



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
ENGENHARIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

**RACINE PEIXOTO DE ALMEIDA JÚNIOR**

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DOS ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA E  
ULTRASSOM COM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.**

**FORTALEZA**

**2019**

RACINE PEIXOTO DE ALMEIDA JÚNIOR

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DOS ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA E  
ULTRASSOM COM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, como exigência parcial para título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA  
2019

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

---

- A45a Almeida Júnior, Racine Peixoto de.  
Análise da correlação dos ensaios de esclerometria e ultrassom com a resistência à compressão do concreto / Racine Peixoto de Almeida Júnior. – 2019.  
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. Curvas de correlação. 2. Ensaios não Destrutivos. 3. Esclerometria. 4. Ultrassom. 5. Resistência à Compressão. I. Título.

CDD 620

---

**RACINE PEIXOTO DE ALMEIDA JÚNIOR**

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DOS ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA E  
ULTRASSOM COM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.

Projeto de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Estrutural e  
Construção Civil, como exigência parcial  
para Título de Bacharel em Engenharia  
Civil.

Aprovado em: 26/11/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Profa. Dra. Mylene de Melo Vieira (Examinadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Marcelo Silva Medeiros Júnior, Ph.D.  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*"Não podemos resolver nossos problemas  
com o mesmo pensamento que tínhamos  
quando os criamos". (Albert Einstein)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido o dom da vida e ter permitido que eu pudesse perseverar e chegar até aqui.

Aos meus pais, Racine Peixoto de Almeida e Francinara Veras de Almeida, por terem ciência da importância da formação escolar na vida de uma pessoa, de modo que nunca mediram esforços para me proporcionar o melhor dela. Obrigado por fazerem com que eu entendesse que o conhecimento e o estudo é a maior herança que poderiam deixar pra mim. Sou muito grato também por terem sido sempre meus maiores incentivadores nessa jornada.

Agradeço também aos meus amigos, Arthur, Bárbara, Lara, Leonardo, Sofia, Tallys, Thaís e Vitor, por terem caminhado junto comigo nessa graduação e nunca terem permitido que eu soltasse a mão de ninguém, sempre ajudando e corroborando para que todos pudessem ultrapassar as dificuldades juntos. Obrigado por todo o apoio na vida acadêmica, emocional e pela amizade de sempre.

Agradeço também ao meu amigo Jean Lopes por ter dividido o sonho de cursar engenharia civil comigo, e ter partilhado, mesmo que por um momento, a experiência dessa graduação, tendo dado sempre o total apoio que um amigo verdadeiro pode dar.

Por fim, sou grato ao Carlos Uchoa, que colaborou diversas vezes para que eu tivesse equilíbrio emocional suficiente para seguir em frente e realizar tudo que almejei. Obrigado pelo carinho, a empatia e o companheirismo de sempre.

## RESUMO

Os ensaios não destrutivos (NDT) se apresentam como uma ferramenta já consolidada no monitoramento da durabilidade das estruturas de concreto. Dentre as técnicas não destrutivas, o ensaio de esclerometria e o ensaio de velocidade de propagação de pulso ultrassônico, permitem uma análise qualitativa das características do concreto quanto à dureza superficial e homogeneidade, respectivamente. O presente trabalho tem como objetivo fazer a correlação de ensaios não destrutivos de ultrassom e de esclerometria com os dados de resistência à compressão do concreto por meio de curvas de correlação. Para isso, corpos de prova cilíndricos e prismáticos de quatro traços de concretos com resistência à compressão aos 28 dias de 25MPa, 30MPa, 35MPa e 45 MPa, foram moldados e ensaiados. Aos 28 dias, ensaios destrutivos de resistência à compressão e NDTs (ultrassom e esclerometria) foram realizados. Curvas de correlação foram plotadas e analisadas de modo a permitir uma ferramenta para estimar a resistência à compressão dos concretos. Os resultados obtidos demonstraram curvas com fatores de correlação confiáveis.

**Palavras-chave:** Curvas de correlação, Ensaios não Destrutivos, Esclerometria, Ultrassom, Resistência à Compressão.

## ABSTRACT

Non-destructive tests (NDT) present as a consolidated tool for monitoring the durability of concrete structures. Among the non destructive techniques, the sclerometry test and the ultrasonic pulse propagation velocity test, allow a qualitative analysis of the concrete characteristics regarding surface hardness and homogeneity, respectively. The present work aims to correlate non destructive ultrasound and sclerometry tests with the compressive strength data of the concrete by means of correlation curves. For this, four mix design cylindrical and prismatic specimens of compressive strength concrete at 28 days of 25MPa, 30MPa, 35MPa and 45 MPa were molded and tested. At 28 days, destructive and non-destructive compressive strength tests (ultrasound and sclerometry) were performed. Correlation curves were plotted and analyzed to allow a tool to estimate the compressive strength of concrete. The results showed curves with reliable correlation factors.

**Keywords:** Correlation curves, Nondestructive Tests, Sclerometry, Ultrasound, Compression Resistance.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esclerômetro de Reflexão .....	16
Figura 2 - Posicionamento do CP para ensaio.....	21
Figura 3 - Execução do ensaio de esclerometria.....	22
Figura 4 - Aparelho de ultrassom do concreto. ....	24
Figura 5 - Tipos de transmissão do ultrassom.....	25
Figura 6 - Influência do diâmetro máximo do agregado na velocidade de propagação do pulso ultrassônico no concreto com $a/c = 0,65$ . ....	28
Figura 7 - Velocidade de Propagação da Onda e Relação Água/Cimento. ....	30
Figura 8 - Proporção dos fatores que influenciam na velocidade do pulso .....	31
Figura 9 - Esquema Experimental.....	34
Figura 10 - Distribuição granulométrica da Brita 01. ....	36
Figura 11 - Distribuição granulométrica da Brita 0. ....	37
Figura 12 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo. ....	38
Figura 13 - Cura e Transporte dos CPs. ....	40
Figura 14 - Resistência à compressão do concreto .....	41
Figura 15 - Calibração dos transdutores. ....	42
Figura 16 - Calibração do esclerômetro com a Bigorna. ....	43
Figura 17 - Gráfico de Resistência à Compressão dos CPs 45MPa.....	45
Figura 18 - Resistência à compressão dos CPs de 25MPa e 35MPa. ....	45
Figura 19 - Gráfico de Resistência à Compressão dos CPs 30Mpa.....	46
Figura 20 - Índice Esclerométrico x Resistência à Compressão (28 dias).....	47
Figura 21 - VPU x Resistência à Compressão (28 dias) .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidades de onda relacionados com o tipo de rocha .....	28
Tabela 2 - Ensaio de granulometria – Brita 1 .....	35
Tabela 3 - Ensaio de granulometria – Brita 0.....	36
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados. ....	39
Tabela 5 - Resistência à compressão dos CPs cilíndricos.....	44
Tabela 6 - Índice Esclerométrico e Fck Médio. ....	47
Tabela 7 - Coeficientes de Correlações das Curvas .....	48
Tabela 8 - Resultados de VPU e Fck dos CPs cilíndricos.....	48
Tabela 9 - Índices de Correlações das Curvas de Ultrassom .....	49
Tabela 10 - Distribuição dos erros percentuais de cada modelo. ....	50
Tabela 11 - Distribuição dos erros percentuais de cada modelo (2).....	50
Tabela 12 - Comparação entre erros das equações esclerométricas atuais e passadas.....	51
Tabela 13 - Comparação entre erros das equações de ultrassom atuais e passadas.....	51

