



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ISAQUE SAMUEL PEREIRA HOLANDA**

**ESTUDO COMPARATIVO DOS ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA E  
VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO EM PAREDE DE CONCRETO**

**FORTALEZA**

**2022**

ISAQUE SAMUEL PEREIRA HOANDA

Estudo comparativo dos ensaios de esclerometria e velocidade de pulso ultrassônico em  
parede de concreto

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil  
do Centro Universitário Christus, como  
requisito parcial para obtenção do título  
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Ma. Rafaela Fujita  
Lima.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Centro Universitário Christus - Unichristus  
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do  
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

H722e Holanda, Isaque Samuel Pereira Holanda.  
Estudo Comparativo dos Ensaios de Esclerometria e Velocidade  
de Pulso Ultrassônico em Parede de Concreto / Isaque Samuel  
Pereira Holanda Holanda. - 2022.  
84 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro  
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,  
Fortaleza, 2022.  
Orientação: Profa. Ma. Rafaela Fujita Lima.

1. Ensaios não destrutivos. 2. Ultrassom. 3. Esclerometria. 4.  
Curvas de correlação. 5. Parede de concreto. I. Título.

CDD 624

ISAQUE SAMUEL PEREIRA HOANDA

Estudo comparativo dos ensaios de esclerometria e velocidade de pulso ultrassônico em  
parede de concreto

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil  
do Centro Universitário Christus, como  
requisito parcial para obtenção do título  
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Ma. Rafaela Fujita  
Lima.

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

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Ma. Rafaela Fujita Lima.

Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Profa. Ma. Mariana de Araújo Leite

Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Profa. Ma. Marisa Teófilo Leitão

Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Aos meus pais

À minha tia

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Ozias Alves Holanda e Isabel Pereira da Silva Holanda que durante tantos anos trabalharam todos os dias mais de 14 horas com o objetivo de formar eu e minha irmã. Obrigado por todos os ensinados e dedicação para que a gente chegasse até esse momento.

À minha tia, Maria Iris Pereira que sempre foi uma segunda mãe e sempre dividiu esse sonho comigo e meus pais, nos ajudando de diversas formas sempre que necessário. Agradeço também ao meu primo, Pedro Ernesto Pereira.

Ao meu amor, Ana Clara, que entrou na minha vida há mais de 2 anos e me ajudou a lidar com a pandemia, sendo por diversas vezes meu equilíbrio emocional para suportar as dificuldades da vida. Obrigado pelo companheirismo, carinho e amor.

À professora Rafaela Fujita pela orientação nesse trabalho, e também compreensão e paciência durante 2 anos que estagiei na sua empresa, local onde conseguir amadurecer minha mente e evoluir na engenharia civil.

Aos meus amigos Igor e Matheus, que me deram apoio, da forma deles, durante tantos anos. Agradeço também meu amigo Thalys, por toda ajuda desde o ensino médio.

Às minhas amigas, Glória, Andressa, Hellen, Rebeca e Danyelle que me acompanham há mais de 15 anos.

Aos meus amigos Wilton e Pedro, que trilharam esse caminho da graduação e ajudaram nos momentos difíceis. Agradeço também ao meu amigo Aristeu que caminhou ao meu lado nesse último ano de faculdade e que se tornou um irmão.

À toda equipe da ConcreFuji, no qual me auxiliou da melhor forma possível, em especial a engenheira Taynah que transmitiu seus conhecimentos e as estagiárias Milena e Bianca.

## RESUMO

Os Ensaaios Não Destrutivos (ENDs) são realizados em obras novas e antigas de forma a avaliar as propriedades do concreto sem provocar danos à estrutura e de maneira rápida. Este trabalho apresenta um estudo utilizando ensaios não destrutivos: ultrassom e esclerometria no sistema de paredes de concreto, segmento que ganha espaço no atual mercado, utilizando o concreto autoadensável. O objetivo do presente estudo é analisar a aplicação dos ENDs e determinar a qualidade do concreto, a correlação entre a resistência à compressão do concreto e os valores obtidos por meio desses ensaios. Com esse propósito, realizou-se ensaios em parede de concreto, sendo empregados os ensaios de esclerometria e Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU), divididos em 5 pavimentos, no concreto do primeiro caminhão betoneira, foram moldados os corpos de prova para realizar ensaios de resistência à compressão e o VPU. O concreto analisado desempenhou ótimos resultados nos ensaios realizados, demonstrando uma homogeneidade. Foram estabelecidas correlações simples, obtidas a partir de resultados de um único ensaio não destrutivo, bem como correlações múltiplas combinando-se os resultados obtidos com os dois ensaios não destrutivos. As equações e curvas obtidas demonstraram coeficientes de correlações bons, de forma a permitir serem aplicados para a estimativa da resistência do concreto analisado.

**Palavras-chaves:** Ensaaios não destrutivos. Ultrassom. Esclerometria. Resistência a compressão. Curvas de correlação.

## **ABSTRACT**

Through non-destructive testing, the properties of concrete can be evaluated quickly and without causing damage to the structure. This work presents a study using non-destructive tests: ultrasound and sclerometry, in concrete walls, segments that have gained space in the current market. With the objective of determining the quality of the concrete and the voice between the strength of the concrete and the values obtained through non-destructive tests. For this purpose, tests were carried out on a concrete wall, using sclerometry tests and more ultrasonic pulse speed, divided into 5 floors, on the concrete of the first concrete mixer truck, supplied by a local concreting company. carry out resistance to resistance and ultrasonic tests. The analyzed concrete performed excellent results in the performed tests, demonstrating homogeneity. There were strong simple correlations, followed from the results of a single non-destructive test, as well as multiple correlations by combining the results obtained with the two non-destructive tests. The curves and requests for good correlation, in order to allow them to be applied for the estimation of the analyzed concrete strength.

**Keywords:** Non-destructive testing. ultrasound. sclerometry. Compression resistance. Correlation curves.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - 1: onda longitudinais; 2: onda transversais; 3: onda superficiais; 4: ondas de placa.....	21
Figura 2 - modos de transmissão dos pulsos. ....	22
Figura 3 - diferentes meios encontrados pelo pulso ultrassônico.....	23
Figura 4 - Relação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão em concretos com diferentes tipos de agregados graúdos. ....	25
Figura 5 - Efeito de proporção da mistura na correlação entre velocidade de pulso e a resistência a compressão.....	26
Figura 6 - Efeito do tipo de cimento e aditivo na correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão. ....	28
Figura 7 - Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade ultrassônica.....	29
Figura 8 - Relação entre velocidade de onda e idade. ....	30
Figura 9 - Influência da idade na evolução da velocidade de propagação para concretos com diferentes tipos e teores de cimento submetidos a diferentes temperaturas de cura. ....	30
Figura 10 - Variação da velocidade com o tempo. ....	31
Figura 11 - Fatores de correção para barras transversais e longitudinais.....	33
Figura 12 - 1 - Influência de barras transversais, 2 - paralelas ao percurso da onda.....	33
Figura 13 - Velocidade de propagação da onda e relação água/cimento.....	34
Figura 14 - Variação da velocidade do pulso com o aumento do teor de ar no concreto. ....	35
Figura 15 - Operação do esclerômetro de reflexão.....	36
Figura 16 - Área de ensaio e pontos de impacto. ....	37
Figura 17 - Esquema Experimental. ....	44
Figura 18 - Corte vertical dos locais dos ensaios. ....	46
Figura 19 - A- Corpos de provas cilíndrico; B - Ensaio de resistência a compressão....	47
Figura 20 - Calibração do esclerômetro com a bigorna. ....	48
Figura 21 - Calibração dos transdutores.....	49
Figura 22 - A - Modo de transmissão indireta; B - Modo de transmissão - direita. ....	50
Figura 23 - Crescimento dos concretos estudados. ....	54
Figura 24 - Médias das resistências.....	54
Figura 25 - Índice esclerométrico X resistência à compressão (94 dias). ....	56
Figura 26 - Surfer da esclerometria pavimento: Térreo. ....	58
Figura 27 - Surfer da esclerometria: 1º pavimento.....	58
Figura 28 - Surfer da esclerometria: 2º pavimento.....	59
Figura 29 - Surfer da esclerometria: 3º pavimento.....	59
Figura 30 - Surfer da esclerometria: 4º pavimento.....	60
Figura 31 - Velocidade de pulso ultrassônico x resistência à compressão (94 dias).....	61
Figura 32 - Índice esclerometrico X velocidade do pulso ultrassônico (94 dias).....	63
Figura 33 - Área ensaiado pavimento térreo - vermelho: fissura, amarelo: elevação. ...	64

Figura 34 - Surfer da velocidade de pulso ultrassônico pavimento: Térreo.....	65
Figura 35 - Surfer da velocidade de pulso ultrassônico: 1º pavimento. ....	66
Figura 36 - Porosidade da área ensaiada: 1º pavimento. ....	66
Figura 37 - Surfer da velocidade de pulso ultrassônico: 2º pavimento. ....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos de velocidade de ondas ultrassônicas para alguns tipos de rochas. .....	25
Tabela 2 - Efeito das dimensões da peça na transmissão do pulso ultrassônico. ....	32
Tabela 3 - Traço empregado. ....	45
Tabela 4 - Distribuição dos ensaios. ....	50
Tabela 5 - Resistência à compressão dos CPs cilíndricos. ....	53
Tabela 6 – Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade do pulso ultrassônico. ....	55
Tabela 7 - Índice esclerométrico e resistência à compressão (94 dias). ....	56
Tabela 8 - Coeficientes de Correlações das Curvas. ....	57
Tabela 9 - Resultados de VPU e resistência à compressão dos CPs cilíndricos. ....	61
Tabela 10 - Índices de Correlações das Curvas de Ultrassom. ....	62
Tabela 11 - Índice esclerométrico e velocidade pulso ultrassônico (94 dias). ....	62
Tabela 12 - Índices de Correlações das Curvas de Ultrassom X esclerometria. ....	63
Tabela 13 -Valores obtidos nos ensaios realizados por Wolfgang (2013) e presente estudo. .....	68
Tabela 14 - Valores obtidos nos ensaios realizados por Peixoto (2019) e presente estudo. .....	69
Tabela 15 - Coeficientes de correlação e equações dos autores. ....	70

## SÍMBOLOS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI American Concrete Institute

a/c água/cimento

BS Normas Britanicas – “British Standards”

CPs Corpos de prova

CP III Cimento Portland de Alto Forno

CPV-ARI Cimento Portland DE Alta Resistência Inicial

D<sub>máx</sub> Dimensão máxima do agregado

ENDs Ensaios não destrutivos

f<sub>ck</sub> Resistência característica do concreto à compressão

VPU Velocidade de pulso ultrassônico

NM Norma Mercosul

coeficiente de correção k

pav. Pavimento

ton toneladas

m<sup>3</sup> metros cúbicos

Kg quilogramas

f<sub>cj,3</sub> resistência do concreto à compressão menor ou igual a 3 dias

f<sub>cj,7</sub> resistência do concreto à compressão a 7 dias

f<sub>cj,28</sub> resistência do concreto à compressão a 28 dias

f<sub>cj,94</sub> resistência do concreto à compressão a 94 dias

r<sup>2</sup> Coeficiente de correlação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
1.2.1	Objetivos Gerais	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Ensaio não destrutivos</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Método do ultrassom</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Propagação das ondas ultrassônicas</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Modo de transmissão do pulso</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Meios que pulso ultrassônico pode encontrar</b>	<b>22</b>
<b>2.6</b>	<b>Fatores que influenciam os resultados do ensaio ultrassom</b>	<b>23</b>
2.6.1	Qualidade de contato entre transdutor e o concreto	24
2.6.2	Tipo e tamanho e outras características dos agregados graúdos	24
2.6.3	Condições de cura	26
2.6.4	Tipo de cimento e grau de hidratação	27
2.6.5	Idade do concreto	29
2.6.6	Forma da peça e tamanho da peça a ser ensaiada	31
2.6.7	Presença de armadura	32
2.6.7	Relação água/cimento	34
2.6.8	Teor de ar	34
<b>2.7</b>	<b>Método do esclerômetro</b>	<b>35</b>
<b>2.8</b>	<b>Ensaio de esclerometria</b>	<b>35</b>
<b>2.9</b>	<b>Vantagens e desvantagens</b>	<b>37</b>
<b>2.10</b>	<b>Fatores que influenciam o ensaio de esclerometria</b>	<b>38</b>
2.10.1	Tipo e teor de cimento	38
2.10.2	Tipo e dimensão de agregado	39
2.10.3	Superfície de contato	39
2.10.4	Carbonatação	40
2.10.5	Idade do concreto	40

<b>2.11 Parede de concreto.....</b>	<b>40</b>
2.11.1 Concreto .....	41
<b>2.12 Estudos pertinentes .....</b>	<b>41</b>
2.12.1 Medeiros (2007) .....	41
2.12.2 Wolfgang (2013) .....	42
2.12.3 Evangelista (2002).....	42
2.12.4 Peixoto (2019) .....	42
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Caracterização dos materiais .....</b>	<b>44</b>
3.1.1 Composição do traço .....	45
<b>3.2 Método .....</b>	<b>45</b>
3.2.1 Área ensaiada <i>in loco</i> .....	45
3.2.2 Ensaio resistência à compressão nos corpos de prova.....	46
3.2.3 Ensaio de esclerometria .....	47
3.2.4 Ensaio de ultrassom .....	48
3.2.5 Distribuição dos ensaios .....	50
3.2.6 Programa surfer .....	51
<b>4 Resultados e Análises .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Ensaio Resistência à Compressão .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2 Método para a avaliação da qualidade do concreto através dos dados da velocidade do pulso ultrassônico e esclerometria .....</b>	<b>55</b>
4.2.1 Coeficiente de correlação .....	55
4.2.2 Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade do pulso ultrassônico.....	55
<b>4.3 Correlação do índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto .....</b>	<b>55</b>
4.2.1 Surfer para esclerometria.....	57
<b>4.3 Correlação do ultrassom com a resistência a compressão do concreto .....</b>	<b>60</b>
<b>4.4 Correlação do ultrassom com índice esclerométrico na parede de concreto ....</b>	<b>62</b>
4.4.1 Surfer da velocidade pulso ultrassônico na parede de concreto .....	63
<b>4.5 Análise comparativa com trabalho da área .....</b>	<b>67</b>
4.5.1 Análise comparativa entre Wolfgang (2013) e presente estudo .....	67
4.5.2 Análise comparativa entre Peixoto (2019) e presente estudo.....	68

4.5.3 Análise comparativa das curvas de correlação Wolfgang (2013), Peixoto (2019) e presente estudo .....	69
<b>5 Conclusão .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>Anexo A - RESULTADOS DO ENSAIO DE ESCLEROMETRIA .....</b>	<b>76</b>
<b>Anexo B - RESULTADOS DO ENSAIO DE ULTRASSOM.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil para compor elementos estruturais. Apresentando elevadas vantagens, tais como, resistência a compressão, facilidade na moldagem e baixo custo comparados a outros materiais.

Os projetos são realizados partindo da premissa de que a estrutura de concreto possui um período de vida útil, no qual é o período de tempo que a mesma mantém suas funções sem sofrer manutenções corretivas, apenas preventivas. A falta de manutenções, muito comum na prática, levam à deterioração precoce e dessa forma, a perda das funcionalidades das estruturas de concreto.

Em alguns casos as manifestações patológicas ocorrem de forma silenciosa e não aparente, podendo levar a edificação à ruína, causando danos materiais e imateriais preocupantes. Com isso, surge a necessidade de ferramentas de controle e análise do estado de deterioração e segurança dessas estruturas.

No processo de execução das estruturas, a resistência característica a compressão, segundo Mehta e Monteiro (2014), está relacionada a tensão necessária para causar a ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar. Caso não atinge o determinado em projeto, nesses casos são realizados ensaios em campo para aferir a qualidade do concreto.

A necessidade de um maior conhecimento a respeito do comportamento da resistência do concreto em seus locais de utilização deu origem aos ensaios *in situ*, os quais podem ser classificados em: ensaios destrutivos e não destrutivos.

Os ensaios destrutivos, são aqueles que danificam a estrutura na sua realização, consistem na extração de amostras de concreto, denominadas testemunhos diretamente dos elementos estruturais que se deseja avaliar a resistência. Tal ensaio apresenta as desvantagens de ser oneroso e da restrição dos locais de retirada das amostras, para que não se comprometa a estabilidade da estrutura em análise (MEIDEIROS, 2007).

Os ensaios não-destrutivos têm a capacidade de verificar a qualidade de uma estrutura e resistência a compressão do concreto sem a necessidade de acarretar danos a estrutura. Segundo Wolfgang (2013), os princípios preconizados pelos métodos não



destrutivos isentam a estrutura de avarias, que podem vir a prejudicar o desempenho portanto dos elementos estruturais ou até mesmo da estrutura como um todo.

### **1.1. Justificativa**

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que muitas das propriedades do concreto, como módulo de elasticidade, impermeabilidade e resistência a intempéries podem ser deduzidas a partir da resistência à compressão.

A resistência característica do concreto é realizada através da moldagem dos corpos de prova (CPs). Segundo NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), é necessário para esse ensaio a utilização de CPs cilíndricos moldados durante a concretagem e rompimento com 28 dias em uma prensa, após passar por uma cura nesse período.

Existe a necessidade de se avaliar a resistência à compressão do material *in loco* em diferentes idades, seja por motivos das etapas construtivas, pela previsão da vida útil da estrutura e/ou para promover reforços e/ou reparos (ESCOBAR; ANDREOTTI; FABRO, 2011).

De acordo com a NBR 7680 (ABNT, 2015), quando a resistência característica à compressão do concreto não é atingida a partir do resultado abaixo da resistência de projeto dos CPs moldados, é aplicável o planejamento da extração de testemunhos (ensaio destrutivo) de estruturas já executadas. Entretanto, esses métodos acarretam certas desvantagens, tais como: serviço com necessidade de mão de obra especializada, extração de peças concretadas, entulho, retrabalho para conserto de tais peças.

Levando em consideração essas desvantagens, surgem vários métodos de ensaios não destrutivos (ENDs) para avaliação da resistência à compressão do concreto sem provocar danos à estrutura trazendo o mesmo resultado e com vantagens significativas.

O esclerometria é um ENDs, utilizada para medir a dureza superficial e correlacionar a resistência a compressão do concreto. Segundo Câmara (2006), menciona que é o método não destrutivo mais utilizado na avaliação da resistência *in loco*. Além disso, sua utilização progrediu devido à necessidade de uma melhor avaliação do

concreto, onde os ensaios padrão em CPs representam apenas a resistência potencial, diferentemente de um concreto em serviço numa peça estrutural (CASTRO, 2009).

Existe outro tipo de ENDs o ensaio de pulso ultrassônico, com capacidade de detecção de profundidade de fissuras e de heterogeneidade, permitindo o controle das características do concreto, tais como: resistência e porosidade. Este método relaciona a velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto com suas propriedades elásticas e densidade, podendo ser utilizados em diversas idades da estrutura de concreto e alvenaria, dessa forma, colaborando para detecção de diversas patologias em fase inicial.

Desse modo, questiona-se: como os ensaios não destrutivos (ultrassom e esclerometria) são correlacionados a resistência à compressão, em obras de parede de concreto.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos Gerais**

O presente estudo tem como objetivo, analisar a aplicação dos métodos de ensaio não destrutivos: ultrassom e esclerometria em concreto autoadensável, do sistema parede de concreto.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Verificar o grau de correlação dos dados de ensaios não destrutivos com a resistência à compressão do concreto por meio de curvas de correlação;
- Verificar a influência da velocidade de propagação da onda e da resistência característica a compressão do concreto moldado nos corpos de prova, medida pelo método do ultrassom e a esclerometria;
- Comparar os resultados das análises da qualidade do concreto com base na velocidade do pulso ultrassônico e o ensaio de esclerometria.
- Analisar de modo comparativo os resultados obtidos e resultados existentes na literatura, realizada na região, quanto à correlação de ensaio destrutivo e ensaios não destrutivos destrutivo.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho foi dividido em 5 capítulos, iniciando-se pela introdução, logo após a revisão bibliográfica existente sobre os assuntos relevantes aos objetivos gerais, passando ao programa experimental desenvolvido, apresentação e análise dos resultados e conclusão.

O capítulo 1, no qual se encontra este item, apresenta a introdução do tema, justificativa e objetivos do trabalho.

O capítulo 2, traz a revisão bibliográfica referente aos métodos de ensaios não destrutivos: pulso ultrassônico e esclerometria que serão empregados na pesquisa, apresentando suas funcionalidades, descrição dos métodos e fatores que influenciam os ensaios.

No capítulo 3, é apresentada a metodologia, através da descrição de como os CPs foram confeccionados até a realização dos ensaios são descritos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e análises. No qual é dividido em resultados dos ensaios experimentais; avaliação da qualidade do concreto; correlação entre velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto.

O capítulo 5 tem como finalidade reunir e apresentar as conclusões dos estudos propostos no objetivo do trabalho. Logo após, são expostas as referências utilizadas no desenvolvimento do presente trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Essa seção apresenta os aspectos teóricos dos assuntos abordados: velocidade de propagação do pulso ultrassônico e esclerometria, com o objetivo de apresentar a literatura sobre os ensaios não destrutivos empregados no presente trabalho. Para cada ensaio é feita uma revisão bibliográfica sobre o método, as vantagens e limitações, as aplicações, os fatores que o influenciam e sua normalização. O emprego de técnicas para moldagem do concreto utilizado nos ensaios será também abordado.

