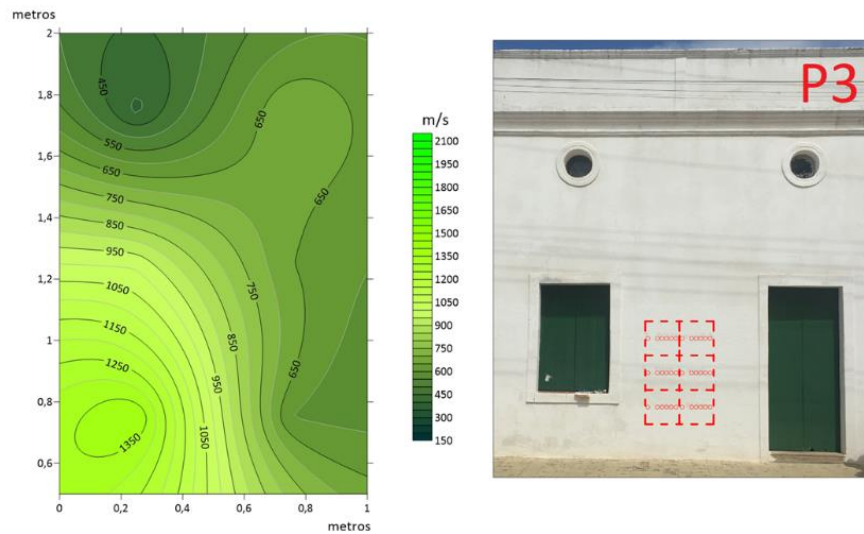
Figura 18 - Resumo visual dos comportamentos dos 16 painéis



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de velocidade para o painel P3 Figura 19, demonstra a grande variação na direção X encontrada na base dele, estando essa mais acentuada na altura 0,75 m, tal variação evidencia a zona de baixas velocidades da parte inferior direita da seção em estudo, aproximadamente em $X = 0,80$ m.

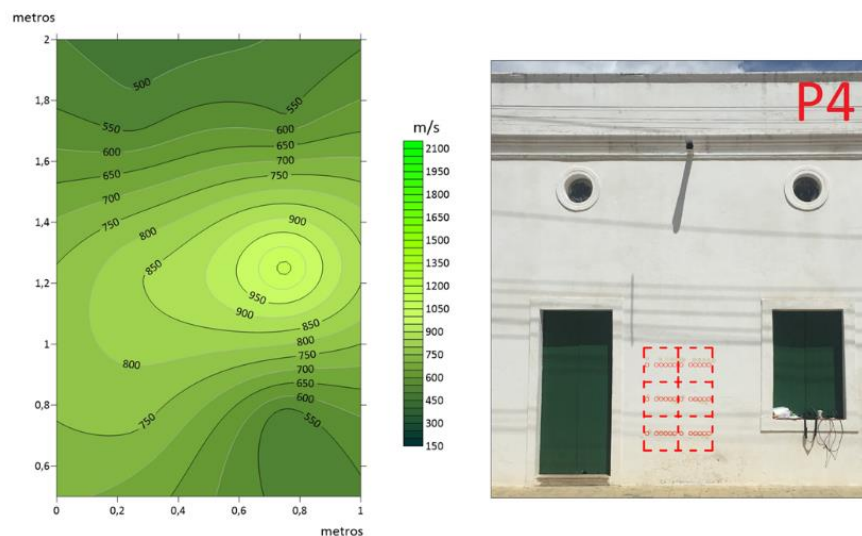
Figura 19 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P3



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, o mapeamento das VPU's do painel P4 Figura 20 demonstra valores de velocidades ultrassônicas menores que 1100,00 m/s. Além disso, a base dele apresenta baixos valores de VPU's, diferente do comportamento médios padrão. Para este painel obteve-se uma velocidade média de 635,08 m/s a uma altura de 0,75 m, resultado distante da média de 1052,16 m/s, evidenciando zonas de baixa homogeneidade das alvenarias ou ainda danos na argamassa de revestimento. O mapa também evidencia zonas de baixa velocidade na parte superior da seção a uma altura de 1,75 m.

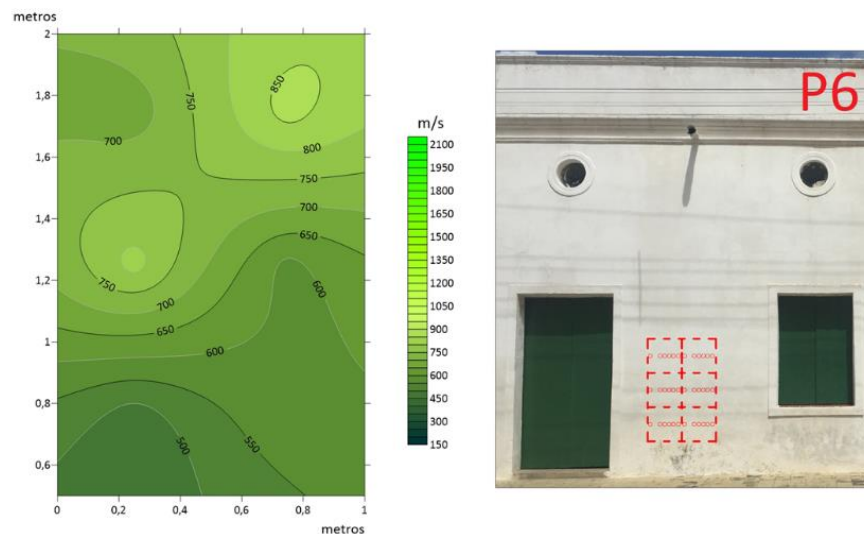
Figura 20 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P4



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapeamento do painel P6 Figura 21 teve comportamento bastante semelhante ao do P4, onde obteve-se uma baixa média das velocidades ultrassônicas, destacando principalmente a média da cota 0,75 m com VPU's médias de 526,65 m/s, valor bem abaixo do esperado. Indicando a possibilidade da presença de vazios e/ou fissuras.

