



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO ULTRASSÔNICO PARA
DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE FISSURAS EM CONCRETO
ARMADO**

HELLEN KARINE FERREIRA

Foz do Iguaçu, PR
Março de 2025



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO ULTRASSÔNICO PARA DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE FISSURAS EM CONCRETO ARMADO

HELLEN KARINE FERREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Profa. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. André Jacomel Torii

Foz do Iguaçu, PR
Março de 2025

HELLEN KARINE FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO ULTRASSÔNICO PARA
DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE FISSURAS EM CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Profa. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos
UNILA

Prof. Prof. Dr. César Winter de Mello
UNILA

Ma. Adriana Elisabete Limberger
CEASB- Itaipu Parquetec

Foz do Iguaçu, PR

Dedico este trabalho aos meu pais e à
memória da minha avó, Maria de Jesus.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus que me sustentou e me deu forças nos momentos de dificuldade nessa caminhada.

Aos meus pais, Marilda e Vilmar, minha eterna gratidão por todo o suporte, amor e dedicação que sempre me ofereceram. Sei que o apoio emocional e financeiro que recebi veio, muitas vezes, com sacrifícios pessoais de vocês, e sou imensamente grata por isso.

Pai, seu apoio prático foi fundamental neste TCC. O fato de você ter viajado dez horas, de Ponta Grossa a Foz do Iguaçu, apenas para me ajudar, demonstra o quanto sempre estive ao meu lado.

Mãe, sua força, suas orações e até mesmo suas lágrimas nos momentos difíceis foram um amparo essencial para que eu pudesse chegar até aqui.

Este trabalho e esta conquista são nossos. Vocês sempre serão meus maiores exemplos de dedicação, fé e amor incondicional.

À minha irmã Stefany, minha jovem e sábia conselheira, obrigada por todo carinho e por estar sempre disponível sempre que precisei de apoio emocional.

Às minhas amigas Gabriela e Laura, que estiveram ao meu lado durante toda a graduação, dividindo trabalhos, horas de estudo e muitos desafios. Sem vocês, essa caminhada teria sido muito mais difícil.

Aos meus colegas, em especial Renato Enrique, Pedro José, Pedro Henrique, Lucas Cabral e João Victor, sou imensamente grata pela colaboração na concretagem das vigas. Este trabalho não teria sido possível sem a dedicação de vocês, que aceitaram abrir mão de finais de semana para me ajudar.

Aos meus professores e orientadores Ana e André, agradeço não apenas pela constante orientação neste trabalho, mas também, especialmente à Ana, pelos valiosos conselhos de vida.

A todos os meus professores, que dedicam suas vidas a uma das profissões mais importantes do mundo, mesmo diante da desvalorização da educação, deixo minha sincera gratidão. Em especial, aos docentes da Unila, que contribuíram para minha formação profissional. Cada um, com seu compromisso com o ensino, seus conselhos e experiências compartilhadas, foi essencial na construção do meu conhecimento e desenvolvimento pessoal.

À equipe do CEASB e aos meus supervisores de estágio na Itaipu, Marcel Unten e Carlos Alberto, agradeço pela confiança em mim e na missão desta pesquisa, bem como pelo apoio prático e pelo conhecimento técnico transmitido ao longo desse processo.

À equipe do LADEMA e a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada e contribuíram para que eu me tornasse quem sou hoje, minha gratidão imensa.

Este trabalho é reflexo do esforço coletivo, das amizades construídas e do apoio que recebi ao longo do caminho. Obrigada a todos!

*"Se cheguei até aqui, foi porque me permitiram sonhar e
me deram forças para continuar."*

Autor desconhecido

RESUMO

Ensaio não destrutivo utilizando a técnica do ultrassom têm se mostrado como ferramentas adequadas para a avaliação e manutenção das estruturas de concreto sem comprometer o seu desempenho estrutural. Uma das principais necessidades é o monitoramento de fissuras, no entanto, como as medições são realizadas em campo, frequentemente ocorrem incertezas devido às características específicas do elemento analisado, como a inclinação das fissuras, a presença de armaduras, a heterogeneidade do concreto, fatores ambientais e outros fatores do processo de medição operacional. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso do método de ultrassom em elementos de concreto com fissuras induzidas e conhecidas e analisar a aplicabilidade do uso do instrumento em estruturas reais. Através do modo de transmissão indireto, foram medidas as velocidades de propagação da onda em 10 corpos de prova, sendo 5 com a presença de armadura e 5 sem a presença de armadura. Em cada grupo, com e sem armadura, 1 corpo de prova foi deixado íntegro e nos outros 4 foram provocadas fissuras com profundidades diferentes e conhecidas sendo 3 perpendiculares à face de medição e 1 inclinada a 45 graus. Os resultados obtidos mostram que apesar do ensaio ser sensível a presença de fissuras e outras falhas no concreto, ainda não é possível utilizá-lo em campo para determinar a profundidade de fissuras devido a altas variações nas medições, por não se ter um ambiente controlado, que acarretam muita imprecisão nos resultados.

Palavras-chave profundidade de fissura; ultrassom; concreto armado; ensaio não destrutivo; concreto.

ABSTRACT

Non-destructive testing using the ultrasound technique has proven to be an adequate tool for evaluating and maintaining concrete structures without compromising their structural performance. One of the main needs is crack monitoring; however, as the measurements are carried out in the field, uncertainties frequently arise due to the specific characteristics of the analyzed element, such as crack inclination, the presence of reinforcement, the heterogeneity of concrete, environmental factors, and other aspects of the operational measurement process. In this context, the present study aims to evaluate the use of the ultrasound method in concrete elements with induced and known cracks and to analyze the applicability of this instrument in real structures. Using the indirect transmission mode, wave propagation velocities were measured in 10 specimens, 5 with reinforcement and 5 without reinforcement. In each group, with and without reinforcement, 1 specimen was left intact, while the other 4 had cracks induced with different and known depths 3 perpendicular to the measurement surface and 1 inclined at 45 degrees. The results obtained show that, although the test is sensitive to the presence of cracks and other defects in concrete, it is still not feasible to use it in the field to determine crack depth due to high variations in measurements. The lack of a controlled environment leads to significant imprecision in the results.

Keywords: crack depth; ultrasound; reinforced concrete; non-destructive testing; concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Onda longitudinal (compressão) ou onda P.	25
Figura 2: Esquema de funcionamento do ultrassom.	27
Figura 3: Configuração para leituras de ultrassom.....	28
Figura 4: Gráfico para o cálculo da velocidade indireta.....	29
Figura 5: Medida da profundidade de uma fissura.	31
Figura 6: Leitura de ultrassom ao redor de uma fissura inclinada.....	32
Figura 7: Barras paralelas à propagação da onda de ultrassom.....	41
Figura 8: Fluxo Metodológico	44
Figura 9: Formas de Madeira	45
Figura 10: Esquema Indução de Fendas.....	46
Figura 11: Disposição das Vigas Moldadas	47
Figura 12: Aplanção das Vigas.....	48
Figura 13: Desforma e Cura.....	49
Figura 14: Medição Com Transdutores	50
Figura 15: Orientação de Medição	51
Figura 16: Locação de Medição	52
Figura 17: Malha de Medição.....	52
Figura 18 – Leitura de ultrassom ao redor de uma fissura para obtenção dos tempos de propagação	53
Figura 19: Viga V0 sem armadura.....	56
Figura 20: Viga V5 sem armadura.....	56
Figura 21: Viga V10 sem armadura.....	56
Figura 22: Viga V15 sem armadura.....	56
Figura 23: Viga V0 com armadura.....	57
Figura 24: Viga V5 com armadura.....	57
Figura 25: Viga V10 com armadura.....	57
Figura 26: Viga V15 com armadura.....	57
Figura 27: Viga V0 sem armadura.....	59
Figura 28: Viga V0 com armadura.....	59
Figura 29: Viga V5 sem armadura.....	60
Figura 30: Viga V5 com armadura.....	60
Figura 31: Viga V10 sem armadura.....	60

Figura 32: Viga V10 com armadura.....	60
Figura 33: Viga V15 sem armadura.....	61
Figura 34: Viga V15 com armadura.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correções para velocidade de propagação de onda ultrassônica devido a variações de temperatura.....	37
Tabela 2: Profundidade da Fissura Viga V5 sem Armadura – L1	62
Tabela 3: Profundidade da Fissura Viga V5 sem Armadura – L2	62
Tabela 4: Profundidade da Fissura Viga V5 sem Armadura – L3	63
Tabela 5: Profundidade da Fissura Viga V10 sem Armadura – L1	63
Tabela 6: Profundidade da Fissura Viga V10 sem Armadura – L2	63
Tabela 7: Profundidade da Fissura Viga V10 sem Armadura – L3	64
Tabela 8: Profundidade da Fissura Viga V15 sem Armadura – L1	64
Tabela 9: Profundidade da Fissura Viga V15 sem Armadura – L2	64
Tabela 10: Profundidade da Fissura Viga V15 sem Armadura – L3	65
Tabela 11: Profundidade da Fissura Viga V5 com Armadura – L1	65
Tabela 12: Profundidade da Fissura Viga V5 com Armadura – L2	66
Tabela 13: Profundidade da Fissura Viga V5 com Armadura – L3	66
Tabela 14: Profundidade da Fissura Viga V10 com Armadura – L1	66
Tabela 15: <i>Profundidade da Fissura Viga V10 com Armadura – L2</i>	<i>67</i>
Tabela 16: <i>Profundidade da Fissura Viga V10 com Armadura – L3</i>	<i>67</i>
Tabela 17: <i>Profundidade da Fissura Viga V15 com Armadura – L1</i>	<i>67</i>
Tabela 18: <i>Profundidade da Fissura Viga V15 com Armadura – L2</i>	<i>68</i>
Tabela 19: <i>Profundidade da Fissura Viga V15 com Armadura – L3</i>	<i>68</i>
Tabela 20: <i>Médias da velocidade e dos tempos de propagação da Viga inclinada sem armadura</i>	<i>69</i>
Tabela 21: <i>Médias da velocidade e dos tempos de propagação da Viga inclinada com armadura</i>	<i>70</i>
Tabela 22: Tempos de propagação para Viga V0 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	78
Tabela 23: Tempos de propagação para Viga V5 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	78
Tabela 24: Tempos de propagação para Viga V10 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	78
Tabela 25: Tempos de propagação para Viga V15 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	79

Tabela 26: Tempos de propagação para Viga V0 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	79
Tabela 27: Tempos de propagação para Viga V5 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	79
Tabela 28: Tempos de propagação para Viga V10 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	80
Tabela 29: Tempos de propagação para Viga V15 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X.....	80
Tabela 30: Velocidade de propagação para Viga 0 sem Armadura – L1, L2 e L3.....	81
Tabela 31: Velocidade de propagação para Viga 5 sem Armadura – L1, L2 e L3.....	81
Tabela 32: Velocidade de propagação para Viga 10 sem Armadura – L1, L2 e L3...	82
Tabela 33: Velocidade de propagação para Viga 15 sem Armadura – L1, L2 e L3..	82
Tabela 34: Velocidade de propagação para Viga 0 com Armadura – L1, L2 e L3....	83
Tabela 35: Velocidade de propagação para Viga 5 com Armadura – L1, L2 e L3....	83
Tabela 36: Velocidade de propagação para Viga 10 com Armadura – L1, L2 e L3..	84
Tabela 37: Velocidade de propagação para Viga 15 com Armadura – L1, L2 e L3..	84

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	20
2.4 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	20
3 SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL	22
3.1 UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM NO CONCRETO	22
3.1.1 Propagação de ondas	24
3.2 ENSAIO DE ULTRASSOM NO CONCRETO	26
3.2.1 Estimativa da Profundidade de Fissuras	30
3.2.2 Fissura inclinada	31
3.2.3 Normas Regulamentadoras	32
3.3 FATORES DE INFLUÊNCIA NO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRASSONICO NO CONCRETO	33
3.3.1 Materiais constituintes do concreto	34
3.3.2 Adensamento	35
3.3.3 Condições de cura	36
3.3.4 Superfície do concreto	36
3.3.5 Temperatura na Utilização do Ultrassom	37
3.3.6 Umidade do Concreto	38
3.3.7 Idade do concreto	38
3.3.8 Acoplante	39
3.3.9 Dispersão e Atenuação do Pulso	39
3.3.10 Frequência dos Transdutores e Comprimento de Onda	40
3.3.11 Presença de armaduras, fissuras ou vazios na VPU	40
3.3.12 Calibração do Equipamento	41
3.3.13 Fatores programáveis no equipamento	42
3.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES	43
4 METODOLOGIA	44
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	44

4.1.1 Definição das Amostras.....	44
4.1.2 Formas	45
4.1.3 Simulação de Fissuras	46
4.1.4 Processo de Moldagem.....	46
4.1.5 Posicionamento da Armadura e Fissuração.....	47
4.1.6 Preparação da Superfície para Ensaios	47
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	48
4.2.1 Materiais Utilizados	48
4.2.2 Processo de Mistura do Concreto	48
4.2.3 Moldagem e Adensamento.....	49
4.2.4 Desforma e Cura	49
4.3 DESCRIÇÃO DO ENSAIO	50
4.3.1 Configuração do Equipamento e Calibração	50
4.3.2 Primeira Campanha de Medições	51
4.3.3 Segunda Campanha de Medições	52
4.3.4 Procedimento de Medição.....	52
4.3.5 Medição da Profundidade da Fissura.....	53
4.3.6 Terceira Campanha de Medições	53
4.3.7 Procedimento de Medição para fissuras inclinadas	53
5 RESULTADOS	55
5.1 O efeito dos parâmetros das ondas utilizadas em medições em corpos de prova de concreto.....	55
5.2 O efeito da presença de fissuras nos resultados do ensaio de ultrassom.....	58
5.3 O EFEITO DE FISSURAS COM DIFERENTES PROFUNDIDADES NOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ULTRASSOM	61
5.4 O EFEITO DA PRESENÇA DE ARMADURA NO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DAS FISSURAS	65
5.5 O efeito da inclinação de fissuras nos resultados do ensaio de ultrassom;.....	68
6 CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
Apêndice A: Tabelas Dos Tempos De Propagação Para Diferentes Ganhos	78
Apêndice B: Tabelas Dos Valores Médios Do Tempo De Propagação Para As Diferentes Linhas Da Malha De Medição Em Vigas Sem Armadura, Com O Mesmo Ganho 500x.....	81

Apêndice C: Tabelas Dos Valores Médios Do Tempo De Propagação Para As
Diferentes Linhas Da Malha De Medição Em Vigas Com Armadura, Com O Mesmo
Ganho 500x.....83

INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Com o passar do tempo, as estruturas estão sujeitas a diversos fatores que podem comprometer sua estabilidade, como variações climáticas, sobrecargas e processos naturais de degradação. Diante disso, a utilização de métodos eficazes de avaliação torna-se essencial para diagnosticar e prever problemas sem comprometer a funcionalidade das estruturas ou exigir intervenções invasivas. Isso porque a durabilidade e a integridade estrutural das construções em concreto são fundamentais para garantir a segurança e a funcionalidade de edificações e infraestruturas em todo o mundo (SOUZA; RIPPER, 1998).

Os métodos de ensaios não destrutivos vêm ganhando destaque por serem fundamentais para avaliar, de maneira confiável e econômica, a integridade de estruturas de concreto. Essa abordagem é aplicável tanto em novas construções quanto em edifícios já existentes (KARAIKOS et al., 2015 apud SOUZA, F.C., 2017).

Uma das principais manifestações patológicas que afetam o concreto em edificações é a presença de fissuras. Dada a sua capacidade de comprometer a durabilidade e a segurança das estruturas, torna-se essencial adotar técnicas que permitam analisar o comportamento dessas fissuras, além de viabilizar o controle e a seleção adequada de métodos de reabilitação (SOUZA, F.C., 2017).

De acordo com Silva et al. (2005) as fissuras em estruturas de concreto podem surgir devido a uma variedade de fatores, cada um com suas próprias características e origens. De um lado, temos as fissuras causadas por carregamentos, que resultam de esforços diretos como tração, flexão ou cisalhamento, geralmente aparecendo nas áreas onde o concreto está sob tensão. Por outro lado, existem as fissuras que não estão relacionadas a carregamentos, mas sim a deformações impostas ao concreto. Essas podem ser provocadas por fenômenos como a retração do material durante a secagem, variações de temperatura que causam expansão ou contração, ou recalques diferenciais que geram movimentações na estrutura.