### 2.1 Ensaio não destrutivos

Dentre as práticas de monitoramento das estruturas de concreto, métodos não destrutivos ou *nondestructive testing* (ENDs) apresentam vantagens significativas quando comparados com os métodos destrutivos (PEIXOTO, 2019). Entre as vantagens: permitem a realização de ensaio e re-ensaio *in loco*, não comprometem a aparência nem o desempenho do elemento estrutural analisado, além do aspecto sustentável do processo pela não geração de resíduos.

De acordo com Julliani (2014), podem-se relacionar propriedades do concreto com frequência de ressonância, propagação da onda ultrassônica e acústica, possibilitando a realização desse método em diversas partes da estrutura, resultando em uma melhor avaliação das condições e características. Segundo Evangelista (2002), dentre as propriedades do concreto que podem ser avaliadas por meio de ensaios ENDs, tem-se: resistência, dureza superficial, localização das armaduras, existência de vazios e fissuração.

Os ensaios não destrutivos têm como principal qualidade o fato que eles não provocam qualquer efeito na capacidade resistente do objeto estudado, sendo ele uma estrutura já realizada ou um corpo de prova. Segundo Machado (2005), os ensaios não destrutivos possuem uma grande versatilidade vendo que eles podem ser aplicados tanto em estruturas antigas como também em estruturas recentes.

De acordo com a norma BS1881:Part201 (BRITISH STANDARD INSTITUTION, 1986) os métodos não destrutivos são convenientes para monitoramento do desenvolvimento da resistência visando remoção de fôrmas, verificar a deterioração do concreto, avaliar durabilidade do concreto, entre outras particularidades.

ACI 228.2R (AMERICAN SOCIETY INSTITUTE, 1998), considera que os ENDs são aplicados no concreto por quatro razões:

- Propriedades do material, resume os métodos sugeridos de ENDs para determinar vários materiais propriedades de concreto endurecido.
- Avaliação a condição estruturais do concreto mais antigo para reparos.
- Controle de qualidade em novas estruturas.
- Soluções de problemas em novas construções.

Segundo Wolfgang (2013), as pesquisas sobre os ENDs vêm se desenvolvendo durante anos, porém sua utilização encontra-se carente de profissionais e mercado mesmo sendo ensaios vantajosos levando em consideração as características apresentadas anteriormente.

## **2.2 Método do ultrassom**

O método de velocidade de onda ultrassônica tem sido utilizado com sucesso para avaliar a qualidade do concreto. O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas através do concreto, entre o emissor e o receptor. Segundo a NBR 8802 (ABNT 2019), o comprimento percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação determina a velocidade das ondas longitudinais através de um componente de concreto. Isto permite o controle de qualidade e inspeção de estruturas de concreto, tendo como principais aplicações:

- determinação da homogeneidade do concreto ou entre os membros;
- a detecção da presença e extensão aproximada de fissuras, vazios e outros defeitos;
- monitoramento das mudanças que ocorrem com o tempo nas propriedades do concreto;
- a determinação da resistência à compressão do concreto;

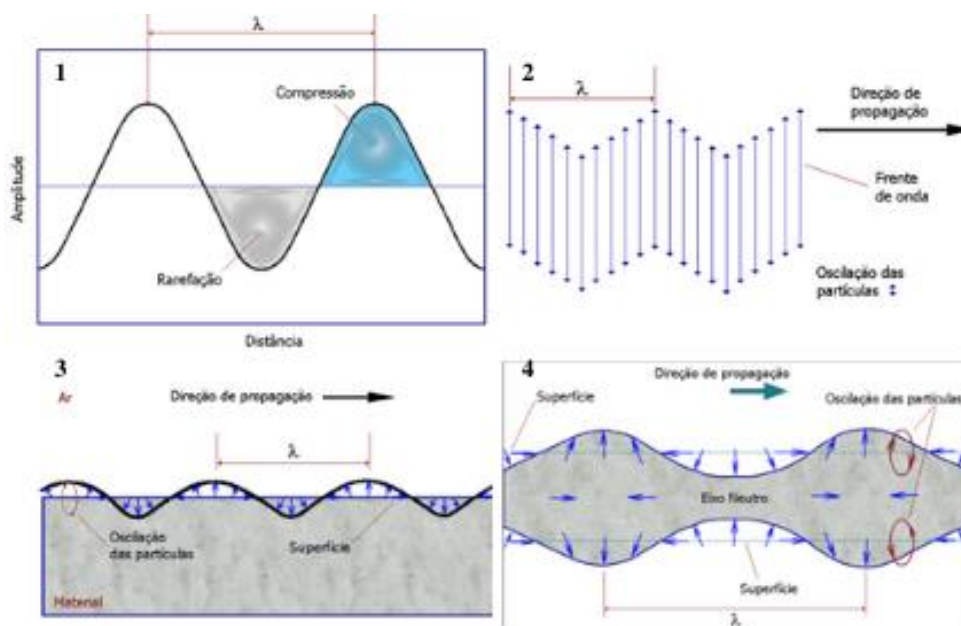
As variações obtidas em um conjunto de medições de velocidade de pulso ultrassônica (VPU) feitas ao longo de intervalos diferentes em uma estrutura refletem uma variação correspondente no estado do concreto.

## 2.3 Propagação das ondas ultrassônicas

São ondas mecânicas imperceptível para audição humana, chegando a frequências que ultrapassam 20 kHz, tratando-se de uma vibração capaz de propagar-se no ar e em diferentes meios por meio da oscilação das moléculas. Em materiais mais sólidos são criadas ondas longitudinais, transversais, superficiais, ondas de Placa, servindo para análise do concreto (BERUTTI, 2004).

Dependendo do objetivo, deve-se escolher o melhor tipo de propagação para que se adequa a análise, Figura 1 representa os tipos de ondas.

Figura 1 - 1: onda longitudinais; 2: onda transversais; 3: onda superficiais; 4: ondas de placa.



Fonte: Adaptada de Berruti, 2004.

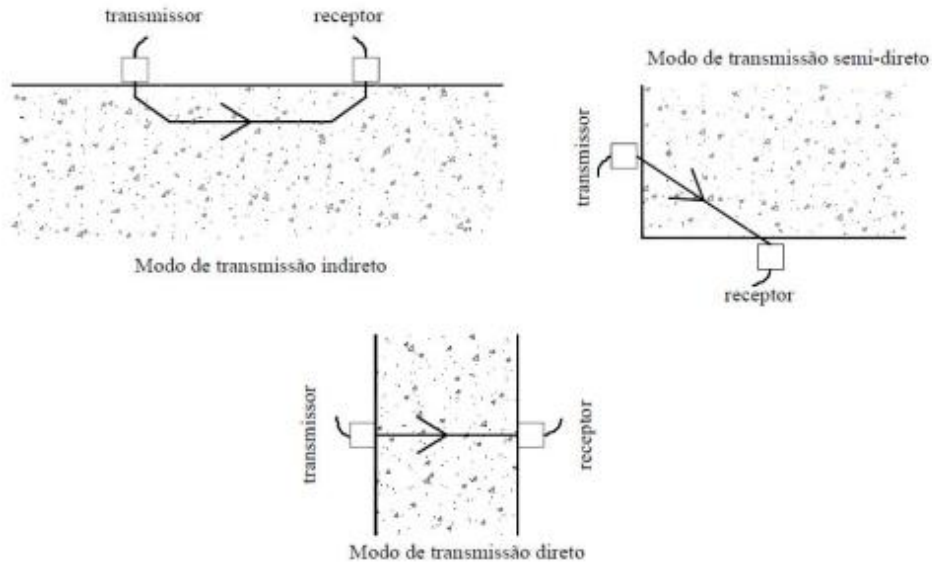
- Longitudinais: geram regiões compressão, sendo o tipo de onda mais utilizado para inspeção de materiais, se caracteriza por propagar-se como serie alternada de compressão e rarefações.
- Transversais: são ondas de cisalhamento, onde as partículas vibram de cima para baixo necessitando de uma forte interação entre as mesmas.
- Superficiais: também chamadas de onda Rayleigh se propagam em superfícies planas ou curvas.
- Ondas de Placa: também chamadas de ondas Lamb, se propagam em materiais que tenham apenas alguns comprimentos de onda de espessura, possui uma vibração complexa e seu movimento ainda não foi determinado com exatidão.

## 2.4 Modo de transmissão do pulso

Segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019) os transmissores e os receptores podem estar distribuídos de três diferentes maneiras (Figura 2):

- Transmissão direta: este é o arranjo mais recomendada, pois dessa forma as ondas são recebidas com maior intensidade. Devem ser dispostos em fases opostas do corpo de prova ou elemento estrutural.
- Transmissão indireta: utiliza um transdutor-emissor e quantos transdutor-receptor forem necessários, separados equidistantes. Esse arranjo é utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo de prova ou elemento, e esta face tem comprimento suficiente para propiciar o deslocamento de transdutor-receptor
- Transmissão semidireta: os transdutores estão em faces perpendiculares entre si. Deve ser utilizado quando não houver a possibilidade de acesso a duas faces opostas de um corpo de prova ou componente de concreto e não haver comprimento necessário.

Figura 2 - modos de transmissão dos pulsos.



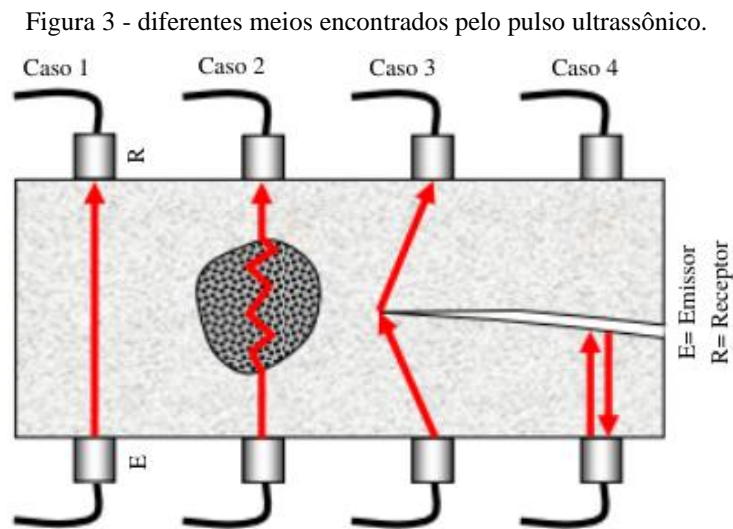
Fonte: ABNT NBR 8802 (2019b).

## 2.5 Meios que pulso ultrassônico pode encontrar

A velocidade de um pulso de ultrassom é influenciada pelas propriedades do concreto que determinam a sua rigidez elástica e sua resistência mecânica. Como o concreto envelhece ou se deteriora, as mudanças que ocorrem com o tempo em sua

estrutura são refletidas em um aumento ou uma diminuição, respectivamente, na velocidade de pulso. Isso permite monitorar as mudanças por meio de testes adequados em intervalos de tempo.

A Figura 3, representa diferentes meios que o pulso ultrassônico pode encontrar no momento do ensaio. Iniciando da esquerda para direita, observa-se o caso 1, o percurso entre os transdutores é através do concreto sólido, e o tempo de viagem é curto. O exemplo seguinte, caso 2, é onde há uns vazios internos, semelhante a um concreto poroso. O pulso é disperso enquanto propaga dentro da porosidade do concreto. Assim, o caminho da onda é mais longo e o tempo de propagação do pulso maior resultando em uma VPU reduzido. No caso 3, os transdutores estão localizados em um local em que a propagação direta é perto da borda de uma fissura. O pulso não propaga através do ar dentro do concreto, mas é capaz de atingir o transdutor receptor por desviar da borda da fissura. Tomando um caminho maior de propagação e aumentando a distância entre os transdutores, a aparente VPU é menor do que através do concreto sólido. No último caso, n°4, o pulso é refletido completamente pela fissura, e o tempo de propagação não é medido.



Fonte: Adaptada pelo autor, 2022.

## 2.6 Fatores que influenciam os resultados do ensaio ultrassom

De acordo com NBR 8802 (ABNT, 2019) e manual PUNDIT LAB (2017), diversos fatores influenciam na estimativa da resistência, condição da superfície, tipo e tamanho e outras características dos agregados graúdos, tipo de cimento, grau de



hidratação, relação água/cimento (a/c), forma e tamanho da peça a ser ensaiada, condições de cura, idade do concreto, presença de armaduras e teor de ar.

### 2.6.1 Qualidade de contato entre transdutor e o concreto

Sendo um dos detalhes mais críticos de se assegurar durante o ensaio, a ABNT NBR 8802 (2019) recomenda que os CPs ou elementos de concreto a serem ensaiados devem ter as superfícies planas, lisas e limpas. No caso de superfícies irregulares, se torna necessário a utilização de uma camada de pasta de cimento ou resina epoxídica, com espessura menor ou igual a 1 mm, a fim de possibilitar bom acoplamento com os transdutores. Havendo processos mecânicos: retificar o material, tomando cuidado para as vibrações não danifique o material a ser ensaio.

É importante ter o cuidado para não haver folga e ar entre os transdutores e o elemento estudado, para isso, são feito uso de substâncias conhecidas como acoplantes. Segundo Ribeiro (2017) entre os mais usados estão a água, o óleo, a glicerina e as graxas de silicone. Evitando dessa forma que contenha ar entre os mesmos ocasionando um erro devido à quantidade mínima de pulso que consegue ser transmitida pelo ar.

### 2.6.2 Tipo e tamanho e outras características dos agregados graúdos

Segundo Naik, Malhotra e Popovics (2004), diversos pesquisadores concluíram que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas varia com as características do agregado graúdo, tais como, porosidade, módulo de elasticidade, absorção de água, resistência a compressão, dentre outras (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Tendo em vista que o agregado graúdo ocupa grande parte do volume de uma peça de concreto e de que acordo com sua densidade, o concreto apresentará diferentes velocidades de propagação de onda. De acordo com Chung e Law (1983), é esperado que agregados graúdos mais densos produzam concretos com velocidades maiores. Na Tabela 1 encontram-se valores de velocidades para diferentes tipos de rochas normalmente utilizadas como agregados.

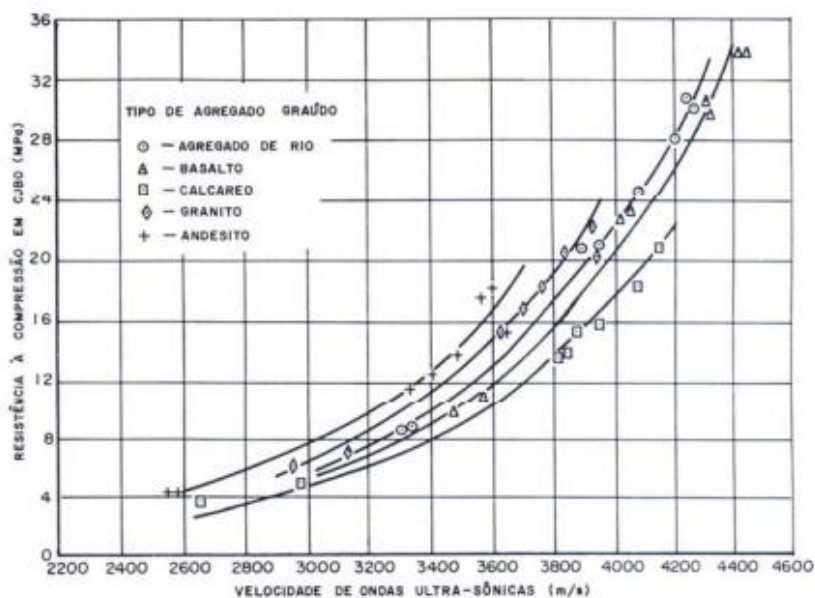
Tabela 1 - Intervalos de velocidade de ondas ultrassônicas para alguns tipos de rochas.

Tipo de Rocha	Velocidade (m/s)
Basalto	5270 – 6020
Dolomita	4370 – 6090
Granito	4000 – 5790
Calcário	3910 – 5780
Arenito	2550 – 5720
Quartzito	5570 – 5720

Fonte: Chung e Law, (1983).

Facaoaru (1961 apud HAMASSAKI, 1986) apresentou estudo com resultados semelhantes, quanto à influência do tipo de agregado graúdo utilizado, em um concreto com as seguintes características: relação a/c de 0,5, dimensão máxima característica do agregado de 15 mm e consumo de cimento da ordem de 300 kg/m<sup>3</sup> de concreto. A conclusão obtida foi a de que concretos com semelhantes resistências à compressão podem ter diferentes velocidades, em função dos tipos de agregados utilizados. Representação gráfica dos resultados está na Figura 4.

Figura 4 - Relação entre a velocidade de pulso e a resistência à compressão em concretos com diferentes tipos de agregados graúdos.

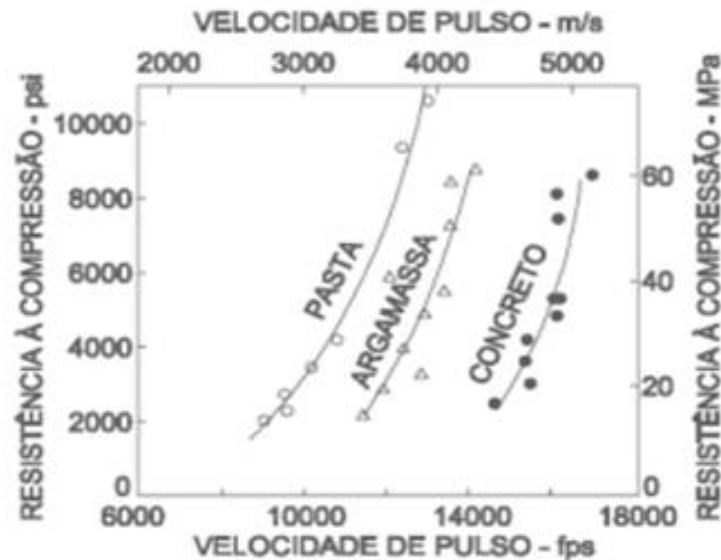


Autor: Facaoaru (1961) apud Hamassaki (1986).

Na Figura 5, pode-se notar que os agregados graúdos têm módulo de elasticidade e velocidade de propagação de onda maiores que a argamassa que por sua vez são maiores

do que o módulo e a velocidade na pasta de cimento (STURRUP et al, 1984 apud MEDEIROS, 2007).

Figura 5 - Efeito de proporção da mistura na correlação entre velocidade de pulso e a resistência a compressão.



Fonte: Sturup et al ,1984 apud Medeiros, 2007.

### 2.6.3 Condições de cura

A cura do concreto é realizada durante as primeiras etapas de endurecimento, sendo um procedimento que visa diminuir a evaporação da água empregada na preparação da mistura, permitindo a realização das reações necessárias de pega, o que promove a homogeneidade do material e hidratação do cimento. Palácios (2012) mostra que o tempo de cura é o segundo fator mais importante que influencia o valor da velocidade do pulso ultrassônico.

De acordo com Almeida (1993 apud MEDEIROS, 2007), os corpos-de-prova de concretos de alto desempenho, mesmo quando submetidos à cura por imersão em água, sofrem hidratação mais rápida e completa na superfície que no interior, por conta das baixas relações a/c.

Como a oferta de água interna ao corpo-de-prova é limitada para uma completa hidratação das partículas dos aglomerantes, a partir de certa idade, os concretos de alto desempenho podem sofrer os efeitos do auto dessecação (MEDEIROS, 2007). Surgindo

microfissuras e aumento do volume de vazios. Gradativamente vão sendo dessecados pelo próprio processo de hidratação dos aglomerantes, passando a serem responsáveis por alterações significativas da velocidade dos concretos (ALMEIDA, 1993 apud MEDEIROS, 2007).

Quando a cura do concreto não é realizada corretamente, a água evapora e causa o surgimento de fissuras e trincas impossibilita a ocorrência das reações de hidratação do cimento, ocorrendo o processo inverso, o que acarreta na redução das velocidades medidas.

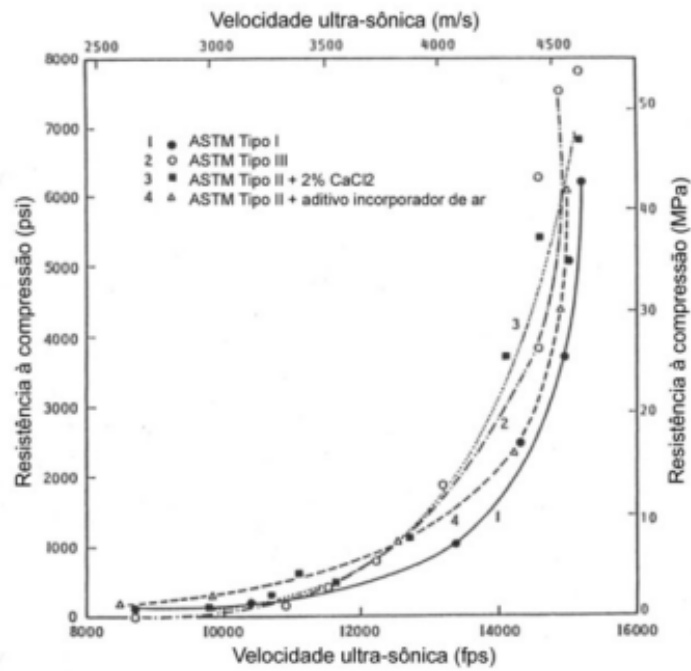
#### 2.6.4 Tipo de cimento e grau de hidratação

Os estudos não quantificam o impacto dessa influencia, segundo Rodrigues (2003 apud LORENZI, 2009), afirma que inúmeros autores são unânimes quanto a significativa influência do tipo e quantidade de cimento na relação entre a VPU e a resistência do concreto.