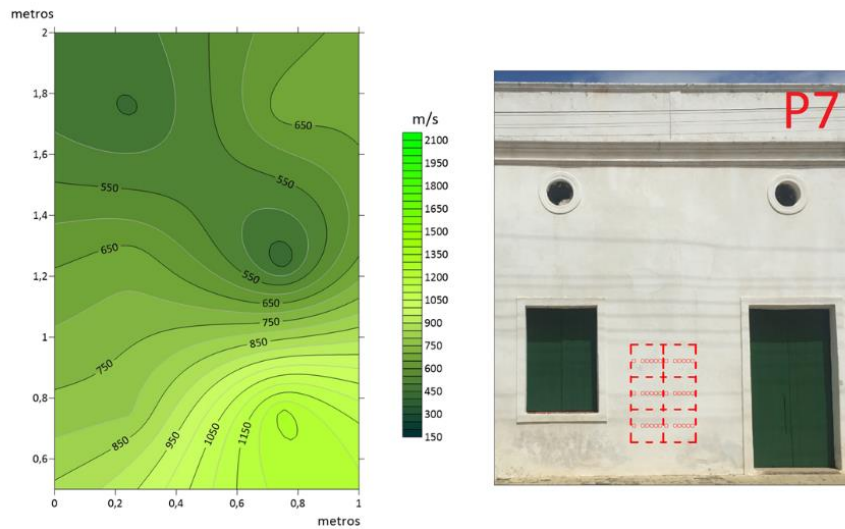
Figura 21 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P6



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise da distribuição das VPU's na seção P7, mostrada na Figura 22, percebe-se uma variação tanto na direção X quanto na direção Y, caracterizando a heterogeneidade desta seção. Embora haja esta variação a velocidade máxima encontrada de 1268,60 m/s, está localizada na cota mais baixa do painel, resultado dentro do esperado.

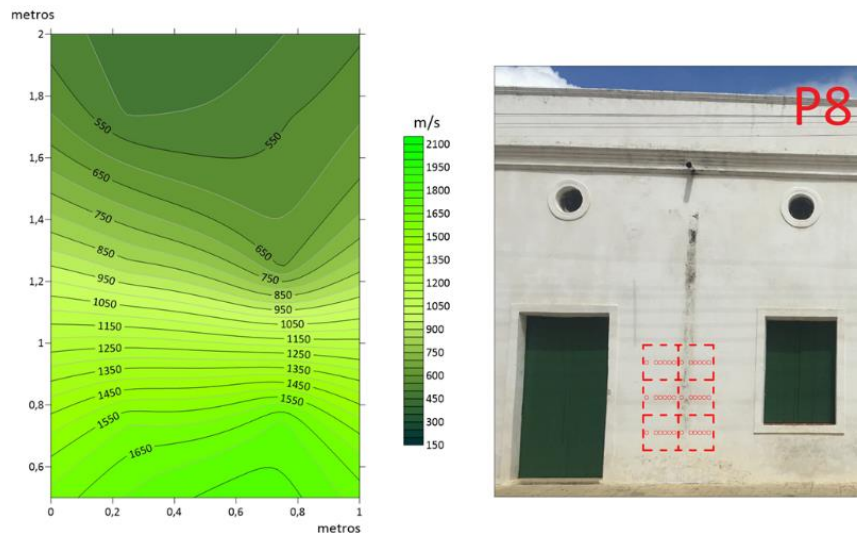
Figura 22 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P7



Fonte: Elaborado pelo autor.

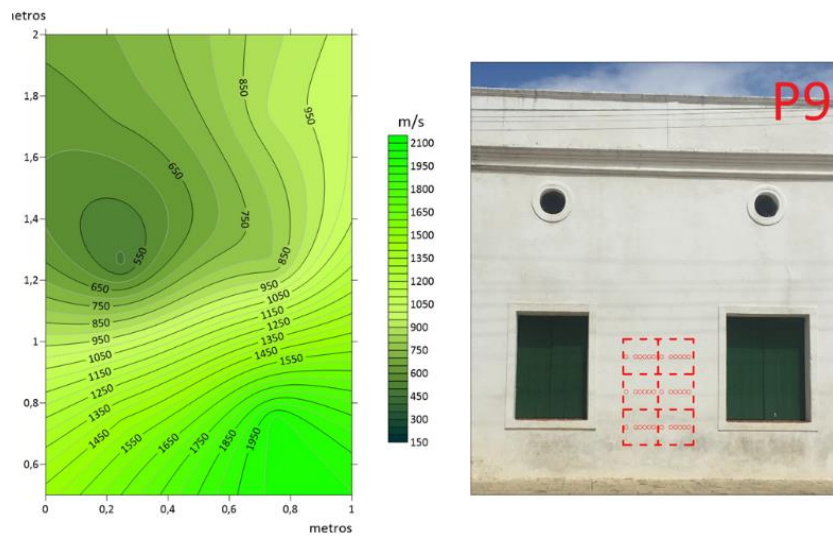
Para as seções P8 e P9, Figura 23 e Figura 24, respectivamente, obteve-se um mapeamento bastante semelhante, ambos os painéis apresentaram velocidades médias elevadas nas bases dos painéis, 1648,05 m/s e 1732,70 m/s respectivamente, comportamento bastante homogêneo e dentro do esperado. Esses dois painéis foram os que apresentaram os maiores valores para desvio padrão, por volta de 550,00 m/s, logo pode-se associar esse resultado à distribuição gradativa e uniforme da variação das VPU's, associadas aos altos valores encontrados. Entretanto para o painel P9, foi encontrado na altura 1,25 m velocidade abaixo do esperado para esta região, 550,00 m/s, evidenciando a possibilidade da existência de danos localizados nesta região, ou ainda presença de vazios.

Figura 23 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P8



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P9

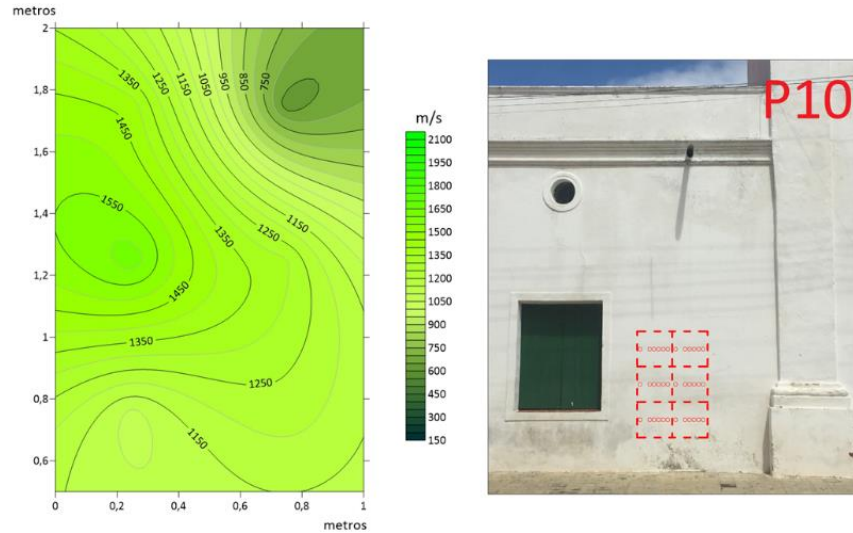


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o mapeamento realizado para o painel P10, Figura 25, nota-se um comportamento diferente dos demais, tem-se velocidades com valores elevados distribuídos em toda a seção em estudo, com o máximo de 1629,20 m/s localizado a uma altura de 1,25 m. Essa distribuição das velocidades pode ser explicada por dois fatores peculiares deste painel, ele está localizado ao lado do pilar pertencente a torre da igreja e a parte posterior está acoplada à estrutura da escada que dá acesso ao couro e a torre da igreja, Figura 7, contribuindo para uma

mudança no rearranjo das forças de compressão e tração deste painel, e conseqüentemente provocando maiores valores de VPU's.