A fissuração pode comprometer significativamente a estética, a funcionalidade ou a durabilidade de uma peça de concreto armado. Além disso, deve-se ter em conta o desconforto psicológico que fissuras com aberturas exageradas podem gerar aos usuários. Fissuras amplas ou profundas podem facilitar a penetração de agentes agressivos, como água, oxigênio e íons cloreto, que podem acelerar processos de

deterioração, incluindo a corrosão das armaduras. Além disso, a capacidade de carga de elementos fissurados pode ser reduzida, aumentando o risco de falhas estruturais (Silva et al., 2005).

A classificação das fissuras é essencial para determinar suas causas, avaliar sua gravidade e definir estratégias adequadas de reparo. Embora não exista uma classificação oficial, é comum categorizá-las com base em sua abertura: microfissuras (aberturas inferiores a 0,05 mm), fissuras (aberturas inferiores a 0,5 mm) e trincas (aberturas de até 1 mm). A NBR 6118:2023, norma brasileira que trata do projeto de estruturas de concreto, não estabelece uma classificação, mas define limites de abertura de fissuras para garantir a durabilidade e o desempenho das estruturas. Para concreto armado em ambiente de agressividade fraca, o limite é de 0,4 mm; em ambientes de agressividade moderada ou forte, o limite é de 0,3 mm; e em ambientes de agressividade muito forte, o limite é de 0,2 mm.

Como discutido amplamente por autores como Helene (1992) e Mehta; Monteiro (2008), as fissuras podem ser classificadas de acordo com sua origem, sendo as principais causas a retração do concreto durante o processo de cura, a fluência, a sobrecarga, efeitos de assentamento do solo, variações térmicas e a corrosão da armadura. Dependendo da causa, as fissuras podem variar em tamanho, direção e profundidade, sendo categorizadas como fissuras ativas, que continuam a se desenvolver com o tempo, e fissuras passivas, que permanecem estáveis após a sua formação. Entretanto, ainda não é completamente possível caracterizar toda a tridimensionalidade de uma fissura sem prosseguir com ensaios que acabariam danificando parte da estrutura. Surge então, como possível solução para esse problema o uso do ensaio de ultrassom, um ensaio não destrutivo e de baixo custo que verifica, geralmente pela análise da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU), a heterogeneidade do concreto, a existência de fissuras e de vazios, entre outras aplicações (Antonaci et al., 2007 apud Medeiros, 2007).

Apesar de promissor e dos diversos estudos realizados em laboratório demonstrarem uma boa capacidade de detecção de falhas de concretagem e estimativa de resistência à compressão do concreto, ainda existe uma série de dúvidas sobre a acurácia dos resultados dos ensaios em inspeções em campo. Esse fato ocorre porque algumas variáveis irão interferir nos resultados de maneira distinta,

principalmente quando utilizadas em elementos com dimensões próximas às reais (Adamai et al., 2017).

Diante desses desafios, o presente trabalho tem como objetivo utilizar o ensaio de ultrassom para medir a profundidade de fissuras no concreto, avaliando sua acurácia em situações próximas às encontradas em campo.

OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar o uso da técnica de ultrassom para determinar a profundidade de fissuras em estruturas de concreto armado e não armado.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar o efeito dos parâmetros das ondas utilizadas em medições em corpos de prova de concreto;
- b) Avaliar o efeito da presença de fissuras nos resultados do ensaio de ultrassom;
- c) Avaliar o efeito de fissuras com diferentes profundidades nos resultados do ensaio de ultrassom;
- d) Analisar o efeito da presença de armadura no ensaio de determinação das fissuras;
- e) Avaliar o efeito da inclinação de fissuras nos resultados do ensaio de ultrassom.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho delimita-se na avaliação e comparação de 10 corpos de prova, sendo 5 com a presença de armadura e 5 sem a presença de armadura. Em cada grupo, com e sem armadura, 1 corpo de prova foi deixado íntegro e nos outros 4 foram provocadas fissuras com profundidades diferentes e conhecidas sendo 3 perpendiculares à face de medição e 1 inclinada a aproximadamente 45°.

1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Este projeto está inserido no âmbito do Convênio CeasbV - Desenvolvimento de Soluções Aplicadas à Segurança da Barragem de Itaipu, desenvolvido pelo Itaipu Parquetec por meio do Centro Avançado em Soluções para Barragens (CEASB), em parceria com a ITAIPU BINACIONAL. O CEASB apoiou esta pesquisa por meio de

fomento, que incluiu o empréstimo de equipamentos, fornecimento de material de consumo, utilização de laboratórios e suporte técnico especializado. Além disso, a equipe de engenheiros e mestres do CEASB contribuiu ativamente para o desenvolvimento da pesquisa, fortalecendo a relação entre a universidade, centro de pesquisa e a inovação.

SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL

1.5 UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM NO CONCRETO

O uso de ultrassom na avaliação de concreto tem sido amplamente estudado nas últimas décadas, com pesquisas que exploram desde a detecção de fissuras até a caracterização de heterogeneidades no material.

A pesquisa conduzida por Medeiros (2007) teve como objetivo estudar detalhadamente esta aplicação do ultrassom, avaliando a capacidade de detecção de fendas superficiais, a estimativa de suas profundidades e a verificação da eficácia de injeções para o preenchimento das mesmas, foi estudado também a influência de variáveis como a idade e a presença de barras de aço. Constatou-se que o método é capaz de estimar profundidades diferentes, mas com uma precisão muito baixa e que não houve influência da abertura na estimação da profundidade da fissura. Ficou comprovado a influência de barras de aço paralelas à direção das leituras com o ultrassom pelo modo de transmissão indireto.

A influência de fatores externos, como temperatura de cura e umidade, também foi amplamente investigada. Câmara (2006) estudou o efeito da temperatura de cura na velocidade de pulso, concluindo que concretos curados em câmara úmida apresentam maior velocidade de pulso devido à melhor hidratação e maior umidade nos poros. Dornelles, Pinto e Padaratz (2004) avaliaram a influência das armaduras na velocidade de pulso, desenvolvendo equações para corrigir os efeitos das barras de aço. A pesquisa mostrou que a presença de barras de aço pode aumentar a velocidade de propagação da onda, dependendo da distância entre os transdutores e as barras.

Em sua dissertação de mestrado, Chies (2014) realizou um estudo que visou estudar a influência que determinadas variáveis operacionais exercem sobre os resultados obtidos nos ensaios de VPU e qual a real capacidade de penetração e detecção de defeitos de diversas magnitudes. Como resultado percebeu que a escolha dos parâmetros de ensaio é um fator determinante para permitir a interpretação correta dos resultados, salientando-se que a experiência do operador e as dimensões de grid, ou seja a malha de pontos onde são realizadas as medições, são os parâmetros que mais interferem na interpretação dos dados.

Godinho, et al. (2020) conduziram um programa experimental para avaliar a influência do tipo de cimento, da idade de cura, do formato e da umidade dos corpos de prova de concreto na velocidade de pulso ultrassônico. Com os dados obtidos foi possível correlacionar o aumento da resistência do concreto ao longo do tempo (nas idades de 7, 14, 28, 70 e 91 dias) com o aumento da velocidade de pulso ultrassônico. Além disso, comprovaram a influência direta da umidade do concreto e do grau de hidratação na velocidade de pulso ultrassônico. A forma do corpo de prova, de modo geral, não apresentou influência nos resultados.

Com objetivo de estudar a influência que determinadas variáveis tecnológicas exercem sobre os resultados obtidos através dos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico, Adamati, et al. (2017) realizaram uma pesquisa que constatou que a escolha do grid deve considerar o tamanho do elemento e do defeito. O grid mais refinado (25 cm) proporcionou melhores resultados, a presença de armadura reduziu significativamente as velocidades médias medidas, contrariando algumas publicações anteriores e que a experiência do operador foi o fator mais influente nas medições. Na mesma pesquisa, mas na publicação feita por Lorenzi, et al. (2017) foi concluído que o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico é uma ferramenta adequada para detecção de falhas no concreto, até certa profundidade.

A pesquisa realizada por Carelli (2014) teve como objetivo ampliar o uso da técnica de ultrassom na avaliação de danos em materiais, como concreto e argamassa, por meio da análise de parâmetros obtidos do formato da onda que se propaga no material. Foram definidos parâmetros como velocidade de grupo, amplitude máxima, energia (inicial, total e acumulada), magnitude, pico de frequência máxima e frequência central. O estudo experimental avaliou a eficácia desses parâmetros na detecção de fissuras em placas de concreto e argamassa, tanto fissuradas quanto não fissuradas, e na evolução de fissuras durante ensaios de flexão em vigas de concreto armado. Os resultados indicaram que nem todos os parâmetros foram adequados para as análises, mas alguns mostraram-se promissores na detecção de fissuras, independentemente de suas características. Esses parâmetros demonstraram maior eficiência em comparação com a análise tradicional de velocidade de pulso, confirmando que o formato da onda ultrassônica pode fornecer informações importantes sobre o comportamento de materiais fissurados.

1.5.1 Propagação de ondas

O Ensaio de Ultrassom é uma técnica amplamente utilizada para avaliar as condições internas de materiais, suas propriedades mecânicas e possíveis não homogeneidades. Baseia-se no princípio da propagação de ondas mecânicas (ou de tensão) em um meio de interesse, sendo que as ondas ultrassônicas estão diretamente relacionadas ao comportamento mecânico dos materiais (Payan; Abraham; Garnier, 2018).

Uma onda é definida como uma perturbação que se propaga de um ponto a outro, transmitindo energia sem transporte de matéria (Sears, Zemansky E Young, 1984). As ondas podem ser classificadas em dois tipos principais: eletromagnéticas e mecânicas. As ondas eletromagnéticas originam-se de perturbações em campos elétricos e magnéticos e podem se propagar tanto em meios materiais quanto no vácuo. Já as ondas mecânicas, como as sonoras, necessitam de um meio material para se propagar, podendo ser sólido, líquido ou gasoso (Serway, 1996).

Para entendimento e análise dos resultados dos ensaios de determinação da velocidade de propagação do pulso ultrassônico em concretos é necessário entender que a velocidade de propagação da onda mecânica é maior em sólidos do que em líquidos e gases (Carelli, 2014).

A propagação das ondas ultrassônicas baseia-se no conceito de deformações de partículas por vibrações mecânicas variáveis no tempo. Quando as partículas de um meio são deslocadas de suas posições de equilíbrio, surgem forças restauradoras que, combinadas com a inércia das partículas, geram movimentos oscilatórios no meio (Hellier, 2001).

Embora as ondas sonoras possam se propagar através de diferentes estados da matéria (sólidos, líquidos e gases), o modo de propagação varia de acordo com a fase do material. Em sólidos, as ondas ultrassônicas podem se propagar de quatro maneiras principais, dependendo do tipo de oscilação das partículas (Mehta e Monteiro, 2008):

Ondas longitudinais (também chamadas de ondas de compressão ou ondas "P", onde "P" significa primária);

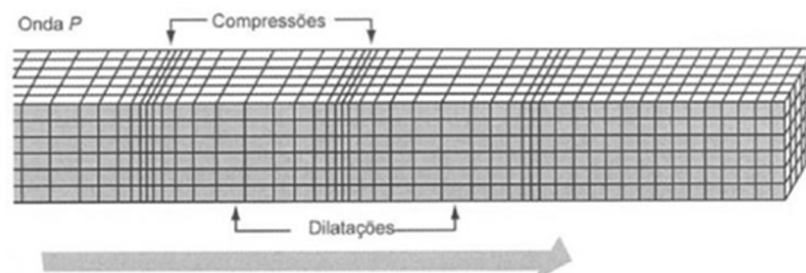
Ondas transversais (conhecidas como ondas de cisalhamento ou ondas "S", onde "S" significa secundária);

Ondas de superfície (ou ondas de Rayleigh);

Ondas de placa (ou ondas de Lamb).

Para a análise da propagação de ondas em sólidos, utiliza-se a generalização de um meio elástico, que permite compreender o comportamento das ondas mecânicas nesses materiais. No caso dos ensaios ultrassônicos, são utilizados dois modos de propagação de ondas: as ondas longitudinais e transversais superpostas. No entanto, em ensaios ultrassônicos, a atenção geralmente se concentra nas ondas P, pois são as primeiras a chegarem no receptor, pois no concreto, a velocidade das ondas transversais geralmente gira em torno de 60% da velocidade das ondas longitudinais (Bungey et al., 2006). O movimento das partículas nesse tipo de onda ocorre paralelamente à direção de propagação, ou seja, as oscilações das partículas se dão na mesma direção em que a onda se propaga conforme a **Figura 1**.

Figura 1- Onda longitudinal (compressão) ou onda P.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Alguns conceitos são fundamentais para compreender a propagação de ondas (Sears, Zemansky E Young, 1984):

- O comprimento de onda (λ) é a distância entre duas cristas consecutivas (ou dois vales consecutivos) de uma onda periódica.
- A velocidade de uma onda (v) corresponde à distância que uma perturbação percorre por unidade de tempo.
- A frequência (f) de uma onda é o número de oscilações completas que ocorrem em um segundo.
- O período (T) é o tempo necessário para completar um ciclo.

A frequência e o período se relacionam da seguinte maneira:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Sabendo-se que durante um período T , a onda percorre uma distância igual ao comprimento de onda λ . A velocidade de propagação é dada por:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (2)$$

Onde, a distância percorrida em um período é λ e o tempo gasto é T , temos:

Como $T = \frac{1}{f}$, substituímos na equação: $v = \lambda \cdot f$

Reorganizando:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

Onde a unidade de medida utilizada para frequência é o Hertz.

Esta equação mostra que a distância percorrida pela onda é diretamente proporcional à velocidade de propagação no material e inversamente proporcional à frequência de transmissão (Hellier, 2001 apud Hoffmann, 2015).

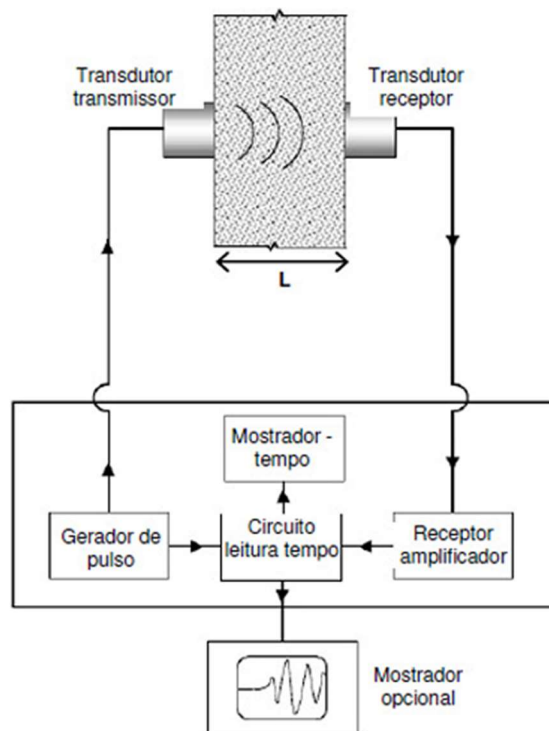
1.6 ENSAIO DE ULTRASSOM NO CONCRETO

O método de ensaio de ultrassom em concreto é uma abordagem que permite detectar fissuras internas, defeitos e alterações no material, como deterioração causada por ambientes químicos agressivos. Uma das principais vantagens desse método é que ele é não destrutivo, ou seja, não causa danos ao elemento testado. Isso permite que o teste seja repetido no mesmo local, o que é especialmente útil para monitorar mudanças estruturais internas no concreto ao longo do tempo (Naik, et al., 2004).

Além disso, como o módulo de elasticidade e a resistência do concreto aumentam com a maturidade do material, a VPU pode ser usada para estimar indiretamente a resistência do concreto, embora não exista uma relação física direta entre essas propriedades (ACI 228, 2003).

O ensaio de ultrassom no concreto baseia-se na propagação de ondas mecânicas através do material. Essas ondas são geradas por transdutores piezoelétricos, que convertem energia elétrica em vibrações mecânicas (**Figura 2**). O transdutor transmissor emite um pulso ultrassônico que se propaga pelo concreto e é captado por um transdutor receptor, posicionado a uma distância conhecida (L).