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 Justificativa .....	12
1.2 Problemáticas da Pesquisa .....	13
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 Objetivo Geral .....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 Ensaio Esclerométrico .....	15
3.1.2 Método do Ensaio.....	16
3.1.3 Vantagens e Limitações.....	17
3.1.3 Aplicabilidade.....	17
3.1.4 Fatores que influenciam os resultados.....	18
3.1.5 Normalização.....	22
3.1.6 Curvas de Correlação.....	22
3.2 Ensaio de Ultrassom.....	23
3.2.1 Método do Ensaio Ultrassônico.....	24
3.2.2 Limitações e Vantagens.....	25
3.2.3 Aplicabilidade.....	26
3.2.4 Fatores que Influenciam os Resultados .....	26
3.2.5 Proporção dos Fatores Influentes nos Resultados .....	31
3.2.6 Normalização.....	32
3.2.7 Curvas de Correlação.....	32
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>33</b>
4.1 Introdução.....	33
4.2 Caracterização dos Materiais.....	35
4.3 Composição dos Concretos .....	39

<b>4.4</b>	<b>Moldagem e Cura dos corpos de prova</b> .....	<b>39</b>
<b>4.5</b>	<b>Ensaio de Resistência à Compressão</b> .....	<b>41</b>
<b>4.6</b>	<b>Ensaio de Ultrassom</b> .....	<b>41</b>
<b>4.7</b>	<b>Ensaio de Esclerometria</b> .....	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Ensaio Resistência à Compressão (fc)</b> .....	<b>44</b>
<b>5.2</b>	<b>Correlação do Índice Esclerométrico com o Fck do Concreto</b> .....	<b>46</b>
<b>5.3</b>	<b>Correlação da Velocidade do Pulso Ultrassônico com o Fck do Concreto</b> .....	<b>48</b>
<b>5.4</b>	<b>Escolha do Tipo de Curva de Correlação.</b> .....	<b>50</b>
<b>5.5</b>	<b>Análise comparativa entre resultados diferentes.</b> .....	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo para compor elementos estruturais. Devido sua larga aplicação em projetos de estruturas, é objeto de estudo de muitos pesquisadores, os quais visam conhecer melhor suas propriedades e particularidades em serviço.

Os projetos são realizados partindo da premissa de que a estrutura de concreto possui um período de vida útil. Este tempo útil estimado de estrutura considera, entre outros aspectos, que as construções serão submetidas aos devidos processos de manutenção. Porém, a falta de manutenções preventivas e corretivas, muito comuns na prática, levam à deterioração precoce 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.

O controle se dá por meio do monitoramento das estruturas de concreto, o qual favorece a manutenção da vida útil prevista em projeto. Tal controle pode indicar necessidade de soluções corretivas na estrutura, permitindo um processo de recuperação mais rápido e, portanto, mais econômico.

Dentre as práticas de monitoramento das estruturas de concreto, Métodos Não Destrutivos ou Nondestructive Testing (NDT) apresentam vantagens significativas quando comparados com os métodos destrutivos. Dentre as muitas 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.

O ensaio ultrassônico é um método de NDT, que relaciona a velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto com suas propriedades elásticas e densidade. É bastante recomendado devido à sua capacidade de detecção de fissuras e de heterogeneidade, permitindo também o controle da compacidade do concreto e a realização de inferências acerca da resistência. Outrossim, a possibilidade de o ensaio ser realizado nas diferentes idades da estrutura de concreto permite avaliar as variações das propriedades com o tempo.

Outro NDT muito usado é o Ensaio Esclerométrico, que mede a dureza superficial

do concreto. O ensaio fornece elementos para a avaliação da qualidade do concreto endurecido, verificando também a uniformidade do concreto em diferentes regiões da estrutura. Assim, como no ensaio ultrassônico, pode ser usado também para avaliar mudanças nas propriedades do concreto ao longo do tempo. A principal diferença entre os dois métodos está no fato de que o ultrassônico permite realizar análise interna do concreto, enquanto o esclerométrico se limita a análises na região superficial.

Portanto, há uma grande necessidade de desenvolvimento de trabalhos e de formação de mão de obra qualificada nesta área (EVANGELISTA, 2002), buscando como principal objetivo uma análise mais adequada das estruturas de concreto produzidas dentro do território nacional. Este trabalho faz-se importante devido ao fato de o estado do Ceará ainda não apresentar um estudo que correlacione os métodos não destrutivos, velocidade de propagação ultrassônica e esclerometria, com o método destrutivo, ensaio de compressão axial, em concretos confeccionados com materiais locais e produzidos atualmente, utilizando curvas de calibração própria para cada tipo de concreto investigado.

Com isso, o trabalho apresenta um estudo experimental da utilização dos métodos não destrutivos supracitados, atrelando seus índices à possibilidade de inferir a resistência à compressão do concreto. Foram ensaiados concretos de 25, 30, 35 e 45MPa, moldados em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, nos quais foram avaliados a resistência à compressão 28 dias, sendo confeccionados para cada traço dois corpos de prova de cada formato. Os resultados foram analisados comparativamente por meio de modelos matemáticos.

Vale ressaltar que os NDTs não podem ser utilizados para precisar a resistência à compressão do concreto, mas sim para analisar suas propriedades de modo qualitativo quanto à dureza superficial e homogeneidade. No entanto, é possível estimar essa resistência, com base em dados qualitativos e quantitativos obtidos nos ensaios. Diante disso, foi constatado que é possível estabelecer correlações dos resultados do NDT com a resistência do concreto.

## **1.1 Justificativa**

As normas que tratam do ensaio esclerométrico e da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, descrevem minuciosamente os procedimentos de realização dos ensaios, bem como materiais e métodos utilizados. Porém, não há uma associação dos dados fornecidos por esses ensaios com a resistência à compressão do concreto.

Tendo o fato supracitado em vista, o presente trabalho baseia-se na necessidade existente de correlacionar o índice esclerométrico e a velocidade do ultrassom com a resistência à compressão de cada tipo de concreto estudado. Com isso, uma curva de plotagem entre esses dados será elaborada de modo a expressar essa correlação. Isso é importante porque permitirá estimar a resistência à compressão de elementos estruturais de concreto acabados, por exemplo, servindo de base para a ratificação dos dados de resistência fornecidos pelas concreteiras, bem como para a identificação da condição das estruturas de concreto submetidas às condições de serviço há mais tempo. Além disso, esses índices dos ensaios citados acima serão uma ferramenta importante a ser utilizada na identificação das manifestações patológicas internas e superficiais no concreto.

A elaboração dessas curvas é importante para fazer inferências acerca da resistência à compressão do concreto com maior confiabilidade, dado que elas serão confeccionadas de acordo com dados de ensaios realizados em concretos moldados com materiais e condições de produção locais.

A partir da revisão bibliográfica será constatado que os materiais exercem forte influência nos índices obtidos dos NDTs, portanto, a realização do estudo se justifica também na necessidade de avaliar a correlação dos resultados desses ensaios com o  $f_{ck}$  do concreto, perante as atuais condições dos materiais empregados na sua fabricação.