A taxa de hidratação do cimento é diferente para cada tipo de cimento, assim influenciando na propagação da VPU. Conforme o aumento do grau de hidratação, o módulo de elasticidade aumenta e por consequência a velocidade também aumentará (JONES, 1962 apud MEDEIROS, 2007).

Sturup et al (1984 apud MEDEIROS, 2007) analisaram vários tipos de cimento em diferentes idades quanto a velocidade ultrassônica e resistência à compressão. Como a curva representa o aumento da idade do concreto, esquerda para a direita, a conclusão obtida foi que nas idades iniciais são notáveis as mudanças no comportamento dos concretos moldados com diferentes tipos de cimento. Essas mudanças são mais discretas em idades avançadas, como pode ser visto na Figura 6.

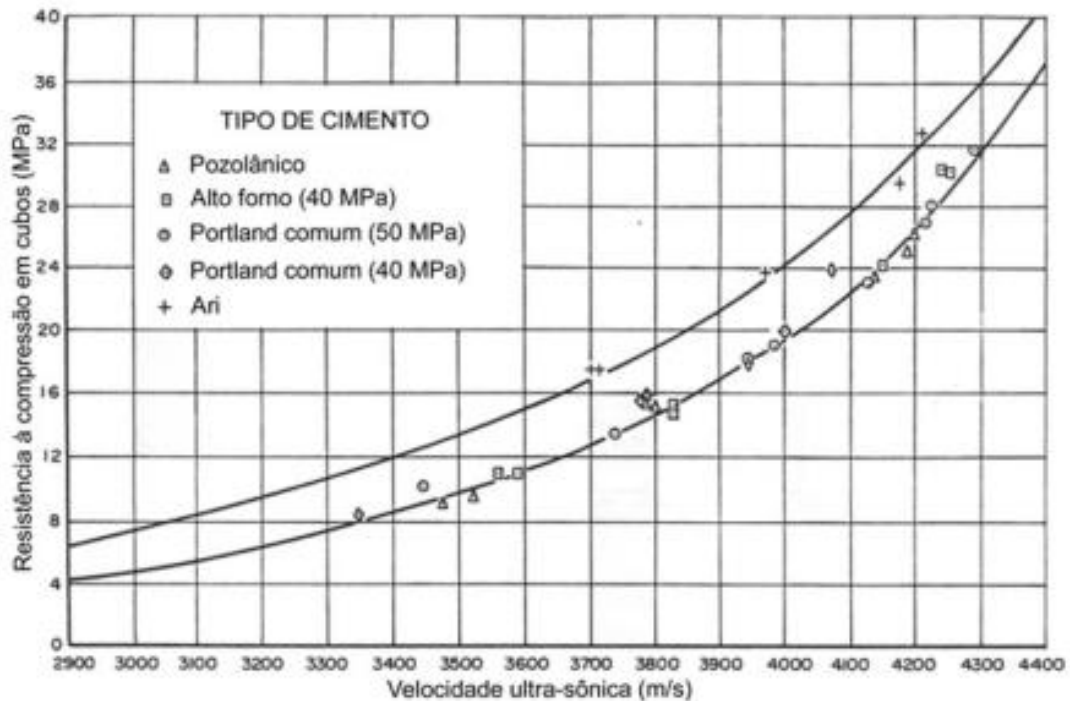
Figura 6 - Efeito do tipo de cimento e aditivo na correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.



Fonte: Sturup et al, 1984, apud Medeiros, 2007.

Facaoaru (1961 apud MEDEIROS, 2007), utilizou-se de cinco tipos de cimentos e fixando o consumo de  $300\text{kg/m}^3$  e relação a/c de 0,45, constatou que o tipo de alta resistência (ARI), apresentou resultados da ordem de 200 m/s maiores que os demais tipos estudados. As rápidas reações de hidratação podem ter ocasionado esse comportamento. A Figura 7 ilustra os resultados.

Figura 7 - Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade ultrassônica.



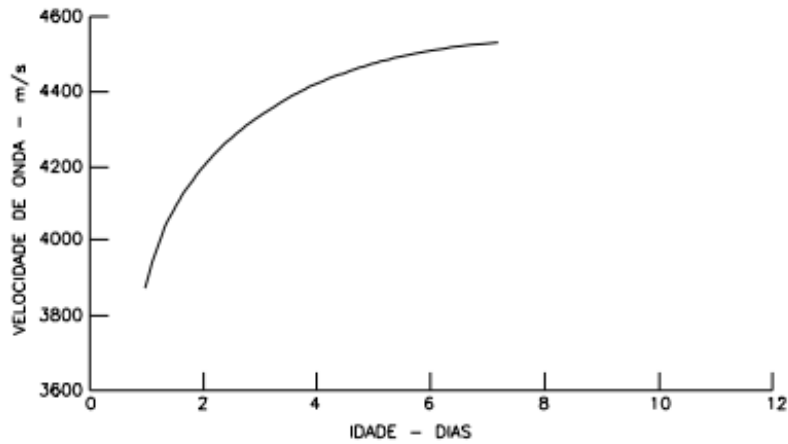
Fonte: Facaoaru (1961 apud MEDEIROS, 2007).

Evangelista (2002), comparou os cimentos CPIII e CPV-ARI, chegando à conclusão que a velocidade de propagação de onda ultrassônica da ordem de 5% maiores para o concreto moldado com o uso de cimento CPV-ARI.

### 2.6.5 Idade do concreto

Jones (1962 apud MEDEIROS, 2007), observou que o efeito da idade na velocidade no concreto é similar ao efeito da evolução da resistência a compressão. De acordo com Orchard (1978 apud MEDEIROS, 2007), nas primeiras idades há um rápido aumento da velocidade, enquanto que, nas idades mais avançadas este aumento é mais suave. Concluindo que a velocidade aumenta muito rápido nas primeiras idades e se estabiliza em poucos dias, tal comportamento se assemelha a evolução de resistência de um concreto feito com cimentos de alta resistência inicial. Segundo Medeiros (2007), esta evolução da velocidade geralmente atinge valores limites antes da resistência. A Figura 8 ilustra essa situação.

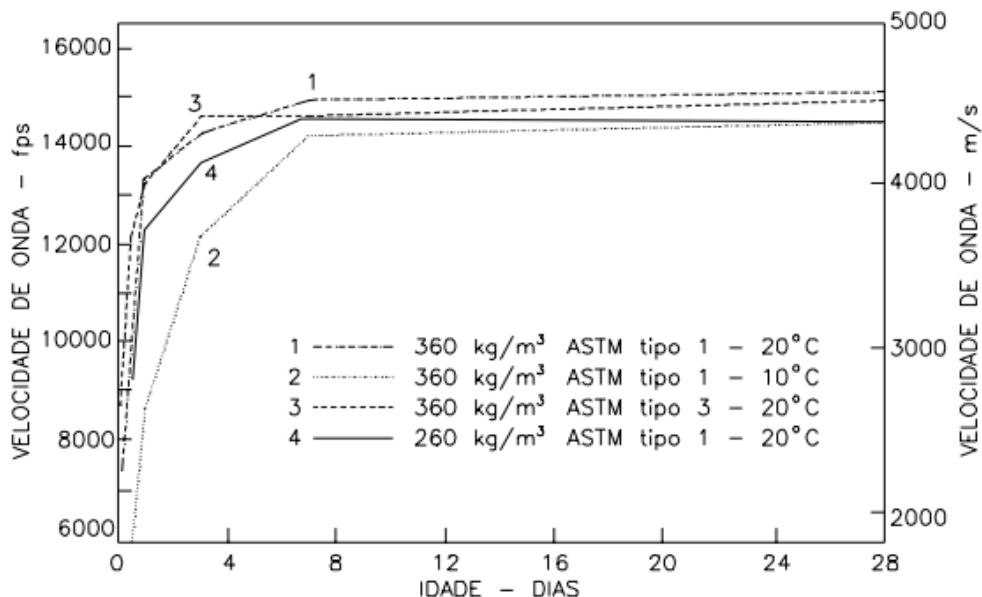
Figura 8 - Relação entre velocidade de onda e idade.



Fonte: Orchard, 1978, apud Medeiros, 2007.

Sturup et al (1984 apud MEDEIROS, 2007), realizaram uma série de ensaios buscando uma correlação entre a velocidade das ondas ultrassônicas e a resistência a compressão. A conclusão foi de que a velocidade pouco varia após os 7 dias, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Influência da idade na evolução da velocidade de propagação para concretos com diferentes tipos e teores de cimento submetidos a diferentes temperaturas de cura.

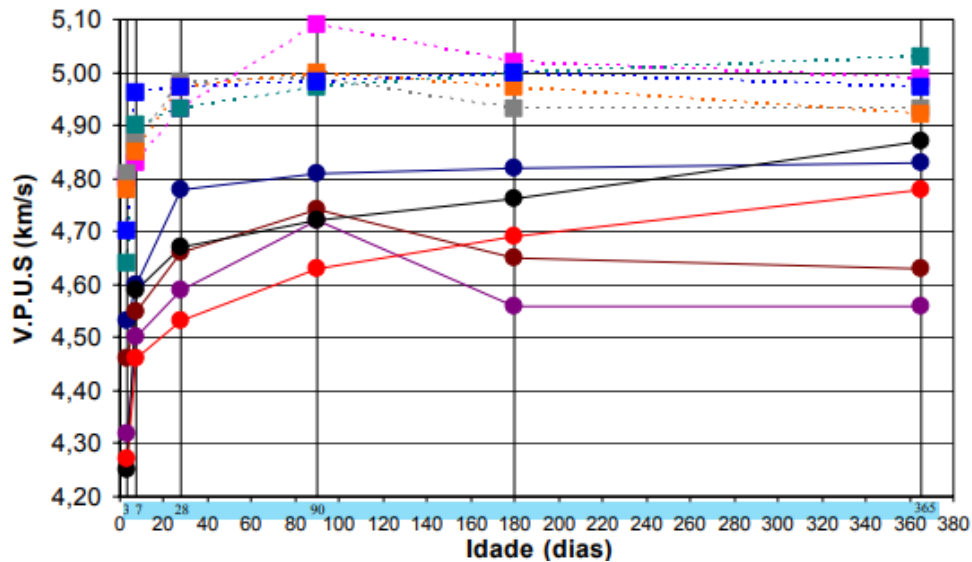


Fonte: Sturup et al, 1984, apud Medeiros, 2007.

A Figura 10, demonstra uma rápida evolução da velocidade nos primeiros dias e a evolução mais lenta e variada em idades mais avançadas. Também podendo ser notado

um decréscimo da velocidade para alguns tipos de concreto a partir dos 90 dias. Almeida (1993 apud MEDEIROS, 2007), através de pesquisas bibliográfica justifica o fenômeno devido a auto dessecação do concreto.

Figura 10 - Variação da velocidade com o tempo.



Fonte: Almeida, 1993, apud Medeiros, 2007.

#### 2.6.6 Forma da peça e tamanho da peça a ser ensaiada

Naik, Malhotra e Popovics (2004), afirmam que a distância percorrida pelo pulso ultrassônico, bem como sua frequência, o tamanho ou forma da peça a ser ensaiada não deve afetar o tempo de propagação, consequentemente, o valor da velocidade.

Segundo Danielleto (1986 apud WOLFGANG 2013), no momento que a peça é esbelta, a onda longitudinal torna-se dispersa e por meio disso, um grande número de modos de propagação são possíveis. Dessa forma, fazendo que seja muito difícil a definição do tempo do pulso ultrassônico e tende a aproximar a velocidade do pulso a velocidade numa placa ou barra infinitamente longa.

A NBR 8802 (ABNT, 2019), recomenda atentar para as dimensões mínimas da peça, em função da frequência dos tradutores e da velocidade de propagação do pulso ultrassônico para minimizar a influência no resultado final, Tabela 2.



Tabela 2 - Efeito das dimensões da peça na transmissão do pulso ultrassônico.

Frequência dos transdutores kHz	Velocidade do pulso ultrassônico (km/s)		
	vc= 3,5	vc= 4,0	vc= 4,5
	Mínima dimensão lateral recomendada (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2019).

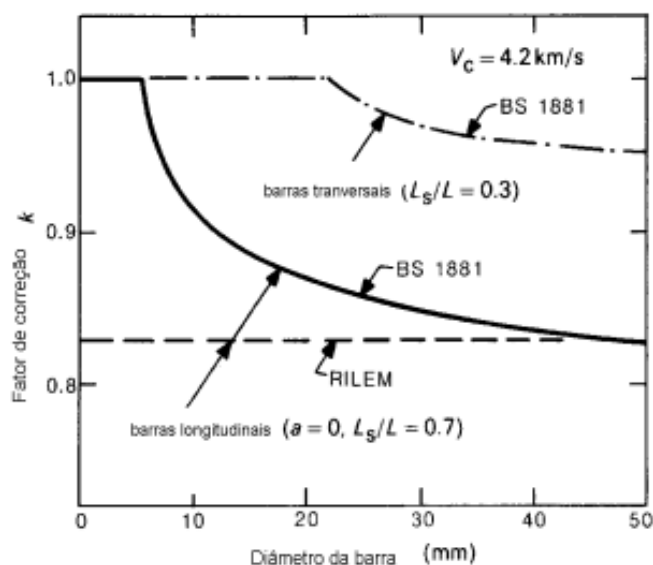
#### 2.6.7 Presença de armadura

Segundo Medeiros (2007), um dos principais fatores que podem influenciar a velocidade de propagação do pulso ultrassônico é a presença de armadura no concreto. Caso seja concreto armado, o pulso pode percorrer uma parte do percurso através do concreto e outra através do aço, dessa forma a velocidade obtida próxima das armaduras é superior a um concreto simples de igual composição (BUNGEY, 1984 apud MEDEIROS, 2007).

Foi observado que a velocidade de propagação da onda no aço é muito superior à do concreto. Naik, Malhotra e Popovics (2004) indicam que a velocidade no aço seja cerca de 40% a 70% maior que a velocidade no concreto, sendo que a velocidade no aço, para um meio sólido e infinito é da ordem de 5900 m/s. Entretanto, uma barra cilíndrica e de pequena seção transversal, comumente encontrada no mercado, a velocidade tem valor de 5200 m/s.

Através de pesquisas, diferentes autores recomendam que a realização dos ensaios de ultrassom seja distante das regiões onde contém presença de armaduras. Quando não for possível, devem ser aplicados fatores de correção em cima dos valores obtidos nos ensaios para que se possa estimar o valor de velocidade de propagação do pulso ultrassônico, (BUNGEY, 1984 apud MEDEIROS, 2007) (Figura 11).

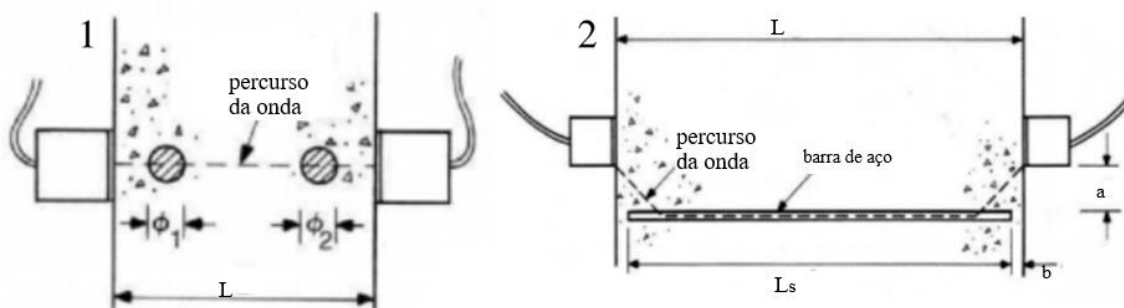
Figura 11 - Fatores de correção para barras transversais e longitudinais.



Fonte: Bungey, 1989 apud Evangelista 2002.

Segundo Bungey (1989 apud EVANGELISTA, 2002), a zona de influência das barras transversais ao percurso é significativamente menor quando comparado a das barras longitudinais, sendo que barras transversais de diâmetro inferior a 20mm não são detectadas em concreto onde tem velocidade acima de 4,0 km/s, porém para barras longitudinais com diâmetros superiores a 6 mm paralelas ao percurso das ondas, a influência é significativa. Figura 12.

Figura 12 - 1 - Influência de barras transversais, 2 - paralelas ao percurso da onda.



Fonte: Adaptada pelo autor apud Evangelista 2002.

Chung e Law (1983 apud WOLFGANG, 2013), constataram que casos a posição das barras sejam paralelamente ao pulso e seu diâmetro maior que 10mm, a influência

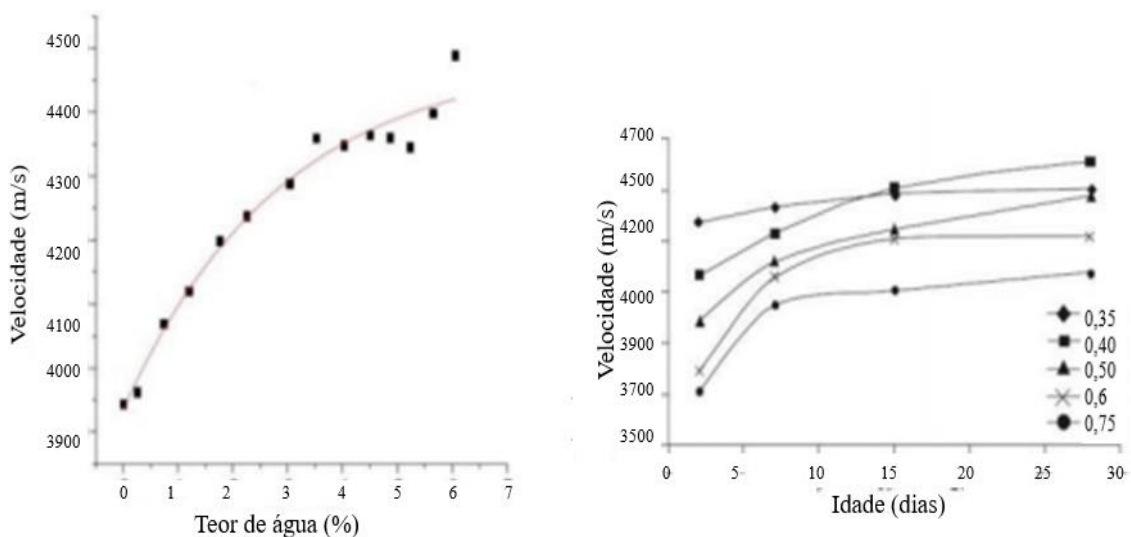
torna-se significativa, porém, caso a barra ficar posicionada transversalmente ao pulso e a quantidade da mesma for pequena em relação à distância entre os transdutores, não terá uma influência significativa.

### 2.6.7 Relação água/cimento

De acordo com Nogueira e Willam (2001, apud LORENZI, 2009), a velocidade do pulso ultrassônico através de um material elástico está relacionada com a densidade, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, entretanto, nenhuma destas grandezas está relacionada com a resistência à compressão do material. Dessa forma, colocando em questão a necessidade de levar em consideração fatores como a relação  $a/c$ , no qual influenciam de forma relevante a valor da resistência a compressão.

Palacios (2012), realizou estudos relacionando a velocidade de propagação do pulso ultrassônico com o fator  $a/c$ . Obtendo resultados que demonstram quanto maior a relação  $a/c$ , menores eram as velocidades de propagação, justamente porque a adição de água além do limite especificado pode aumentar o abatimento acima do limite especificado (Figura 13).

Figura 13 - Velocidade de propagação da onda e relação água/cimento.



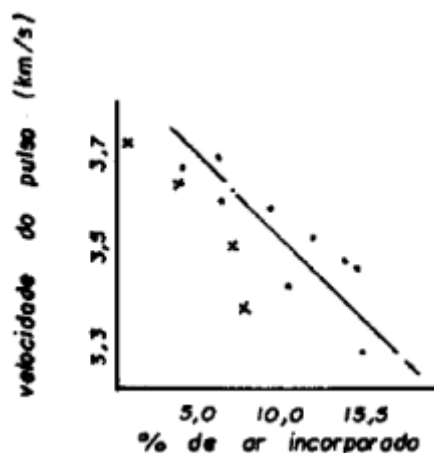
Fonte: Adaptada, Palacios, 2012.

### 2.6.8 Teor de ar

Segundo Nozaki (1979 apud WOLFGANG, 2013), realizou ensaios nos quais as peças tinham uma variação do teor de ar de 0,4% a 18%, com o uso de aditivo, conforme

há uma maior incorporação de ar no concreto, menor fica a sua velocidade de pulso. Observou que a variação de ar incorporado foi de 10,5% o que significa que houve um aumento de 200% em cima da taxa inicial de 5%. Já na VPU, houve uma variação de 0,3 km/s o que implica em uma diminuição de 10,8% do seu valor inicial de 3,7 km/s. Demonstrando que a velocidade do pulso tem uma diminuição não proporcional ao aumento da porcentagem de ar incorporado, enquanto há o triplo de ar incorporado inicialmente, a velocidade diminui somente um décimo do seu valor inicial, podendo ser notada na Figura 14.