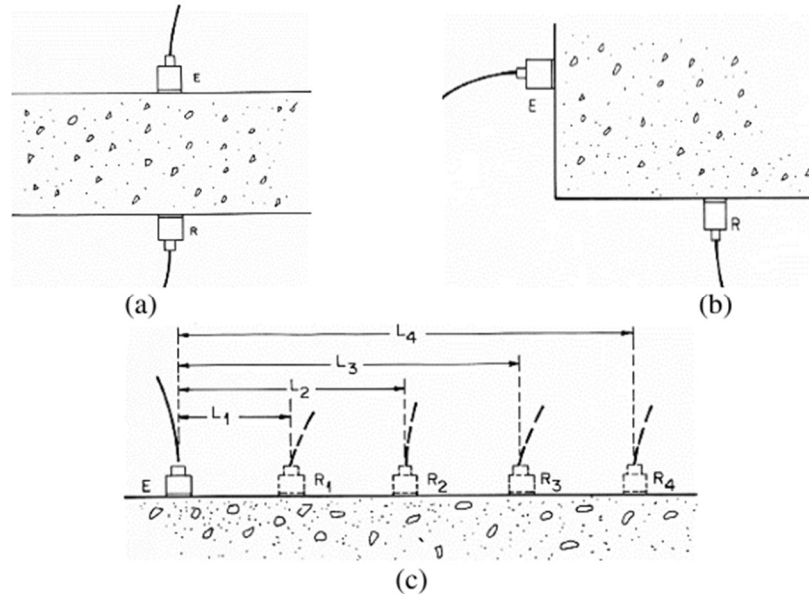
Figura 2: Esquema de funcionamento do ultrassom.



Fonte: Naik et al., 2004; Souza, 2017.

A velocidade de propagação do pulso ultrassônico está diretamente relacionada às propriedades elásticas e à densidade do material, sendo praticamente independente de sua geometria (Payan, Abraham e Garnier, 2018). No entanto, como a velocidade do pulso é determinada a partir da primeira perturbação detectável no sinal da onda, ela é um dos parâmetros menos sensíveis a pequenas variações internas do material (SHIOTANI E AGGELIS, 2008 e 2009 apud Silva, P. M., 2017).

De acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019) existem três possíveis arranjos dos transdutores para efetuar as leituras dos ensaios, conforme ilustrado na **Figura 3**, sendo que: (a) direta; (b) semidireta; (c) indireta.

Figura 3: Configuração para leituras de ultrassom

Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2019).

O modo de transmissão direta é o mais eficaz, pois permite que a máxima energia seja transmitida e recebida, garantindo resultados mais confiáveis. Além disso, o percurso da onda é claramente definido e pode ser medido com maior precisão. Por essas razões, esse método deve ser priorizado sempre que possível (Bungey et al., 2006).

O método de transmissão semidireta é menos utilizado, mas se mostra bastante eficaz para evitar áreas com alta densidade de armaduras, como os cantos de pilares e vigas (Medeiros, 2007). De acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019), essa configuração só deve ser adotada quando não for possível acessar duas faces opostas de um corpo de prova ou elemento de concreto, e quando a única face disponível não tiver extensão suficiente para a aplicação do método de transmissão indireta.

O modo de transmissão indireta é menos satisfatório, já que a amplitude do sinal recebido é significativamente menor em comparação ao modo direto. Outro fator que limita sua eficácia é que o pulso ultrassônico tende a se propagar próximo à superfície do concreto, uma região que frequentemente apresenta características

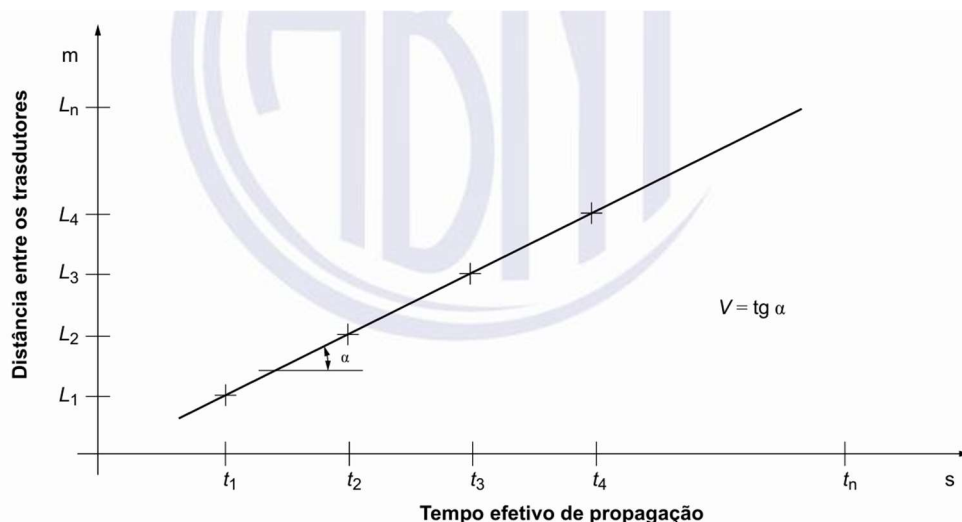
diferentes das camadas internas, como maior concentração de partículas finas, especialmente em elementos como lajes (Naik et al., 2004).

Apesar dessas limitações, é possível calcular a velocidade de propagação da onda no modo indireto, seguindo o procedimento descrito na NBR 8802 (ABNT, 2019):

1. Fixar o transdutor emissor em um ponto específico.
2. Realizar a leitura do tempo de propagação com o transdutor receptor posicionado em pontos equidistantes ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$), alinhados em uma mesma reta que parte do transdutor emissor.
3. Plotar em um gráfico cartesiano as distâncias entre o transdutor emissor (E) e cada ponto receptor (R_1 a R_n), em relação aos tempos de propagação registrados.
4. A inclinação da reta formada pelos pontos no gráfico corresponde numericamente à velocidade de propagação da onda no concreto.

A precisão da velocidade obtida no modo indireto depende do alinhamento dos pontos no gráfico, como na **Figura 4**. Quanto mais alinhados estiverem os pontos, mais consistente será o resultado. Esse método, embora menos preciso que o modo direto, ainda é útil quando o acesso às duas faces do elemento estrutural é limitado, como por exemplo, em vigas ou lajes apoiadas diretamente sobre outras estruturas.

Figura 4: Gráfico para o cálculo da velocidade indireta.



Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2019).

1.6.1 Estimativa da Profundidade de Fissuras

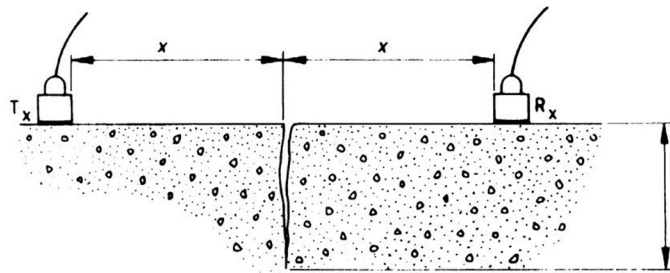
A estimativa da profundidade de fissuras superficiais em estruturas de concreto é uma aplicação importante do método de ultrassom, especialmente quando utilizado no modo de transmissão indireta. Autores e normas internacionais, como a RILEM NDT1 (1972), BS 1881: Part 203 (1986), Bungey (1989), EN-ISO 8047 (1994) apud Medeiros (2007), Pundit Manual (1994), Rossel et al. (2000) apud Medeiros (2007) e Naik et al. (2004), afirmam que é possível determinar a profundidade de fissuras por meio de leituras do tempo de propagação de ondas ultrassônicas. No entanto, há pouca informação disponível sobre a aplicação prática desse procedimento, o que demanda uma análise cuidadosa dos modelos matemáticos propostos.

Os trabalhos de Medeiros (2007) e Souza (2017), abordaram modelos matemáticos para estimar a profundidade de fissuras: o Modelo 1, proposto por Bungey (1989), e o Modelo 2, descrito na norma BS 1881: Part 203 (1986). Souza (2017) aborda também os modelos que ele chama de Método “A” proposto por Pinto et al. (2010) e Método “B” – Pinto et al. (2010). Dentre estes modelos foi escolhido para calcular a profundidade de fissuras deste trabalho o modelo da BS 1881: Part 203 (1986), por se tratar do mesmo modelo apresentado no manual do equipamento utilizado para as medições.

Modelo Proposto pela BS 1881: Part 203 (1986)

O Modelo 2, descrito na norma BS 1881: Part 203 (1986), propõe um procedimento semelhante ao modelo 1, mas com um arranjo combinado dos transdutores simétricos à fissura, onde a primeira medição é realizada com os transdutores colocados equidistantes das fissuras e a segunda medição os transdutores são afastados simetricamente. A Figura 5 exemplifica as distâncias e a profundidade deste método, onde tem-se “c” deve se ler “h”. Esse método elimina a necessidade de estimar a velocidade de propagação no modo de transmissão indireta, o que pode reduzir erros associados à heterogeneidade do concreto.

Figura 5: Medida da profundidade de uma fissura.



Fonte: BS 1881: Part 203 (1986).

A seguir é demonstrado o procedimento matemático para a determinação da profundidade de fissuras.

Tempo de propagação com transdutores simétricos (T1):

$$T_1 = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V} \quad (3)$$

Onde:

T1 = tempo de propagação com os transdutores posicionados a uma distância x da fissura;

V = velocidade de propagação do pulso.

Tempo de propagação com transdutores equidistantes (T2):

$$T_2 = \frac{2\sqrt{4x^2 + h^2}}{V} \quad (4)$$

Onde:

T2 = tempo de propagação com os transdutores posicionados a uma distância 2x da fissura.

Igualando as equações 6 e 7 e eliminando V, obtém-se a profundidade da fissura (h):

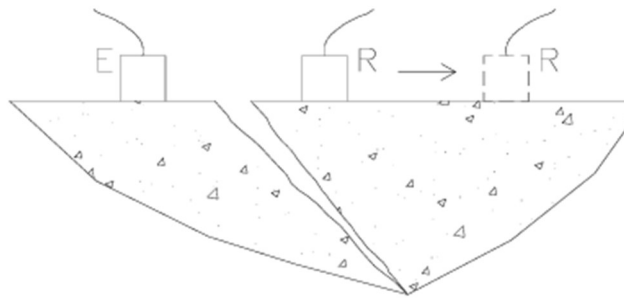
$$h = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (5)$$

1.6.2 Fissura inclinada

Baseado no trabalho de Medeiros (2017) é possível determinar o sentido de inclinação de fissuras. Para se determinar se uma fissura é perpendicular à superfície, pode-se posicionar os transdutores próximos à fissura. O emissor deve permanecer fixo, enquanto o receptor é movido para mais longe da fissura, conforme ilustrado na

Figura 6. Se o tempo de propagação da segunda leitura (com os transdutores mais afastados) for menor que o da primeira leitura, isso sugere que a fissura está inclinada na direção do emissor para o receptor. No entanto, também pode indicar que a fissura é muito profunda. Para confirmar, basta inverter a posição dos transdutores. Se o tempo de propagação for menor quando os transdutores estão mais próximos, a fissura está realmente inclinada na direção observada anteriormente. Caso contrário, a fissura pode ser perpendicular à superfície, mas com uma profundidade significativa (BS 1881: Part 203, 1986).

Figura 6: Leitura de ultrassom ao redor de uma fissura inclinada.



Fonte: BS 1881: Part 203 (1986).

1.6.3 Normas Regulamentadoras

Existem diversas normas que regulamentam o ensaio de ultrassonografia. A norma brasileira NBR 8802 (2019) aborda o tipo de material acoplante utilizado no ensaio, além de definir termos como onda longitudinal, velocidade de propagação e frequência ultrassônica. Durante a execução do ensaio, as superfícies a serem analisadas devem estar lisas ou uniformizadas com argamassa, gesso ou resina epóxi.

A NM 58 (1996) é semelhante a NBR 8802 (2019), mas por ser mais antiga é menos rígida, abordando aplicações mais genéricas, incluindo avaliação de homogeneidade, resistência e módulo de elasticidade, sem mencionar a calibração do equipamento.

Os métodos de ensaio descritos nas principais normas internacionais são semelhantes: direto, semidireto e indireto. Os resultados devem ser apresentados com

base na velocidade, calculada pela equação $V = L/t$, onde V é a velocidade de propagação (m/s), L é a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (m) e t é o tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda (s).

Entre as normas internacionais, destacam-se a britânica BS 1881 (1986) e a americana ASTM C597-02 (2002). A norma britânica complementa a NBR 8802 (2019) ao recomendar o uso da mesma equação para calcular a velocidade do pulso ultrassônico e ao mencionar a necessidade de uniformizar superfícies irregulares com pasta de cimento, epóxi ou plastificante. Ambas as normas concordam que o objetivo do ensaio de ultrassonografia é avaliar a integridade do concreto. A norma britânica, no entanto, detalha mais aplicações, como a detecção de defeitos, vazios internos, estimativa da profundidade de trincas superficiais e espessura de camadas de concreto de qualidade inferior.

1.7 FATORES DE INFLUÊNCIA NO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRASSONICO NO CONCRETO

O tempo de propagação do pulso ultrassônico no interior do concreto depende de diversos fatores, tendo em vista que se trata de um material bastante heterogêneo, estes fatores podem ser divididos em dois grupos (Costa, 2004):

Grupo I – Fatores Internos à Estrutura de Concreto.

- a) Natureza do agregado graúdo;
- b) Natureza do agregado miúdo;
- c) Relação a/c do concreto;
- d) Tipo de cimento;
- e) Aditivos;
- f) Relação agregado/cimento;
- g) Densidade do material;
- h) Propriedades elásticas;
- i) Presença de armadura interna;

Grupo II – Fatores externos à Estrutura de Concreto.

- a) Umidade superficial da estrutura;
- b) Vibração do meio;
- c) Idade dos corpos-de-prova testados;

- d) Meio a que a estrutura está exposta;
- e) Temperatura ambiente;
- f) Largura da peça a ser ensaiada;
- g) Modo de colocação dos transdutores sobre a superfície;
- h) Condições da superfície a ser ensaiada.

Estes fatores devem ser considerados nas medições e serão explicados nos tópicos que seguem.

1.7.1 Materiais constituintes do concreto

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU) no concreto é influenciada por diversos fatores relacionados aos materiais constituintes, como o tipo de agregado, o cimento, a relação água/cimento, o uso de aditivos e o processo de adensamento. Esses elementos afetam diretamente a densidade, a porosidade e o módulo de elasticidade do concreto, refletindo-se na velocidade de propagação das ondas.

O tipo e a densidade do agregado graúdo são fatores determinantes na VPU, conforme estudos de Naik, et al. (2004). Diferentes agregados apresentam velocidades de propagação que variam em uma ampla faixa, entre 2500 e 6000 m/s. Agregados mais densos tendem a produzir concretos com velocidades maiores, enquanto agregados leves, resultam em velocidades menores (Chung e Law, 1983 apud Medeiros 2007).

Kaplan (1959) apud Medeiros (2007), demonstrou que concretos com resistências à compressão semelhantes podem apresentar diferentes velocidades de propagação, dependendo do tipo de agregado utilizado. Isso ocorre porque o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação do agregado são geralmente superiores aos da pasta de cimento, influenciando diretamente o comportamento do concreto como um todo.

A dimensão máxima do agregado graúdo ($D_{m\acute{a}x}$) também tem um papel importante. Evangelista (2002) constatou que agregados com $D_{m\acute{a}x}$ de 19 mm resultaram em velocidades entre 2,5% e 11% superiores às de agregados com $D_{m\acute{a}x}$ de 9,5 mm. Sturup, Vecchio e Catarin (1984) apud Medeiros (2007) corroboraram

essa observação, verificando que concretos com agregados de maior dimensão máxima apresentaram velocidades mais altas. Isso se deve ao fato de que agregados maiores têm superfície específica menor, reduzindo a quantidade de pasta de cimento necessária e, conseqüentemente, a porosidade do concreto.

O tipo de cimento também afeta a VPU, embora de forma menos direta. Jones (1962) apud Medeiros (2007) observou que a taxa de hidratação do cimento influencia a velocidade de propagação, pois um maior grau de hidratação aumenta o módulo de elasticidade e, conseqüentemente, a velocidade. Evangelista (2002) comparou cimentos Portland comum (CP III) e de alta resistência inicial (CP V-ARI), encontrando velocidades cerca de 5% maiores para o CP V-ARI.

A utilização de aditivos, como os superplastificantes, pode impactar significativamente a Velocidade de Propagação Ultrassônica (VPU). Esses aditivos exercem influência sobre a velocidade de maneira análoga à taxa de hidratação do cimento. Em particular, os superplastificantes tendem a promover velocidades mais elevadas, em função da redução da relação água/cimento, o que diminui a porosidade e eleva a densidade do concreto. Essa diminuição no volume de água resulta em uma estrutura interna mais compacta, com menor presença de vazios, facilitando, assim, a propagação das ondas ultrassônicas (Naik, et al., 2004).

A relação água/cimento é um fator determinante que impacta diretamente a Velocidade de Propagação Ultrassônica (VPU). Quando essa relação aumenta, observa-se uma diminuição na velocidade de propagação, já que o módulo de elasticidade do concreto é reduzido. Apesar de a variação na relação água/cimento não influenciar diretamente a correlação entre VPU e resistência à compressão, valores mais baixos dessa relação (como 0,36 e 0,40) geram velocidades mais altas. Isso se deve ao fato de que uma quantidade menor de água resulta em uma microestrutura mais compacta e menos porosa, o que favorece a transmissão das ondas ultrassônicas (Kaplan, 1959 e Facaoaru, 1961 apud Medeiros, 2007).