## **1.2 Problemáticas da Pesquisa**

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil. Portanto, a durabilidade das estruturas está diretamente relacionada com a vida útil prevista em projeto. Ainda segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto,

sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor.

O grande entrave é que, em muitos dos casos, as estruturas de concreto não passam por esse processo de manutenção preventiva, e as pessoas, muitas vezes, buscam soluções quando o problema toma proporções mais graves, o que favorece a manifestação patológica precoce nessas estruturas. Esse descaso com o processo de manutenção e controle dos elementos estruturais, acarretou inúmeros acidentes: desabamentos de prédios, quedas de pontes e ruína de elementos estruturais, por exemplo. Tais fatos, por sua vez, podem ser evitados através do controle e monitoramento das estruturas, sendo os NDTs bastante utilizados para isso.

Portanto, uma ferramenta importante no monitoramento das estruturas pode ser o uso de curvas que correlacionem o índice esclerométrico e a velocidade do pulso ultrassônico, com a resistência à compressão do concreto, bem como estimar sua resistência à compressão. Isso favorece também a identificação de manifestações patológicas e proporciona maior controle do estado de conservação dos elementos estruturais, bem como fornece um método para interpretar os dados dos ensaios.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo plotar curvas de correlação do índice esclerométrico e da velocidade de propagação do pulso ultrassônico com a resistência à compressão do concreto. Esse estudo visa também verificar se os materiais locais proporcionam concretos de qualidade que possam ter suas resistências à compressão inferidas por índices de NDTs.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar ensaios destrutivos (resistência à compressão) e não destrutivos (esclerometria e ultrassom) nos concretos estudados na idade de 28 dias;



- Verificar o grau de correlação dos dados de ensaios não destrutivos com o fck do concreto por meio de curvas de correlação.
- Avaliar os resultados obtidos, de modo comparativo, através da correlação das curvas de calibração entre resistência à compressão e as grandezas medidas nos NDTs.
- Analisar de modo comparativo os resultados obtidos e resultados existentes na literatura quanto à correlação de ensaio destrutivo e NDTs.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

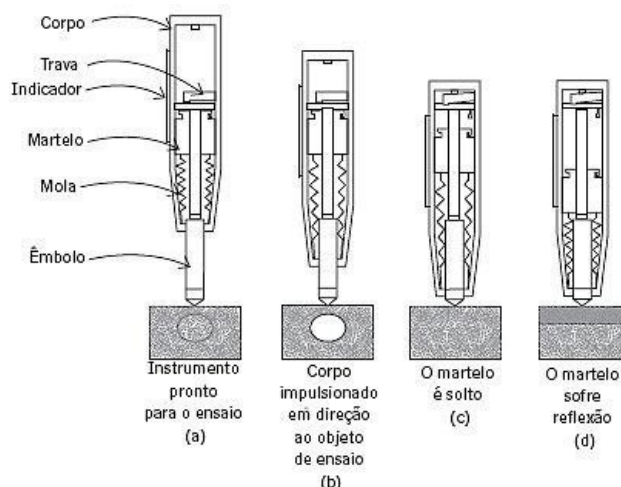
#### **3.1 Ensaio Esclerométrico**

O ensaio esclerométrico é um método empregado para determinação do valor aproximado da resistência à compressão superficial do concreto endurecido e de sua uniformidade. A realização do ensaio de esclerometria consiste em uma massa martelo que, impulsionada por mola, choca-se com a área a ser ensaiada. Quanto maior a dureza da superfície, menor a parcela da energia que se converte em deformação permanente, e maior é a reflexão do objeto massa martelo que golpeia a superfície. O equipamento usado no ensaio é conhecido como esclerômetro de reflexão (Figura 1).

As primeiras tentativas de medir a dureza superficial do concreto ocorreram em 1930, sendo que inicialmente foram utilizados métodos envolvendo medições do retorno de uma bola de aço fixa num pêndulo, ou atirada de uma pistola. O princípio do ricochete, segundo o qual o retorno de uma massa elástica depende da dureza da superfície onde ela se choca, foi o mais aceito mundialmente (Bungey, 1989)

O esclerômetro suíço, “Schimidt Hammer”, tem sido usado em vários países por muitos anos (Evangelista, 2002).

Figura 1 - Esclerômetro de Reflexão



Fonte: (Téchne, 2009).

### 3.1.2 Método do Ensaio

No ensaio de esclerometria a superfície do concreto que está sendo testada é submetida a um impacto, comprimindo o pistão do aparelho. Uma massa (martelo) com uma mola adquire uma quantidade de energia devido à extensão desta até uma posição determinada. Quando a mola se solta, a massa sofre rebote ao se chocar contra a barra de percussão, ainda em contato com o concreto. A distância percorrida pela massa no retorno, em porcentagem da deformação inicial, é denominada índice esclerométrico (IE).

O ricochete depende do valor da energia cinética no martelo antes do impacto com o êmbolo e o quanto dessa energia é absorvida durante o impacto. Uma vez que uma fração da energia é absorvida no atrito mecânico do equipamento, a outra parte é absorvida na interação entre o êmbolo e o concreto. A energia absorvida pelo concreto está relacionada com a resistência e a rigidez do concreto: quanto menos ele absorve, menor a deformação permanente da estrutura e maior a resistência, logo maior o recuo ou a reflexão do martelo.

Não há uma correlação única entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão, devido à influência de fatores como tipo e quantidade de cimento, tipo de agregado, idade e umidade do concreto, mas é válida a aproximação.

### 3.1.3 Vantagens e Limitações

O equipamento é leve, de fácil manuseio, simples de operar e barato, sendo que uma grande quantidade de dados pode ser obtida rapidamente. Os danos que podem ser causados na superfície são praticamente nulos (Evangelista, 2002). Pequenas marcas podem se fazer presentes em concretos de pouca idade ou de baixa resistência

O método é bom para avaliação da uniformidade do concreto, monitoramento do desenvolvimento da resistência ao longo do tempo, bem como para estimar a resistência do concreto.

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. Um outro fator a ser observado no ensaio é a posição em que o esclerômetro deve ser usado: preferencialmente ortogonalmente na área de ensaio. Quando o ensaio não for executado na posição horizontal, o índice esclerométrico deve ser corrigido, pois, os resultados são afetados pela influência da gravidade sobre a força da mola do esclerômetro. O impacto do esclerômetro não deve provocar vibração na peça. Peças pequenas devem ser apoiadas ou fixadas (Evangelista, 2002).

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. 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, conforme a NBR 7584, 2013.

Segundo Bungey (1989), este método não deve ser aplicado em concretos com resistência à compressão inferiores a 10MPa.

### 3.1.3 Aplicabilidade

Através deste método, pode-se verificar a homogeneidade do concreto comparando diferentes áreas da estrutura, sem que este seja danificado. Mesmo com precisão limitada, pode-se estimar a resistência do concreto baseando-se em curvas de correlação (ACI-364, 1993).

A NBR 7584 (ABNT, 2013) 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 outras.

### **3.1.4 Fatores que influenciam os resultados**

Segundo Malhotra (2004), os principais fatores que influenciam os resultados do ensaio esclerométrico são: condições de superfície e umidade, tipo de fôrma, tipo de cimento, teor de cimento, tipo e teor do agregado graúdo, posição do esclerômetro, carbonatação, idade da peça, condições de umidade da superfície, e rigidez da peça.