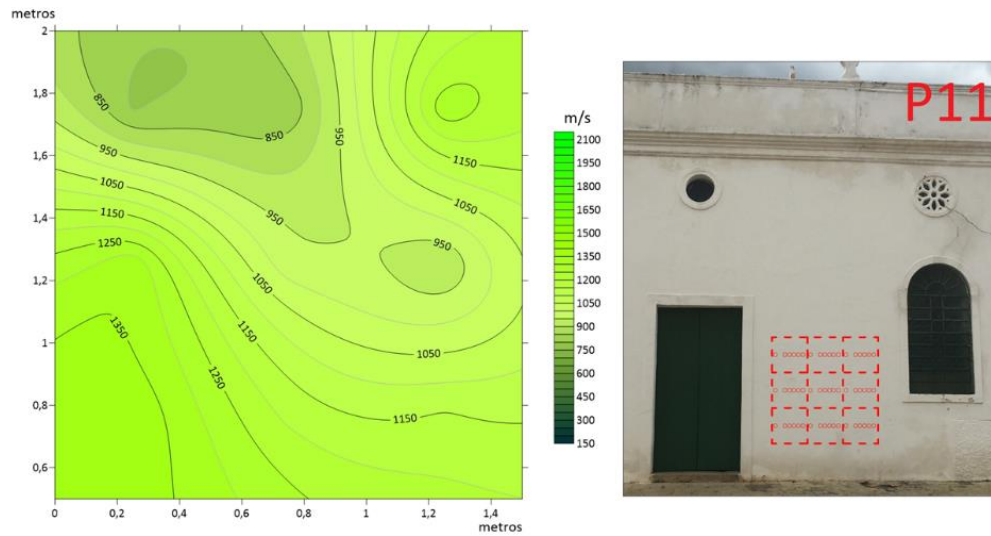
Figura 25 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P10



Fonte: Elaborado pelo autor.

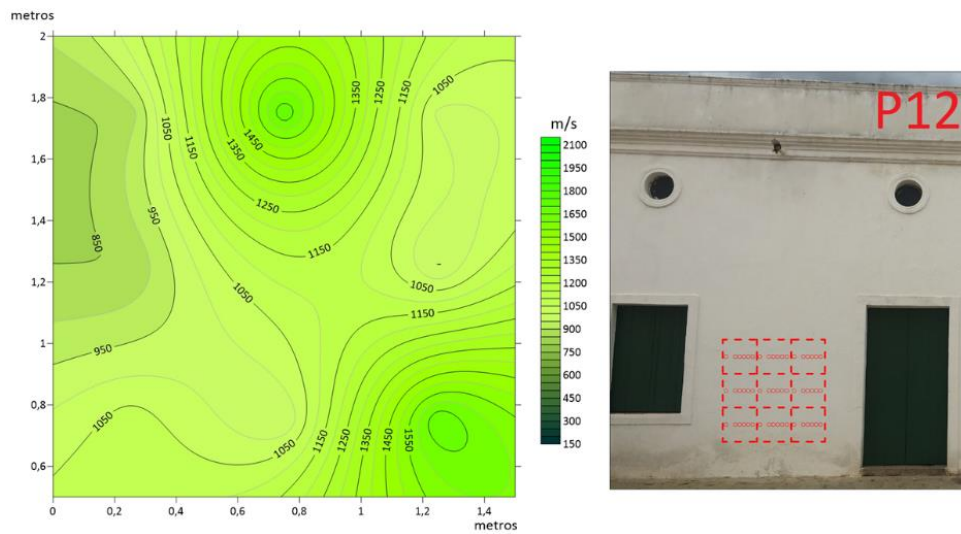
O resultado do mapeamento para os painéis P11 e P12, Figura 26 e Figura 27, os quais apresentam a presença de uma parede intercomunicação em sua parte interna à igreja, mostra que não houve grandes variações nas velocidades, bem como a presença de velocidades mais elevadas mesmo em cotas mais altas. Além disso, nota-se que as VPU's mínimas do painel foram de 794,74 m/s e 854,29 m/s, para P11 e P12 respectivamente. Estas velocidades mínimas, são as maiores dentre os demais painéis, desta forma verifica-se a influência causada pela presença da parede conectada à seção de estudo.

Figura 26- Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P11



Fonte: Elaborado pelo autor.

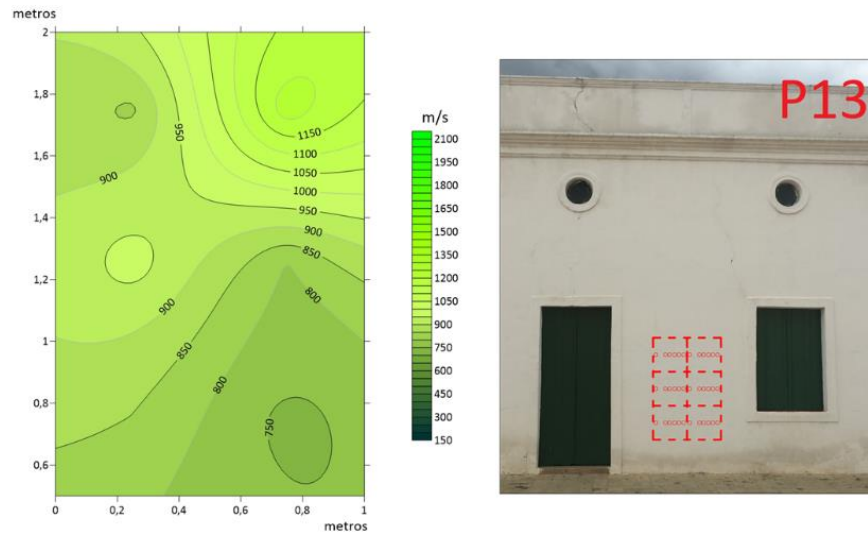
Figura 27 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P12



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o mapeamento do painel P13, Figura 28, pode-se verificar uma zona com menores VPU's na parte inferior da seção em estudo, assim com a presença de zonas com velocidades mais elevadas na parte superior, comportamento inesperado.