1.7.2 Adensamento

O processo de adensamento também tem um impacto significativo na VPU. Concretos mal vibrados ou adensados manualmente tendem a ser menos densos, resultando em velocidades menores. Davis (1977) apud Medeiros (2007), observou

que as regiões superiores de colunas de concreto apresentam velocidades menores devido ao movimento de água e ar durante o adensamento, o que aumenta a relação água/cimento e reduz a densidade nessas áreas. Câmara (2006), verificaram que a velocidade medida próximo à superfície de concretagem foi 2 a 5% menor do que na base dos prismas, indicando um maior grau de adensamento nas regiões inferiores. Além disso, a direção de propagação da onda em relação à direção de concretagem também influencia a VPU, com velocidades ligeiramente maiores quando a onda se propaga transversalmente às camadas de concretagem, devido à menor qualidade das camadas superficiais (Bauer, 1987).

1.7.3 Condições de cura

As condições de cura do concreto têm um impacto significativo na correlação entre a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência do material, com esse efeito sendo mais pronunciado em concretos que passam por processos de cura acelerada. (ACI 228, 2003).

Câmara (2006), investigou o comportamento da velocidade dos pulsos ultrassônicos em concretos com resistências de 20 MPa, 25 MPa e 30 MPa, avaliando-os nas idades de 3, 7, 14, 28 e 90 dias. O estudo indicou que, sob essas condições, os concretos curados em câmara úmida apresentaram velocidades superiores às dos concretos curados ao ar. Esse resultado pode estar associado a uma melhor hidratação do cimento e a um maior teor de umidade nos poros dos concretos saturados.

De acordo com a International Atomic Energy Agency (2002) apud Carelli (2014), a temperatura de cura influencia o desenvolvimento da hidratação nos primeiros dias, afetando tanto a resistência à compressão quanto a velocidade dos pulsos ultrassônicos.

1.7.4 Superfície do concreto

A superfície do concreto deve estar lisa e limpa para garantir um acoplamento adequado dos transdutores. A NBR 8802 (ANBT, 2019) recomenda procedimentos para regularização da superfície, como métodos mecânicos ou aplicação de pasta de

cimento, gesso ou resina epóxi. Superfícies rugosas ou com acabamentos devem ser evitadas, pois podem não representar as propriedades do interior do concreto.

Segundo Lorenzi (2009), é importante evitar superfícies muito rugosas ou que tenham recebido algum tipo de acabamento, uma vez que as propriedades do concreto na camada superficial podem diferir significativamente das do interior. A NM 58 (1996) reforça essa recomendação, sugerindo que as superfícies do concreto sejam lisas para medições precisas. Caso haja rugosidades, é aconselhável realizar um polimento ou aplicar uma fina camada de resina epóxi ou argamassa de pega rápida (Grullón et al., 2004).

Além disso, Machado (2005), chama a atenção para o fato que superfícies que receberam acabamento devem ser evitadas, pois as propriedades do concreto na camada superficial nem sempre são as mesmas do interior da peça. Essa diferença pode levar a imprecisão nas medições.

1.7.5 Temperatura na Utilização do Ultrassom

Assim como a temperatura de cura tem influência sobre a velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos, a temperatura também exerce influência durante a realização do ensaio. De acordo com a RILEM NDT 1 (1972) a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas é afetada pela temperatura, especialmente quando esta ultrapassa 30°C ou fica abaixo de 5°C. No intervalo de 40°C a 60°C, observa-se uma redução na velocidade, decorrente da microfissuração interna do concreto. Por outro lado, em situações de congelamento, a velocidade aumenta devido à solidificação da água presente nos poros do concreto. Para contornar os efeitos da temperatura são propostos fatores de correção, o manual do equipamento orienta usar a **Tabela 1**:

Tabela 1: Correções para velocidade de propagação de onda ultrassônica devido a variações de temperatura.

Temperatura	Concreto seco	Concreto úmido
10°C – 30°C	1.0 (sem correção)	1.0 (sem correção)
60°C	1.05	1.04
40°C	1.02	1.02
0°C	0.99	0.99
-4°C	0.98	0.92

Fonte: PROCEQ Pundit Lab: Manual de Instruções de Operação.

1.7.6 Umidade do Concreto

A umidade exerce uma influência relativamente moderada na Velocidade de Propagação Ultrassônica (VPU). A velocidade em um concreto saturado é aproximadamente 2% maior do que em um concreto seco. Esse comportamento ocorre porque as ondas sonoras se propagam com maior rapidez em meios líquidos em comparação com os gasosos. Dessa forma, quando os poros do concreto estão preenchidos com água, há um aumento na velocidade das ondas ultrassônicas, conforme destacado nos estudos de Chung e Law (1983) e Bungey (1989).

O aumento da umidade no concreto tende a elevar os valores de VPU, especialmente em concretos de baixa resistência. Isso acontece porque a água preenche os poros do concreto, facilitando a propagação das ondas. Em alguns casos, esse aumento pode chegar a 5% em relação a concretos secos. Vários autores, como Chung e Law (1983), Ohdaira e Masuzawa (2000) e Berriman et al. (2004) apud Chies (2014), confirmaram esse efeito, embora não tenham explorado detalhes sobre a umidade da superfície.

1.7.7 Idade do concreto

O efeito da idade na velocidade do concreto é semelhante ao da evolução da resistência à compressão. Nas primeiras idades, a velocidade aumenta rapidamente, estabilizando-se em poucos dias, especialmente em concretos feitos com cimentos de alta resistência inicial. Essa rápida evolução ocorre devido ao avanço acelerado das reações de hidratação do cimento, que promovem a formação de uma estrutura interna mais densa e coesa. (Jones 1962 e Orchard, 1978 apud Medeiros, 2007).

Em idades mais avançadas, a velocidade de propagação ultrassônica pode diminuir devido à auto dessecação, especialmente em concretos com baixas relações água/cimento, como os de alto desempenho. Esse fenômeno ocorre quando a água dos poros capilares é consumida pela hidratação do cimento, levando à formação de microfissuras e ao aumento da porosidade vazia. Mesmo sob cura por imersão, a hidratação superficial pode impermeabilizar a estrutura, limitando a oferta de água interna e intensificando a auto dessecação. Como resultado, a propagação das ondas

ultrassônicas é reduzida, já que elas se propagam mais lentamente no ar do que na água (Almeida, 1993 apud Medeiros, 2007).

1.7.8 Acoplante

O acoplante é o material aplicado nas superfícies dos transdutores antes de serem colocados em contato com o concreto a ser avaliado. Sua principal função é uniformizar a superfície do concreto onde os transdutores serão posicionados e evitar a entrada de ar durante o teste.

De acordo com Costa (2004), a natureza do material acoplante pode interferir no resultado final do ensaio embora as normas não especifiquem rigidamente o tipo de material a ser usado como acoplante. A escolha do material é mais crítica do que se imagina na interface entre o transdutor e a superfície do concreto.

As principais normas trazem orientações claras sobre o uso de acoplantes em ensaios ultrassônicos. A ASTM C 597:2009 destaca que o acoplante ideal é aquele que gera uma onda recebida com formato e decaimento senoidal, que pode ser observada em um osciloscópio ou no visor digital do equipamento. Já a BS 1881 - parte 203:1986 sugere o uso de materiais como vaselina, graxa ou uma mistura de caulim e glicerol como acoplantes. A NBR 8802 (ABNT, 2019), recomenda a aplicação de uma camada fina de acoplante, como graxa de silicone, mineral ou vaselina, nas superfícies dos transdutores ou do concreto, garantindo uma conexão eficaz, principalmente em superfícies lisas. Por fim, a NM 58:1996 indica que o meio de acoplamento pode ser graxa, vaselina ou outro material viscoso, ressaltando a importância de aplicar uma pressão leve nos transdutores para preencher os poros superficiais do concreto.

1.7.9 Dispersão e Atenuação do Pulso

A presença de vazios, fissuras e partículas de agregados no concreto causa dispersão e atenuação do pulso ultrassônico. Essa dispersão é mais intensa quando o comprimento de onda (λ) é igual ou menor que o tamanho do dispersor (Bungey et al., 2006).

1.7.10 Frequência dos Transdutores e Comprimento de Onda

A escolha da frequência dos transdutores é um aspecto crítico no ensaio de ultrassom em concreto, pois está diretamente relacionada ao comprimento de onda da onda ultrassônica e, conseqüentemente, à capacidade de detecção de defeitos e à precisão das medições. Transdutores com frequência natural entre 20 e 100 kHz são os mais indicados para uso em concreto, pois oferecem um equilíbrio entre a resolução espacial e a capacidade de penetração no material (Bungey et al., 2006).

Frequências mais altas (acima de 100 kHz) são ideais para amostras pequenas ou concreto de alta resistência, pois produzem ondas com menor comprimento de onda, permitindo a detecção de defeitos menores e maior resolução; no entanto, são mais suscetíveis à atenuação em concretos com agregados grandes ou estruturas de grandes dimensões. Por outro lado, frequências mais baixas (abaixo de 25 kHz) são mais adequadas para grandes amostras ou concretos com agregados maiores, já que as ondas de maior comprimento de onda penetram mais profundamente e são menos afetadas por descontinuidades menores, como microtrincas ou porosidade (NAIK, et al., 2004)

Em um meio como o concreto, o aumento da frequência resulta em um menor comprimento de onda, o que melhora a resolução espacial, mas também aumenta a atenuação do sinal (Philippidis e Aggelis, 2005 apud Souza, 2017).

1.7.11 Presença de armaduras, fissuras ou vazios na VPU

Conforme o relatório ACI 228.1R-03 (2003), tanto a quantidade quanto a disposição das armaduras no concreto afetam a VPU. Isso ocorre porque a velocidade no aço é cerca de 40% superior à do concreto, especialmente quando as barras estão alinhadas na mesma direção da propagação do pulso.

(Bungey et al., 2006) afirma que quando se deseja medir a profundidade de fissuras a presença de armaduras no concreto deve ser evitada sempre que possível, pois a velocidade do pulso ultrassônico nesse material é significativamente maior. Em um meio de aço infinito, essa velocidade pode atingir aproximadamente 5900 m/s, mas tende a ser reduzida em barras de menor diâmetro, comumente utilizadas em

conjunto com o concreto. Além disso, a velocidade de propagação na barra pode variar de acordo com as condições de aderência entre o aço e o concreto.

Já Dornelles, Pinto e Padaratz (2004), explicam que quando a armadura se encontra no trajeto da onda, ocorre a transição do pulso ultrassônico do concreto para o aço e, posteriormente, o seu retorno ao concreto. Esse fenômeno resulta em um aumento na velocidade final da propagação, podendo comprometer a precisão na estimativa da resistência e homogeneidade da estrutura.

No caso de barras dispostas paralelamente à propagação da onda (**Figura 7**), o tempo medido será influenciado pela distância do transdutor em relação à armadura, uma vez que a trajetória da onda será alterada por esse posicionamento.

Figura 7: Barras paralelas à propagação da onda de ultrassom



Fonte: Dornelles, Pinto e Padaratz (2004)

1.7.12 Calibração do Equipamento

Antes de iniciar o ensaio, é essencial calibrar o equipamento utilizando um bloco de calibração, que possui um tempo de propagação do pulso previamente conhecido, esta é uma etapa fundamental para garantir a precisão das medições. Durante a calibração, o operador deve posicionar os transdutores na barra de referência e ajustar o tempo de propagação exibido no equipamento para corresponder ao valor conhecido. De acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019), essa etapa é crucial para garantir que as medições sejam confiáveis e que o equipamento esteja operando dentro dos parâmetros esperados.

1.7.13 Fatores programáveis no equipamento

Com base no manual de instruções do equipamento PROCEQ Pundit Lab (*Manual de Instruções de Operação*), existem diversos parâmetros configuráveis no equipamento que permitem a realização de leituras precisas durante os ensaios. Essas configurações podem auxiliar a adaptar o ensaio às necessidades específicas de cada inspeção, seja para a detecção de fissuras, avaliação da homogeneidade do material ou verificação da qualidade de reparos. As funções configuráveis do equipamento são:

a. Ajuste do Ganho do Sinal

O ganho do sinal controla a amplificação do sinal recebido pelo transdutor. O Pundit Lab oferece uma ampla faixa de ganhos, que podem ser ajustados conforme a necessidade. Ganhos baixos (1x, 2x, 5x) são usados quando o sinal é forte e não há necessidade de amplificação excessiva, evitando a saturação do sinal (truncamento). Ganhos médios (10x, 20x, 50x) são úteis para sinais moderados, como em concretos com fissuras superficiais. Já ganhos altos (100x, 200x, 500x, 1000x) são usados para sinais com resposta fraca, como em materiais muito heterogêneos ou com fissuras profundas. No entanto, ganhos muito altos podem causar truncamento do sinal, o que prejudica a análise (Hofmann, 2015).

b. Configuração do Tempo de Aquisição

O tempo de aquisição define o intervalo de tempo durante o qual o sinal é capturado. No Pundit Lab, esse tempo pode ser ajustado para garantir que todo o sinal relevante seja registrado. Para materiais com pequena espessura ou fissuras próximas à superfície, tempos curtos (1 a 2 μ s) são suficientes. Já para materiais mais espessos ou fissuras profundas, tempos longos (5 μ s ou mais) são necessários. O ajuste correto do tempo de aquisição é essencial para garantir que o sinal seja capturado de forma completa e precisa.

1.8 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

Uma das principais vantagens do método de ultrassom é o seu caráter não destrutivo, o que significa que ele não causa danos à estrutura durante a avaliação. Isso é particularmente importante em estruturas críticas, como pontes, edifícios e barragens, onde a integridade estrutural deve ser preservada. Além disso, o ultrassom é eficaz para detectar fissuras internas que não são visíveis na superfície, pois o pulso ultrassônico é refletido ou difratado ao encontrar uma descontinuidade, como uma fissura (Souza, 2017).

Além disso, os equipamentos de ultrassom são relativamente acessíveis e portáteis, o que facilita sua utilização em campo. O método não requer preparação complexa da superfície, exceto a aplicação de um material acoplante, como vaselina ou gel (KEPLER et al., 2000 apud Hoffman, 2015).

Apesar das vantagens, o método de ultrassom apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. A heterogeneidade do concreto, composto por cimento, agregados, água e possíveis vazios, pode afetar a propagação das ondas ultrassônicas, gerando variações nos resultados e dificultando a interpretação dos dados (Souza, 2017; Naik et al., 2004).

A presença de armaduras no concreto também pode interferir na propagação das ondas ultrassônicas, gerando reflexões e difrações que podem mascarar a presença de fissuras. Isso exige cuidados adicionais na interpretação dos resultados (Medeiros, 2007). Outra limitação é a dependência da qualidade do acoplamento entre o transdutor e a superfície do concreto. Qualquer variação na pressão aplicada ou na quantidade de material acoplante pode afetar os resultados, exigindo procedimentos padronizados para garantir a precisão das medições (Naik et al., 2004).

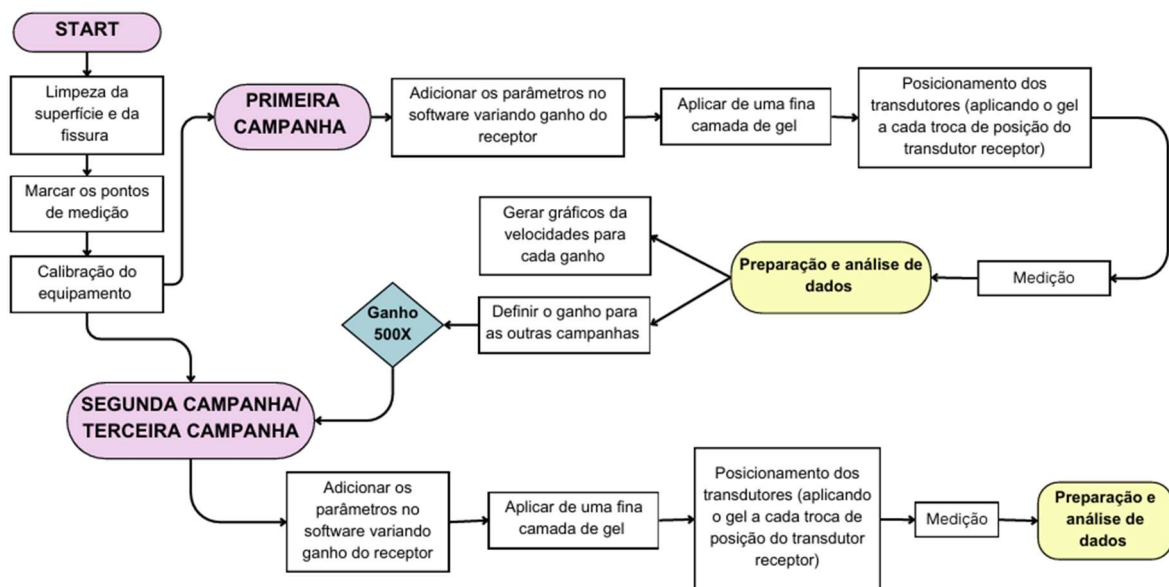
Para fissuras muito profundas, a atenuação do sinal ultrassônico pode ser significativa, reduzindo a sensibilidade do método. Além disso, a precisão da estimativa da profundidade diminui à medida que a fissura se afasta da superfície Souza (2017).