#### **- Superfície do Concreto:**

A superfície do concreto deve ser preferencialmente lisa, porque o acabamento da superfície influencia no IE. Superfícies desempenadas são, em geral, mais duras que as superfícies que não são. Portanto, as superfícies que não estiverem lisas ou com bom acabamento deverão ser preparadas com uma pedra abrasiva antes de realizar o ensaio (NEVILLE, 1997).

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:

Superfícies carbonatadas resultam em IEs maiores do que as camadas internas do elemento estrutural (ACI 228.1R, 2003). Estima-se que a presença de umidade superficial no concreto pode ser responsável por variações nos índices esclerométricos de até 20% (NBR 7584, 2013).

**- Tipo de fôrma:**

Hobbs e Tchoketch (2006) demonstraram em seus resultados que o índice esclerométrico é maior em quase duas unidades nas medições realizadas nas superfícies dos corpos-de-prova moldados com forma de madeira que aqueles utilizaram formas plásticas, para uma mesma resistência do concreto. Esta diferença parece constante e significativa.

As fôrmas de madeira compensada absorvem a umidade do concreto, produzindo uma camada superficial mais dura do que a obtida em concretos moldados em fôrmas metálicas ou plásticas (ACI 228.1R-03, 2003).

**- Tipo e Teor de Cimento:**

A NM 78 (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.

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, o erro na estimativa da resistência resultado de uma mudança no conteúdo de cimento é improvável que exceda o 10%. Quanto ao tipo de cimento, descreve que concretos feitos com cimento aluminoso ou cimento supersulfatado (80% a 85% de escória de alto forno mais 10% a 15% de sulfato de cálcio) apresentam correlações diferentes das obtidas com cimento Portland comum.

De acordo com Bungey (1989), mudanças no teor de cimento não correspondem a mudanças na dureza superficial do concreto

Segundo Evangelista (2002), através de uma análise estatística de valores de IE 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.

**- Tipo de Agregado e Dimensão Máxima do Agregado:**

A energia absorvida pelo concreto está relacionada com sua resistência e rigidez,

de modo que concretos mais rígidos e resistentes proporcionam maiores valores de IE, por gerarem uma reflexão maior no martelo. Portanto os índices esclerométricos são resultados da combinação dos dois. Como a rigidez é influenciada pelo tipo de agregado graúdo, conseqüentemente o índice esclerométrico também será influenciado (Neville, 1997).

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

Ainda de acordo com ACI 228.1R (2003), o tipo de agregado influencia a rigidez do concreto, daí a necessidade de se obter curvas de correlação com os mesmos materiais utilizados na confecção do concreto da estrutura a ser investigada. Segundo NBR 7584:2013, diferentes tipos de agregados podem fornecer concretos de mesma resistência, porém índices esclerométricos diferentes. Na utilização de agregados leves ou pesados, a variação ainda é mais acentuada (NBR 7584, 2013).

Evangelista (2002) apresenta em sua pesquisa os resultados da influência de diferentes tipos de agregado graúdo no IE. Pôde-se constatar que, em geral, os concretos com brita de gnaiss apresentaram índices 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.

Yun et al (1988) investigaram composições com agregados de diâmetro máximo característico igual a 25mm e 40mm. Os resultados demonstram que a correlação do ensaio de esclerometria com a resistência à compressão é mais influenciada pelo teor do agregado graúdo no concreto do que pela dimensão máxima deste. A presença de um agregado graúdo na região abaixo do pistão pode resultar em um índice esclerométrico muito alto, e o oposto ocorre se houver vazios (Neville, 1997).

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

#### **- Posição do Esclerômetro:**

Segundo as várias normas técnicas de diferentes países que tratam deste ensaio, o esclerômetro deve ser usado ortogonalmente à área de ensaio. Quando o ensaio não é feito

com equipamento na posição horizontal deve-se corrigir o IE por meio de coeficientes fornecidos pelos fabricantes. Esta correção deve-se à influência da gravidade sobre a força da mola do esclerômetro.

#### **- Rigidez do Elemento Ensaiado:**

De acordo com as normas técnicas, peças pequenas devem estar bem apoiadas e fixadas para não dificultar a estimativa da resistência, uma vez que o impacto do aparelho com a peça ensaiada pode gerar vibrações no concreto ensaiado. No caso de comparações entre elementos estruturais, estas devem ser feitas a partir de medições em pontos de rigidez similar (Figura 2).

A RILEM NDT 3 (1984) cita que os corpos de prova (cilíndricos ou cúbicos) devem ter dimensões grandes, como por exemplo cubos de 150 mm. Para evitar movimentos bruscos do corpo de prova em função do impacto do esclerômetro, este pode ser sustentado entre os pratos da prensa, sob uma tensão de 1MPa, ou apoiado numa base bastante rígida.

Figura 2 - Posicionamento do CP para ensaio.



Fonte: (O Autor, 2019)

### 3.1.5 Normalização

O ensaio de esclerometria é padronizado, no Brasil, pela Norma Brasileira NBR 7584 (ABNT, 2013), pela Norma Mercosul NM 78:1996 e pela Norma Americana ASTM C 805:1985.

### 3.1.6 Curvas de Correlação

Evangelista (2002) afirma que é preferível o ensaio com a superfície seca, e caso os corpos de prova estiverem sob cura úmida, estes devem permanecer por 48 horas no ambiente do laboratório antes do ensaio. A NBR 7584:2013 recomenda que devem ser feitas no mínimo 16 medições por face, tanto para CPs cilíndricos quanto para CPs cúbicos ou prismáticos. A Figura 3 mostra a execução de uma medição esclerométrica em prisma de concreto. A Figura 3 mostra a execução de uma medição esclerométrica em prisma de concreto.

Figura 3 - Execução do ensaio de esclerometria.



Fonte: (O Autor, 2019)



A maneira mais conveniente de se obter a correlação entre a resistência e o índice esclerométrico é realizar ambos os ensaios em corpos-de-prova cúbicos. Como é muito difícil assegurar que estes corpos-de-prova representem fielmente a estrutura a ser testada, resultados mais confiáveis serão obtidos através da extração de testemunhos. Neste caso, o ensaio de esclerometria deve ser feito no mesmo local onde serão retirados os testemunhos (BS 1881: Part 202, 1986)

Conforme Machado (2005), para se obter a correlação entre a resistência e o índice esclerométrico, deve ser ensaiado um número razoável de CP, abrangendo vários níveis de resistência. A variação da resistência pode ser feita de duas formas distintas, dependendo do que se queira averiguar. Se o interesse for o monitoramento da evolução da resistência, os CP devem ser ensaiados em diferentes idades, mas caso o interesse seja o monitoramento da qualidade do concreto, deve-se variar as proporções dos seus componentes.

A RILEM NDT 3 (1984) descreve que os corpos-de-prova, cilíndricos ou cúbicos, devem ter dimensões grandes (=150mm), evitando assim a influência do tamanho da peça nos resultados.

A NM 78 (1996) recomenda que sejam feitos concretos variando a relação a/c entre 0,4 e 0,7, com intervalos de 0,05. Para cada valor da relação a/c, moldar no mínimo 2 corpos-de-prova cilíndricos 15x30cm, submetidos à cura úmida. Determina-se o índice esclerométrico médio e a resistência à compressão média entre os corpos-de-prova. Calcula-se a média aritmética de cada variável, resistência e índice esclerométrico, que será um ponto na curva de correlação. Esta norma ainda recomenda que o ensaio com esclerômetro seja feito na prensa com uma carga de 15% do valor de ruptura do corpo-de-prova à compressão, para evitar vibrações e deslocamentos no momento do ensaio.