Figura 14 - Variação da velocidade do pulso com o aumento do teor de ar no concreto.



Fonte: Nozaki, 1979, apud Wolfgang, 2013.

## 2.7 Método do esclerômetro

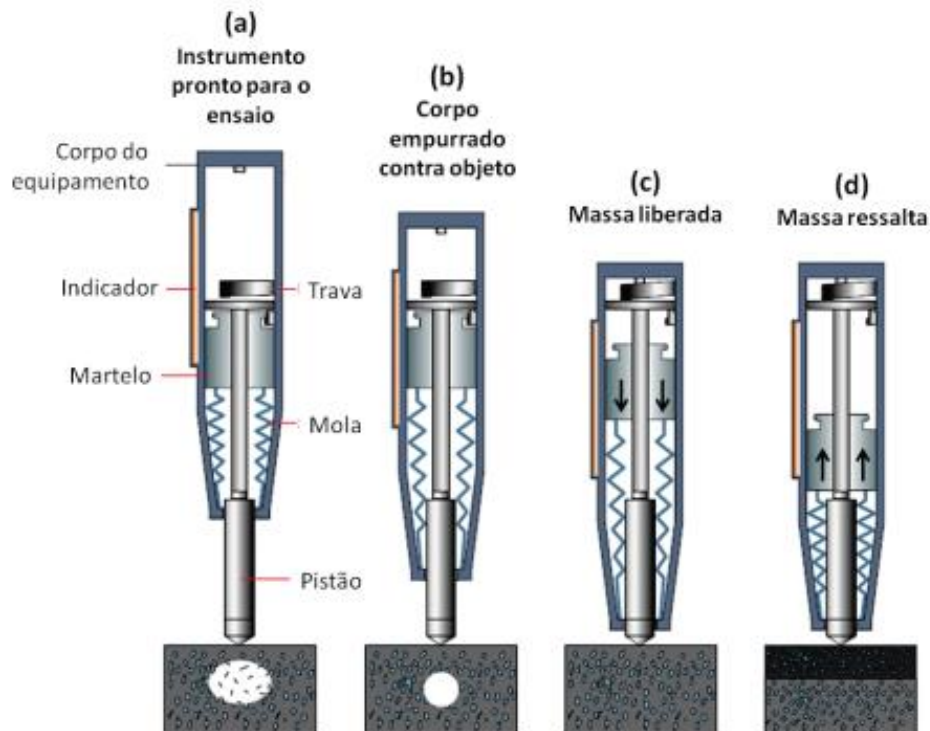
Essencialmente, o método avalia o valor aproximado da dureza à compressão superficial do concreto endurecido e de sua uniformidade. O esclerômetro de reflexão de Schmidt tem sido usado em vários países por muitos anos, de maneira padrão, com uma energia de impacto e medir o rebote ou a reflexão de uma massa padrão após o impacto no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

## 2.8 Ensaio de esclerometria

Segundo Peixoto (2019), a realização do ensaio de esclerometria consiste em uma massa martelo que, impulsionada por mola, choca-se com a área a ser ensaiada. No início do ensaio, o pistão é colocado em contato com a superfície de concreto com a mola encolhida (Figura 15 - a). A seguir, o corpo externo do instrumento é pressionado contra

a superfície do concreto, fazendo com que a mola se estenda (Figura 15 – b). A trava é liberada quando a mola está inteiramente estendida, e o martelo se move em direção à superfície de concreto (Figura 15 – c). O martelo ocasiona um impacto sobre o pistão, e a massa controlada pela mola sofre um recuo após o choque (Figura 15 – d). Dessa forma é registrado em uma escala de medida, gerando um valor numérico para reflexão do martelo (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

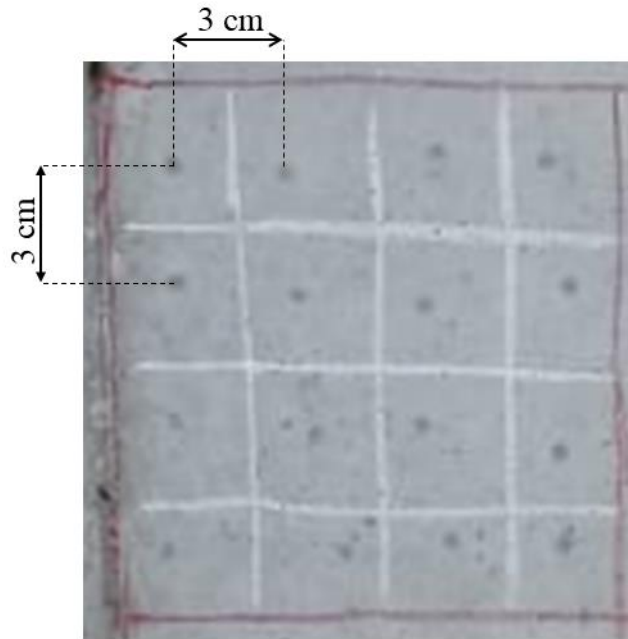
Figura 15 - Operação do esclerômetro de reflexão.



Fonte: Téchné, 2009 apud Peixoto 2019.

A ABNT NBR 7584 (2012), recomenda desenhar um reticulado e aplicar o esclerômetro nas áreas limitadas, devendo ser efetuados 16 impactos. Não é permitido mais de um impacto sobre um mesmo ponto, caso aconteça, o segundo valor lido não pode ser considerado no cálculo dos resultados, Figura 16.

Figura 16 - Área de ensaio e pontos de impacto.



Fonte: Autor (2022).

É necessário cuidados especiais com área de ensaio com dimensões inferiores a 100 mm na direção do impacto, por não serem suficientemente rígidos e provocarem a interferência de fenômenos de ressonância, vibração e dissipação de energia no resultado obtido, pode-se ensaiar colocando um apoio de encontro à face oposta à área de ensaio, (ABNT NBR 7584, 2012).

## 2.9 Vantagens e desvantagens

O equipamento é de simples operação, leve, barato e sendo que uma grande quantidade de dados pode ser obtida rapidamente. Os danos que podem ser causados na superfície são praticamente nulos. Deixando somente pequenas marcas podem ser causadas nas avaliações em concretos novos ou de baixa resistência (BS1881:Part202, 1986).

De acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012), estabelece o uso do ensaio para os seguintes casos:

- a) Verificação da homogeneidade do concreto;
- b) Comparação de peças de concreto, tendo para isso um referencial;
- c) Estimar a resistência à compressão do concreto, desde que obtida uma curva de correlação confiável com concreto fabricado com materiais

locais e atentar para influência do tipo de cimento, agregados, condições de umidade, carbonatação, superfície entre outra.

Alguns fatores como o grau de saturação, que minora o índice esclerométrico, ou a carbonatação, que majora o índice esclerométrico, com o passar do tempo atingem a camada superficial do concreto, influenciando pouco nas camadas mais profundas (PEIXOTO, 2019). Segundo NBR 7584 (ABNT, 2012), esta é a principal limitação desse ensaio, pois os resultados do esclerômetro indicam as propriedades da camada superficial do concreto com cerca de 20 ou 30mm de profundidade. Deve-se evitar impactos sobre armaduras, bolhas e áreas similares, que não representem o concreto em avaliação.

## **2.10 Fatores que influenciam o ensaio de esclerometria**

A NBR 7584 (ABNT 2012), afirma que os principais fatores que influenciam os resultados do ensaio esclerométrico são: tipo e teor de cimento, tipo e dimensão dos agregados, superfície de contato, condições de umidade da superfície, carbonatação da peça concretada, idade do concreto, operação do esclerômetro.

### **2.10.1 Tipo e teor de cimento**

A NM 78 (ABNT, 1996), relata que o consumo de cimento por metro cúbico não tem influência significativa na correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão. Quanto ao tipo de cimento, esta norma relata que concretos feitos com cimento aluminoso ou cimento supersulfatado (80% a 85% de escória de alto forno + 10% a 15% de sulfato de cálcio) apresentam correlações diferentes das obtidas com cimento portland comum.

A BS 1881: 202 (1986) ressalta que o concreto com alto conteúdo de cimento gera índices esclerométricos menores que aqueles concretos com baixo conteúdo de cimento. Contudo, também afirma que a mudança no teor de cimento pode levar a um erro de  $\pm 10\%$  na estimativa da resistência, e que concretos com teores elevados de cimento têm índices esclerométricos menores do que concretos de mesma resistência, porém com teores de cimento menores.

Segundo Evangelista (2002), através de uma análise estatística de valores de índices esclerométrico de concretos com cimento CP III e CP V e diferentes relações de

a/c, constatou que, para uma mesma idade e relação a/c, os maiores valores foram encontrados em concretos com cimento CP V.

### 2.10.2 Tipo e dimensão de agregado

Diferentes tipos de agregados podem fornecer concretos com a mesma qualidade, porém com diferentes índices esclerométricos. Quando se empregam agregados leves ou pesados, esta variação é ainda mais acentuada (ABNT NBR 7584, 2012).

Yun et al (1988 apud EVANGELISTA 2002), analisaram as composições com agregados de  $D_{máx} = 25\text{mm}$  e de  $D_{máx} = 40\text{mm}$ , chegando a uma correlação deste ensaio com a resistência à compressão é mais influenciada pelo teor do agregado graúdo no concreto do que pela dimensão máxima deste.

De acordo com o ACI 228 1R-89 (1988), o tipo de agregado influencia a dureza do concreto, contendo a necessidade de desenvolvimento de curvas de correlação entre resistência e índices esclerométrico de acordo com o tipo de agregado que foi utilizado no concreto da estrutura que está sendo investigada.

Evangelista (2002) utilizou em sua pesquisa diferentes tipos de agregados graúdo e constatou que, os concretos com brita de gnaiss apresentam índices esclerométricos em torno de 5% a 58% maiores do que os concretos com brita de traquito, a diferença se torna maior na idade de três dias em concretos com relação a/c menores.

De acordo com a NM 78 (ABNT, 1996), não podem ser comparados resultados de ensaios em concretos preparados com agregados de diferentes composições petrográficas.

### 2.10.3 Superfície de contato

O tipo de acabamento da camada superficial influencia o índice esclerométrico, Qasrawi (2000 apud EVANGELISTA 2002) ressalta que pode ser necessário preparar a superfície com uma pedra abrasiva tornando-a mais lisa. Superfícies desempenadas são, em geral, mais duras que as superfícies que não são.

Segundo Palacios (2012), as vantagens observadas de dar um tratamento com retificadora nas superfícies antes de realizar o ensaio de esclerometria são:

- a) Remoção de poros na camada de argamassa sobre a superfície;
- b) Tornam-se visíveis defeitos da estrutura que possam afetar os resultados;



- c) A estrutura do concreto (agregados e pasta) se torna mais visível;
- d) Uma camada superficial de concreto carbonatado pode ser removida.

#### 2.10.4 Carbonatação

A influência da carbonatação na dureza da superfície do concreto é significativa e promove a superestimação da resistência. Devem ser definidos coeficientes corretivos, a fim de minimizar o efeito da carbonatação (ABNT NBR 7584, 2012).

A carbonatação do concreto que atinge, com o passar do tempo, uma certa camada superficial da estrutura, é um limitante uma vez que pode influenciar nos índices esclerométricos. Segundo a NBR 7584 (ABNT 2012), cita que em casos extremos, os valores estimados para a resistência do concreto, quando há carbonatação, podem superar os valores reais em mais de 50 %, em função da espessura da camada carbonatada.

#### 2.10.5 Idade do concreto

Segundo a BS1881:Part202 (1986), são necessárias curvas de calibração próprias para diferentes condições de cura. Entre as idades de 3 dias a 3 meses não é necessário considerar o efeito da carbonatação.

Bungey (1989 apud EVANGELISTA 2002) afirma que a relação entre dureza e resistência varia com o tempo e que variações no endurecimento inicial, cura e condições de exposição do concreto influenciam a correlação. E acrescenta que as condições de umidade do concreto podem ser afetadas pelo método de cura adotado.

Segundo a NBR 7584 (ABNT 2012), a influência da idade na dureza superficial do concreto, em relação à dureza obtida nas condições normalizada para 28 dias, deve-se a fatores, como a diferença de cura, carbonatação e outros. Portanto, estas correlações não são automaticamente válidas para idades superiores a 60 dias e inferiores a 14 dias, sendo necessário o emprego de fatores específicos para cada concreto em questão, corrigindo-se quando necessário.

### **2.11 Parede de concreto**

O sistema, basicamente, emprega um jogo de fôrmas, tela de aço e o concreto que irá constituir a parede (CORSINI, 2011). Segundo Nunes (2011), esse sistema vem conquistando o mercado brasileiro, oferecendo todas as vantagens de uma metodologia

construtiva voltada à produção de edificações em larga escala. Observando atentamente os casos de interferências entre sistemas e visando sempre a rápida execução.

### 2.11.1 Concreto

O concreto é o principal componente do sistema parede de concreto, pois é ele que responde pela durabilidade e qualidade do sistema estrutural juntamente com a armadura (SANTOS, 2013). Devido à espessura mínima das paredes serem de 10 cm e com uma tela centralizada, exige do concreto grande trabalhabilidade, a NBR 16055 (ABNT, 2012), recomenda para a escolha do concreto os seguintes fatores:

- resistência à compressão para desforma;
- resistência à compressão característica aos 28 dias ( $f_{ck}$ );
- classe de agressividade do local de implantação da estrutura;
- trabalhabilidade, medida pelo abatimento do tronco de cone ou pelo espalhamento do concreto.

## 2.12 Estudos pertinentes

Muitos estudos foram realizados sobre a possibilidade de utilizar os END's para analisar possíveis problemas ou prevenir danos estruturais. Nessa seção será apresentado alguns estudos utilizando os métodos abordados nesse trabalho com objetivo de analisar as estruturas de forma que não acarretem danos.

### 2.12.1 Medeiros (2007)

Medeiros (2007), utilizou o ensaio de ultrassom para verificar a sensibilidade do método em detectar fendas superficiais e a eficácia de injeções em elementos de concreto armado. O autor por meio de moldes de concreto confeccionados em laboratório com fendas perpendiculares à superfície, provando que através do modo de transmissão indireta consegue estimar a profundidade de fendas superficiais perpendiculares à superfície e indicando VPU variando até no máximo 10%.

Para concluir seu segundo objetivo, utilizou argamassa pobre e espuma poliuretano, porém o pulso não atravessa este caminho poroso e continua desviando da fenda por baixo da mesma. Material mais adequado para reparo seria resinas epóxi ou

apenas selada superficialmente, dessa forma o pulso desviará pelo menor caminho passando pelo material selante rígido, mesmo que a espessura deste material selante seja pequena, menor do que 2,5 cm.

#### 2.12.2 Wolfgang (2013)

Wolfgang estudou o comparativo da resistência de CPs utilizando o método do ultrassom e a compressão axial e a avaliação do concreto com base na VPU, através de curva de correlação entre os resultados, concluiu que não são ideais para representar uma correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão do concreto. Obtendo valores de índices de correlações insuficiente, concluindo que, quanto maior é o número de informações sobre o concreto a ser estudado maior será a precisão dos seus resultados, dessa forma é possível melhorar as curvas e equações de correlação.

#### 2.12.3 Evangelista (2002)

Evangelista (2002), estudou a resistência a compressão do concreto utilizando diferentes END's. Através de 960 ensaios de resistência à compressão, 960 de ultrassom e 8640 medições de índice esclerométrico, constatou que nem sempre o fator que influi significativamente na resistência à compressão influência de maneira relevante a grandeza medida no ensaio não destrutivo e vice-versa. Verificou-se que a regressão múltipla aplicada a dados de dois tipos de ensaios não destrutivos leva à estimativa da resistência à compressão com maior acurácia.

#### 2.12.4 Peixoto (2019)

Peixoto (2019), utilizando CPs cilíndrico e prismático realizou uma análise da correlação dos ensaios de ultrassom e esclerometria com a resistência a compressão do concreto. Constatou que a partir dos dados fornecidos através dos ensaios não destrutivos, como o de ultrassom e esclerometria, podem ser feitas inferências acerca do  $f_{ck}$  do concreto, fato que é possibilitado através das curvas de correlação e das suas equações. Em seus estudos, obteve índices de correlações satisfatórios para o concreto analisado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

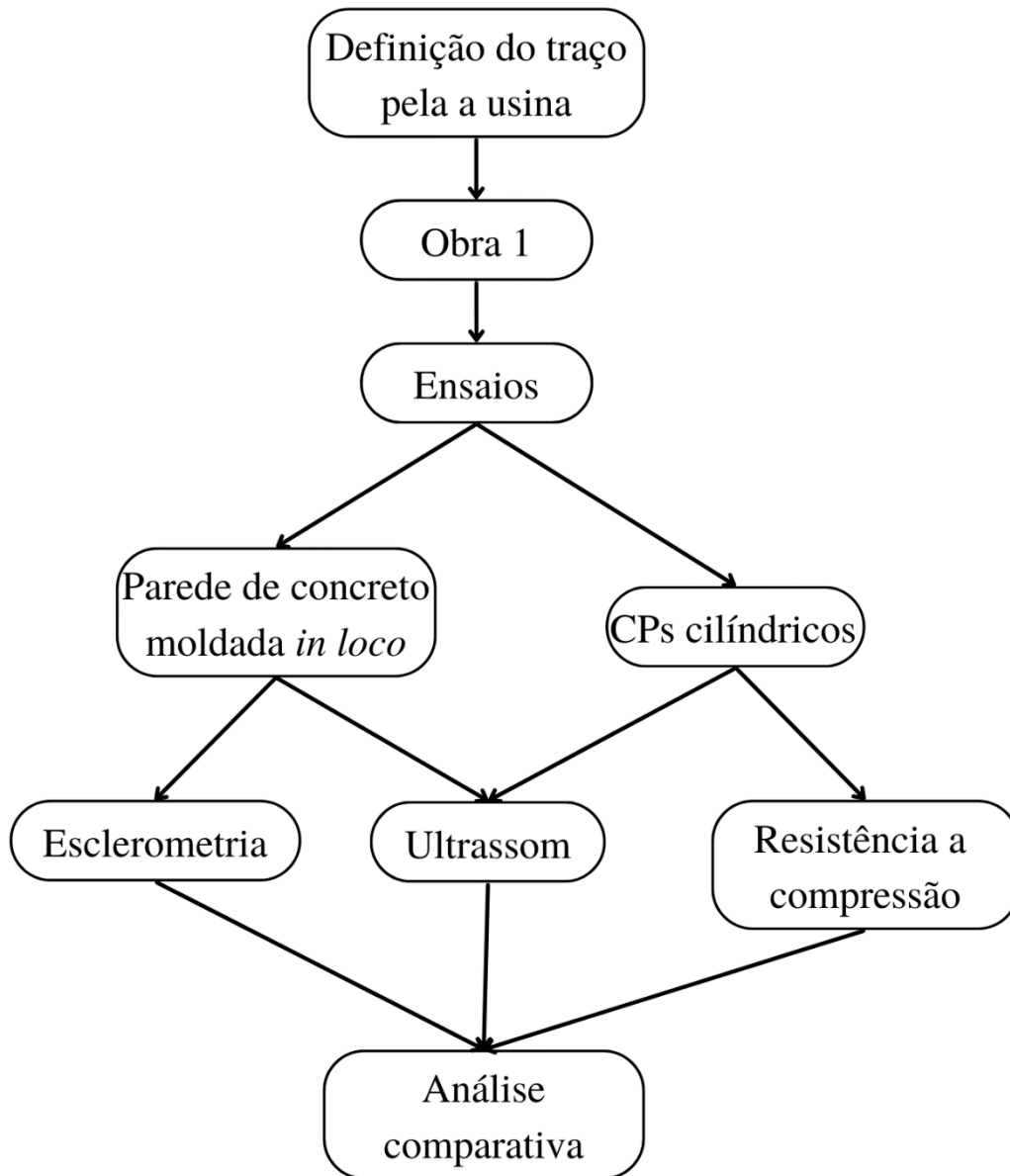
Essa presente seção tem como objetivo abordar método, materiais e equipamentos adotados durante o processo experimental para determinar a resistência à compressão e as grandezas medidas por meio da realização de ensaios não destrutivos.

Os modelos experimentais de pesquisas científicas podem ser classificados como a materialização de uma parcela da realidade, através de uma representação simplificada de uma ocorrência recente ou passada. Para isso, deve estabelecer uma boa precisão dos resultados, por meio de uma comprovação prévia e pela determinação das limitações em relação da realidade que irá representar (FERREITA; HOCHMAN; BARBOSA, 2005).

Para comparar os valores dos índices encontrados através dos ensaios ENDS, foram realizados os ensaios de esclerometria e o de ultrassom *in loco*, bem como o ensaio de resistência à compressão realizados nos corpos de prova cilíndricos moldados para o traço de fck de 25MPa.

De forma esquemática, a Figura 17 ilustra o fluxograma relacionando as principais etapas a seguidas nesse tópico.

Figura 17 - Esquema Experimental.



Fonte: Autor (2022).

### 3.1 Caracterização dos materiais

Como visto no referencial teórico, os materiais podem influenciar de forma direta no comportamento das amostras estudadas, dessa forma, para realizar uma asserção na análise desse estudo experimental, torna-se importante determinar e caracterizar os materiais que serão empregados na realização dos traços das amostras de concreto. Além disso, é necessário ter entendimento e saber classificar os materiais e suas propriedades de acordo com as normas técnicas da ABNT vigentes.