Por fim, a umidade do concreto e a temperatura ambiente podem afetar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, gerando variações nos resultados. Isso exige correções nos dados para garantir a precisão das medições (Souza, 2017; Viana, 2017).

METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os métodos utilizados para a obtenção da velocidade de pulso empregados neste trabalho. Seguindo o fluxograma da Figura 10, foram realizadas três campanhas de medição para a coleta de resultados e posterior análise.

Figura 8: Fluxo Metodológico



Fonte: Autora. 2024

1.9 PROGRAMA EXPERIMENTAL

1.9.1 Definição das Amostras

Para a realização deste trabalho, foram conduzidas buscas por estudos similares na literatura técnica, com o objetivo de definir a geometria e a quantidade de amostras mais adequadas para atender aos objetivos da pesquisa. Conforme visto nos trabalhos de Adamati et al. (2017), Medeiros (2007), Silva, et al. (2019), A. Lorenzi et al. (2017), percebeu a necessidade com dimensões próximas a estruturas reais. Optou-se então a fabricação de 10 vigas de concreto contendo diferentes profundidades de fissuras induzidas com dimensões de 30x30x100 cm. A fim de comparar o comportamento do concreto com e sem armadura, metade das vigas foi produzida sem armadura, enquanto a outra metade foi reforçada com uma barra de

aço de 25 mm de diâmetro, simulando uma armadura estrutural. O traço do concreto e a bitola da armadura foram escolhidos para simular uma estrutura de concreto já estudada pelo CEASB. Todas as vigas foram produzidas com o mesmo traço de concreto e bitola de aço, garantindo a uniformidade das amostras.

As vigas foram nomeadas de acordo com a profundidade da fissura, onde Viga V0 é a viga sem fissura, Viga V5 é a viga com fissura de 5 cm de profundidade, V10 é a viga com fissura de 10 cm de profundidade e V15 é a viga com fissura de 15 cm de profundidade, a presença ou não da armadura é indicada como com armadura e sem armadura.

1.9.2 Formas

Para confecção dos elementos, que por sua forma foram chamadas de vigas, foram feitas formas com a utilização de compensado. Devido as dimensões decidiram-se por produzir as formas dispostas no chão na horizontal, facilitando a concretagem dos elementos no local onde ficariam até o fim dos experimentos. Como não seria possível girar as vigas para medi-las nas faces mais lisas que são as de contato com o compensado, optou-se por previamente fazer recortes de 5 cm, 10 cm e 15 cm no centro das caixarias para encaixar as chapas de zinco, estes recortes foram feitos usando lâmina de serra manual afim de ficar com a espessura compatível com a chapa de zinco. Também foram feitos furos nas laterais das formas para encaixar a barra de aço, estes furos foram realizados com o uso de serra copo no tamanho de 3 mm.

Figura 9: Formas de Madeira



Fonte: Autora. 2024

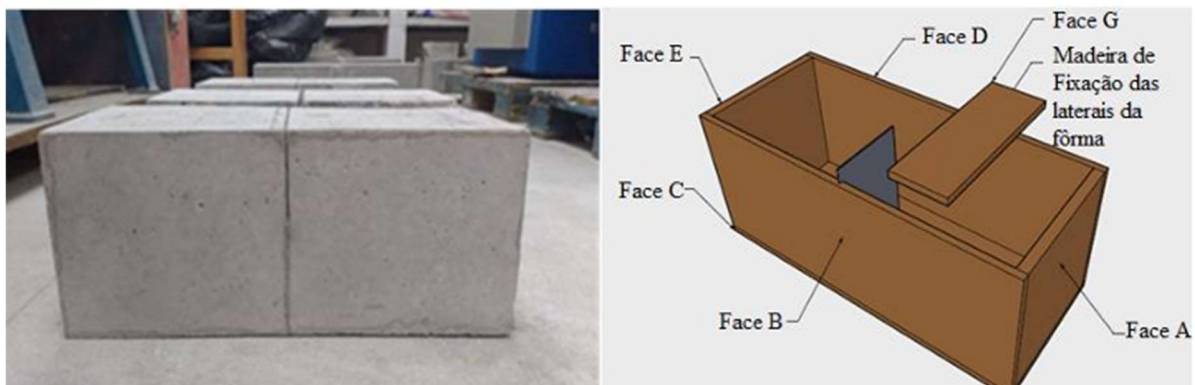


Fonte: Autora. 2024

1.9.3 Simulação de Fissuras

A indução das fendas foi inspirada no método proposto por Silva, et al. (2019), com algumas diferenças devido ao tamanho dos corpos de prova, para simular fissuras de diferentes profundidades — 5 cm, 10 cm e 15 cm — em 8 das vigas, utilizou-se chapas de zinco com 4 mm de espessura, cortadas com profundidades correspondentes às fissuras desejadas e comprimento de 50 cm. As sobras laterais das chapas permitiram sua fixação e remoção após a concretagem. Duas das 8 vigas foram confeccionadas com fissuras inclinadas a 45°, com o objetivo de testar a capacidade de identificação da inclinação das fissuras. Adicionalmente, duas vigas foram moldadas sem fissuras, com e sem armadura, para posterior comparação entre as com fissuras

Figura 10: Esquema Indução de Fendas



Fonte: Silva, et al. (2019)

1.9.4 Processo de Moldagem

As vigas foram moldadas em dias diferentes, sempre utilizando o mesmo traço de concreto. Para garantir o controle de qualidade, três corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) foram moldados a cada betonada, seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2003). Esses corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão aos 28, 53 e 84 dias, permitindo o monitoramento da evolução da resistência do concreto ao longo do tempo.

1.9.5 Posicionamento da Armadura e Fissuração

As barras de aço, que simulam a armadura, foram posicionadas no centro das laterais dos moldes, garantindo um cobrimento de 10 a 15 cm de concreto em ambos os lados. As chapas de zinco foram fixadas nas caixarias por meio da dobra das sobras laterais, conforme ilustrado na **Figura 11** e retiradas aproximadamente 6 horas após o início da cura, evitando que as fissuras se fechassem prematuramente.

Figura 11: Disposição das Vigas Moldadas



a) Fixação das Chapas de Zinco



b) Cura das Vigas

Fonte: Autora. 2024

1.9.6 Preparação da Superfície para Ensaio

Para assegurar que a superfície de leitura do ultrassom fosse plana e lisa, a face do concreto foi aplanada durante a moldagem e posteriormente a cura completa do concreto a face foi lixada com rebolo diamantado, conforme orientação da NBR 8802 (ABNT, 2019).

Figura 12: Aplainação das Vigas



Fonte: Autora. 2024

1.10 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

1.10.1 Materiais Utilizados

Para a produção do concreto, foram utilizados os mesmos materiais constituintes, incluindo cimento, agregados graúdos e miúdos, com o objetivo de recriar o traço original do concreto estudado do pelo CEASB, com um fck de 21 MPa, slump de 18 cm e relação água/cimento de 0,47. Os materiais empregados foram:

- Cimento: 344 kg/m³
- Água: 190 kg/m³
- Aditivo plastificante: 1,92 kg/m³
- Areia natural: 593 kg/m³
- Areia artificial: 254 kg/m³
- Brita 1: 950 kg/m³

1.10.2 Processo de Mistura do Concreto

A mistura do concreto foi realizada mecanicamente utilizando uma betoneira com capacidade de 200 litros. Antes da concretagem, a betoneira foi preparada com

uma imprimação de cimento e água para evitar a aderência de resíduos. Os materiais foram dosados em massa e adicionados à betoneira na seguinte ordem:

1. Agregados graúdos (brita 1);
2. 80% a 90% da água;
3. Cimento;
4. Agregados miúdos (areia natural e artificial);
5. Restante da água, já misturada com o aditivo plastificante

1.10.3 Moldagem e Adensamento

Após a mistura, o concreto foi adensado nos moldes das vigas e corpos de prova utilizando um vibrador de agulha, seguindo as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2003). Esse procedimento garantiu a eliminação de vazios e a homogeneidade do material.

1.10.4 Desforma e Cura

A desforma das vigas foi realizada entre 3 e 6 dias após a moldagem. Devido ao peso das vigas e dificuldade no manuseio, a placa inferior dos moldes foi mantida. As vigas foram armazenadas na calçada lateral do Laboratório Setor Sul da UNILA, protegidas da incidência direta do sol e da chuva. No entanto, não foi possível controlar a temperatura e a umidade do local de cura.

Figura 13: Desforma e Cura



a) Disposição das vigas

b) Fenda após a retirada da chapa

c) Fenda após a retirada da chapa

Fonte: Autora. 2024

1.11 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

1.11.1 Configuração do Equipamento e Calibração

As leituras de ultrassom foram realizadas utilizando o equipamento Ultrasonic Pulse Velocity - Pundit Lab+ do fabricante Proceq, utilizando transdutores de 50 mm de diâmetro com frequência de transmissão/recepção de 54 kHz, conforme orientado pelas normas NBR 8802 (ABNT, 2019), BS 1881 - parte 203:1986, NM 58 (1996) e pelo manual do fabricante as leituras foram feitas no modo indireto de transmissão. Antes de iniciar qualquer medição, o equipamento foi calibrado seguindo as instruções descritas no manual, garantindo a precisão e confiabilidade dos resultados.

Para garantir um controle preciso sobre a pressão de acoplamento, utilizou-se anilhas de 1 kg, provenientes de um equipamento do laboratório de solos, com o objetivo de aplicar uma pressão constante sobre os transdutores. Esse procedimento foi adotado para evitar danos aos cabos coaxiais durante as medições. O método consistiu em posicionar duas anilhas de 1 kg sobre cada transdutor, conforme ilustrado na **Figura 14**, garantindo que a pressão fosse uniformemente distribuída. Além disso, uma base de madeira foi utilizada como suporte para as anilhas, protegendo os cabos de possíveis danos causados pelo peso. Esse arranjo foi mantido em todas as medições, assegurando a consistência e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 14: Medição Com Transdutores



Fonte: Autora. 2024

Para garantir que a quantidade de prismas utilizada no estudo seja representativa e permita a aplicação de métodos estatísticos na análise dos resultados, é essencial que o número de observações das variáveis independentes

siga uma proporção adequada. Recomenda-se que haja, no mínimo, 5 observações para cada variável independente. No entanto, para que a amostra seja considerada mais confiável e representativa, o ideal é que essa proporção esteja entre 15 e 20 observações para cada variável independente (Hair et al., 2009 apud Silva et al., 2019). Para este trabalho foram consideradas três variáveis, a profundidade da fissura, a presença de armadura e a distância entre transdutores, tendo-se uma quantidade de $3 \times 20 = 60$ medições por variável.

1.11.2 Primeira Campanha de Medições

Para a definição do ganho do receptor e a percepção das fissuras, foram marcados pontos de colocação dos transdutores ao longo das vigas. O transdutor emissor foi fixo no ponto inicial da viga, enquanto o transdutor receptor foi deslocado em incrementos de 15 cm. Conforme ilustrado na

Figura 16, os pontos foram marcados a partir da fissura, com uma distância inicial de 7,5 cm para cada lado, a fim de centralizá-la. A partir desse ponto, foram realizadas medições a cada 15 cm.

Foram efetuadas 60 medições em cada ponto, utilizando uma tensão de excitação de 500 V, largura de pulso de 5 μ s e variando o ganho do receptor em 1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x. Inicialmente, planejou-se utilizar os parâmetros definidos por SOUZA (2017) (tensão de excitação de 500 V, ganho de 1x e largura de pulso de 5 μ s). No entanto, devido à falta de precisão nas medições iniciais, optou-se por variar o ganho do receptor para obter resultados mais confiáveis.

Figura 15: Orientação de Medição



Fonte: Medeiros. 2017

Figura 16: *Locação de Medição*



Fonte: Autora. 2024

1.11.3 Segunda Campanha de Medições

Na segunda campanha, as vigas foram marcadas com uma malha de medição, conforme ilustrado na **Figura 17**. Foram traçadas linhas verticais a cada 5 cm e linhas horizontais a cada 7,5 cm, criando um grid para orientar as medições. Essa campanha foi realizada em todas as vigas, com e sem armadura, com exceção daquelas com fissuras inclinadas. As medições foram realizadas com uma tensão de excitação de 500 V, largura de pulso de 5 μ s e ganho do receptor em 500x conforme definidos após os ensaios da primeira campanha.

Figura 17: *Malha de Medição*



Fonte: Autora. 2024

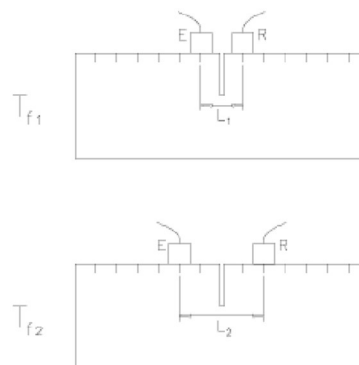
1.11.4 Procedimento de Medição

Após a calibração do equipamento, as medições foram realizadas em distâncias específicas entre os transdutores: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm e 80 cm. A fissura foi mantida centralizada em relação aos transdutores durante todo o processo. O procedimento foi repetido para cada uma das três linhas horizontais do grid, registrando-se a velocidade e o tempo de propagação das ondas ultrassônicas.

1.11.5 Medição da Profundidade da Fissura

Para determinar a profundidade das fissuras, foi utilizado o mesmo equipamento, seguindo um procedimento semelhante ao descrito anteriormente. No entanto, as medições de tempo de propagação (T_1 e T_2) foram realizadas em distâncias específicas, com os transdutores posicionados inicialmente a uma certa distância e, posteriormente, ao dobro dessa distância, conforme ilustrado na **Figura 18**.

Figura 18 – Leitura de ultrassom ao redor de uma fissura para obtenção dos tempos de propagação



Fonte: Medeiros. 2017

1.11.6 Terceira Campanha de Medições

A terceira campanha de medições teve como objetivo verificar se é possível determinar a inclinação das fissuras em relação à superfície das vigas. Para isso, foi utilizado o método descrito por Medeiros (2007), baseado na norma BS 1881: Part 203 (1986), que permite identificar a direção da inclinação da fissura por meio da comparação dos tempos de propagação das ondas ultrassônicas.

1.11.7 Procedimento de Medição para fissuras inclinadas

a) Posicionamento dos Transdutores:

Os transdutores foram posicionados próximos à fissura, com o emissor fixo e o receptor movido para uma posição mais afastada, conforme ilustrado na **Figura 5**.

Foram realizadas duas leituras: uma com os transdutores próximos à fissura e outra com os transdutores mais afastados.

b) Análise dos Tempos de Propagação:

O tempo da primeira leitura (transdutores próximos), isso indica que a fissura está inclinada no sentido do emissor para o receptor.

No entanto, esse resultado também pode ser um indicativo de que a fissura é muito profunda. Para confirmar a inclinação, o procedimento foi repetido com os transdutores invertidos.

c) Inversão dos Transdutores:

Com os transdutores invertidos, uma nova leitura foi realizada. Se o tempo de propagação com os transdutores próximos for menor que o tempo com os transdutores afastados, confirma-se que a fissura está inclinada no sentido da leitura anterior. Caso contrário, a fissura pode ser perpendicular à superfície, mas com uma profundidade significativa.

RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das análises realizadas. Inicialmente, discute-se o efeito dos parâmetros das ondas utilizadas em medições em corpos de prova de concreto. Em seguida, são expostos os resultados dos ensaios voltados à avaliação da percepção das fissuras pelo aparelho de ultrassom. Posteriormente, analisa-se a influência das diferentes profundidades nos resultados do ensaio. Além disso, são apresentadas as análises sobre o efeito da presença de armaduras na detecção das fissuras, por meio da comparação com os ensaios realizados sem armadura. Por fim, considera-se a determinação da inclinação da fissura pelo método proposto.