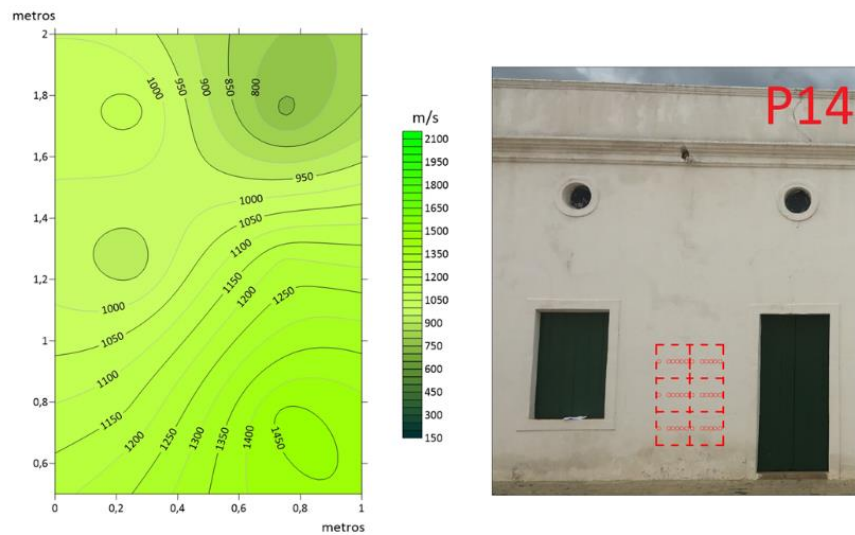
Figura 28 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P13



Fonte: Elaborado pelo autor.

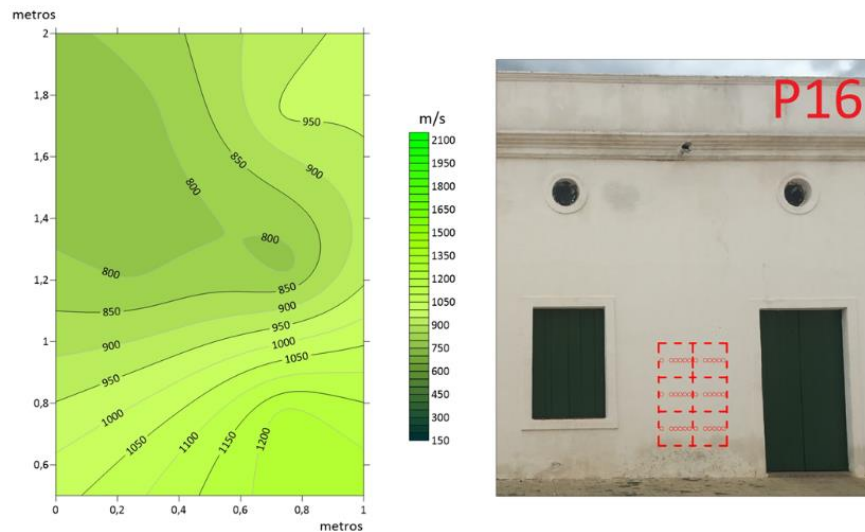
Já o mapeamento para os painéis P14 e P16, Figura 29 e Figura 30, mostraram-se dentro do resultado esperado, a diferença entre ambos está nos valores máximos de VPU's encontrados, que foram de 1471,30 m/s e 1230,20 m/s respectivamente, e nas pequenas variações ao longo da direção X.

Figura 29 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P14



Fonte: Elaborado pelo autor.

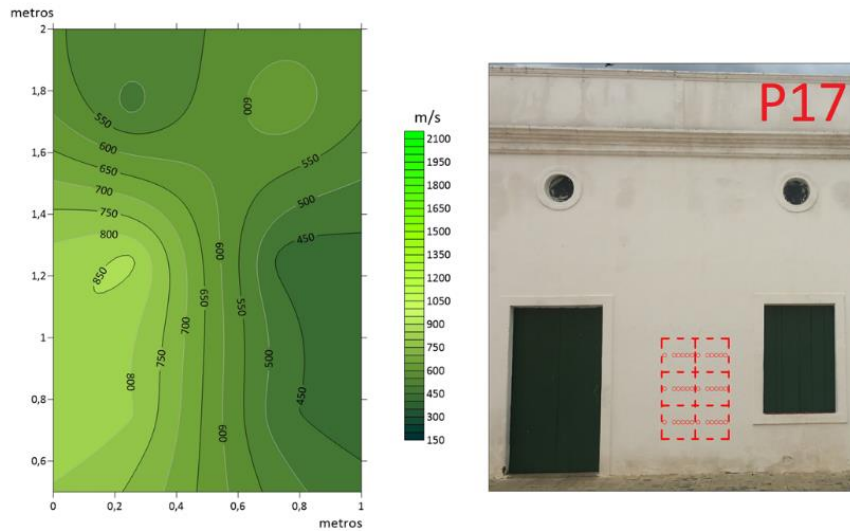
Figura 30 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P16



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapeamento do Painel P17, Figura 31, apresenta uma grande diferença no comportamento das VPU's diante dos demais painéis. Observa-se uma grande variação das VPU's na direção X, e valores bem abaixo das médias. Algumas hipóteses para este comportamento são, a parede apresenta uma falha estrutural, possivelmente uma fissura, causando uma desconexão entre duas regiões e, conseqüentemente, velocidades distintas em um mesmo painel, este comportamento também pode estar ligado a aplicação de diferentes materiais, ou ainda de diferentes épocas construtivas, resultando nas diferenças de velocidade em uma mesma seção separadas por uma linha vertical, a mesma que divide os materiais distintos. O painel também apresenta VPU média de 612,53 m/s, abaixo da velocidade média dos demais painéis de 855,06 m/s.