O Comitê 228.1R de ACI (2003) relata que o coeficiente de variação médio do ensaio de esclerometria é de aproximadamente 10%.

### **3.2 Ensaio de Ultrassom**

As primeiras publicações sobre medições de pulsos gerados mecanicamente surgiram nos Estados Unidos, por volta de 1940. Permitiu-se então, demonstrar que a velocidade de propagação depende das propriedades elásticas e era quase que independente da geometria do elemento. A partir dos anos 60, iniciou-se desenvolvido de

equipamentos portáteis, como o PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester), desenvolvido na década de 70 (CÂMARA, 2006).

Esses equipamentos são equipados com bateria próprias e um mostrador digital com o tempo de propagação da onda ultrassônica (Figura 4). Vale enfatizar que, apesar do fato de o dado mais utilizado ser a velocidade do pulso ultrassônico, o aparelho mede somente o tempo que o pulso leva para percorrer internamente o concreto, saindo do transdutor emissor e chegando ao receptor.

Figura 4 - Aparelho de ultrassom do concreto.



Fonte: (O Autor, 2019)

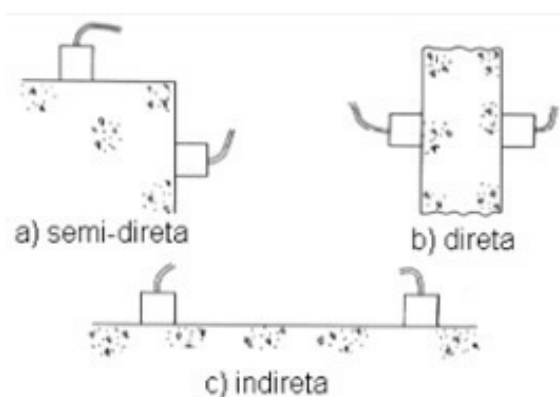
### 3.2.1 Método do Ensaio Ultrassônico

O método se baseia no fato de que a velocidade do pulso ultrassônico está relacionada com a qualidade do concreto. As ondas ultrassônicas se propagam melhor quando existe um meio sólido, quando há um meio material para se propagarem, logo quanto menos vazios o concreto tiver, e quanto maior for sua resistência, maior será a velocidade do pulso ultrassônico.

O ensaio consiste na medição, com o uso de dispositivos eletrônicos, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas e da distância entre o emissor e o receptor. O comprimento percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação resulta na velocidade média de propagação da onda. Vale ressaltar que o que é medido é o tempo que o pulso leva para sair do emissor e chegar ao receptor, a distância entre estes deve ser previamente conhecida e com esses dois dados, dividindo a distância pelo tempo de propagação, é obtido a velocidade do pulso ultrassônico.

A velocidade da onda depende principalmente dos seguintes fatores: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica do concreto, e também da presença de armadura (Bungey, 1989). O ensaio é bastante aplicável para a determinação da uniformidade do concreto, determinação da existência de fissuras, monitoramento da evolução da resistência e estimar a resistência à compressão por meio de curvas de correlação. Na Figura 5 estão representadas três formas de realizar o ensaio de ultrassom do concreto: transmissão direta, semi-direta e indireta.

Figura 5 - Tipos de transmissão do ultrassom.



(Fonte: Autor Desconhecido)

### 3.2.2 Limitações e Vantagens

O acesso a superfícies estruturais expostas nem sempre é possível. As pontes, por exemplo, possuem suas lajes, tecnicamente conhecidas por tabuleiro, cobertas por revestimento asfáltico, o que inviabiliza a execução do ensaio por transmissão direta, sendo necessário buscar outras formas de ensaio.

Além disso, a boa ligação entre o concreto e o transdutor é um ponto crítico do método, assim como a interpretação dos resultados, que pode ser difícil (Malhotra, 1984). Somado a isso, a relação entre a velocidade da onda e a resistência, pode ser confundida devido a presença de vazios, fissuras e descontinuidades do concreto.

O ensaio apresenta também o inconveniente de depender da desforma da estrutura, que poderá acontecer após vários dias da concretagem, impossibilitando estimar-se a resistência do concreto nas primeiras idades. Este inconveniente pode ser superado utilizando janelas com tampas removíveis na fôrma da estrutura a ser concretada, que

podem ser abertas para a utilização do ultra-som e posteriormente fechadas, antes que ocorra a desforma da peça por inteiro. Porém, ele mostra-se eficaz na verificação da homogeneidade do concreto e da resistência à compressão (PINTO, 2004, apud CÂMARA, 2006).

Uma das principais vantagens é a de que o equipamento para este ensaio é de fácil operação e de custo não muito elevado. O ensaio de ultrassom é completamente não destrutivo, e pode avaliar o concreto em toda a espessura do elemento estrutural, caso seja feita a transmissão direta.

### **3.2.3 Aplicabilidade**

Se houver descontinuidades no concreto, estas podem ser detectadas através do ultrassom, pela diferença de velocidades das ondas ultrassônicas (ACI 364, 1993). O método de ultrassom possibilita estimar a uniformidade do concreto, como também avaliar danos provocados pelo fogo, gelo, ou agentes químicos (Chang e Law, 1983).

Dentre outras aplicações, pode-se destacar:

- a. Determinação da existência de fissuras.
- b. Monitoramento da resistência do concreto de acordo com o avanço da sua idade.
- c. Estimar a resistência à compressão por meio de curvas de correlação.
- d. Avaliação do estado de deterioração do concreto.
- e. Verificação da homogeneidade do concreto.

### **3.2.4 Fatores que Influenciam os Resultados**

De acordo com Manual PUNDIT LAB (2017), diversos fatores influenciam na estimativa da resistência, principalmente pelo tipo de agregado, condição da superfície, relação água/cimento, idade do concreto, dimensão e graduação dos agregados, condições de cura, presença de armaduras e tipo de cimento.

#### **- Condições de Superfície:**

A superfície do concreto que será ensaiado deverá ser lisa, sem a presença de ranhuras, nem muito menos pontas de agregados aparentes superficialmente, para garantir

perfeito contato dos transdutores com ela. Evitar superfícies que receberam acabamento, pois este pode não ser o representativo de toda a peça (Bungey, 1989). Recomenda-se que seja realizado em superfícies não circulares, devido ao contato incompleto entre o transdutor e esse tipo de superfície, porém, há a possibilidade de usar transdutores pontuais, mas o nível de energia destes são menores, e ainda existem restrições quanto à distância entre os transdutores além da qual os pulsos não são mais recebidos (Chung e Law, 1983).

#### **- Tipo e quantidade de Agregado:**

Sturup et al. (1984) constataram que, para uma dada resistência à compressão, a diferença entre a velocidade da onda em concretos convencionais e concreto pesado foi pequena, onde são usados, respectivamente, o agregado convencional e pesado. Isso difere para concreto leve, onde a diferença de velocidade de propagação da onda foi maior, quando comparado com os dois outros concretos estudados. Agregados graúdos e miúdos têm módulos de elasticidade e velocidades de propagação da onda maiores que o da pasta de cimento, por serem mais sólidos e a onda sonora ter a propriedade de se propagar melhor em um meio material.