1.12 O efeito dos parâmetros das ondas utilizadas em medições em corpos de prova de concreto

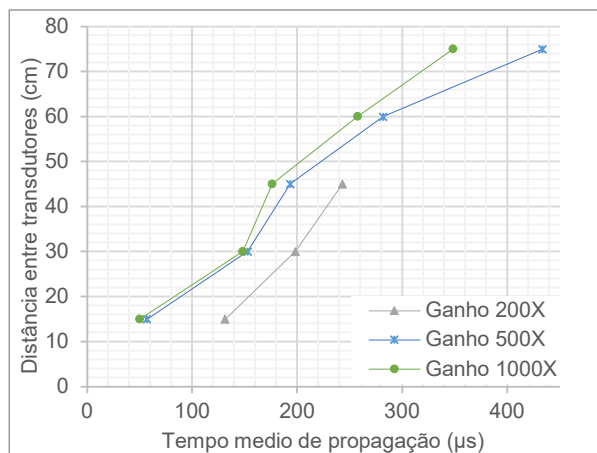
Para esta etapa do projeto, optou-se por buscar na literatura referências que auxiliassem na minimização do número de parâmetros a serem avaliados, bem como na configuração do equipamento. Com base na revisão bibliográfica, o equipamento foi configurado inicialmente com uma tensão de excitação de 500 V, ganho de 1x e largura de pulso de 5 μ s, conforme descrito por Souza (2017). No entanto, durante as primeiras medições, observou-se que as ondas não chegavam ao receptor, impossibilitando a obtenção de dados. Diante disso, partiu-se do entendimento de que o aumento do ganho do receptor não prejudicaria o ensaio caso houvesse truncamento do sinal, uma vez que não seriam analisados os gráficos, e foram realizados testes para identificar o valor de ganho que proporcionaria os melhores resultados. Mantendo as demais configurações, o ganho foi variado em todas as opções disponíveis no equipamento: 1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x.

Os gráficos das **Figuras 19 a 22** apresentam os resultados das medições das vigas sem armadura e os gráficos das **Figuras 23 a 26** apresentam os resultados das vigas com armadura. Foram selecionados para apresentação apenas os gráficos referentes a ganhos de 200x, 500X e 1000X pois esses foram que proporcionaram os melhores resultados. Para ganhos inferiores a 200x, na maioria dos casos, os valores

do tempo de propagação foram iguais a zero, indicando a ausência de propagação da onda.

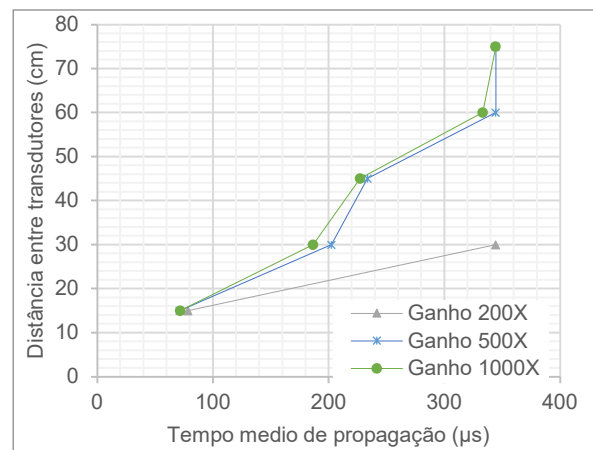
Esses gráficos foram elaborados com base nos dados das tabelas 1 a 8 do apêndice, que contêm as médias dos tempos de propagação e os respectivos desvios padrão para cada posição do transdutor, considerando cada uma das vigas analisadas.

Figura 19: Viga V0 sem armadura



Fonte: Autora. 2025

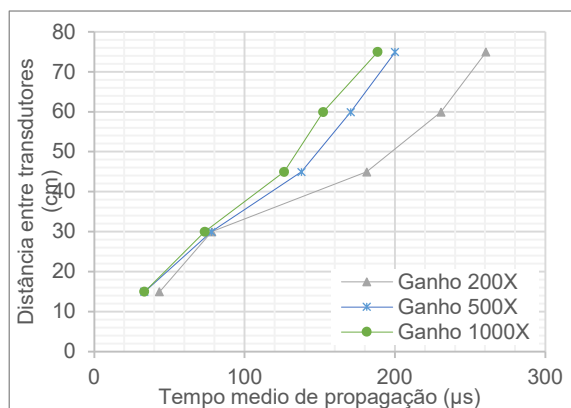
Figura 20: Viga V5 sem armadura



Fonte: Autora. 2025

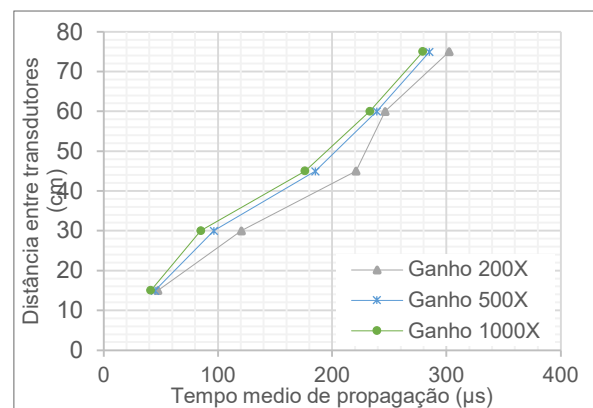
Pode-se observar que para as vigas V0 e V5 sem armadura o ganho de 200X não foi capaz de completar as medições, para a viga V0 sem armadura, **Figura 19**, as medições nas posições 60cm e 75cm não houve propagação da onda e para a viga V5 sem armadura, **Figura 20**, a partir da posição 30cm já não foi possível captar o sinal para determinação do tempo de propagação da onda.

Figura 21: Viga V10 sem armadura



Fonte: Autora. 2025

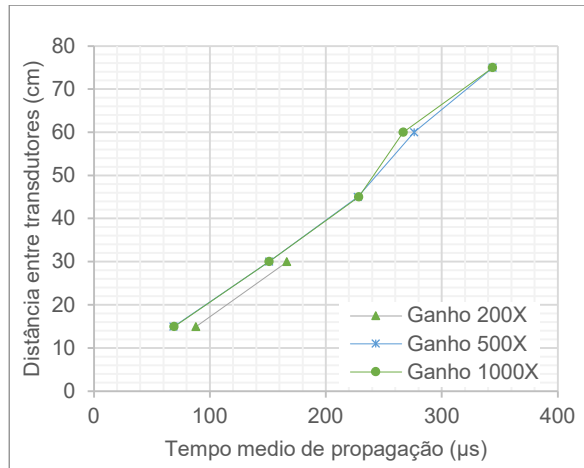
Figura 22: Viga V15 sem armadura



Fonte: Autora. 2025

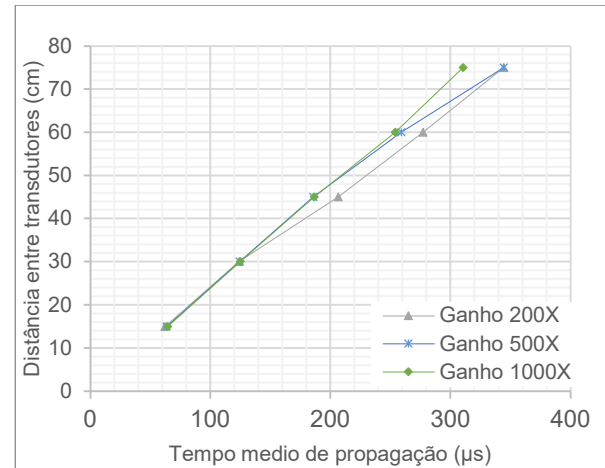
Nas vigas V10 e V15 sem armadura, **Figura 21** e **Figura 22**, nota-se que os ganhos de 500X e 1000X apresentam pouca diferença entre eles. Já o ganho 200X é o que mais se distingue dos demais.

Figura 23: Viga V0 com armadura



Fonte: Autora. 2025

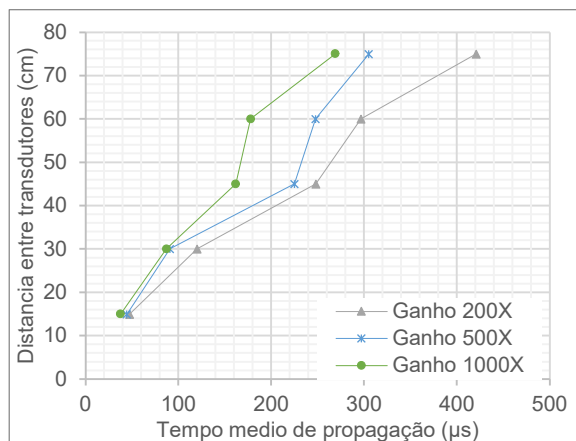
Figura 24: Viga V5 com armadura



Fonte: Autora. 2025

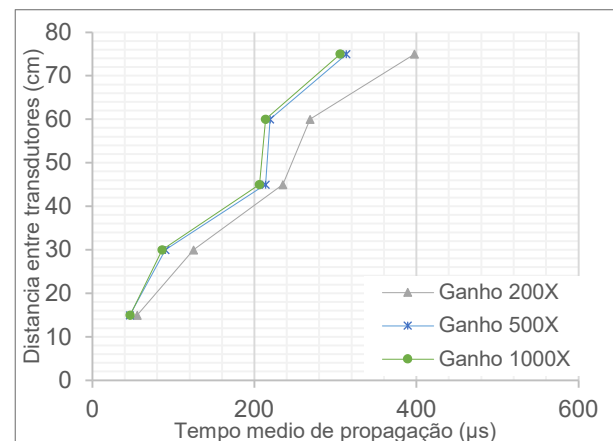
Nas vigas com a presença de armadura podemos ver um comportamento semelhante as sem armadura, onde para a viga V0, **Figura 23**, com o ganho de 200X não houve propagação do sinal a partir da posição 30cm de distância entre transdutores. Já nas vigas V5, V10 e V15, gráficos das **Figuras 24, 25 e 26** respectivamente, vemos que o ganho de 200X é o que mostra um comportamento mais diferente dos demais ganhos apresentados.

Figura 25: Viga V10 com armadura



Fonte: Autora. 2025

Figura 26: Viga V15 com armadura



Fonte: Autora. 2025

A análise dos dados permitiu identificar que o ganho de 500x foi o mais adequado para todas as vigas testadas. Embora algumas vigas tenham apresentado resultados satisfatórios com ganhos menores, o valor de 500x foi escolhido por ser o primeiro ganho no qual todas as vigas, sem exceção, apresentaram resultados consistentes. Para o ganho de 200x, observou-se que, em alguns pontos de determinadas vigas, ainda não foi possível obter medições confiáveis, o que descartou essa opção. Já para o ganho de 1000x, apesar de todas as vigas terem respondido adequadamente, ele não foi selecionado por ser o valor mais alto disponível, e o objetivo era utilizar o menor ganho possível que ainda garantisse resultados confiáveis.

Observou-se que os desvios padrão variaram significativamente para todos os ganhos testados, o que era esperado devido à heterogeneidade do concreto. Essa variação não permite conclusões precisas sobre a exatidão das medições, mas, ao analisar os gráficos, verificou-se que, na maioria dos casos, os resultados de velocidade obtidos a partir do tempo de propagação foram consistentes, tanto para vigas sem armadura quanto para as com armadura. Isso sugere que, apesar da variabilidade intrínseca ao material, o método utilizado é capaz de fornecer dados confiáveis para a análise da propagação de ondas no concreto.

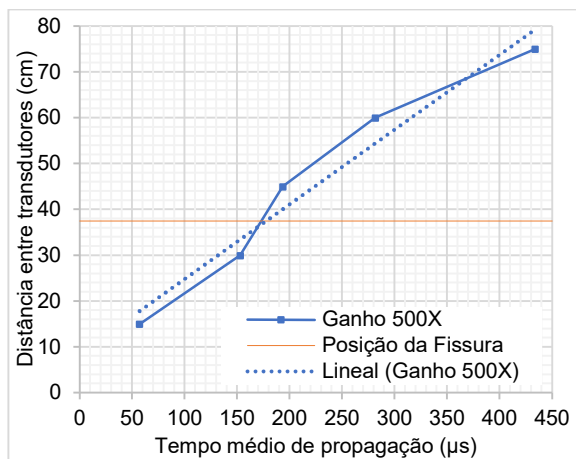
1.13 O efeito da presença de fissuras nos resultados do ensaio de ultrassom

Para esta etapa foi realizada a análise dos gráficos de velocidade com ganho de 500X, obtidos a partir do ensaio para detecção de fissuras e determinação do ganho ideal.

Analisando o gráfico da **Figura 27** da Viga V0 sem armadura, percebe-se que houve perturbações no caminho da onda, resultando em uma trajetória não linear, diferente do comportamento esperado para um material homogêneo e íntegro. Essa não linearidade pode ser atribuída a algum defeito presente no concreto, como a presença de vazios, agregados de tamanho irregular ou heterogeneidades na matriz do material, que desviaram a trajetória da onda. Apesar disso, o comportamento geral do gráfico ainda apresenta uma tendência linear, indicando que a propagação da onda foi predominantemente consistente.

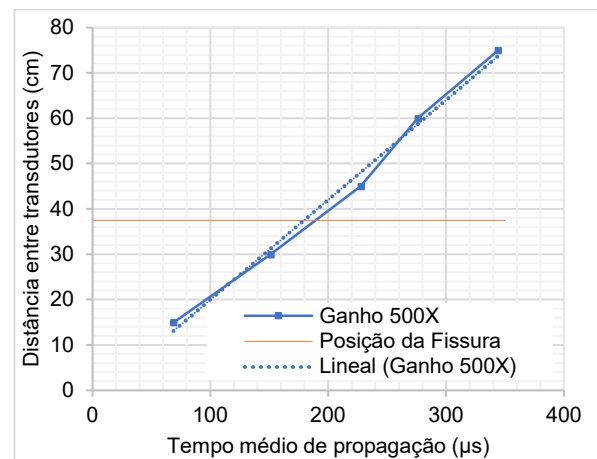
Já na Viga V0 com armadura, gráfico da **Figura 28**, o comportamento observado foi muito mais próximo do esperado, indicando a ausência de fissuras entre os pontos de 30 cm e 45 cm. No entanto, foi detectada uma anomalia entre os pontos de 45 cm e 60 cm, onde a onda parece ter encontrado algum obstáculo ou defeito. Essa anomalia pode ser explicada por diversos fatores, como a presença de agregados de maior tamanho, vazios ou até mesmo uma pequena descontinuidade na armadura. Esses fatores podem ter causado uma alteração localizada no caminho da onda, refletindo-se na inclinação do gráfico nessa região.

Figura 27: Viga V0 sem armadura



Fonte: Autora. 2025

Figura 28: Viga V0 com armadura



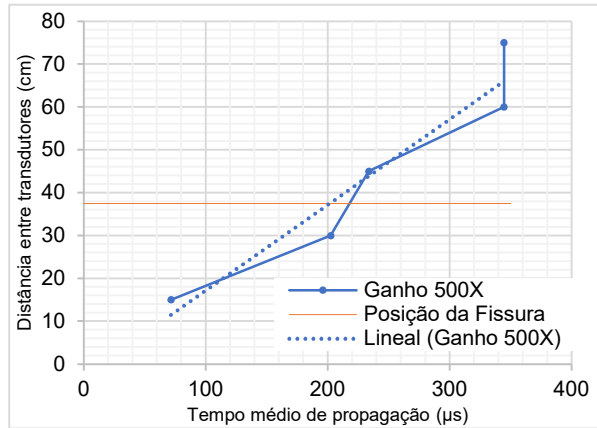
Fonte: Autora. 2025

Observando o gráfico da **Figura 29** da viga V5 sem armadura vemos uma tendência crescente como é esperado, entretanto com muita variação na distribuição dos pontos do gráfico, essa não linearidade pode ser atribuída a diversos fatores, como a heterogeneidade do concreto, a presença de pequenos vazios, agregados de tamanho irregular ou outras imperfeições no material, que podem desviar ou alterar o caminho da onda, resultando em variações no tempo de propagação. Apesar dessas irregularidades, o gráfico demonstra uma tendência linear, indicando que, em geral, a propagação da onda ocorre de maneira consistente, mas com interferências pontuais causadas pelas características do material.

Já na viga V5 com armadura, gráfico da **Figura 30**, podemos observar mudanças sutis na inclinação da reta, esse comportamento indica erroneamente que não há fissura no local, algumas causas podem ser supostas, como de que a fissura

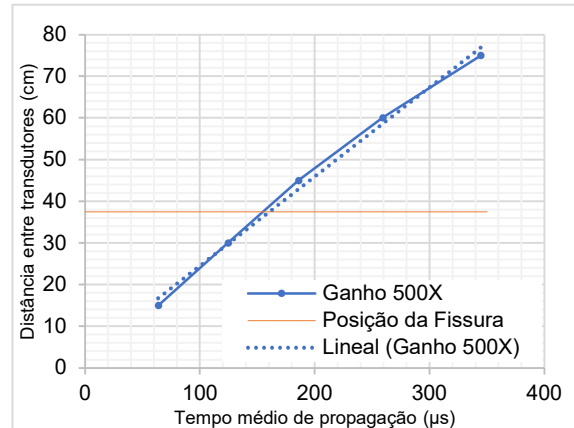
não estava completamente aberta devido a presença de algum componente ou simplesmente a onda encontrou outro caminho mais curto para realizar sua trajetória.