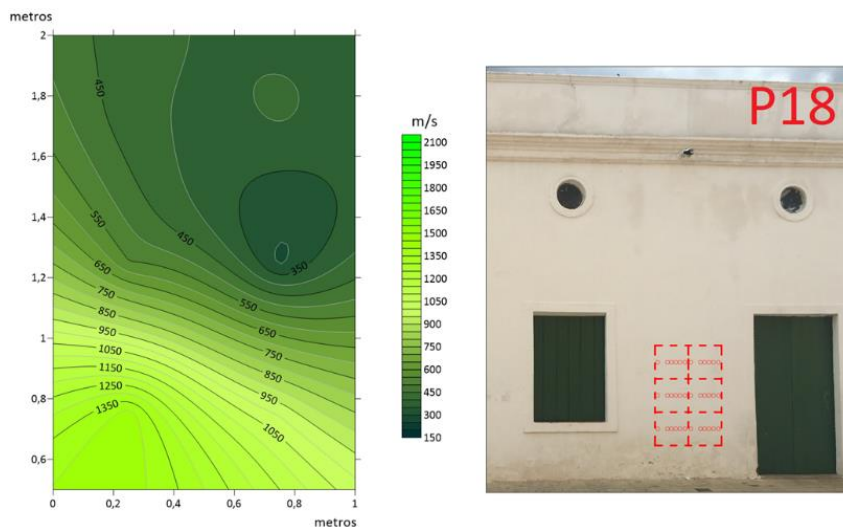
Figura 31 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P17



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o mapeamento do painel P18, Figura 32, pode-se verificar um comportamento localizado com velocidades baixas, próximas de 350,00 m/s, localizado à direita da seção em estudo por volta de 1,75 m. Também é possível notar uma grande amplitude em suas velocidades, a VPU mínima encontrada neste painel foi de 291,00 m/s, bem abaixo da velocidade mínima média de 545,05 m/s, também constatou-se um elevado desvio padrão, sendo este de 438,00 m/s, frente a média de 293,89 m/s, tal combinação pode ser destacada como um indicador de fissuras na argamassa de revestimento, em uma região localizada.

Figura 32 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P18



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os painéis P19 e P20 merecem uma maior atenção, durante a aquisição dos dados foram verificadas fissuras superficiais em ambos os painéis. Essa fissuração foi identificada visualmente e por um breve ensaio à percussão realizado, na Figura 33 é possível constatar a presença deste dano encontrado na seção P19. Para estes painéis a leitura do equipamento ficou dificultada, os vazios formados pelas fissuras tornam o painel não homogêneo, e a presença destes vazios diminuem as VPU's nas alvenarias, desta forma os resultados tendem a apresentar baixas VPU's e sem grandes variações com a posição.

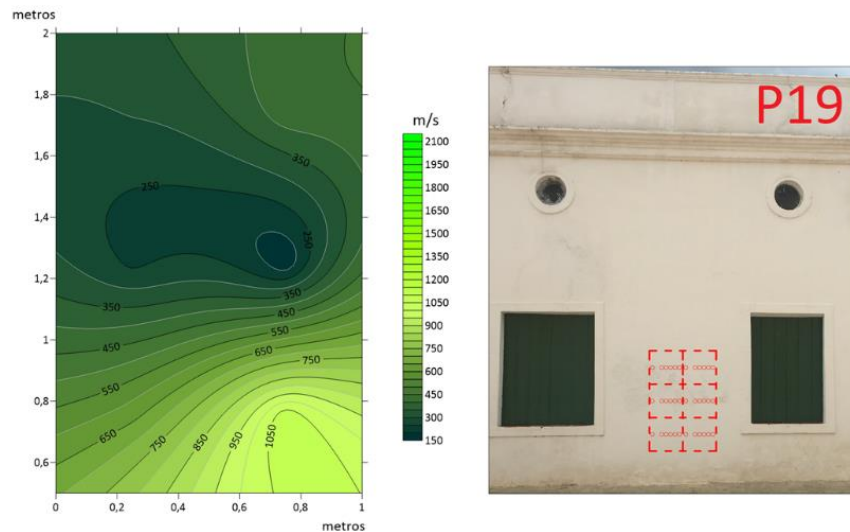
Figura 33 - Pannel P19 com presença de fissuração superficial



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o painel P19, Figura 34, foi verificado apenas uma fissuração localizada situada por volta da cota 1,25 m, Figura 33, esse resultado pode ser verificado no mapeamento deste, onde é notório uma zona com VPU's mais baixas a essa altura de 1,25 m, esse comportamento localizado é condizente com a zona onde foi identificado em loco com a presença de fissuras na argamassa de revestimento. A VPU mínima encontrada foi de 159,49 m/s, a menor velocidade encontrada em todos os painéis.

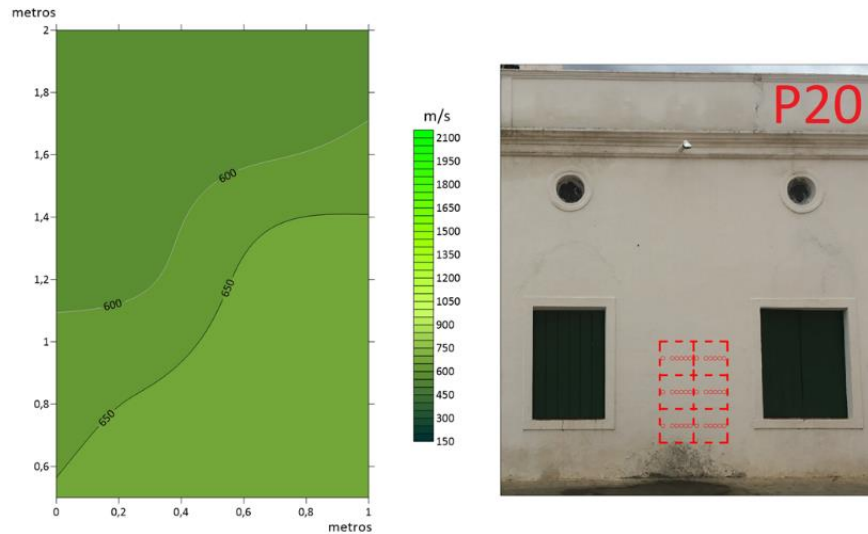
Figura 34 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P19.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o mapeamento do painel P20, Figura 35, mostra um resultado bem diferente dos demais, com VPU's quase que constante em toda sua extensão, com uma velocidade média de 626,11 m/s. Esse resultado é reflexo da fissuração encontrada que se estende por toda sua área, uma hipótese deste comportamento constante, é que a argamassa não está bem aderida às alvenarias, de maneira que as ondas se propagam apenas na camada da argamassa de revestimento, resultando neste comportamento constante em todo o painel. Ao analisar a Tabela 2 novamente, é possível ver que a seção P20, apresentou o menor máximo de VPU entre os demais painéis, com apenas 689,00 m/s, também apresentou um desvio padrão bem abaixo dos demais, com apenas 58,90 m/s, frente a média de 293,89 m/s. Desta forma percebe-se que uma máxima do painel bem abaixo da média, assim como um baixo desvio padrão também são indicadores de possibilidade da presença de fissuras da argamassa de revestimento em painéis de alvenaria com tijolos maciços.