### 3.1.1 Composição do traço

O concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova foi produzido e fornecidos por uma concreteira da região, referenciada no presente trabalho por Empresa A, sendo ele um concreto autoadensável. Foi dosado com o intuito de obter uma resistência característica do concreto a compressão de 25MPa aos 28 dias.

O concreto ensaiado possui um fator a/c de 0,55 e os materiais utilizados foram: cimento Portland CPV + agregado graúdo (brita) + agregado miúdo (areia) + água + aditivo. A Tabela 3 contém a quantidade desses materiais.

Tabela 3 - Traço empregado.

<b>TRAÇO EMPREGADO</b>						
Materiais	Cimento (kg)	Areia média (m <sup>3</sup> )	Areia fina (m <sup>3</sup> )	Brita 0 (m <sup>3</sup> )	Aditivo litro (L)	Água (L)
Utilizado	410	0,372	0,246	0,567	5,467	225,5

Fonte: Autor, 2022.

Os agregados graúdo e miúdo, foram caracterizados por meio dos ensaios de granulometria e massa específica, de acordo com as respectivas normas NBR NM 248 (2003) Agregados – Determinação da composição granulométrica, e NBR NM 53 (2009) Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Realizado pela Empresa A para validar seus traços.

## 3.2 Método

Nessa seção constam os procedimentos realizados para a obtenção dos resultados que foram analisados para fins comparativos entre a resistência a compressão e os ENDS. Além disso, apresenta-se como foi realizado a moldagem e preparo das peças ensaiadas.

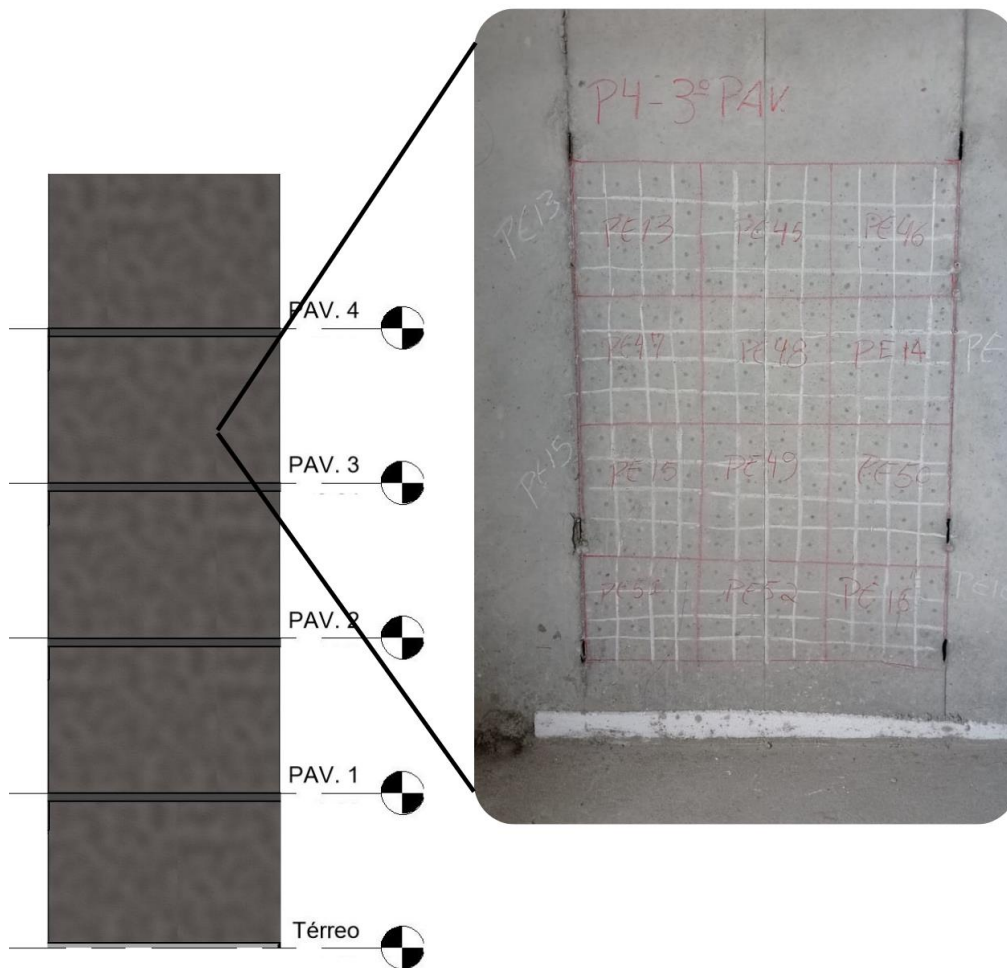
### 3.2.1 Área ensaiada *in loco*

Para realizar os ensaios supracitados, utilizou-se uma obra da região que está empregando o método de parede de concreto, no qual, este sistema construtivo ganha espaço no atual mercado da construção civil. Para garantir que o concreto utilizado seria o mesmo, tanto para os ensaios *in loco* e em laboratório, partiu-se do pressuposto que, a concretagem deve ser iniciada por a parede mais central e do lado oposto do caminhão lança de concreto, logo após, parede oposta e seguindo essa sequência até a última parede

e laje do pavimento (pav.), dessa forma rastreamos o primeiro caminhão betoneira da concretagem dos pavimentos selecionados, no qual, preenche 100 centímetro (cm) de altura.

A Figura 18, demonstra um corte vertical da parede de concreto concretada com o primeiro caminhão betoneira do dia, com um corte mais detalhado sobre a área ensaiada, no qual foram iniciadas a 20 cm da laje para evitar interferência nos ensaios, formando um retângulo 80 cm de altura por 60 cm de comprimento. Vale ressaltar que, repetiu-se essa mesma área de ensaios nos pavimentos do térreo, 1º, 2º, 3º, 4º.

Figura 18 - Corte vertical dos locais dos ensaios.



Fonte: Autor, 2022.

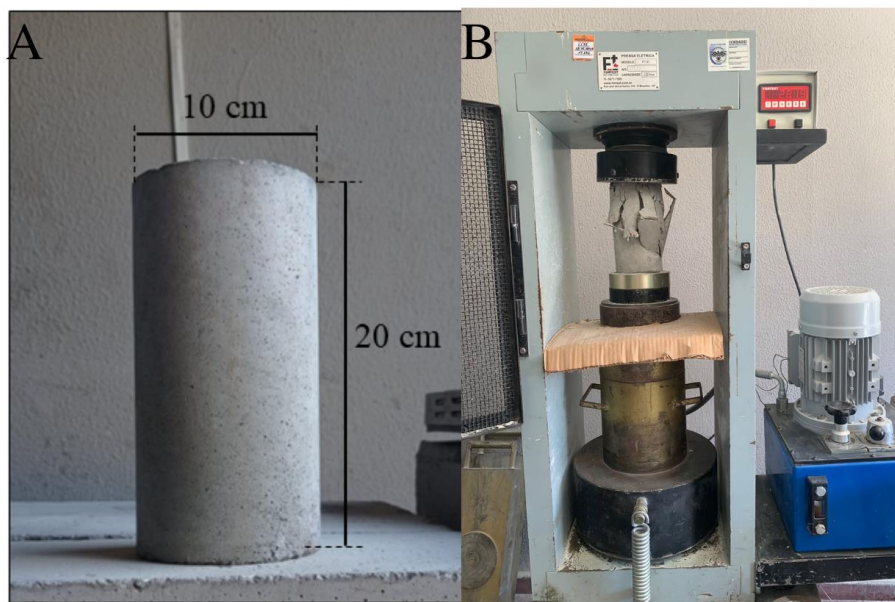
### 3.2.2 Ensaio resistência à compressão nos corpos de prova

Normalizado pela NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo esse processo realizado em fôrmas metálicas, evitando o risco de interação fôrma-concreto. Por ser um concreto

autoadensável é dispensado o adensamento e realizado o lançamento do mesmo nas formas. A desforma dos CPs ocorreram na idade de um dia, permanecendo em submersão em cura úmida (imersão em água + cal), seguindo a normativa de cura regida pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Para os ensaios de resistência a compressão, foram moldados 8 CPs cilíndricos divididos para cada pavimento, sendo 2 pares para as idades de 1, 7, 28 e 94 dias com dimensões de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, como pode ser observado na Figura 19 - A.

Figura 19 – A- Corpos de provas cilíndrico; B - Ensaio de resistência a compressão.



Fonte: Autor (2022).

Os ensaios de resistência à compressão nos CPs cilíndricos foram realizados em conformidade com a NBR 5739 (ABNT, 2018), para esse ensaio, levando em consideração o maior resultado entre o par, como resistência do concreto no estado endurecido para cada idade analisada. Foi utilizada a prensa elétrica FN 01, com capacidade de 200 toneladas (ton), demonstrado na Figura 19 – B, e todos os corpos de provas foram retificados para nivelar os topos dos CPs.

### 3.2.3 Ensaio de esclerometria

A execução do ensaio foi de acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012), antes do ensaio, foi realizado a calibração do esclerômetro suíço de reflexão Silver Schmidt da



Langry, utilizando-se uma bigorna de aço (Figura 20), realizando 10 leituras, dessa forma, calculando o coeficiente de correção (K).

Figura 20 - Calibração do esclerômetro com a bigorna.



Fonte: Autor, 2022.

Para realização da esclerometria, primeiro ensaio não destrutivo, efetuamos o reticulado (Figura 16) em uma área de 20 cm por 20 cm, totalizando 12 por pavimento, exceto o 4º pav., no qual foram realizados 4 ensaios. Vale salientar que, as paredes de concreto têm espessuras de 10 cm, dessa forma não há interferência por fenômenos de ressonância, vibração e dissipação de energia nos resultados obtidos.

### 3.2.4 Ensaio de ultrassom

Esse ensaio segue a normativa do método do ultrassom representado segundo as prescrições da NBR 8802 (ABNT, 2019) e utilizado o equipamento Pundit Lab com transdutores de 54 kHz e diâmetro de 50 mm, no qual, foi calibrado antes da realização de cada ensaio com auxílio de barra de referência Figura 21. Com o objetivo de garantir o perfeito contato entre os transdutores e facilitar a transmissão do pulso ultrassônico pela superfície dos CPs e paredes de concreto, foi utilizado o gel condutor incolor para ultrassom.

Figura 21 - Calibração dos transdutores.



Fonte: Autor, 2022.

Para a parede concreto, foram realizados 8 pontos de forma indireta e dispostos a cada 10 cm na horizontal, com o transmissor fixo e o receptor variando a cada 5 cm, dessa forma, realizando 56 leituras por pavimento. A BS1881: Part 203 (1986) recomenda a moldagem de no mínimo 3 corpos de prova para cada betonada, devido às limitações de materiais, foram moldados 2 CPs para 94 dias e realizado 1 medição na direção longitudinal.

A distribuição dos transmissores e os receptores foram de forma indireta nas paredes de concreto e de forma direta nos CPs (Figura 22).

Figura 22 – A - Modo de transmissão indireta; B - Modo de transmissão - direita.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.2.5 Distribuição dos ensaios

A Tabela 4 a seguir, demonstra a quantidade, os pavimentos e quais ensaios foram empregados para determinações dos resultados. Vale ressaltar que, foi perdido 1 CP do 2º pav., dessa forma, restando somente 1 para a idade de 94 dia, além disso, pelo fato da obra ter uma rápida execução, não foi possível a realização dos ensaios de ultrassom nas paredes dos 3º e 4º pav. e somente 4 esclerometrias no 4º pav. pois tiveram que pintar as áreas a ser ensaiada.

Tabela 4 - Distribuição dos ensaios.

Obra	Pav.	ENSAIO			
		Resistência à compressão (und)	Esclerometria (und)	Ultrassom em parede de concreto (und)	Ultrassom em cp (und)
1	Térreo	8	12	56	2
	1º	8	12	56	2
	2º	7	12	56	1
	3º	8	12	-	2
	4º	8	4	-	2

Fonte: Autor (2022).

### 3.2.6 Programa surfer

O surfer é um programa que pode ser utilizado para a confecção de mapas de variáveis a partir de dados espacialmente distribuídos, dessa forma fez-se o uso no presente trabalho para criar mapas das áreas de ensaios das paredes de concreto, no qual forneceu uma análise mais detalhada e profunda dos concretos analisados.

Utilizou-se um comparativo entre a influência da quantidade de ensaios para análise do concreto. Foram executados mais 12 ensaios de esclerometria por pavimento, e em seguida, gerado um mapa da área. No caso do ultrassom, empregou-se essa ferramenta com auxílios de estudos de outros autores, como parâmetros de qualidade do concreto e VPU obtidas nos ensaios.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste tópico foram apresentados os resultados obtidos no programa experimental, juntamente com sua análise do concreto estudado e na proposição das curvas de correlação com os dados alcançados através dos ensaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria, realizados nas paredes de concreto *in loco*, bem como os resultados dos ensaios de resistência à compressão, que foram realizados em CPs cilíndricos em laboratório.

### 4.1 Ensaio Resistência à Compressão

É importante salientar que todos os corpos de prova foram ensaiados na mesma prensa hidráulica, prensa elétrica FN 01 com capacidade de 200 toneladas (ton), para ratificar que todos foram submetidos às mesmas condições de rompimento.

Os resultados da resistência à compressão dos concretos estudados estão apresentados na Tabela 5, no qual,  $f_{cj,\leq 3}$  representa rompimento menor ou igual a 3 dias,  $f_{cj,7}$ ,  $f_{cj,28}$  e  $f_{cj,94}$  representam os resultados de 7, 28 e 94 dias respectivamente. São apresentados também, para cada uma das fases, dados estatísticos como média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.).

Tabela 5 - Resistência à compressão dos CPs cilíndricos.

Resistência de Projeto (MPa)	Pav.	Número do CP	Data da moldagem	Idade (dias)				
				fcj,3	fcj,7	fcj,28	fcj,94	
25	Térreo	445	01/07/2022	17,51	25,06	33,65	33,02	
				17,83	26,15	35,54	36,91	
	1º Pav.	465	07/07/2022	7,69	27,34	33,68	38,53	
				7,80	28,94	33,22	37,92	
	2º Pav.	483	09/09/2022	21,94	29,35	33,13	39,33	
				22,03	28,66	34,62	-	
	3º Pav.	501	12/07/2022	3,03	31,18	35,52	43,88	
				4,38	27,15	34,03	45,35	
	4º Pav.	519	14/07/2022	7,51	24,08	34,72	40,17	
				9,49	25,31	34,26	35,89	
	Média				11,92	27,32	34,24	39,00
	Desvio padrão				7,19	2,22	0,86	3,82
C.V (%)				83	8	2	10	

Fonte: Autor, 2022.

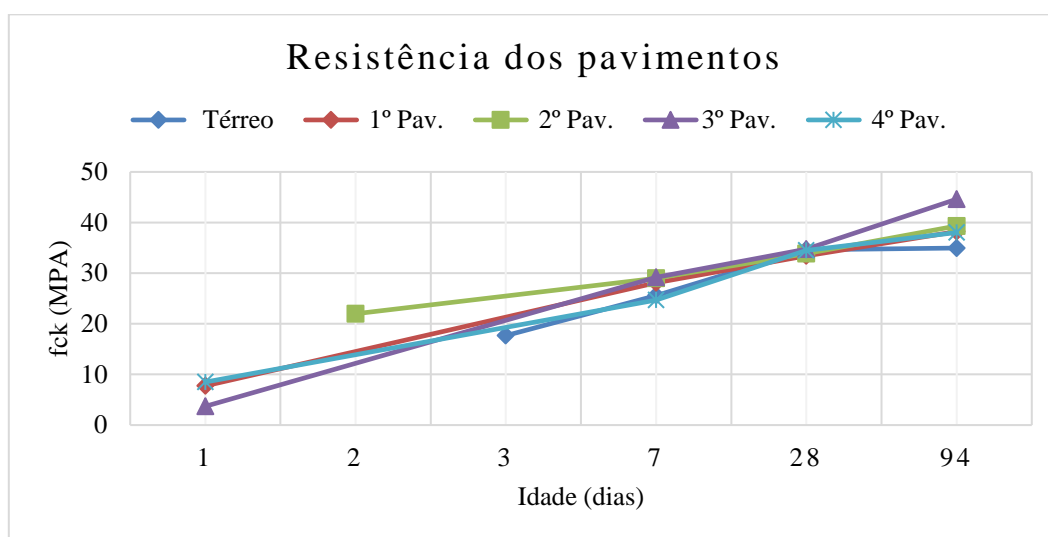
As grandezas avaliadas no traço de concreto estudado, apresentam-se de forma heterogênea para os CPs  $fc_{j,3}$ , havendo uma variação de 19 MPa entre os resultados, mas essa variação é atribuída pelo o fator que as referências 445 e 483 foram rompidas com 3 e 2 dias respectivamente e os demais exemplares com 1 dias de maturação, dessa forma favorecendo nas suas resistências, demonstrando um crescimento na ordem 80% na fase inicial, favorecendo a desmoldagem das formas das paredes de concreto.

Nota-se que dos 10 CPs estudados com o  $fc_{j,7}$ , 9 alcançaram a resistência de projeto e 1 chegando próximo. Para  $fc_{j,28}$ , observou outro crescimento, no qual todos os CPs ultrapassaram as resistências predeterminadas em projeto de no mínimo 30%, significando que o traço pode ser ajustado, de forma a diminuir o consumo de cimento, porém é ótimo em relação a segurança das estruturas de concreto.

Observando  $fc_{j,94}$  e considerando o maior do par, ocorreu outro crescimento da resistência, no caso dos CPs 501, nota-se que, ele alcançou uma resistência na ordem de 80% maior que a determinada em projeto.

O gráfico da Figura 23 representa o crescimento dos concretos estudados.

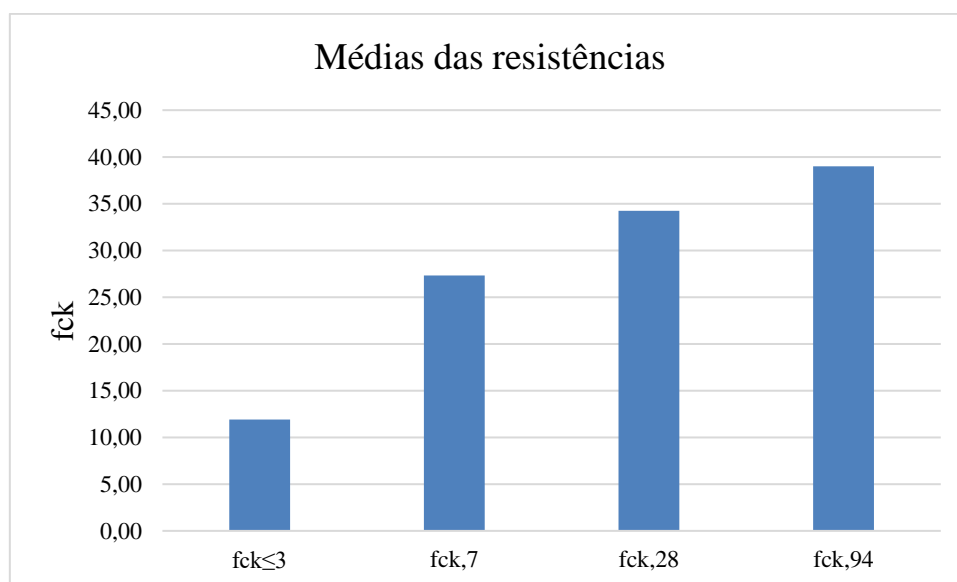
Figura 23 - Crescimento dos concretos estudados.



Fonte: Autor, 2022.

O gráfico da Figura 24 representa as médias das resistências a compressão para os rompimentos pré-determinados, pode-se observar que, houve um crescimento em todas as fases, principalmente dos CPs para 7 dias em relação aos menores ou igual a 3 dias, ficando em torno de 15 MPa, e se estabilizando nas fases finais do estudo.

Figura 24 - Médias das resistências.



Fonte: Autor, 2022.

## 4.2 Método para a avaliação da qualidade do concreto através dos dados da velocidade do pulso ultrassônico e esclerometria

### 4.2.1 Coeficiente de correlação

Diversos autores verificaram a escolha do tipo de curva de correlação mais adequada para representar as diferentes correlações, seguindo o critério do maior coeficiente de correlação ( $r^2$ ).

Palacios apud Assis (2011) apresenta como poderia ser feita a interpretação do  $r^2$  de forma prática:

- $0,00 \leq r^2 \leq 0,20$  - dependência insignificante;
- $0,21 \leq r^2 \leq 0,40$  - dependência fraca;
- $0,41 \leq r^2 \leq 0,70$  - dependência marcante;
- $0,71 \leq r^2 \leq 1,00$  - dependência forte.

### 4.2.2 Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade do pulso ultrassônico.

Segundo Leslie e Cheesman (1949 apud VIEIRA FILHO, 2007), a qualidade do concreto pode ser avaliada de acordo com a velocidade de pulso observada. A Tabela 6 representa os valores encontrados.

Tabela 6 – Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade do pulso ultrassônico.

Velocidades de propagação (m/s)	Qualidade do concreto
>4500	excelente
3500 – 4500	boa
3000 – 3500	duvidosa
2000 – 3000	pobre
< 2000	muito pobre

Fonte: Adaptado de Whitehurst, 1966 apud Vieira Filho, 2007.