Figura 29: Viga V5 sem armadura



Fonte: Autora. 2025.

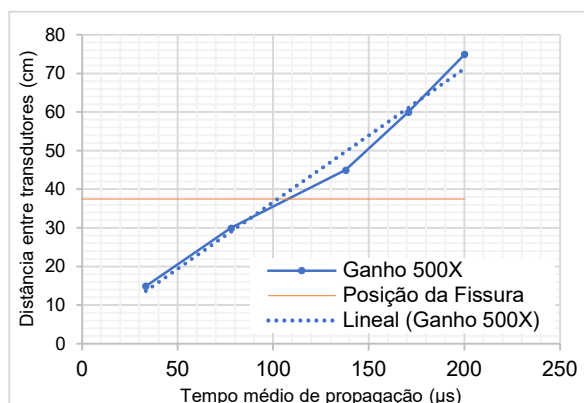
Figura 30: Viga V5 com armadura



Fonte: Autora. 2025.

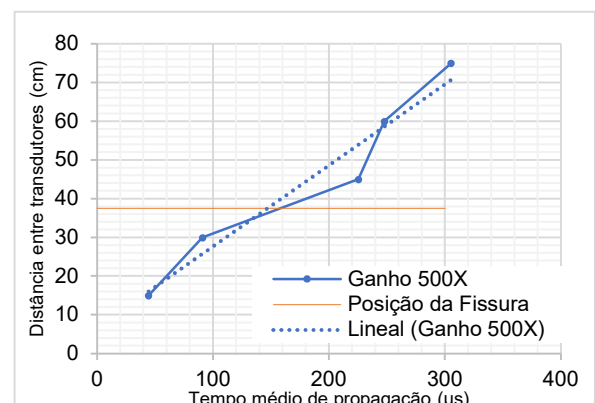
Nas vigas V10, tanto com armadura quanto sem armadura, gráficos das **Figuras 31 e 32**, observamos um comportamento semelhante ao da V5 sem armadura. No entanto, aqui fica evidente que houve uma deformação mais acentuada na reta exatamente no ponto onde a fissura está localizada, aos 37,5 cm. Essa deformação indica que a fissura interferiu de maneira significativa na propagação da onda, causando uma mudança perceptível no tempo de propagação. Outro ponto interessante é que, embora os gráficos tendam a seguir um caminho preferencial, ainda há variações entre eles. Isso mostra que, mesmo com condições semelhantes, a onda pode encontrar pequenas diferenças no trajeto, seja por causa da heterogeneidade do concreto, da presença da armadura ou de outros fatores que influenciam sua propagação.

Figura 31: Viga V10 sem armadura



Fonte: Autora. 2025.

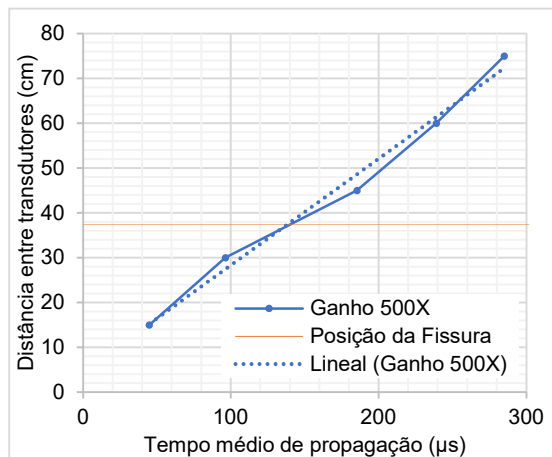
Figura 32: Viga V10 com armadura



Fonte: Autora. 2025.

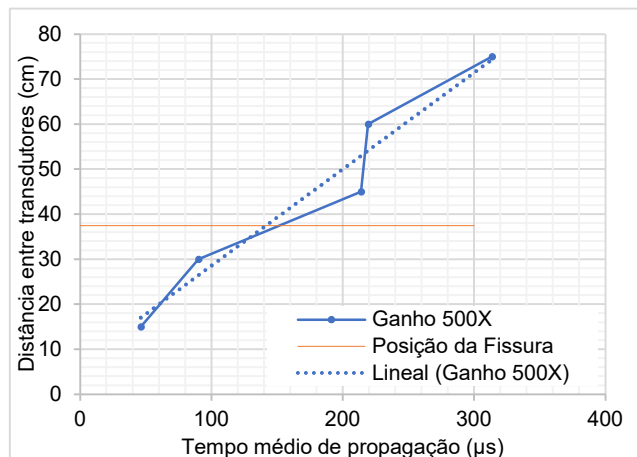
Nas vigas V15 sem e com armadura, gráficos das **Figuras 33 e 34**, observamos o mesmo comportamento das vigas V10, onde pode-se ver claramente uma pronunciada mudança no tempo de propagação da onda no local onde se encontra a fissura.

Figura 33: Viga V15 sem armadura



Fonte: Autora. 2025

Figura 34: Viga V15 com armadura



Fonte: Autora. 2025

Nesta etapa podemos ver que em grande parte das vigas, observou-se uma distorção na inclinação da reta na região próxima aos 37,5 cm, local onde a fissura foi introduzida intencionalmente. Essa distorção indica uma alteração no tempo de propagação da onda, refletindo a influência da fissura na velocidade de propagação.

1.14 O EFEITO DE FISSURAS COM DIFERENTES PROFUNDIDADES NOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ULTRASSOM

Através da primeira campanha de medições pudemos perceber que o ensaio é sensível a presença de fissuras, apesar da onda nem sempre percorrer o mesmo caminho. Através do cálculo da profundidade da fissura pelo método da BS 1881: Part 203 (1986) foi possível verificar o efeito de diferentes profundidades de fissura na velocidade de propagação das ondas.

Foram determinados os tempos de propagação das ondas em diferentes distâncias, cujos resultados estão apresentados nos apêndices. Esses dados foram utilizados para criar combinações entre os tempos de propagação, conforme

necessário para as equações, especificamente combinações em que o segundo tempo de propagação corresponde ao dobro do primeiro. As medições, juntamente com os respectivos desvios padrão, são apresentadas nas tabelas no apêndice. As **tabelas 14 a 22** apresentam os resultados dos cálculos das profundidades das fissuras, os resultados estão organizados de acordo com as linhas da malha de medição, denominadas como L1, L2 e L3, conforme a disposição da malha.

Tabela 2: Profundidade da Fissura Viga V5 sem Armadura – L1

L1			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	63,22	116,02	0,05
15-30	77,67	146,88	0,06
20-40	116,02	234,14	Indeterminada
30-60	146,88	374,26	Indeterminada
40-80	234,14	350,90	0,47

Fonte: Autora. 2025

Tabela 3: Profundidade da Fissura Viga V5 sem Armadura – L2

L2			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	22,39	64,09	Indeterminada
15-30	44,51	145,93	Indeterminada
20-40	64,09	175,74	Indeterminada
30-60	145,93	271,40	0,14
40-80	175,74	309,43	0,26

Fonte: Autora. 2025

Tabela 4: Profundidade da Fissura Viga V5 sem Armadura – L3

L3			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	22,45	69,59	Indeterminada
15-30	48,74	90,16	0,07
20-40	69,59	133,76	0,07
30-60	90,16	187,91	Indeterminada
40-80	133,76	338,69	Indeterminada

Fonte: Autora. 2025

Tabela 5: Profundidade da Fissura Viga V10 sem Armadura – L1

L1			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	21,94	60,83	Indeterminada
15-30	52,99	128,79	Indeterminada
20-40	60,83	165,03	Indeterminada
30-60	128,79	260,84	Indeterminada
40-80	165,03	569,29	Indeterminada

Fonte: Autora. 2025

Tabela 6: Profundidade da Fissura Viga V10 sem Armadura – L2

L2			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	27,03	50,38	0,05
15-30	36,53	97,74	Indeterminada
20-40	50,38	159,65	Indeterminada
30-60	97,74	228,41	Indeterminada
40-80	159,65	334,12	Indeterminada

Fonte: Autora. 2025

Tabela 7: Profundidade da Fissura Viga V10 sem Armadura – L3

L3			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	36,18	72,31	0,00
15-30	42,71	76,93	0,09
20-40	72,31	259,47	Indeterminada
30-60	76,93	257,15	Indeterminada
40-80	259,47	545,40	Indeterminada

Fonte: Autora. 2025

Tabela 8: Profundidade da Fissura Viga V15 sem Armadura – L1

L1			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	68,78	77,03	0,33
15-30	54,10	137,43	Indeterminada
20-40	77,03	202,22	Indeterminada
30-60	137,43	310,37	Indeterminada
40-80	202,22	333,86	0,34

Fonte: Autora. 2025

Tabela 9: Profundidade da Fissura Viga V15 sem Armadura – L2

L2			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μs]	Tempo 2 [μs]	Profundidade [m]
10-20	53,81	61,39	0,30
15-30	44,30	117,52	Indeterminada
20-40	61,39	156,66	Indeterminada
30-60	117,52	250,92	Indeterminada
40-80	156,66	311,36	0,05

Fonte: Autora. 2025

Tabela 10: Profundidade da Fissura Viga V15 sem Armadura – L3

L3			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	44,94	99,30	Indeterminada
15-30	74,34	161,34	Indeterminada
20-40	99,30	128,84	0,37
30-60	161,34	363,71	Indeterminada
40-80	128,84	351,42	Indeterminada

Fonte: Autora. 2025

Dados os tempos de propagação, foram calculadas as profundidades das fissuras, ao observar os cálculos percebemos que para todas as linhas os resultados foram bem pouco homogêneos, tendo pouca taxa de assertividade. Percebemos que as vigas V5 e V10 apresentaram maior número de acertos quanto a profundidade das fissuras. Já a V15 as profundidades calculadas foram bem distantes da real.

1.15 O EFEITO DA PRESENÇA DE ARMADURA NO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DAS FISSURAS

Repetiu-se os mesmos procedimentos de item 5.3 mas com a presença de armadura, com objetivo de comparar os resultados dos itens 5.3 e 5.4 para avaliar qual o efeito da presença de armadura no ensaio.

Tabela 11: Profundidade da Fissura Viga V5 com Armadura – L1

L1			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	32,85	59,63	0,06
15-30	30,15	141,79	Indeterminada
20-40	59,63	219,34	Indeterminada
30-60	141,79	343,90	Indeterminada
40-80	219,34	343,90	0,41

Fonte: Autora. 2025

Tabela 12: Profundidade da Fissura Viga V5 com Armadura – L2

L2			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	35,79	73,41	Indeterminada
15-30	43,45	102,26	Indeterminada
20-40	73,41	173,33	Indeterminada
30-60	102,26	343,90	Indeterminada
40-80	173,33	337,20	0,11

Fonte: Autora. 2025

Tabela 13: Profundidade da Fissura Viga V5 com Armadura – L3

L3			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	36,28	98,60	Indeterminada
15-30	42,53	176,67	Indeterminada
20-40	98,60	210,57	Indeterminada
30-60	176,67	290,30	0,26
40-80	210,57	343,90	0,36

Fonte: Autora. 2025

Tabela 14: Profundidade da Fissura Viga V10 com Armadura – L1

L1			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	53,484	79,260	0,12
15-30	64,205	120,678	0,06
20-40	79,260	206,827	Indeterminada
30-60	120,678	315,108	Indeterminada
40-80	206,827	343,900	0,33

Fonte: Autora. 2025

Tabela 15: Profundidade da Fissura Viga V10 com Armadura – L2

L2			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	21,99	76,36	Indeterminada
15-30	67,01	170,58	Indeterminada
20-40	76,36	209,79	Indeterminada
30-60	170,58	262,99	0,33
40-80	209,79	313,29	0,48

Fonte: Autora. 2025

Tabela 16: Profundidade da Fissura Viga V10 com Armadura – L3

L3			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	60,51	82,76	0,16
15-30	67,36	147,00	Indeterminada
20-40	82,76	222,58	Indeterminada
30-60	147,00	303,97	Indeterminada
40-80	222,58	343,90	0,43

Fonte: Autora. 2025

Tabela 17: Profundidade da Fissura Viga V15 com Armadura – L1

L1			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	118,2378	162,1867	0,16
15-30	93,08333	171,6883	0,07
20-40	162,1867	252,055	0,21
30-60	171,6883	292,8667	0,23
40-80	252,055	344,4	0,63

Fonte: Autora. 2025

Tabela 18: Profundidade da Fissura Viga V15 com Armadura – L2

L2			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	143,6867	123,16	Indeterminada
15-30	84,00667	174,3583	Indeterminada
20-40	123,16	177,485	0,27
30-60	174,3583	408,4288	Indeterminada
40-80	177,485	336,7283	0,16

Fonte: Autora. 2025

Tabela 19: Profundidade da Fissura Viga V15 com Armadura – L3

L3			
Distância entre Transdutores (cm)	Tempo 1 [μ s]	Tempo 2 [μ s]	Profundidade [m]
10-20	82,16711	118,61	0,13
15-30	75,91	360,6767	Indeterminada
20-40	118,61	238,61	Indeterminada
30-60	360,6767	505,877	0,43
40-80	238,61	449,0233	0,17

Fonte: Autora. 2025

Podemos verificar que ao contrário do que foi observado nas vigas sem armadura, aqui temos que os resultados mais próximos da realidade foram na viga V15, tabelas 33,34 e 35. Entretanto, os resultados continuam, em sua maioria muito dispersos e com pouca precisão, o que pode ser influência do cobrimento do concreto, que é de aproximadamente 15 cm.

1.16 O efeito da inclinação de fissuras nos resultados do ensaio de ultrassom;

A fissura inclinada foi simulada de maneira semelhante às fissuras perpendiculares, utilizando uma chapa de zinco com 15 cm de largura. A diferença principal foi a marcação, no molde, de uma inclinação de 45° a partir da face de medição. Para analisar a inclinação da fissura, foi seguido o procedimento descrito anteriormente no item 3.2.2, aqui serão apresentadas as tabelas 36 e 37 contendo as

medias das velocidades e tempos de propagação para cada linha da malha de medições.

Tabela 20: Médias da velocidade e dos tempos de propagação da Viga inclinada sem armadura.

Direita						
	L1		L2		L3	
Distância entre transdutores (cm)	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]
15	2418,62	63,55	3192,20	48,03	3248,78	47,36
30	2864,90	108,82	3630,68	84,35	3071,41	100,11
45	2178,40	213,12	2105,60	219,13	2253,35	204,58
60	2299,92	267,20	2422,36	252,78	2509,22	244,02
75	2494,92	307,48	2214,00	276,39	2671,39	286,42
Esquerda						
Distância entre transdutores (cm)	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]
15	3345,07	45,84	3759,47	40,82	3916,25	39,16
30	3961,47	77,48	3663,68	83,63	4326,03	70,95
45	3930,37	116,78	4123,68	111,59	3982,95	115,24
60	2626,10	234,62	3848,63	160,03	4130,63	150,20
75	2820,70	271,44	3973,02	192,63	3263,07	234,65

Fonte: Autora. 2025

Analisando os resultados podemos perceber que para todas os casos a fissuras se inclinam à esquerda, tanto na viga inclinada sem armadura quanto para viga inclinada com armadura, uma vez que à esquerda, as velocidades médias são maiores em todas as distâncias em comparação com as velocidades à direita (15cm a 75cm) em comparação com os tempos à direita, isto indica que sinal ultrassônico se propaga mais rapidamente à esquerda, sugerindo que a fissura está inclinada no sentido da esquerda para a direita, este comportamento se repete em todas as linhas da viga.

Tabela 21: Médias da velocidade e dos tempos de propagação da Viga inclinada com armadura.