Figura 35 - Mapeamento das velocidades ultrassônicas (m/s) do painel P20



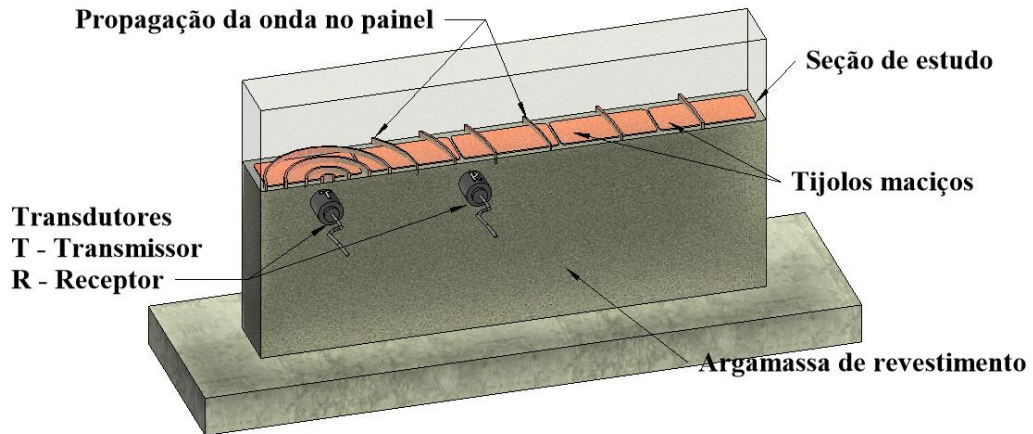
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando as fachadas laterais, observa-se que a lateral Nordeste, Figura 14, apresenta maior quantidade de painéis dentro do comportamento esperado, havendo variações em painéis próximos a demais elementos estruturais, caso da seção P10 que estão próximo a uma parede perpendicular. Já na lateral Sudoeste, Figura 15, os resultados apontam para uma maior incidência de danos, principalmente ao longo dos painéis P17, P19 e P20, também é possível destacar que ocorrem maiores variações nas medições, podendo estar relacionado à maior exposição a agentes agressivos e intempéries nesta fachada.

4.3 Propagação da VPU em painéis com presença de manifestações patológicas

A partir dos resultados encontrados nos estudos em laboratório, e posteriormente com a aplicação dos conhecimentos adquiridos em campo, é possível estabelecer algumas hipóteses de como as ondas se propagam em painéis com diferentes manifestações patológicas e como estas interferem nas VPU's encontradas. Para melhor demonstrar as hipóteses estabelecidas, foi realizada uma seção em um painel de alvenaria a qual está submetida ao ensaio de propagação do pulso ultrassônico pelo método indireto, como pode ser identificado na Figura 36.

Figura 36 - Seção de estudo, propagação da VPU

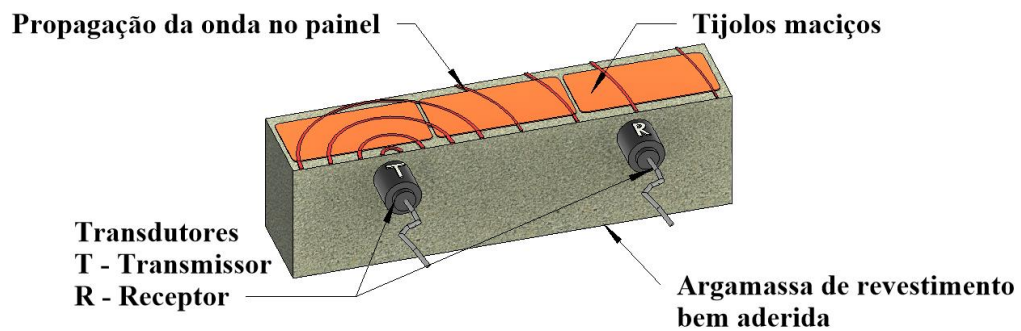


Fonte: Elaborado pelo autor.

No esquema estabelecido acima, é possível verificar que o transdutor transmissor, emite as ondas que se propagam em todas as direções no interior do painel, percorrendo inicialmente a camada de revestimento, e logo depois se propagando nos tijolos maciços até chegar na posição do transdutor receptor.

Dessa forma pode-se estabelecer o esquema de propagação da onda em uma parede de alvenarias de tijolos maciços com argamassa de revestimento bem aderida, Figura 37, onde a onda consegue percorrer toda a região superficial e profunda do painel, conseguindo realizar a caracterização do mesmo como um todo. Para painéis sem danos como este, espera-se encontrar mapas de VPU conforme o comportamento padrão médio encontrado, Figura 17.

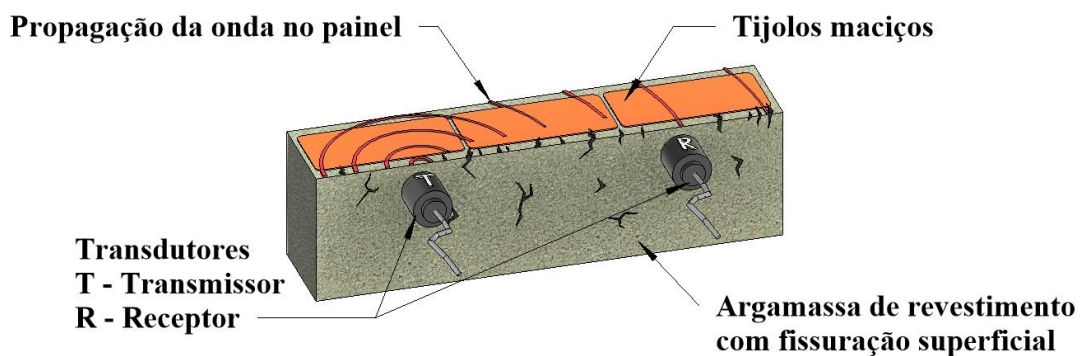
Figura 37 - Propagação da onda em um painel com argamassa de revestimento bem aderida



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o estudo de caso também foram encontrados painéis com manifestação de fissuras superficiais na argamassa de revestimento, onde se encontrou VPU's mais baixas nas regiões específicas com a presença destes danos, como no painel P19. Logo pode-se inferir que a presença das fissuras dificulta a propagação das ondas de maneira superficial, forçando a onda a se propagar em camadas mais profundas, resultando em um percurso maior e consequentemente velocidades mais baixas, este esquema pode ser verificado na Figura 38, onde pode ser notado a perda de capacidade das ondas se propagarem nas camadas superficiais.