## 4.3 Correlação do índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto

Para realizar uma melhor associação de dados, foram calculadas as médias de cada conjunto de valores resultantes das esclerometrias nas paredes de concreto,



demonstrados no Anexo individualmente, e dos  $f_{cj,94}$  nos CPs cilíndricos que no qual, no qual foram considerados os maiores resultados entre o par como a resistência do concreto, valores representados na Tabela 7.

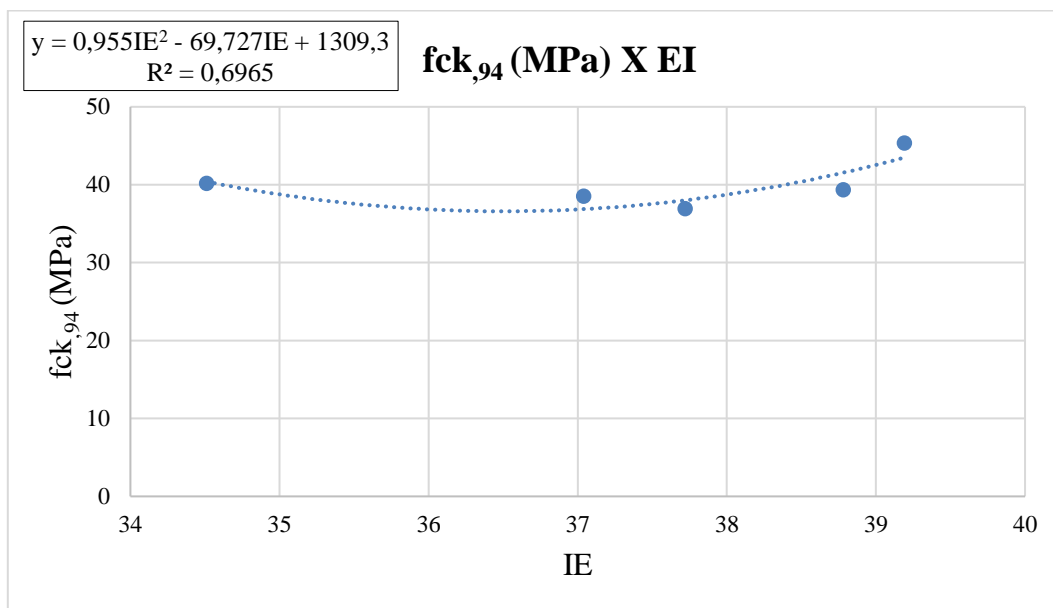
Tabela 7 - Índice esclerométrico e resistência à compressão (94 dias).

<b>Pav.</b>	<b>IE</b>	<b><math>f_{cj,94}</math> (MPa)</b>
Térreo	37,72	36,91
1º	37,04	38,53
2º	38,78	39,33
3º	39,19	45,35
4º	34,51	40,17

Fonte: Autor, 2022.

Através desses dados, foi possível criar uma análise de dispersão entres as duas variáveis, e plotando a curva de tendência entre eles, demonstrado nos gráficos da Figura 25.

Figura 25 - Índice esclerométrico X resistência à compressão (94 dias).



Fonte: Autor, 2022.

Foram plotados 4 tipos de curvas e fornecendo assim equações através dos dados coletados: linear, exponencial, polinomial e potência, a partir das análises de dispersão e destas. Com base na revisão bibliográfica efetuada, constatou-se que as curvas mais indicadas por diversos autores para representar a relação IE x resistência à compressão são a de polinômio 2º grau e linear.

A linha de tendência que forneceu o maior coeficiente de correlação  $r^2$  foi a polinomial de 2º grau, alcançando valor de aproximadamente 0,7, o que permite classificar a dependência entre essas duas variáveis em marcante, sendo esta escolhida para representar os dados. Através da Tabela 8 pode-se observar os demais valores de  $r^2$ , nota-se uma variação das curvas em relação a polinomial.

Tabela 8 - Coeficientes de Correlações das Curvas.

<b>Correlação</b>	<b>Regressão</b>	<b>Equação</b>	<b><math>r^2</math></b>
IE x fck (94 dias)	Linear	$0,5619IE + 19,017$	0,1059
	Exponencial	$24,608e^{0,0129IE}$	0,1104
	Potência	$7,7336IE^{0,4534}$	0,1008
	Polinomial	$0,955IE^2 - 69,727IE + 1309,3$	0,6965

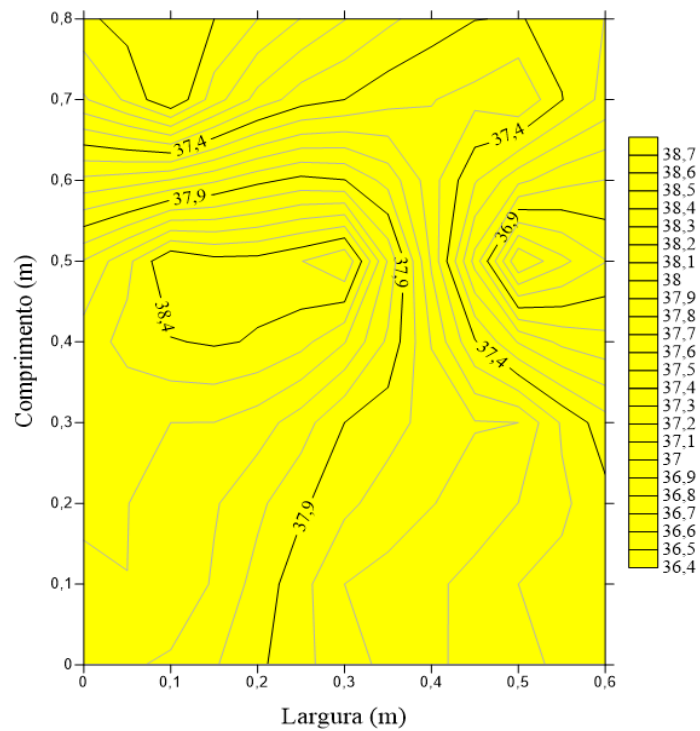
Fonte: Autor, 2022.

#### 4.2.1 Surfer para esclerometria

Com o intuito de analisar os ensaios da esclerometria no surfer, foram empregados parâmetros em relação à média dos dados obtidos, com a utilização do desvio padrão como critério para determinação da faixa dos valores, subtraindo e somando em relação à média. Portanto, o intervalo dos dados utilizados no estudo então compreendidos entre os limites inferior de 36,46 IE e superior de 39,35 IE, no qual os valores que ficarem fora dessa faixa são representados pela cor vermelho e verde respectivamente nos mapas plotados pelo o programa. E os valores entre o intervalo são representados pela cor amarela.

Com a determinação desses parâmetros, observou-se que, 75% dos ensaios ficaram dentro do intervalo, sendo dessa forma marcante para as áreas ensaiadas dos pavimentos, compondo o térreo (Figura 26) por completo e sendo predominante nos 1º (Figura 27), 2º (Figura 28) e 3º (Figura 29) pavimento. Pode-se observar pouca variação para os demais intervalos, demonstrando uma homogeneidade das paredes concretadas nos pavimentos.

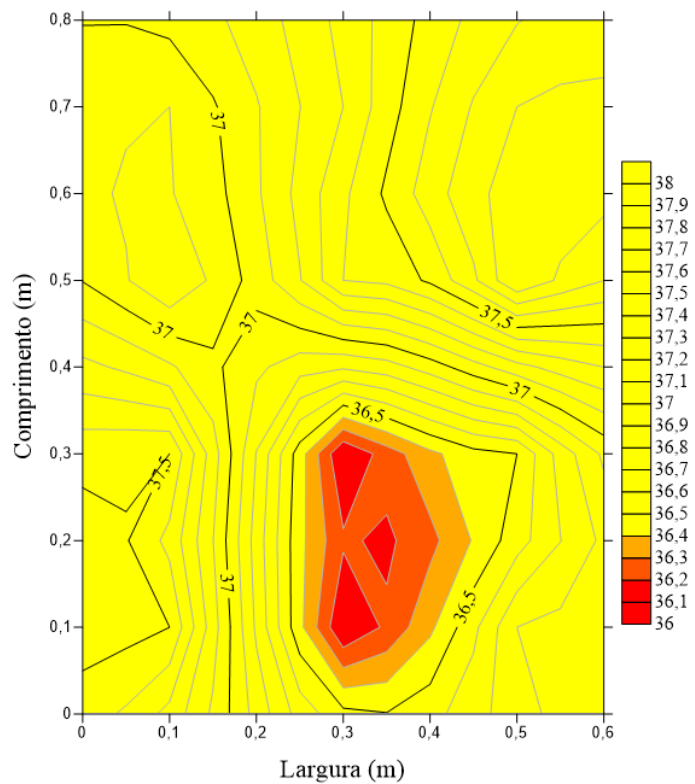
Figura 26 - Surfer da esclerometria pavimento: Térreo.  
Área Ensaída



Fonte: Autor, 2022.

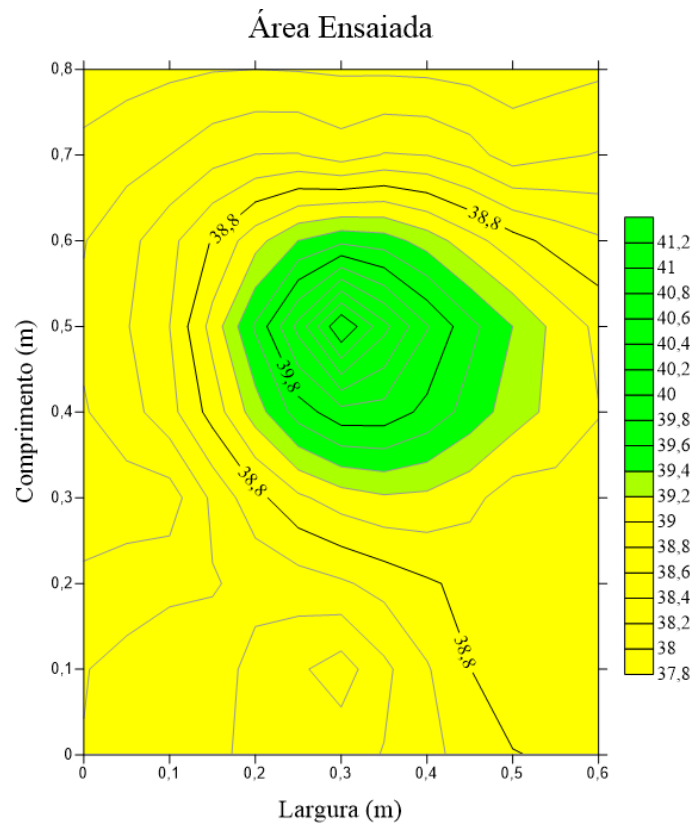
Figura 27 - Surfer da esclerometria: 1º pavimento.

Área Ensaída



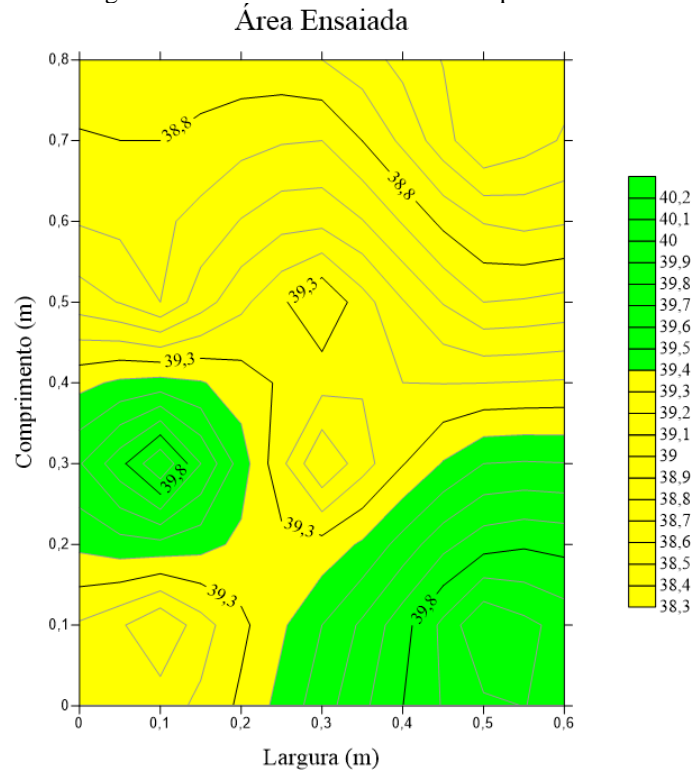
Fonte: Autor, 2022.

Figura 28 - Surfer da esclerometria: 2º pavimento.



Fonte: Autor, 2022.

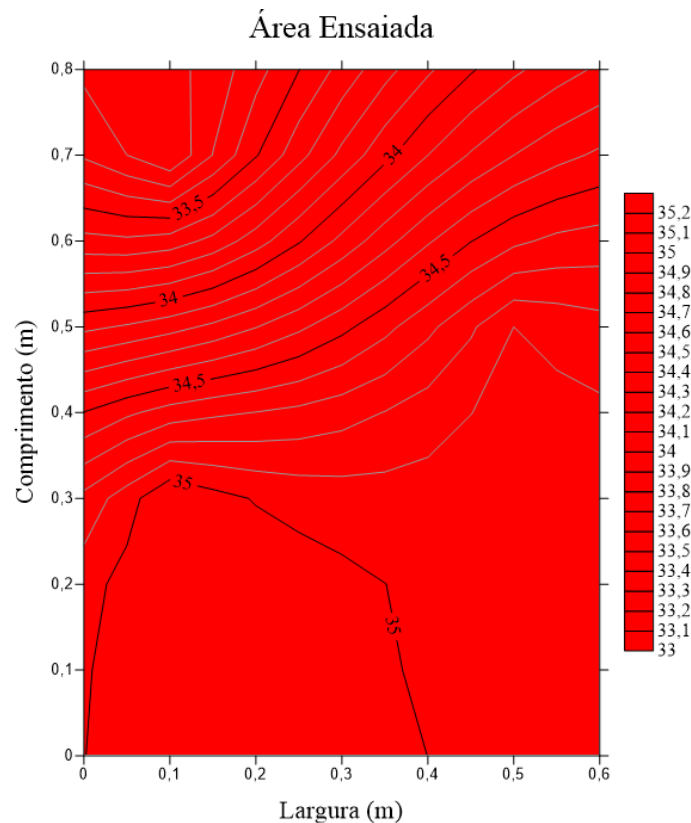
Figura 29 - Surfer da esclerometria: 3º pavimento.



Fonte: Autor, 2022.

No 4º pavimento (Figura 30) foram realizados 4 ensaios de esclerometria, pode-se observar que o mapa da região ensaiada, ficou com uma forma linear, fator caracterizados pela a quantidade de ensaios realizados. Vale salientar que, essa foi a areia ensaiada que todos os IE se encontram abaixo do limite inferior, mas obteve valores de resistências altos.

Figura 30 - Surfer da esclerometria: 4º pavimento.



### 4.3 Correlação do ultrassom com a resistência a compressão do concreto

O ensaio de ultrassom e de resistência à compressão do concreto foram realizados nos mesmos CPs, o que corroborou para que cada velocidade medida pudesse ser atribuída a cada resistência identificada, não necessitando calcular a média por CPs e VPU, valores representados na Tabela 9. Nota-se que, todos os ensaios de ultrassom ficaram entre o intervalo 3500 – 4500 (m/s), representando uma boa qualidade do concreto estudado.

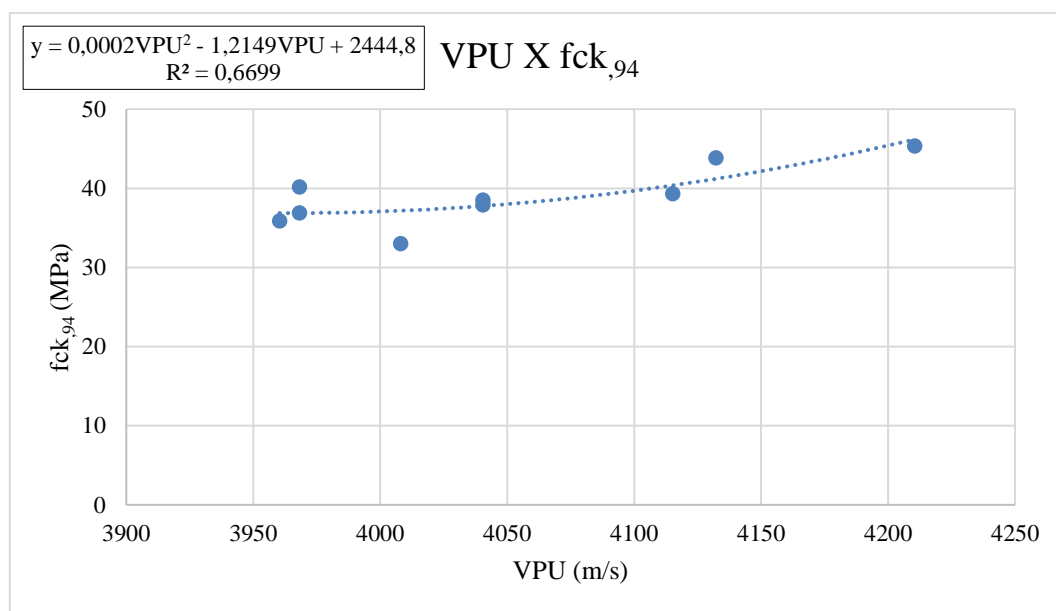
Tabela 9 - Resultados de VPU e resistência à compressão dos CPs cilíndricos.

Andar	Número do CP	fck,94	Tempo (µs)	VPU (m/s)
Térreo	445	33,02	49,9	4008,02
		36,91	50,4	3968,25
1º Pav.	465	38,53	49,5	4040,40
		37,92	49,5	4040,40
2º Pav.	483	39,33	48,6	4115,23
		-	-	-
3º Pav.	501	43,88	48,4	4132,23
		45,35	47,5	4210,53
4º Pav.	519	40,17	50,4	3968,25
		35,89	50,5	3960,40
Média		39,00	49,41	4049,30
Desvio padrão		3,82	1,04	86,69
C.V (%)		82	83	8

Fonte: Autor, 2022.

Foi feita a análise de regressão linear simples e plotada a linha de tendência demonstrada na Figura 31.

Figura 31 – Velocidade de pulso ultrassônico x resistência à compressão (94 dias).



Fonte: Autor, 2022.

Foram plotados 4 tipos de curvas e equações fornecidas através dos dados coletados: linear, exponencial, polinomial e potência, a partir das análises de dispersão e

destas. A linha de tendência que forneceu o maior coeficiente de correlação  $r^2$  foi o polinomial, sendo esta escolhida para representar os dados.

O  $r^2$  aplicado à curva citada, alcançou valores em torno de 0,67, o que permite classificar a dependência entre essas duas variáveis em dependência marcante. Isso demonstra que os dados obtidos a partir da realização dos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão do concreto foram satisfatórios.

Através da Tabela 8 pode-se observar os demais valores de  $r^2$ , nota-se uma pequena variação entre as curvas.

Tabela 10 - Índices de Correlações das Curvas de Ultrassom.

Correlação	Regressão	Equação	$r^2$
VPU x Fck (94 dias)	Linear	$0,0343VPU - 99,889$	0,6054
	Exponencial	$1,2231e^{0,0009VPU}$	0,6171
	Potência	$1E-11VPU^{3,4698}$	0,6139
	Polinomial	$0,0002VPU^2 - 1,2149VPU + 2444,8$	0,6699

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.4 Correlação do ultrassom com índice esclerométrico na parede de concreto

A Tabela 11, demonstra as médias de cada conjunto de valores resultantes das esclerometrias, e das velocidades de pulso ultrassônico, ambos ensaios realizados nas paredes de concreto e demonstrados individualmente nos Anexo A e Anexo B respectivamente. Vale ressaltar que, a obra teve uma rápida execução, e foram realizados os ensaios de ultrassom nas paredes dos pavimentos térreo, 1º, 2º, dessa forma, foram empregados os ensaios de esclerometria das mesmas áreas ensaiadas.

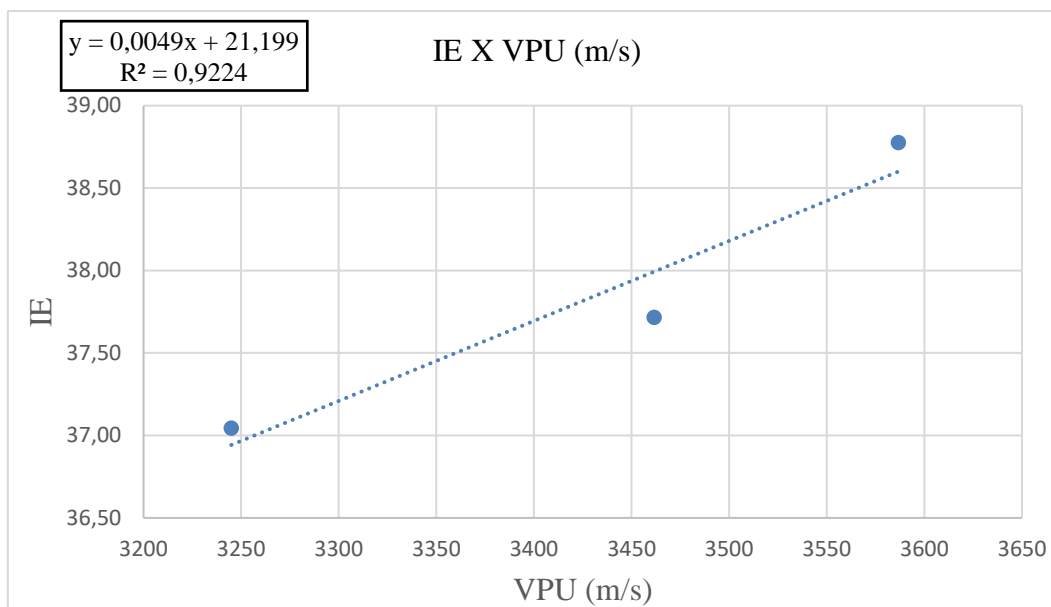
Tabela 11 - Índice esclerométrico e velocidade pulso ultrassônico (94 dias).