Direita						
	L1		L2		L3	
Distância entre transdutores (cm)	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]
D15	2796,57	55,06	2801,22	54,92	3499,53	44,00
D30	2400,75	127,65	3340,82	92,01	2320,60	131,86
D45	2128,55	217,12	3082,60	149,03	2324,97	197,70
D60	2035,87	304,96	2528,07	242,40	2535,95	241,42
D75	2141,20	357,26	3072,10	250,72	2272,55	337,18
Esquerda						
Distância entre transdutores (cm)	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]	Média da Velocidade (m/s)	Média do tempo [μ s]
D15	5127,37	29,87	4211,25	36,34	5461,84	29,26
D30	4180,33	73,20	4255,53	71,91	4246,50	72,06
D45	2416,03	189,98	3350,33	140,50	4105,80	112,00
D60	2365,58	259,08	2240,87	273,11	2545,68	240,43
D75	2267,28	337,75	4005,35	191,10	2792,88	273,94

Fonte: Autora. 2025

CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar o uso do ultrassom para determinar a profundidade de fissuras em estruturas de concreto armado e não armado. Diante dos resultados obtidos, conclui-se que, apesar de ser sensível aos danos e variações no concreto, o método apresenta limitações na determinação da profundidade das fissuras devido às altas variações nos resultados das medições.

Ainda assim, o ensaio de ultrassom pode ser útil para aplicações menos específicas, como a avaliação da qualidade do concreto e a detecção de danos em geral. No entanto, sua eficácia pode ser maior em ambientes mais controlados, onde seja possível minimizar os fatores intervenientes, principalmente os efeitos da temperatura ambiente. Observou-se que a temperatura teve grande influência sobre as medições, especialmente em dias mais quentes, quando superava os 30°C.

Em relação à presença de armadura, os resultados indicam que, neste estudo, sua influência foi pouco significativa, uma vez que, tanto nos ensaios com armadura quanto nos ensaios sem armadura, houve grande dispersão nos resultados. Além disso, pode-se inferir que as ondas se propagam predominantemente pela superfície do concreto e que o alto cobrimento da armadura neste experimento reduziu sua interferência.

A predição da inclinação das fissuras confirmou a sensibilidade do ensaio para a detecção de danos mais gerais. Em ambos os casos, com e sem armadura, foi possível determinar com precisão a direção da inclinação da fissura.

Com base neste estudo, conclui-se que a medição da profundidade de fissuras por meio da análise da VPU é uma técnica imprecisa e pouco aplicável em situações reais onde não há controle sobre todos os fatores intervenientes. Além disso, outras técnicas de ultrassom podem ser mais precisas para avaliar danos no concreto. Estudos como os de Carelli (2014), Tinoco (2019), Souza (2017), Hoffman (2015) e outros mostram que parâmetros adicionais das ondas, além da VPU, são promissores para a avaliação do estado geral de elementos de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI): **ACI 228**. “Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures”. June, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) **C 597-02**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete¹. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 5738** “Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova”. Dezembro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 5739** “Concreto- Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos”. 30 de março, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 8802** “Concreto Endurecido-Determinação da propagação da velocidade de onda ultrassônica”. 11 de fevereiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 6118** “Projeto de Estruturas de Concreto”. 18 de agosto, 2023.

ADAMATI, D. S.; LORENZI, A.; CHIES, J. A.; SILVA FILHO, L. C. P. **Análise de estruturas de concreto armado através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico: estudo de parâmetros tecnológicos intervenientes**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 2, p. 358-385, abr. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1550/S1983-41952017000200006>. Acesso em: 02 jan. 2025.

BAUER, L. A. F., **Materiais de construção**. 5^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 435p., 1987. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/docs/materiais-de-construcao-falcao-bauer-vol-1-5a-ed-p-25/4905887/>. Acesso em: 24 de mar. 2025.

BS 1881: Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. Londres: British Standards Institution, 1986.

BUNGEY, J. H., **The testing of concrete in structures**, 2 ed. London, Surrey University Press, 1989. Disponível em:

https://archive.org/details/testingofconcret0000bung_o9m1/page/n7/mode/2up?view=theater. Acesso em: 24 de mar. de 2025.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S.G.; GRANTHAM, M.G. **Testing of Concrete in Structures**. New York: Taylor & Francis, - 4ª Ed., 2006.

CARELLI, J. M. **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa**. 2014. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

EVANGELISTA, A. C. J., **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

CALDAS, A. J. A. **Avaliação da abertura de fissuras de flexão em vigas de concreto armado**. São Paulo, 1997. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

CÂMARA, R. C. **Influência da temperatura de cura na velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos em concretos de diferentes resistências**. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CHIES, J.A. **Ensaio não destrutivo em concreto: detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado – análise das modificações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio**

Grande do Sul. 1988. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DORNELLES, F. L.; PINTO, R. C. A.; PADARATZ, I. J. **Influência do posicionamento da armadura em medições de ultrassom para avaliação da resistência à compressão do concreto.** In: ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL, 2004, Porto, Portugal. Anais... Porto: [s.n.], 2004. p. 1015-1022.

GODINHO, J. P.; SOUZA JUNIOR, T. F. de; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, M. S. A. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 2, p. 222-247, abr. 2020. ISSN 1963-4195. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-4195202000020004>.

GRULLÓN PEÑA, Manuel Ramón et al. **Correlação entre resistência à compressão e ultra-som: influência da dosagem e da umidade.** 2004, Anais. São Paulo: IBRACON, 2004. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/32e247b8-cb5b-4008-a666-ab5e7f13c73e/Helene-2004-correlacao.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2025.

HELENE, P. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1992.

HOFMANN, Mateus de Assunção. **Atenuação da energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto.** 2015. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

LORENZI, A.; CHIES, J. A.; ADAMATI, D. S.; SILVA FILHO, L. C. P. **Avaliação da capacidade de detecção de falhas no concreto através do ensaio ultrassônico.** Revista ALCONPAT, v. 7, n. 3, p. 286-301, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.127>.

LORENZI, A.; SILVA FILHO, L. C. P. **Estudo Comparativo entre Sistemas Inteligentes para Auxílio da Análise de Estruturas de Concreto através de Ensaio Não Destrutivos.** In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE

EQUIPAMENTOS (COTEC 2003), 7., 2003, Florianópolis. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2003. 9 p. 1 CD-ROM.

LORENZI, A. **Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultrassônico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LORENZI, A.; SILVA FILHO, L. C. P.; CAETANO, L. F.; LORENZI, L. S. **Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51., 2009, Curitiba. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 13 p. 1 CD-ROM.

MACHADO, M. D., **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 238 pp., 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952009000200001>. Acesso em: 24 de mar. de 2025.

MEDEIROS, A.; HELENE, P. **Avaliação da qualidade do concreto em estruturas existentes utilizando ultrassom e técnicas de análise de dados**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011.

MEDEIROS, Arthur. **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. 2007. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete**. 3rd edition. McGraw Hill Professional, 2005. 659 p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: ibracon. – 2ª Edição, 2008

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. Disponível em: https://kashanu.ac.ir/Files/The%20Ultrasonic%20Pulse_pdf11.pdf. Acesso: 24/03/2025.

NORMA MERCOSUL. NM 58, Concreto Endurecido – **Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 1996.

PAYAN, Cédric; ABRAHAM, Odile; GARNIER, Vincent. Ultrasonic Methods. In: BALAYSSAC, Jean-Paul; GARNIER, Vincent. **Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures**. Great Britain and United States: ISTE Press and Elsevier, 2018, p. 21-86. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/non-destructive-testing-and-evaluation-of-civil-engineering-structures/balayssac/978-1-78548-229-8>.

PINTO, R. C. D. A., MEDEIROS, A., PADARATZ, I. J., & ANDRADE, P. B. **Use of Ultrasound to Estimate Depth of Surface Opening Cracks in Concrete Structures**. Ndt Net. 2010.

PUNDIT Manual, CNS Electronics Ltd., London., 76pp., 1994.

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.

SERWAY, R. A. **Física**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1996. v.2: Movimento ondulatório e termodinâmica.

SILVA, M. A. F.; FIGUEIREDO, J. R. F.; CARVALHO, R. C.; FERREIRA, M. A. **Controle de fissuração em vigas de concreto armado de acordo com as recomendações da NBR 6118:2003**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Pernambuco. **Anais...** Pernambuco: IBRACON, 2005.

SILVA, M. T. A.; ROCHA, J. H. A.; MONTEIRO, E. C. B.; PÓVOAS, Y. V.; RABBANI, E. R. K. **Avaliação do ensaio de ultrassom para a estimativa da profundidade de fissuras em concreto**. Revista ALCONPAT, v. 9, n. 1, p. 79-92, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.289>.

SILVA, Priscila Moreira da. **Análise da perda de rigidez em vigas de concreto armado devido à fissuração por esforços de flexão utilizando ensaio de ultrassom**. 2017. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SOUZA, Fabio Caon de. **Avaliação do preenchimento com sistema epóxi de fendas induzidas em estruturas de concreto pela análise do sinal ultrassônico**. 2017. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

TINOCO, J. **Efeito da umidade do concreto na propagação de ondas ultrassônicas**. 2012. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

TINOCO, J.; MEDEIROS, A. **Uso de algoritmos de processamento de sinais para análise automática de dados de ultrassom em concreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2013.

VIANA, A. C. C. **Comportamento de ondas ultrassônicas em concreto aquecido até 400°C**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

APÊNDICE A: TABELAS DOS TEMPOS DE PROPAGAÇÃO PARA DIFERENTES GANHOS

Tabela 22: Tempos de propagação para Viga V0 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V0 sem Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	131,38	3,25	57,03	2,24	50,20	5,00
30	198,30	20,45	152,98	1,33	148,33	7,46
45	243,03	11,56	193,59	14,74	176,33	14,91
60	0,00	0,00	281,72	7,93	257,52	14,25
75	0,00	0,00	433,73	7,13	348,42	29,26

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 23: Tempos de propagação para Viga V5 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V5 sem Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	78,65	0,07	71,43	0,16	71,80	0,14
30	344,50	0,00	202,90	13,42	186,64	0,36
45	344,50	0,00	233,66	3,02	227,31	1,49
60	344,50	0,00	344,50	0,00	334,15	23,20
75	344,50	0,00	344,50	0,00	344,50	0,00

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 24: Tempos de propagação para Viga V10 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V10 sem Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	43,40	0,18	33,33	2,30	33,36	3,02
30	78,27	0,24	77,99	2,19	73,53	5,00
45	181,27	11,36	137,87	6,61	126,42	6,61
60	230,73	1,16	170,69	14,05	152,40	11,48
75	260,57	13,26	200,11	16,07	188,50	3,77

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 25: Tempos de propagação para Viga V15 sem Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V15 sem Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	47,23	0,24	44,83	3,67	41,18	2,13
30	120,54	0,44	96,39	13,18	85,03	7,99
45	220,79	3,80	185,30	6,98	176,33	4,35
60	246,28	0,26	239,13	4,27	233,01	26,27
75	302,26	9,17	285,09	3,86	279,24	6,54

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 26: Tempos de propagação para Viga V0 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V0 com Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	87,98	0,12	68,65	0,19	69,27	0,17
30	166,38	0,10	151,04	1,71	151,17	1,27
45	343,90	0,00	227,57	0,31	228,34	0,28
60	343,90	0,00	276,06	0,16	266,69	0,21
75	343,90	0,00	343,90	0,00	343,90	0,00

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 27: Tempos de propagação para Viga V5 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V5 com Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	62,19	0,48	63,62	0,25	63,62	0,25
30	123,97	0,17	124,49	0,13	124,49	0,13
45	206,66	10,25	185,87	0,17	185,87	0,17
60	277,24	9,02	259,14	1,12	259,14	1,12
75	344,40	0,00	344,40	0,00	344,40	0,00

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 28: Tempos de propagação para Viga V10 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V10 com Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	47,40	0,41	44,50	4,61	37,65	3,84
30	120,13	6,08	91,08	3,09	87,23	6,14
45	248,27	0,26	225,27	24,07	161,85	20,61
60	296,68	2,89	247,78	4,27	177,97	16,64
75	420,93	52,52	305,17	3,90	269,10	30,04

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 29: Tempos de propagação para Viga V15 com Armadura – Ganhos 200X, 500X e 1000X

Viga V15 com Armadura						
Ganho	200X		500X		1000X	
Distância [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
15	55,28	0,13	46,14	0,19	46,61	0,15
30	125,11	0,09	88,70	4,06	86,28	0,17
45	235,22	4,18	213,86	4,02	206,19	4,28
60	268,92	4,55	219,34	6,81	213,78	6,59
75	397,37	2,14	313,61	5,47	305,91	3,83

Fonte: a autora, 2025.

APÊNDICE B: TABELAS DOS VALORES MÉDIOS DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO PARA AS DIFERENTES LINHAS DA MALHA DE MEDIÇÃO EM VIGAS SEM ARMADURA, COM O MESMO GANHO 500X

Tabela 30: Velocidade de propagação para Viga 0 sem Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	38,59	4,32	40,32	3,77	49,91	2,69
15	52,02	3,65	52,43	4,51	60,61	5,12
20	60,89	4,19	87,40	17,94	98,11	33,07
30	125,47	40,01	221,41	117,76	94,00	4,79
40	181,41	48,55	143,60	17,15	155,14	29,87
60	348,77	54,52	534,74	350,24	250,35	41,38
80	391,50	38,75	463,99	173,79	437,47	100,54

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 31: Velocidade de propagação para Viga 5 sem Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	63,22	1,34	22,39	0,24	22,45	0,24
15	77,67	12,69	44,51	5,18	48,74	0,42
20	116,02	0,61	64,09	0,15	69,59	4,86
30	146,88	15,57	145,93	30,63	90,16	6,96
40	234,14	1,71	175,74	21,84	133,76	21,39
60	374,26	18,36	271,40	14,54	187,91	31,47
80	350,90	40,55	309,43	4,79	338,69	8,35

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 32: Velocidade de propagação para Viga 10 sem Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	21,94	0,17	27,03	0,38	36,18	0,19
15	52,99	0,58	36,53	0,15	42,71	1,85
20	60,83	0,71	50,38	0,12	72,31	6,07
30	128,79	15,83	97,74	4,67	76,93	2,32
40	165,03	14,87	159,65	1,88	259,47	47,55
60	260,84	11,87	228,41	19,25	257,15	29,51
80	569,29	4,34	334,12	79,25	545,40	171,29

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 33: Velocidade de propagação para Viga 15 sem Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	68,78	10,85	53,81	19,96	44,94	41,95
15	54,10	9,55	44,30	5,18	74,34	1,68
20	77,03	3,63	61,39	2,38	99,30	12,29
30	137,43	11,58	117,52	7,20	161,34	27,31
40	202,22	26,36	156,66	11,42	128,84	10,56
60	310,37	15,31	250,92	5,32	363,71	61,19
80	333,86	11,73	311,36	18,03	351,42	33,40

Fonte: a autora, 2025.

APÊNDICE C: TABELAS DOS VALORES MÉDIOS DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO PARA AS DIFERENTES LINHAS DA MALHA DE MEDIÇÃO EM VIGAS COM ARMADURA, COM O MESMO GANHO 500X

Tabela 34: Velocidade de propagação para Viga 0 com Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	22,17	0,19	45,59	27,61	24,30	9,29
15	55,07	4,28	50,95	4,91	45,69	0,27
20	76,39	11,22	59,56	0,15	66,43	9,86
30	134,17	3,78	126,48	0,28	144,98	7,97
40	161,30	11,38	181,05	7,78	183,74	0,68
60	300,92	7,30	255,80	27,70	272,03	0,38
80	405,63	72,74	344,28	11,93	396,76	7,25

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 35: Velocidade de propagação para Viga 5 com Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	32,85	3,32	35,79	0,17	36,28	0,17
15	30,15	1,22	43,45	0,19	42,53	0,21
20	59,63	7,46	73,41	0,46	98,60	6,55
30	141,79	11,89	102,26	5,67	176,67	9,11
40	219,34	3,04	173,33	4,13	210,57	16,37
60	343,90	0,00	343,90	0,00	290,30	5,75
80	343,90	0,00	337,20	10,16	343,90	0,00

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 36: Velocidade de propagação para Viga 10 com Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	53,48	32,98	21,99	3,12	60,51	6,79
15	64,21	0,14	67,01	0,11	67,36	0,15
20	79,26	0,35	76,36	0,83	82,76	5,44
30	120,68	15,14	170,58	26,88	147,00	14,92
40	206,83	21,06	209,79	4,05	222,58	15,51
60	315,11	29,51	262,99	37,07	303,97	26,50
80	343,90	0,00	313,29	6,16	343,90	0,00

Fonte: a autora, 2025.

Tabela 37: Velocidade de propagação para Viga 15 com Armadura – L1, L2 e L3

Linha	L1		L2		L3	
Distância entre Transdutores [cm]	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão	Tempo [μs]	Desvio Padrão
10	118,24	4,96	143,69	3,95	82,17	45,07
15	93,08	4,73	84,01	6,20	75,91	2,37
20	162,19	16,43	123,16	7,58	118,61	4,61
30	171,69	19,93	174,36	3,71	360,68	22,84
40	252,06	23,45	177,49	3,01	238,61	5,22
60	292,87	42,69	408,43	41,89	505,88	10,16
80	344,40	0,00	336,73	10,32	449,02	3,81

Fonte: a autora, 2025.