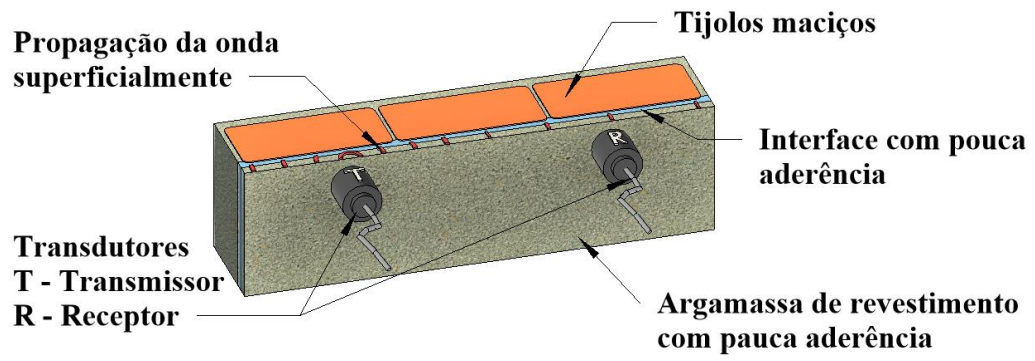
Figura 38 - Propagação da onda em um painel com argamassa de revestimento fissurada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por último, também foi encontrado painéis com configurações bem específicas das VPU's, em que se mostraram bastante homogêneas, como o resultado encontrado no painel P20, a principal hipótese para este comportamento deve-se ao fato do sistema apresentar pouca aderência entre a argamassa de revestimento e o substrato, dessa forma a onda se propaga apenas nas camadas mais superficiais, resultando em uma VPU constante, sendo esta a característica apenas da argamassa de revestimento, que para argamassas de cal presente na edificação em estudo, em torno dos 600,00 m/s ou abaixo deste valor. O esquema da VPU para este tipo de dano está melhor ilustrado na Figura 39.

Figura 39 - Propagação da onda em um painel com pouca aderência na argamassa de revestimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada um estudo do comportamento de ondas ultrassônicas em painéis de alvenarias argamassas pelo método indireto, utilizando de estudos em laboratório associado a pesquisas bibliográficas, a fim de estabelecer parâmetros para utilização das VPU's a fim de caracterização destes painéis, em seguida, com posse dos parâmetros observados, foi realizado a caracterização de uma edificação histórica, a qual foi escolhida a Igreja de Nossa Senhora da Expectação, através do método estudado, selecionando 16 painéis das fachadas nordeste e sudoeste da edificação.

Para o estudo Global da Igreja Nossa senhora da Expectação, analisando as duas fachadas laterais individualmente, a lateral sudoeste apresentou uma maior incidência de danos, a principal hipótese para essa maior incidência está relacionada ao fato de ocorrer maior incidência solar nesta fachada, causando um ambiente com maior agressividade, ao longo do tempo essas condições favorecem o surgimento e desenvolvimento de manifestações patológicas.

Considerando que cada material possui uma velocidade característica de VPU, variando de acordo com sua densidade e homogeneidade, a existência de danos ou estruturas distintas dos padrões do material analisado apresenta influência na VPU medida. Assim, a aplicação de VPU para se caracterizar as propriedades de alvenarias pode ser uma ferramenta de grande utilidade no processo e caracterização das construções históricas, quando identificados os padrões típicos de comportamentos da onda ultrassônica. A identificação de padrões de propagação ultrassônica em alvenarias além de poder ser utilizado para a identificação de anomalias num painel, também pode servir como base para comparação da distribuição das VPU ao longo de uma edificação, por exemplo, para indicar se todas as alvenarias apresentam método construtivo similar.

Os resultados deste trabalho indicam 5 comportamentos típicos de VPU em painéis de alvenarias, nomeadamente:

- Em painéis de alvenaria de tijolos maciços com argamassa de cal, e revestimento argamassado de cal, com espessura não superior a 1,5 cm, quando não sob o efeito de confinamento, de elementos rígidos, ou sob o efeito de aberturas nas margens do painel, como janelas e portas, as ondas ultrassônicas apresentam VPU's maiores na base da seção em estudo, sendo sua velocidade decrescente à medida em que a altura avança, como o encontrado no comportamento médio padrão dos painéis, Figura 17;

- Para o caso de presença de fissuras não generalizadas nos revestimentos argamassados em alvenaria de tijolos maciços, as regiões com a presença de fissuras e/ou falta de aderência entre a argamassa de revestimento e as alvenarias, apresentam velocidades de propagação mais próxima da faixa típica das VPU argamassas, no caso de argamassas de cal (em torno dos 600,00 m/s ou abaixo deste valor), sendo que as demais áreas do painel apresentam valores de VPU de acordo com o comportamento padrão de distribuição ultrassônica, conforme pode ser encontrado na seção P19, Figura 34;
- A situação de fissuração generalizada e ausência de aderência nos revestimentos argamassados em alvenaria de tijolos maciços, faz com que as ondas ultrassônicas se propagam de modo quase constante, e apenas na superfície do revestimento, com valores característicos da VPU típico ao das argamassas de cal, essencialmente entre 600,00 m/s e 1000,00 m/s, podendo estes valores serem atenuados pela presença de fissuras e vazios. Além da distribuição homogênea de velocidades no painel, visivelmente notório nos mapas de cores, este resultado também pode ser identificado ao analisar o baixo desvio padrão quando comparado a média dos demais, este comportamento pode ser verificado no painel P20, Figura 35.
- A existência de falhas estruturais, mudança de materiais e/ou época interligadas por argamassa em um mesmo painel, ainda que recoberta por argamassa sem presença de fissuras, apresentam distribuição de velocidades de maneira heterogêneas ao longo de uma linha, sendo esta onde ocorre a mudança descrita, resultando em arranjos que se destacam pela diferenciação da VPU ao longo de uma linha vertical, como o comportamento encontrado no painel 17, Figura 31.
- A presença de elementos estruturais como paredes, pilares ou ainda escadas engastadas em partes posteriores de painéis para tijolos de alvenaria com argamassa de cal, tendem a apresentar valores de VPU acima do esperado para o conjunto argamassa/tijolo, em cotas mais altas diferente do esperado para o comportamento padrão, essas velocidades variam em torno de 1500,00 m/s, podendo apresentar valores maiores, este comportamento pode ser encontrado nos painéis P10, P11 e P12, Figura 25, Figura 26 e Figura 27 respectivamente.