Andar	VPU (m/s)	IE
Térreo	3461,5	37,72
1º	3245,0	37,04
2º	3586,7	38,78

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 32, demonstra a linha de tendência realizada por meio de análise de regressão linear simples.

Figura 32 - Índice esclerométrico X velocidade do pulso ultrassônico (94 dias).



Foram plotados 4 tipos de curvas e equações fornecidas através dos dados coletados: linear, exponencial, polinomial e potência, a partir das análises de dispersão e destas. A linha de tendência escolhida foi a linear por facilidade de interpretação e demonstrar um alto valor de  $r^2$ .

O  $r^2$  aplicado à curva citada, alcançou valores de 0,92, o que coloca entre o intervalo  $0,71 \leq R^2 \leq 1,00$ , permitindo classificar a dependência entre essas duas variáveis em dependência forte. Demonstra que os dados obtidos a partir da realização dos ensaios de ultrassom e esclerometria do concreto foram satisfatórios.

Tabela 12 - Índices de Correlações das Curvas de Ultrassom X esclerometria.

Correlação	Regressão	Equação	$r^2$
IE x VPU (94 dias)	Linear	$0,0049x + 21,199$	0,9224
	Exponencial	$24,379e^{0,0001x}$	0,9254
	Potência	$1,0992x^{0,4348}$	0,9184
	Polinomial	$2E-05x^2 - 0,1024x + 203,74$	1

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.4.1 Surfer da velocidade pulso ultrassônico na parede de concreto

Utilizamos a Tabela 6 como parâmetro para avaliar a os valores da velocidade de pulso ultrassônico das paredes de concreto. Sendo representados a qualidade do concreto pela a cor azul os valores excelente, verde, amarelo e vermelho para os valores

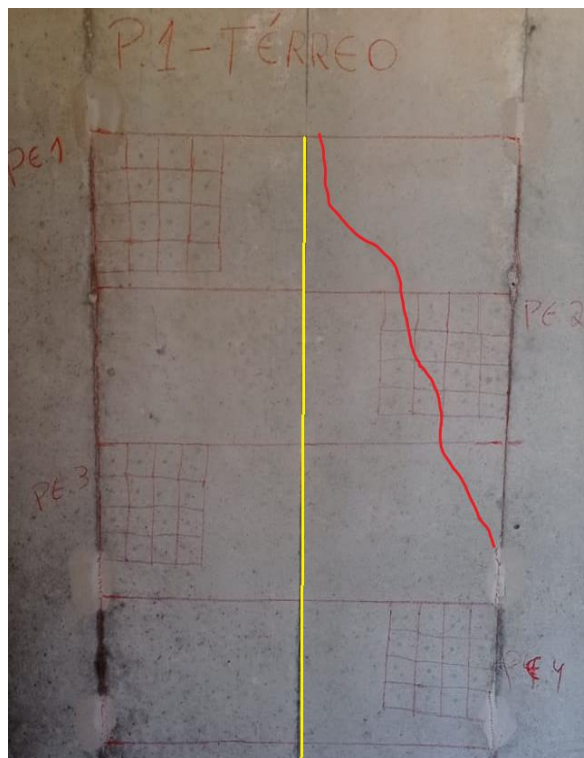


de VPU boa, duvidosa e pobre respectivamente. A pior classificação seria muito pobre, porém, não houve nenhum ensaio abaixo de 2000 m/s.

Cerca de 45% dos ensaios realizados ficaram entre o intervalo de 3500 – 4500 m/s, demonstrando uma boa velocidade de pulso ultrassônico e homogeneidade do concreto e somente 1 ensaio foi maior que 4500 m/s.

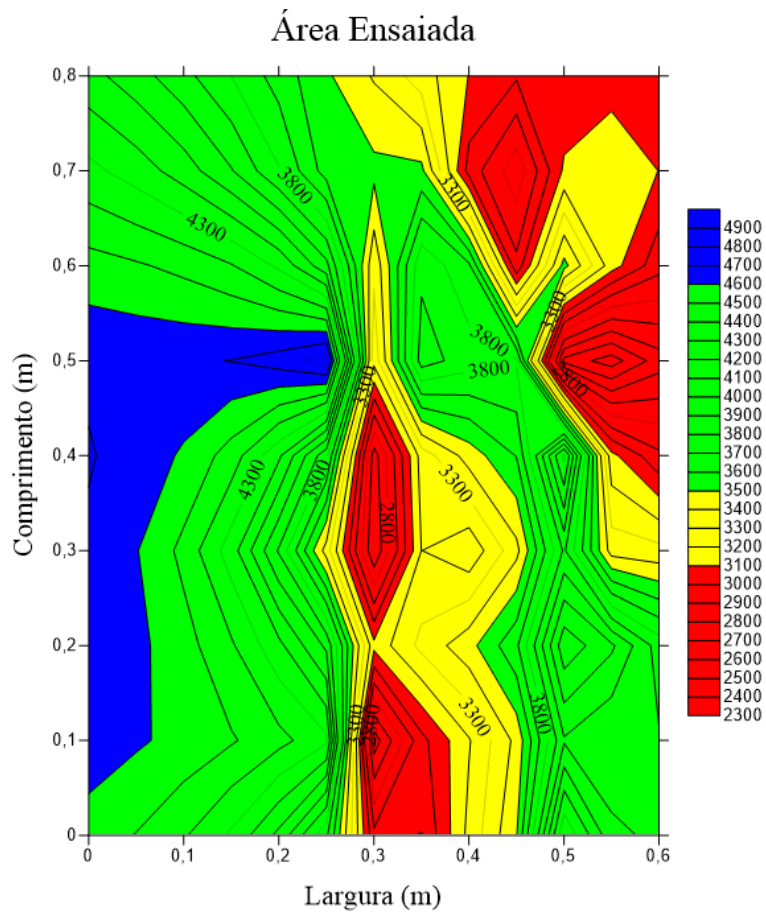
Pode-se observar que, a Figura 34 representando a área ensaiada do pavimento térreo, possui duas zonas pobres, a zona superior esquerda, representa uma área logo após uma fissura, e a zona centralizada, se encontra em um local onde possui uma emenda da forma, identificado pela linha vermelha e amarela respectivamente, são fatores que pode influenciar na VPU, demonstrado na Figura 33. A emenda se repete no mapa do 1º pavimento.

Figura 33 - Área ensaiado pavimento térreo - vermelho: fissura, amarelo: elevação.



Fonte: Autor, 2022.

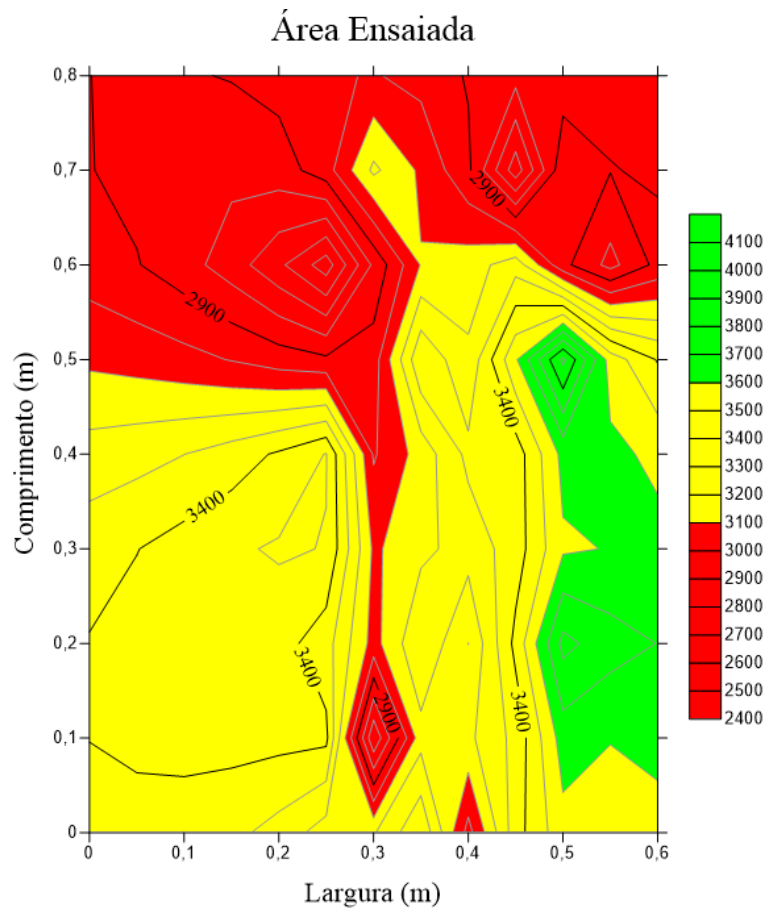
Figura 34 - Surfer da velocidade de pulso ultrassônico pavimento: Têrreo.



Fonte: Autor, 2022.

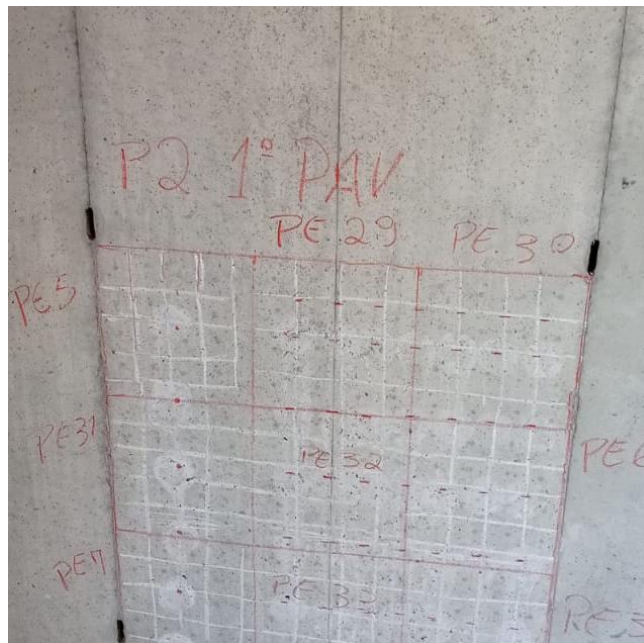
A Figura 35, representa o mapa do 1º pavimento, é composta por zona pobre na parte superior da área ensaiada, fator que pode-se atribuir a porosidade da superfície de contrato do transmissor e receptor com a parede de concreto, representada na Figura 36. Além do mais, contendo somente 14 leituras boas em toda a área, menor índice comparado com os demais pavimentos.

Figura 35 - Surfer da velocidade de pulso ultrassônico: 1º pavimento.



Fonte: Autor, 2022.

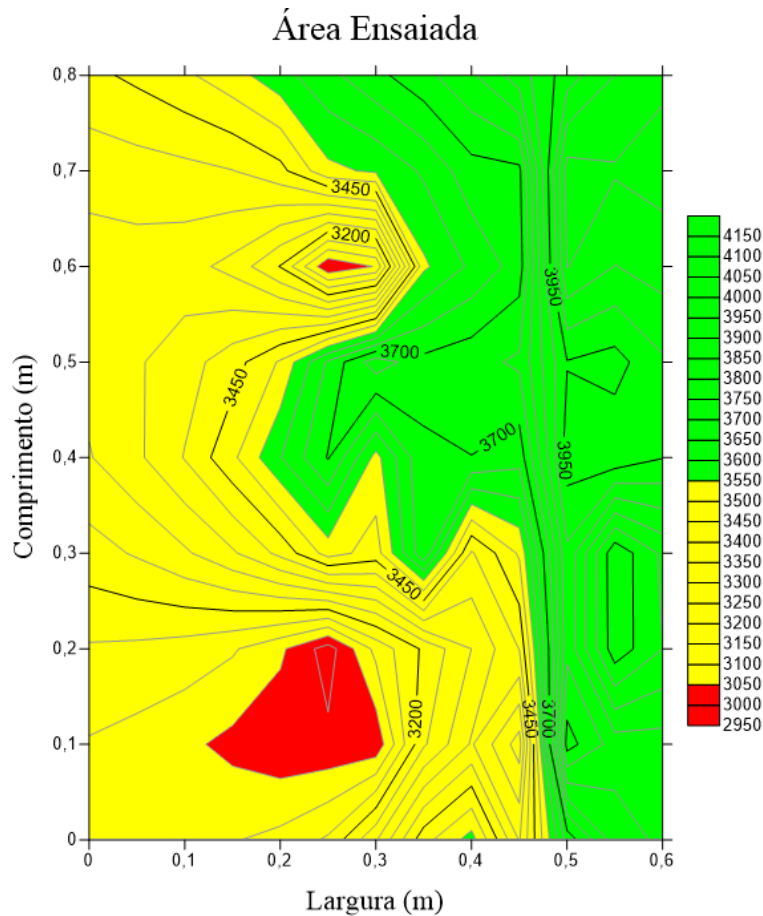
Figura 36 - Porosidade da área ensaiada: 1º pavimento.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 37, representa a área estudada do 2º pavimento, pode-se observar altos valores de VPU, com poucas zonas ruins.

Figura 37 - Surfer da velocidade de pulso ultrassônico: 2º pavimento.



#### 4.5 Análise comparativa com trabalho da área

Com o intuito de analisar os materiais de construção no quesito qualidade e verificar as interferências da resistência à compressão a partir dos ENDs com tempo, foram realizadas comparações entre estudos semelhantes da região nos últimos anos. Vale ressaltar que, não foram encontrados trabalhos que utilizavam os ensaios supracitados em paredes de concreto.

##### 4.5.1 Análise comparativa entre Wolfgang (2013) e presente estudo

Wolfgang (2013), realizou um estudo utilizando o método do ultrassom e a resistência à compressão, foram escolhidas duas obras na cidade de Fortaleza e assim

moldados 20 CPs com resistência de projeto de 20 MPa e mais 20 CPs com resistência de projeto de 30 MPa.

A Tabela 13 a seguir, representa os valores médios das resistências a compressão aos 28 dias e VPU encontradas nos estudos.

Tabela 13 - Valores obtidos nos ensaios realizados por Wolfgang (2013) e presente estudo.

Autor	Ensaio		
	Resistência a compressão		Ultrassom CPs
	fck projeto (MPa)	fcj médio 28dias (MPa)	VPU médio (m/s)
Wolfgang (2013)	20	19,04	4864,83
	30	28,34	4884,53
<b>Trabalho atual</b>	<b>25</b>	<b>34,24</b>	<b>4049,30</b>

Fonte: Autor, 2022.

As médias das resistências a compressão aos 28 dias dos traços utilizados por Wolfgang (2013), apresentam valores abaixo da resistência de projeto, em contra partida, valores de VPU acima de 4500 m/s, com base na Tabela 6, conclui-se que os exemplares são constituídos por concretos com qualidade excelente. Nota-se que há variação do fck médio em torno de 9 MPa, mas uma pequena variação na VPU.

Ao comparar com o presente estudo, no qual foram encontrados valores de resistências a compressão superior e VPU em torno de 4055,89 m/s, caracterizando como um concreto de qualidade boa, é possível notar divergências, pois diversos autores comprovaram que menores resistências à compressão resulta em menores VPU.

Wolfgang (2013) realizou seus traços com concreto convencional, diferente do presente estudo que foram empregados traços com concretos autoadensável, no qual possui um maior teor de argamassa, fator que de acordo com a revisão bibliográfica realizada pode interferir nos resultados.

Pode-se concluir que, os materiais atualmente empregados na fabricação do concreto proporcionam inferências do seu fck e nos ensaios empregados.

#### 4.5.2 Análise comparativa entre Peixoto (2019) e presente estudo

Peixoto (2019), realizou um estudo utilizando quatro traços de concretos convencional e com resistência à compressão aos 28 dias de 25MPa, 30MPa, 35MPa e

45 MPa e empregando os ENDs de esclerometria em CPs prismáticos e ultrassom em CPs cilíndricos.

Os valores obtidos por Peixoto (2019), apresentaram ótimos resultados em todos os ensaios realizados. A Tabela 14 a seguir, representa os valores médios das resistências a compressão aos 28 dias, dos índices esclerométrico e VPU encontradas no seu estudo.

Tabela 14 - Valores obtidos nos ensaios realizados por Peixoto (2019) e presente estudo.

Autor	Ensaio			
	Resistência a compressão		Esclerometria	Ultrassom CPs
	fck projeto (MPa)	fcj médio 28dias (MPa)	IE médio	VPU médio (m/s)
Peixoto (2019)	25	41,75	45,88	4841,00
	30	38,10	46,05	4783,00
	35	47,21	49,94	4901,00
	40	54,50	57,25	4901,00
<b>Trabalho atual</b>	<b>25</b>	<b>34,24</b>	<b>37,90</b>	<b>4055,89</b>

Fonte: Autor, 2022.

Todos os traços de concreto estão com acréscimo de resistência na ordem de 60%, observando os índices esclerométrico, Peixoto (2019) obteve ótimos valores em todos os traços e uma VPU média alta, demonstrando em todos os ensaios realizados que o concreto é de excelente qualidade.

Com esses dados, é possível notar a diferença dos resultados, Peixoto (2019) não disponibilizou os traços, mas pode-se concluir que, os materiais selecionados em todos os traços são de ótimas qualidades, assim como os preparos dos concretos e ensaios realizados para averiguar seus parâmetros.

#### 4.5.3 Análise comparativa das curvas de correlação Wolfgang (2013), Peixoto (2019) e presente estudo

A Tabela 15 demonstra os valores dos coeficientes de correlações obtidos pelos autores, assim como suas melhores equações.

Tabela 15 - Coeficientes de correlação e equações dos autores.

<b>Autor</b>	<b>Correlação</b>	<b>Regressão</b>	<b>Equação</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Wolfgang (2013)	fck (28 dias) X VPU	Linear	0,035VPU - 147,43	0,0474
Peixoto (2019)	fck (28 dias) X VPU	Linear	0,1123VPU - 499,88	0,7558
	fck (28 dias) X IE	Polinomial	-0,0675IE <sup>2</sup> + 8,2476IE - 196,58	0,9477
<b>Trabalho atual</b>	<b>fck (94 dias) X VPU</b>	<b>Polinomial</b>	<b>0,0002x<sup>2</sup> - 1,2149x + 2444,8</b>	<b>0,6699</b>
	<b>fck (94 dias) X IE</b>	<b>Polinomial</b>	<b>0,955IE<sup>2</sup> - 69,727IE + 1309,3</b>	<b>0,6965</b>
	<b>VPU X IE</b>	<b>Linear</b>	<b>0,0049x + 21,199</b>	<b>0,9224</b>

Fonte: Autor, 2022.

Comparados os dois autores com os valores obtidos no presente trabalho, nota-se que, Peixoto (2019) obteve os melhores resultados de r<sup>2</sup> acima de 0,71, podendo classificar as correlações das variáveis como forte, podemos atribuir esses valores a ótima qualidade do concreto estudada por ele e sua alta resistência a compressão. Em contra partida, Wolfgang (2013) obteve um valor abaixo de 0,20, classificando a das correlações das variáveis com dependência insignificante, fator que podemos atribuir ao concreto analisado, pois apresentam valores de fck baixo e com coeficiente de variação alto das amostras analisadas.

Pode-se concluir que, essas variações existiram, pois, há muitos fatores que interferem no concreto e ensaios empregados, como visto no referencial bibliográfico. Contudo, os materiais atualmente empregados na fabricação do concreto evoluíram o que ratifica que esses ensaios podem ser empregados para avaliação e assim haver um acompanhamento das propriedades dos diversos traços de concretos. Entretanto, devemos pontuar que as diferenças dos valores encontrados entre os estudos estão diretamente relacionados ao tipo de concreto utilizado, no caso, o concreto autoadensável (CAA).

O CAA apresenta um alto teor de argamassa (TA) de 60%, enquanto no concreto convencional temos TA de 50%. Outro ponto a ser destacado no CAA é a Dimensão Máxima Característica (DMC) da brita que é por volta de 12,5mm, no caso do concreto convencional a DMC é em torno de 19mm. Essas características dos concretos podem ter influenciado significativamente os resultados da VPU.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados de programa experimental que envolveu o sistema de paredes de concreto, forma construtiva que ganha espaço no mercado, utilizando concreto autoadensável.

Através dos resultados desses ensaios e a ampla revisão bibliográfica realizada, pôde-se constatar que nem sempre o fator que influencia significativamente um ensaio, terá influência de maneira relevante as grandezas medida nos outros. Por exemplo, considerando o maior do par os corpos de prova moldados dos 1º e 2º pavimentos, constatou diferença menor que 1 MPa, demonstrando um concreto homogêneo. Em contra partida, 25% dos ensaios de ultrassom realizados no 1º pavimento define como um concreto de qualidade boa, enquanto o 2º pavimento, 67% dos ensaios classifica o concreto para uma qualidade boa. Havendo variação até mesmo no mesmo ensaio, foi obtido uma média geral de VPU de 3431,1 m/s na parede de concreto e de 4049,30 m/s nos corpos de prova moldados. Divergências que podemos atribuir a superfície de contato, porosidade e execução das peças.