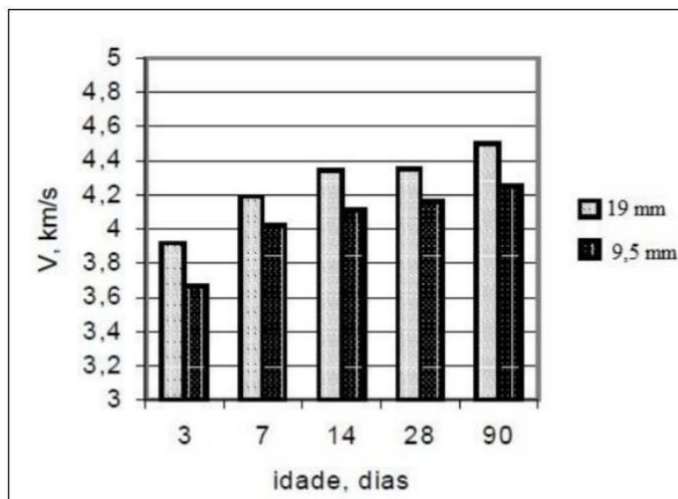
Logo, concretos com massas específicas maiores, ou com maior quantidade de agregados, apresenta maiores velocidades de propagação da onda (Chung e Law, 1983). A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é influenciada significativamente por agregados leves e dimensão máxima do agregado graúdo. Nas correlações entre a resistência à compressão e velocidade de propagação das ondas ultra- sônicas, verificou-se que se pode adotar uma única correlação para concretos de agregados britados e um mesmo tipo de cimento, mas se usado outro tipo de agregado leve e/ou cimento, outra correlação é necessária (Evangelista, 2002).

Além disso, Machado (2005) constatou em seus experimentos, que mantendo a relação água/cimento constantes e o mesmo tipo de cimento e alterando apenas o agregado utilizado, o concreto com uso do agregado de diâmetro máximo de 19,5mm apresentou velocidades de propagação de ondas maiores que o concreto de agregado de 9,5mm, sendo um aumento da ordem de 2,5% a 11% de velocidade.

O gráfico da velocidade de propagação do pulso ultrassônico onda em relação as idades dos ensaios, considerando os dois concretos estudados por Machado (2005) está

plotado na Figura 6.

Figura 6 - Influência do diâmetro máximo do agregado na velocidade de propagação do pulso ultrassônico no concreto com  $a/c = 0,65$ .



Fonte: (MACHADO, 2005)

Em concretos com agregado granítico pôde-se constatar uma velocidade 4,5% maior do que em concretos com agregado diabásico (Irrigaray e Pinto, 2011). Machado (2005) observou uma maior velocidade de onda para concretos com agregado sienito do que concretos com agregado com gnaisse. A Tabela 1 mostra a velocidade do pulso ultrassônico de acordo com o tipo de rocha, o que confirma que dependendo da origem da rocha em que o agregado foi originado, este pode gerar alterações nas velocidades apresentadas no concreto.

Tabela 1 - Velocidades de onda relacionados com o tipo de rocha

TIPO DE ROCHA	V (km/s)
Basalto	5,27 a 6,02
Dolomita	4,37 a 6,09
Granito	4,00 a 5,79
Calcário	3,91 a 5,78
Quartzito	5,57 a 5,72
Arenito	2,55 a 4,23

Fonte: (CHUNG, LAW, 1983)

**- Condições de Cura:**

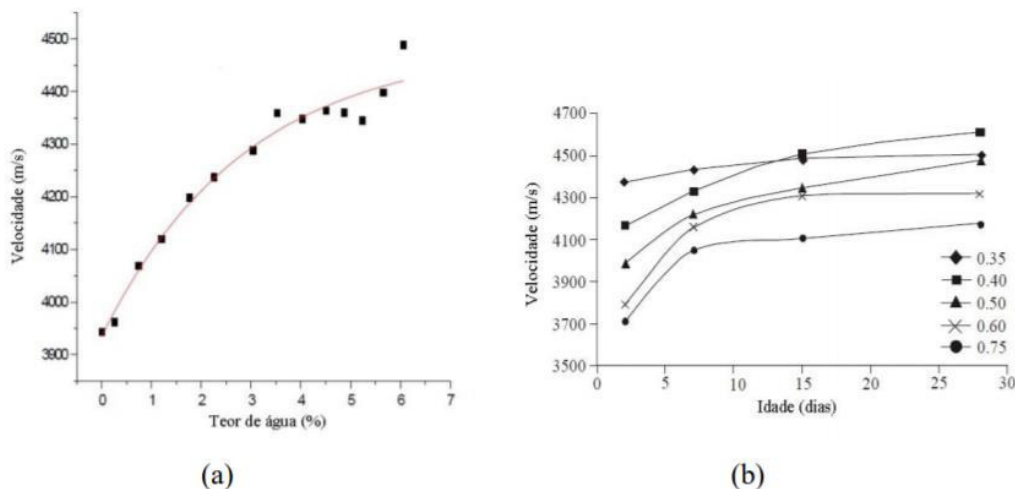
Esse fator atua evitando a perda de água precoce do concreto durante a hidratação nas suas primeiras idades, permitindo a ocorrência das reações necessárias para pega e endurecimento, o que promove a homogeneidade do material. Palácios (2012) mostra que o tempo de cura é o segundo fator mais importante que influencia o valor da velocidade do pulso ultrassônico.

A velocidade de onda através do concreto saturado pode ser de 5% maior quando comparados ao mesmo concreto em condições secas (BUNGEY; MILLARD, 1996). Lawson et al. (2011) e Thai et al. (2011) constatam em sua pesquisa que o cimento hidrata e diminui a porosidade à medida que a idade aumenta. Quando a cura do concreto não é realizada corretamente, a água evapora e impossibilita a ocorrência das reações de hidratação do cimento, ocorrendo o processo inverso, o que acarreta na redução das velocidades medidas.

**- Relação água/cimento:**

A velocidade de onda é também afetada pela relação água/cimento do concreto e pela idade do concreto. Palacios (2012) estudou o efeito da relação com a velocidade de propagação da onda ultrassônica com o fator água cimento. Os resultados demonstraram que quanto maior a relação água cimento, menores eram as velocidades de propagação da onda, justamente porque a adição de água além do limite especificado pode aumentar o abatimento acima do limite especificado (Figura 7).

Figura 7 - Velocidade de Propagação da Onda e Relação Água/Cimento.



Fonte: (PALACIOS, 2012)

#### - Presença de Armaduras:

A velocidade da onda é influenciada principalmente pelo coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade, massa específica do concreto e, no caso de concreto armado, a presença de armaduras e vazios (BUNGEY, 1989; CÂMARA, 2006).

Quando existem armaduras localizadas paralelamente ao caminho das ondas, dependendo da proximidade dos transdutores, as ondas podem transitar parte através do concreto e parte através do aço. Como a velocidade das ondas é maior no aço do que no concreto (1,2 a 1,9 vezes), o primeiro pulso a chegar no transdutor receptor percorreu o concreto e o aço, o que acarreta um aumento da velocidade de propagação (Sturup et al, 1984, RILEM NDT1, 1972).

Bungey (1989) cita que, nos casos onde não se pode evitar a presença das barras de aço, torna-se necessário fazer uma correção nos valores obtidos para que se possa estimar a velocidade de propagação no concreto.