Ademais, este trabalho abre espaço para demais comportamentos a serem investigados a respeito da interpretação das VPU's obtidas pelo método indireto em painéis argamassados, como a verificação do incremento de velocidades causados por argamassas de

revestimentos de diferentes espessuras e traços, a fim de parametrizar e complementar o resultado obtido com os painéis modelos em laboratório, onde verificou-se que a argamassa de revestimento não impede a caracterização de um painel de alvenaria, apenas adiciona um incremento médio de velocidade nas VPU's.

Por fim, este trabalho introduz uma nova visão na forma de interpretação dos resultados do ensaio ultrassônico pelo método indireto, que ao longo das últimas décadas a literatura insistiu na observação dos valores das velocidades, sem consideração do padrão de distribuição. A observação de padrões de comportamento das VPU torna possível a caracterização de materiais heterogêneos, abrindo caminho para uma linha de estudos no âmbito das alvenarias, especialmente as históricas.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 8802 - **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Brasil, p. 8, 2019.
- ABNT, NBR 16805 – **Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Caracterização de painéis por velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Brasil, 2020.
- ALVES, A. L. S. **Proposição de um método de caracterização de alvenarias de edificações históricas por meio de avaliação ultrassônica.** Monografia, 2017.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom** Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2011.
- BINDA, L.; SAISI, A.; TIRABOSCHI, C. **Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures.** NDT & E International, v. 34, n. 2, p. 123–138, mar, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00037-2)
- BOSCATO, G. et al. **Optimized procedures and strategies for the dynamic monitoring of historical structures.** J Civil Struct Health Monit 6, 265–289, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0164-9>
- BRITISH STANDARDS INSTITUTIONS, **BS 1881: Part 201, Guide to the use of non-destructive methods of test for hardened concrete.** London, 1986.
- BUNGEY, J. H., **The influence of reinforcement on ultrasonic pulse velocity testing,** In Situ Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, p229-246, 1984.
- BUNGEY, J. H., **The testing of concrete in structures,** 2 ed. London, Surrey University Press, 1989.
- C. G. Araújo, **Análise numérica de um patrimônio histórico em icó como auxílio ao monitoramento estrutura.** Universidade de Fortaleza, 2018.
- C. Garcia, M. A. Soeiro, and E. Mesquita. **Caracterização dinâmica da Igreja da Expectação em Icó.** Ceará, pp. 1–8, 2019.
- CERAVOLO, Rosario et al. **Vibration-based monitoring and diagnosis of cultural heritage: a methodological discussion in three examples.** International Journal of Architectural Heritage, n. June 2015, p. 375-395, 2014. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.850554>
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, pr EN-ISO 8047, **Testing concrete – Determination of ultrasonic pulse velocity.** Brusseis, 1994.
- F. Brandão, **CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE UM EDIFÍCIO HISTÓRICO DO SÉCULO XIX,** Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT,” no. April, pp. 1–12, 2016.

FIGUEIREDO, E. P. **Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações.** In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.* São Paulo: IBRACON, 2005.

FILIPCZYNSKI, L.; PAWLOWSKI, Z.; WEHR, I.; **Ultrasonic methods of testing materials.** (Translation). Butterworths, London, 1966.

HAMASSAKI, L. T., **Utilização do ultra-som em concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 108p, 1986.

ICOMOS. **Princípios para análise, conservação e restauração estrutural do patrimônio arquitetônico.** 14.^a Assembléia Geral do ICOMOS, Zimbábue, 2003.

J. L. Delgado, **“Avaliação sísmica de um edifício crítico em alvenaria”** Instituto Técnico de Lisboa, 2013.

MANNING, E. et al. **Direct Sonic and Ultrasonic Wave Velocity in Masonry under Compressive Stress.** 9th International Masonry Conference, Guimarães, 2014.

MARTINI, R. J.; **Caracterização de alvenarias de granito baseada em técnicas geofísicas, mecânicas e redes neuronais.** Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2019.

MEDEIROS, A; **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado.** Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

MESQUITA, E. et al. **Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements.** *Journal of Building Engineering*, v. 19, n. May, p. 172–180, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.011>

Mesquita, E., Martini, R., Alves, A. et al. **Heterogeneity detection of Portuguese–Brazilian masonries through ultrasonic velocities measurements.** *J Civil Struct Health Monit* 8, 847–856, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0312-5>

MESQUITA, et al. **Long-term monitoring of a damaged historic structure using a wireless sensor network.** *Engineering Structures*, v. 161, n. February, p. 108 - 117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.013>

Ministero delle Infrastrutture, **“NTC 2008-Decreto Ministeriale 14/1/2008”**, 2008.

MIRANDA, L.F.B. **Ensaio acústico e de macacos planos em alvenarias resistentes.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Faculdade do Porto. p. 259, 2011.

MUNICH RE. **TOPICS GEO: Natural catastrophes 2015.** Munich: MUNICH RE, 2016.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S., **The Ultrasonic Pulse Velocity Method**, **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**, Tarun R. Naik and V M Malhotra eds, CRC Press, pp 169-189, 2004.

NETO, C. R. J. **A urbanização do Ceara setecentista - As vilas de Nossa Senhora da Expectação do Icó e de Santa Cruz do Aracati**. Universidade Federal da Bahia, 2007.

OLIVEIRA, A. M. de S. S. **Manifestações patológicas em edifícios residenciais: o caso das fachadas revestidas com pinturas**. I Conferência Latino-Americana de construção sustentável X Encontro Nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 2004

P.W.Higgs, **Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons**, Phys. Rev. 145 (4), 1156-1163, 1966.

PUNDIT Manual, CNS Eletronics Ltd., London. p. 76, 1994.

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

RILEM, NDT1, **Testing of concrete by the ultrasonic method**, 1972

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D., **FÍSICA Mecânica dos Fluidos - Calor - Movimento Ondulatório**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA. Volume 2. 2ª ed. 1016 p. 1993.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D., **FÍSICA Ondas Eletromagnéticas - Óptica - Física Atômica**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA. Volume 4. 2ª ed. 1016 p. 1994.

TOMAZ, Paulo Cezar. **A Preservação do Patrimônio Cultural e sua Trajetória no Brasil**. Revista de História e Estudos Culturais, Fênix. Universidade Presbiteriana Mackenzie, v. 7, a. VII, n. 02, 2010.

TURGUT, P. **Properties of masonry blocks produced with waste limestone sawdust and glass powder**. Journal of Building Engineering, v. 22, n. July, p. 1422–1427, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.008>

VALLUZZI, M. R. et al. **Non-destructive investigations for structural qualifications of the Sarno Baths, Pompeii**. Journal of Cultural Heritage, 2019.

VIANA, Francirton Josino. **Icó: Seu patrimônio, conhecer e preservar**. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de História, Centro de Educação, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011.