O conhecimento dos fatores que influem nos resultados de cada ensaio permite melhor interpretar esses resultados e a obtenção de correlações entre a resistência à compressão e a grandeza do ensaio não destrutivo mais confiáveis.

Para a análise das correlações, foram plotados os principais tipos de curvas de correlação e escolhidos as mais adequadas através de pesquisas de diversos autores para expressar a ligação entre as variáveis. Foram constatados nas correlações entre resistência a compressão, esclerometria e ultrassom, valores de coeficientes que no qual, caracterizam como marcante. E quando correlacionados ultrassom e esclerometria, foram alcançados valores de  $r^2$  forte. Concluindo que as equações exibidas para o concreto estudado apresentam um bom grau de confiabilidade.

Verificou-se diferenças entre as curvas obtidas neste e em outros trabalhos da região, evidenciando a importância da calibração dessas curvas. Como as pesquisas relacionadas aos ensaios não destrutivos no Brasil não têm sido muito frequentes, há ainda muito o que ser feito visando obter curvas de correlação adequadas aos concretos aqui usados e formar mão de obra qualificada.



Sugere-se que seja feitos estudos dos traços de concreto disponibilizados pelas as concreteiras da região, da mesma forma ensaios dos seus materiais. Realizando ensaios não destrutivos em outras fases do concreto, tais como: ultrassom com 7, 28 e acima de 90 dias; esclerometria com 28 dias, entre 28 e 90 dias e acima de 90 dias.

Outra opção é padronizar corpos de provas moldado em obras e comparar com testemunhos extraídos de diferentes tipos de elementos estruturais feitos com o mesmo concreto.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY INSTITUTE. ACI 228.2R. **Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures**. Farmington Hills, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_NBR 8802: **Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica: Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: 2019b.

\_\_\_\_NBR 7680-1: **Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_NBR 7584: **Concreto Endurecido: Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_NBR NM 78, 1996, “**Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão**”.

\_\_\_\_. NBR 5738: **Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_NBR 16055: **Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2012.

BERUTTI, F. A., **Aplicação de métodos de Ultra-som para avaliação e caracterização de microestrutura de materiais cerâmicos à base de alumina e sua associação com propriedades mecânicas**, p. 152, 2004.

British Standard Institution , BS 1881: Part 201, 1986, “**Guide to the use of nondestructive methods of test for hardened concrete**”, London.

\_\_\_\_BS 1881: Part 202, 1986, **Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer**”, London.

CÂMARA, E., **Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na Grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos**. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Cap. 8. Disponível em: . Acesso em: 15 fev. 2022.

CASTRO, E., **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009. Cap. 8. Disponível em: . Acesso em: 15 fev. 2022.

CORSINI, R. **Paredes normatizadas**. Técnica, São Paulo, n. 183, dezembro 2011.

ESCOBAR, C. J.; ANDREOTTI, D.; FABRO, G., **Avaliação de desempenho do ensaio de esclerometria na determinação da resistência do concreto endurecido**. Ibracon, Salvador, v. 1, n. 1, p.1-16, set. 2011. Anual. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto 2008.

EVANGELISTA, A. C. J., **Avaliação da Resistência do Concreto usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos**. 2002. 219p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FERREIRA, L.; HOCHMAN, B.; BARBOSA, M.. **Modelos experimentais em pesquisa**. Acta Cirúrgica Brasileira, São Paulo, v.20, n.2, p.28 – 34, 2005.

JULLIANI, I. M., **Avaliação das Propriedades Mecânicas do Concreto de Lajes Alveolares Pré-fabricadas Utilizando Ensaios não Destrutivos**. 2014. 33p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, São Paulo, 2014.

LORENZI, A., **Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Estimativa da Resistência à Compressão do Concreto a partir da Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico**. 2009. 196p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2009.

MACHADO, M. D., **Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaios Não Destrutivos**. 2005. 265p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MEDEIROS, A., **Aplicação do Ultra-som na Estimativa da Profundidade de Fendas Superficiais e na Avaliação da Eficácia de Injeções em Elementos de Concreto Armado**. 2007. 180p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, 2014.

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.

NUNES, V. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto armado**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2011.

PALACIOS, M. P. G. **Emprego de Ensaios Não Destrutivos e de Extração de Testemunhos na Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto**. 2012. 165p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PEIXOTO, R. **Análise da correlação dos ensaios de esclerometria e ultrassom com a resistência à compressão do concreto**. 2019. Monografia (título de Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2019.

PUNDIT LAB. **Instruções Operacionais**. Suíça: Proceq, 2017.

**RIBEIRO, L. C., Caracterização de um aço inoxidável austenítico hp fundido por centrifugação utilizando o ensaio de ultrassom.** Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

**SANTOS, E. Estudo comparativo de viabilidade entre alvenaria de blocos cerâmicos e paredes de concreto moldadas no local com fôrmas metálicas em habitações populares.** 2013. Monografia (título de Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, 2013.

**VIEIRA FILHO, J. O., Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à e.** 2007. 2 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Cap. 5. Disponível em: . Acesso em: 01 mar. 2022.

**WOLFGANG, J. G., Estudo comparativo entre o ultrassom em corpos de provas de concreto e sua resistência à compressão axial.** 2013. Monografia (título de Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2013.

## ANEXO A - RESULTADOS DO ENSAIO DE ESCLEROMETRIA

<b>TÉRREO</b>												
<b>Ponto</b>	<b>PE1</b>	<b>PE2</b>	<b>PE3</b>	<b>PE4</b>	<b>PE21</b>	<b>PE22</b>	<b>PE23</b>	<b>PE24</b>	<b>PE25</b>	<b>PE26</b>	<b>PE27</b>	<b>PE28</b>
<b>1</b>	35	35	36	38	34	34	35	37	36	36	38	35
<b>2</b>	34	32	35	36	38	36	35	37	36	35	35	40
<b>3</b>	35	34	38	36	38	36	37	36	36	36	38	36
<b>4</b>	35	36	36	32	34	35	37	38	37	38	35	36
<b>5</b>	34	35	36	34	36	38	36	37	38	38	35	35
<b>6</b>	35	35	37	38	37	37	36	35	37	33	36	36
<b>7</b>	34	34	36	36	40	36	40	36	34	38	36	37
<b>8</b>	36	36	36	34	33	35	35	37	39	35	38	30
<b>9</b>	39	34	36	34	36	36	35	38	35	39	39	35
<b>10</b>	35	29	35	36	36	35	36	36	35	34	35	37
<b>11</b>	36	35	38	36	36	37	38	37	34	35	33	37
<b>12</b>	35	39	34	37	35	37	38	37	36	36	36	36
<b>13</b>	35	35	35	35	34	33	36	38	36	34	36	35
<b>14</b>	36	35	39	36	36	40	36	38	38	38	37	36
<b>15</b>	35	36	38	35	37	36	39	35	35	35	38	36
<b>16</b>	35	35	37	35	34	36	37	36	36	35	37	36
<b>Índice Esclerométrico Médio Inicial</b>	35,3	34,7	36,4	35,5	35,9	36,1	36,6	36,8	36,1	35,9	36,4	35,8
<b>Limite Superior</b>	38,8	38,2	40,0	39,1	39,5	39,7	40,3	40,4	39,7	39,5	40,0	39,4
<b>Limite Inferior</b>	31,7	31,2	32,7	32,0	32,3	32,5	33,0	33,1	32,5	32,3	32,7	32,2
<b>Índice Esclerométrico Médio Final</b>	35,0	34,8	36,4	35,7	35,6	35,8	36,6	36,8	36,1	35,9	36,4	35,9
<b>Índice Esclerométrico Efetivo</b>	36,8	36,5	38,2	37,5	37,4	37,6	38,5	38,6	37,9	37,7	38,2	37,7
<b>Ângulo (°)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PE - ponto de esclerometria

1º PAV.												
Ponto	PE5	PE6	PE7	PE8	PE29	PE30	PE31	PE32	PE33	PE34	PE35	PE36
1	36	38	34	34	36	36	38	39	42	36	38	34
2	36	35	36	34	34	38	36	39	36	40	36	35
3	34	33	38	35	35	34	35	36	36	33	36	35
4	35	36	38	35	42	34	34	35	36	35	34	33
5	36	36	36	36	36	34	33	35	40	36	36	35
6	35	36	36	34	33	34	34	36	34	35	35	33
7	37	41	35	34	35	37	35	36	34	37	38	34
8	34	35	34	35	36	36	40	35	40	34	39	33
9	34	38	36	35	36	42	33	40	34	37	34	36
10	34	36	36	36	40	37	40	34	34	37	35	35
11	35	36	36	35	34	38	42	34	34	33	36	33
12	36	34	34	41	35	34	33	34	40	33	36	36
13	34	36	38	36	42	38	32	36	35	35	34	35
14	35	38	35	36	34	41	34	34	33	34	36	34
15	36	36	35	40	42	40	37	35	33	32	34	36
16	36	38	35	32	43	34	38	36	34	34	34	33
Índice Esclerométrico Médio Inicial	35,2	36,4	35,8	35,5	37,1	36,7	35,9	35,9	35,9	35,1	35,7	34,4
Limite Superior	38,7	40,0	39,3	39,1	40,8	40,4	39,5	39,5	39,5	38,6	39,3	37,8
Limite Inferior	31,7	32,7	32,2	32,0	33,4	33,0	32,3	32,3	32,3	31,6	32,1	30,9
Índice Esclerométrico Médio Final	35,2	36,1	35,8	35,0	35,5	36,0	35,0	35,6	34,4	34,7	35,7	34,4
Índice Esclerométrico Efetivo	36,9	37,9	37,5	36,8	37,3	37,8	36,8	37,4	36,1	36,5	37,5	36,1
Ângulo (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PE - ponto de esclerometria

2º PAV.												
Ponto	PE9	PE10	PE11	PE12	PE37	PE38	PE39	PE40	PE41	PE42	PE43	PE44
1	39	36	36	35	39	38	38	36	37	39	37	36
2	36	36	36	40	41	42	36	40	38	36	37	39
3	36	40	36	39	42	38	38	36	38	36	36	38
4	36	38	35	34	42	39	37	39	37	36	39	35
5	36	36	40	39	38	38	34	35	36	39	38	35
6	35	36	44	38	38	42	36	36	40	36	34	37
7	39	39	36	36	34	36	37	35	36	36	34	36
8	35	35	35	36	36	38	35	37	36	35	32	37
9	40	42	48	39	33	36	36	37	36	35	38	38
10	35	36	36	37	40	36	35	38	39	41	38	39
11	34	41	37	37	35	35	38	40	35	37	36	40
12	36	35	35	35	42	38	36	37	40	39	35	38
13	44	34	38	36	33	37	36	37	36	36	36	34
14	38	36	35	36	44	40	35	39	35	37	40	38
15	36	37	35	36	36	36	36	37	32	37	35	37
16	35	36	38	35	40	40	37	37	36	38	35	37
Índice Esclerométrico Médio Inicial	36,9	37,1	37,5	36,8	38,3	38,1	36,3	37,3	36,7	37,1	36,3	37,1
Limite Superior	40,6	40,8	41,3	40,4	42,1	41,9	39,9	41,0	40,4	40,8	39,9	40,8
Limite Inferior	33,2	33,4	33,8	33,1	34,5	34,3	32,6	33,5	33,0	33,4	32,6	33,4
Índice Esclerométrico Médio Final	36,4	36,4	36,3	36,8	39,1	37,5	36,3	37,3	37,0	36,8	36,3	37,1
Índice Esclerométrico Efetivo	38,2	38,3	38,1	38,6	41,0	39,4	38,1	39,1	38,9	38,6	38,1	39,0
Ângulo (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PE - ponto de esclerometria

3º PAV.												
Ponto	PE13	PE14	PE15	PE16	PE45	PE46	PE47	PE48	PE49	PE50	PE51	PE52
1	42	35	35	40	35	36	37	37	35	36	34	40
2	36	40	38	38	39	38	38	39	38	38	36	38
3	35	36	35	36	38	39	37	35	41	38	36	38
4	38	37	36	38	35	36	39	38	35	39	36	36
5	38	37	36	37	35	36	40	38	39	42	38	38
6	38	37	36	38	42	38	38	38	37	38	38	35
7	36	37	36	36	39	34	40	38	41	41	38	40
8	38	37	38	36	40	37	37	40	36	38	39	38
9	36	38	38	36	35	37	37	35	37	37	42	40
10	38	38	35	39	40	38	44	37	36	35	41	40
11	37	36	44	37	38	34	40	35	37	36	36	38
12	39	37	40	38	39	40	38	36	46	35	40	36
13	37	42	35	36	42	36	37	37	36	40	36	39
14	36	35	38	35	38	36	38	36	39	42	33	38
15	35	36	36	35	38	38	37	38	38	34	38	34
16	37	39	37	37	36	40	39	37	39	35	40	39
Índice Esclerométrico Médio Inicial	37,3	37,3	37,1	37,0	38,1	37,1	38,5	37,1	38,1	37,8	37,6	37,9
Limite Superior	41,0	41,0	40,8	40,7	41,9	40,8	42,4	40,8	41,9	41,5	41,3	41,7
Limite Inferior	33,5	33,6	33,4	33,3	34,3	33,4	34,7	33,4	34,3	34,0	33,8	34,1
Índice Esclerométrico Médio Final	36,9	37,0	36,6	37,0	37,5	37,1	38,1	37,1	37,6	37,1	37,6	38,2
Índice Esclerométrico Efetivo	38,8	38,9	38,4	38,9	39,4	38,9	40,0	39,0	39,5	39,0	39,5	40,1
Ângulo (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PE - ponto de esclerometria												



<b>4° PAV.</b>				
<b>Ponto</b>	<b>PE17</b>	<b>PE18</b>	<b>PE19</b>	<b>PE20</b>
<b>1</b>	36	34	35	38
<b>2</b>	31	34	34	36
<b>3</b>	31	34	34	35
<b>4</b>	31	32	36	33
<b>5</b>	34	36	37	37
<b>6</b>	30	35	33	33
<b>7</b>	33	36	35	31
<b>8</b>	31	33	36	33
<b>9</b>	32	38	36	33
<b>10</b>	34	36	34	38
<b>11</b>	35	35	36	37
<b>12</b>	36	34	35	34
<b>13</b>	34	35	34	34
<b>14</b>	34	34	36	35
<b>15</b>	34	35	36	34
<b>16</b>	33	38	35	34
<b>Índice Esclerométrico Médio Inicial</b>	33,1	34,9	35,1	34,7
<b>Limite Superior</b>	36,4	38,4	38,6	38,2
<b>Limite Inferior</b>	29,8	31,4	31,6	31,2
<b>Índice Esclerométrico Médio Final</b>	33,1	34,9	35,1	34,9
<b>Índice Esclerométrico Efetivo</b>	33,1	34,9	35,1	34,9
<b>Ângulo (°)</b>	0	0	0	0
<b>PE - ponto de esclerometria</b>				

## ANEXO B - RESULTADOS DO ENSAIO DE ULTRASSOM

ANDAR	PONTO	LEITURA	TEMPO (µs)	DISTÂNCIA (cm)	VPU (m/s)
Térreo	1	1	42,20	15	3554,50
		2	56,70	20	3527,34
		3	70,90	25	3526,09
		4	101,40	30	2958,58
		5	128,00	35	2734,38
		6	144,40	45	3116,34
		7	156,40	50	3196,93
	2	1	37,20	15	4032,26
		2	60,20	20	3322,26
		3	64,50	25	3875,97
		4	80,60	30	3722,08
		5	119,50	35	2928,87
		6	127,30	45	3534,96
		7	159,00	50	3144,65
	3	1	30,90	15	4854,37
		2	61,90	20	3231,02
		3	63,30	25	3949,45
		4	78,00	30	3846,15
		5	91,80	35	3812,64
		6	182,60	45	2464,40
		7	212,60	50	2351,83
	4	1	39,20	15	3826,53
		2	75,50	20	2649,01
		3	77,10	25	3242,54
		4	87,10	30	3444,32
		5	97,10	35	3604,53
		6	103,90	45	4331,09
		7	159,80	50	3128,91
	5	1	44,70	15	3355,70
		2	76,70	20	2607,56
		3	78,10	25	3201,02
		4	96,10	30	3121,75
		5	103,90	35	3368,62
		6	114,90	45	3916,45
		7	149,00	50	3355,70
	6	1	37,70	15	3978,78
		2	63,90	20	3129,89
		3	75,10	25	3328,89
		4	86,60	30	3464,20
		5	95,10	35	3680,34
		6	105,40	45	4269,45
		7	121,40	50	4118,62
	7	1	34,70	15	4322,77
		2	78,60	20	2544,53
		3	84,20	25	2969,12
		4	94,00	30	3191,49
		5	102,10	35	3428,01
		6	112,80	45	3989,36
		7	128,20	50	3900,16
	8	1	40,30	15	3722,08
		2	68,30	20	2928,26
		3	86,30	25	2896,87
		4	92,90	30	3229,28
		5	100,20	35	3493,01
		6	102,50	45	4390,24
		7	124,00	50	4032,26

ANDAR	PONTO	LEITURA	TEMPO (μs)	DISTÂNCIA (cm)	VPU (m/s)
1° Pav.	1	1	50,70	15	2958,58
		2	62,10	20	3220,61
		3	81,10	25	3082,61
		4	102,70	30	2921,13
		5	137,70	35	2541,76
		6	151,40	45	2972,26
		7	172,20	50	2903,60
	2	1	61,30	15	2446,98
		2	70,90	20	2820,87
		3	80,50	25	3105,59
		4	95,30	30	3147,95
		5	107,40	35	3258,85
		6	153,70	45	2927,78
		7	180,60	50	2768,55
	3	1	51,40	15	2918,29
		2	67,80	20	2949,85
		3	73,80	25	3387,53
		4	93,20	30	3218,88
		5	97,60	35	3586,07
		6	111,90	45	4021,45
		7	140,60	50	3556,19
	4	1	42,80	15	3504,67
		2	66,90	20	2989,54
		3	79,60	25	3140,70
		4	90,20	30	3325,94
		5	104,60	35	3346,08
		6	124,00	45	3629,03
		7	138,00	50	3623,19
	5	1	42,90	15	3496,50
		2	64,90	20	3081,66
		3	78,70	25	3176,62
		4	92,60	30	3239,74
		5	104,50	35	3349,28
		6	125,50	45	3585,66
		7	138,70	50	3604,90
	6	1	44,90	15	3340,76
		2	65,30	20	3062,79
		3	76,00	25	3289,47
		4	96,80	30	3099,17
		5	102,10	35	3428,01
		6	117,50	45	3829,79
		7	133,60	50	3742,51
	7	1	43,80	15	3424,66
		2	76,50	20	2614,38
		3	79,00	25	3164,56
		4	94,40	30	3177,97
		5	105,10	35	3330,16
		6	123,40	45	3646,68
		7	138,70	50	3604,90
	8	1	47,60	15	3151,26
		2	62,70	20	3189,79
		3	73,80	25	3387,53
		4	101,20	30	2964,43
		5	104,20	35	3358,93
		6	126,20	45	3565,77
		7	141,40	50	3536,07

ANDAR	PONTO	LEITURA	TEMPO (μs)	DISTÂNCIA (cm)	VPU (m/s)
2º Pav.	1	1	42,40	15	3537,74
		2	56,20	20	3558,72
		3	69,30	25	3607,50
		4	81,50	30	3680,98
		5	94,90	35	3688,09
		6	109,20	45	4120,88
		7	121,80	50	4105,09
	2	1	49,90	15	3006,01
		2	65,50	20	3053,44
		3	70,60	25	3541,08
		4	83,10	30	3610,11
		5	95,30	35	3672,61
		6	109,70	45	4102,10
		7	123,50	50	4048,58
	3	1	41,00	15	3658,54
		2	52,90	20	3780,72
		3	67,30	25	3714,71
		4	80,40	30	3731,34
		5	93,10	35	3759,40
		6	114,00	45	3947,37
		7	127,20	50	3930,82
	4	1	40,50	15	3703,70
		2	56,60	20	3533,57
		3	67,70	25	3692,76
		4	81,10	30	3699,14
		5	95,40	35	3668,76
		6	113,20	45	3975,27
		7	125,40	50	3987,24
	5	1	42,60	15	3521,13
		2	57,50	20	3478,26
		3	67,80	25	3687,32
		4	88,40	30	3393,67
		5	99,80	35	3507,01
		6	115,70	45	3889,37
		7	136,50	50	3663,00
	6	1	50,40	15	2976,19
		2	64,20	20	3115,26
		3	77,90	25	3209,24
		4	90,90	30	3300,33
		5	102,90	35	3401,36
		6	115,80	45	3886,01
		7	136,30	50	3668,38
	7	1	49,80	15	3012,05
		2	66,40	20	3012,05
		3	77,10	25	3242,54
		4	89,40	30	3355,70
		5	108,50	35	3225,81
		6	113,30	45	3971,76
		7	129,00	50	3875,97
	8	1	47,50	15	3157,89
		2	60,70	20	3294,89
		3	71,80	25	3481,89
		4	84,00	30	3571,43
		5	104,60	35	3346,08
		6	122,60	45	3670,47
		7	130,80	50	3822,63