#### - Tipo de Cimento:

Thai et al. (2011) avaliaram dois tipos de concreto com uma relação água/cimento fixa e variando só o tipo de cimento (CEM IIA 32,5 e CEM I 52, 5). De acordo com os resultados obtidos, nas idades iniciais as velocidades de onda variaram em torno de 2%



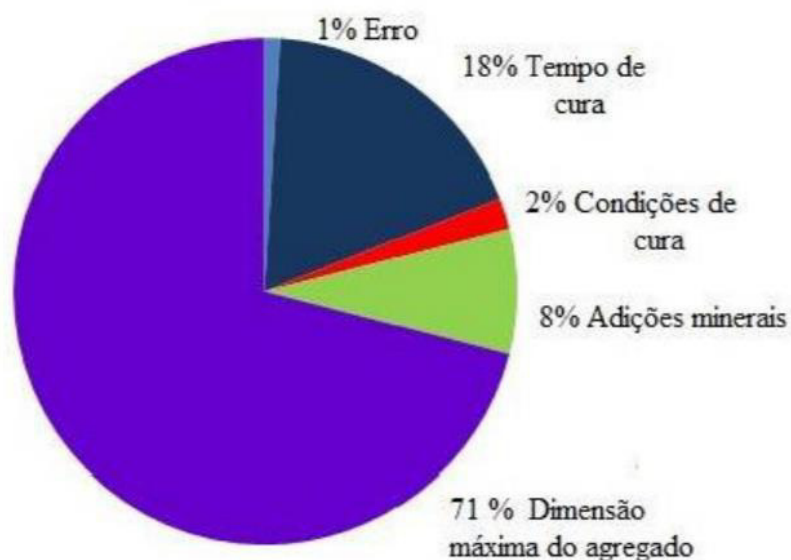
diminuindo esta variação em até 0,47%, quando comparados os concretos aos 28 dias .

Irrigaray e Pinto, (2011) encontraram uma variação considerável da velocidade de onda nos concretos onde foi modificado somente o tipo cimento. Nos concretos com cimento CP V-ARI-RS as velocidades obtidas foram maiores comparadas com as velocidades dos concretos onde foi utilizado cimento CP IV-32. Foi observado na sua pesquisa que concretos produzidos com cimento CP IV apresentaram velocidades em torno de 5% maiores aos concretos onde foi utilizado cimento CP III (Evangelista, 2002).

### 3.2.5 Proporção dos Fatores Influentes nos Resultados

Tanyidizi e Coskun (2008) realizaram uma análise do nível de importância de quatro parâmetros que influenciam nos resultados do ensaio de ultrassom, os quais são: a dimensão máxima do agregado, condições de cura, adições de minerais e tempo de cura, apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Proporção dos fatores que influenciam na velocidade do pulso



Fonte: (Tanyidizi e Coskun; 2008)

Os resultados apresentados nesse estudo demonstram que a dimensão máxima do agregado é o fator que mais influencia na velocidade da onda, o que pode ser justificado pelo fato desta ser bastante influenciada pelo módulo de elasticidade do concreto, bem como pela massa específica, e como se sabe o agregado aumenta bastante esses dois

parâmetros no concreto. Além disso, esse componente ocupa cerca de 60 a 80% do volume de concreto e a velocidade do pulso no concreto é obtida pela soma dos tempos na propagação na pasta de cimento e no agregado.

Palacios (2012), por sua vez, também apresenta como o segundo parâmetro importante que influencia o valor de  $V$ , através do material, o tempo de cura. Corpos-de-prova submetidos à cura úmida obtiveram maiores velocidades de propagação de onda ultrassônica (CÂMARA, 2006).

Como terceiro fator importante, apresenta-se a adição de minerais que atua reduzindo o calor de hidratação, bem como a entrada de agentes agressivos e a porosidade, fato que aumenta a durabilidade do concreto e a velocidade da onda ultrassônica.

### **3.2.6 Normalização**

O ensaio de ultrassom é padronizado, no Brasil, pela Norma Brasileira NBR 8802 (ABNT, 2013), pela Norma Mercosul NM 58:1996 e pela Norma Americana ASTM C 587:1983.

### **3.2.7 Curvas de Correlação**

A resistência do concreto, em geral, é controlada pela pasta de cimento e a velocidade de onda ultrassônica principalmente pelas propriedades dos agregados (CÂMARA, 2006).

A correlação entre a resistência à compressão pode ser determinada realizando-se ensaios de ultrassom em corpos-de-prova de um determinado tipo de concreto. Posteriormente, esta correlação poderá ser utilizada para estimar a resistência à compressão deste mesmo concreto (ASTM C 587, 1983). Evangelista (2002) e BS 1881: Part 203 (1986) determinam que as curvas de correlação devem ser obtidas experimentalmente para cada tipo de concreto, realizando ensaios em tipos de corpos-de-prova com resistências baixas, médias e altas.

É sugerido também a moldagem de no mínimo três corpos-de-prova por betonada, para cada CP devem ser feitas três medições de velocidade entre o topo e a base, o valor obtido nos ensaios deve ultrapassar  $\pm 5\%$  do valor médio das três medições.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 Introdução

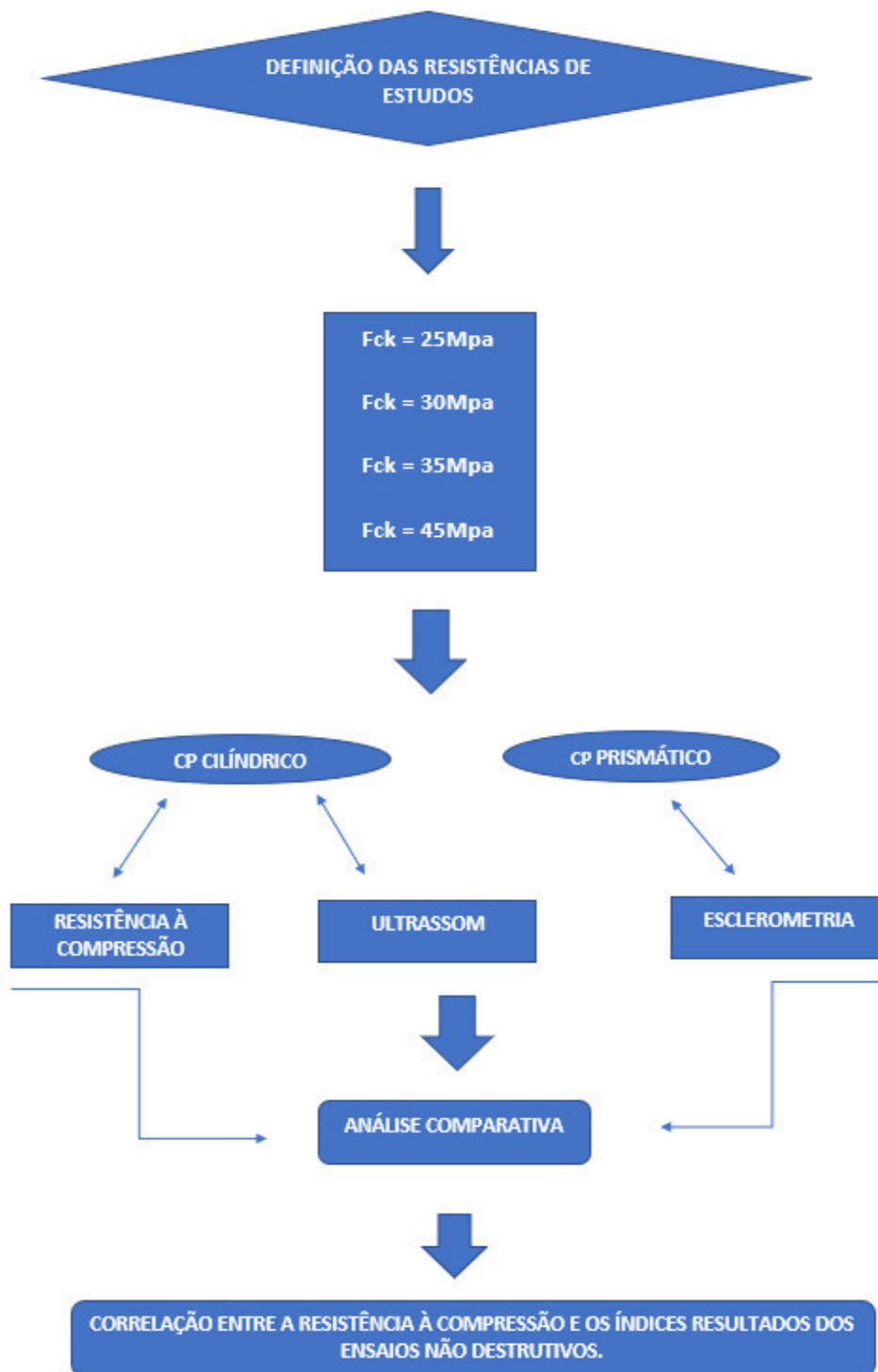
Com a finalidade de propor curvas de correlação entre a resistência à compressão e as grandezas medidas por meio da realização de ensaios não destrutivos, o programa experimental englobou o estudo de diferentes composições de concretos fornecidos por uma concreteira da cidade de Fortaleza, onde foram moldados os corpos de prova a partir de lotes de concretos que seriam destinados às obras em execução na região.

Existem três tipos de NDTs bastante conhecidos: ultrassom do concreto, esclerometria e penetração de pinos. Foram escolhidos os dois primeiros, porque as funcionalidades dos dois se complementam, visto que o ensaio de esclerometria serve para medir a dureza superficial, sendo possível fazer inferências acerca de uma camada de 20 a 30mm internas ao concreto, enquanto o de ultrassom permite a emissão de um pulso que percorre internamente o concreto em toda sua extensão. A disponibilidade de equipamentos para os ensaios também foi um fator que contribuiu para essa escolha.

Para comparar os valores dos índices encontrados através dos ensaios supracitados, foi realizado o ensaio de resistência à compressão dos CPs cilíndricos. Para isso foram moldados corpos de prova, que de acordo com seus respectivos traços, forneceram CPs de resistência à compressão de: 25MPa, 30MPa, 35MPa e 45 MPa para a idade de 28 dias. Vale ressaltar que foram moldados dois corpos de prova cilíndricos (10x20) cm e dois corpos de prova prismáticos (15x15x50) cm para cada traço, sendo o ensaio de esclerometria realizado no CP prismático e os demais no cilíndrico.

A Figura 9 representa de forma esquemática esse programa experimental:

Figura 9 - Esquema Experimental



Fonte: (O Autor, 2019)

## 4.2 Caracterização dos Materiais

Nas composições dos concretos ensaiados os materiais utilizados foram: cimento Portland CII-Z + agregado graúdo (brita 0 e brita 1) + agregado miúdo (areia) + água + aditivo (Powerflow 3100). Foi utilizado como material aglomerante cimento Portland CII-Z-32.

Os agregados graúdos 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. Na Tabela 2 estão descritas a granulometria da Brita 1.

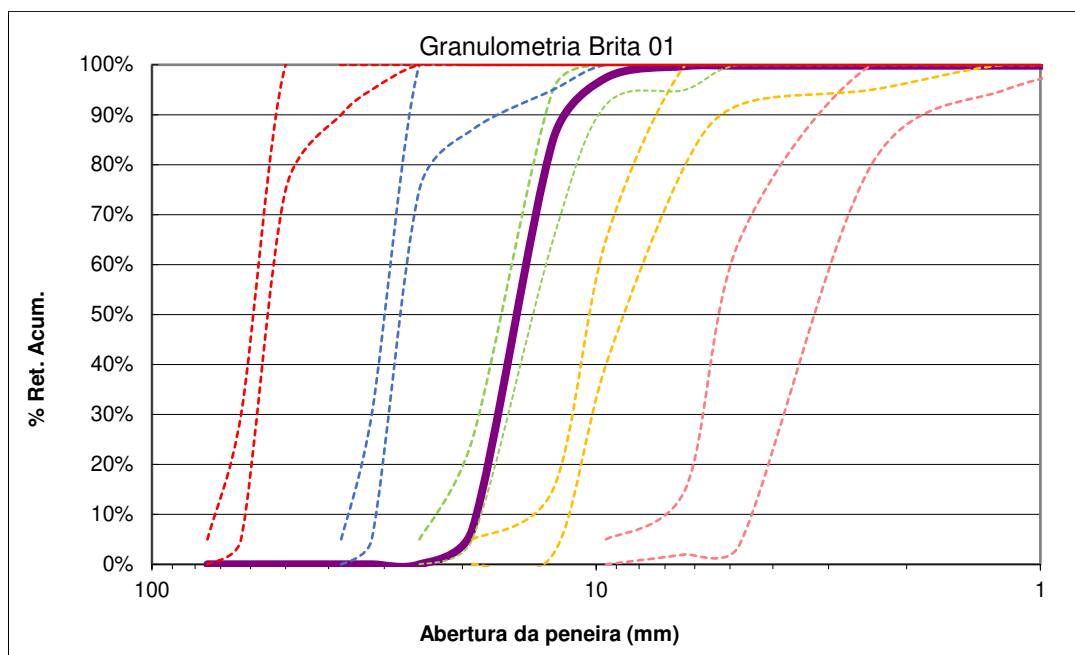
Tabela 2 - Ensaio de granulometria – Brita 1

PENEIRAS		PESO RETIDO		%	
Nº	ABERTURA	(g)	(g)	RETIDA %	ACUMUL. %
	(mm)				
3/4	19	348	348	7	7
1/2	12,5	3914	3843	78	85
3/8	9,5	609	623	12,4	97,4
1/4	6,3	117	115	2,3	99,7
4	4,8	5	4	0,1	99,8
FUNDO		7	11	0,7	100
SOMA		5000	4944	100	703,3

Fonte: (O Autor, 2019)

Pode-se observar que 93% do material passa na peneira de abertura de 19mm e cerca de 85% desse material fica retido na peneira de abertura 12,5mm. Portanto, a maior parte desse material possui diâmetro superior à esta abertura e inferior 19mm. A Figura 10 representa graficamente a distribuição granulométrica desse agregado:

Figura 10 - Distribuição granulométrica da Brita 01.



Fonte: (O Autor, 2019)

A curva de distribuição granulométrica da Brita 01 representa que a distribuição desse agregado é uniforme, tendo grãos com diâmetros equivalentes em sua totalidade. Tabela 3 apresenta a granulometria da Brita 0:

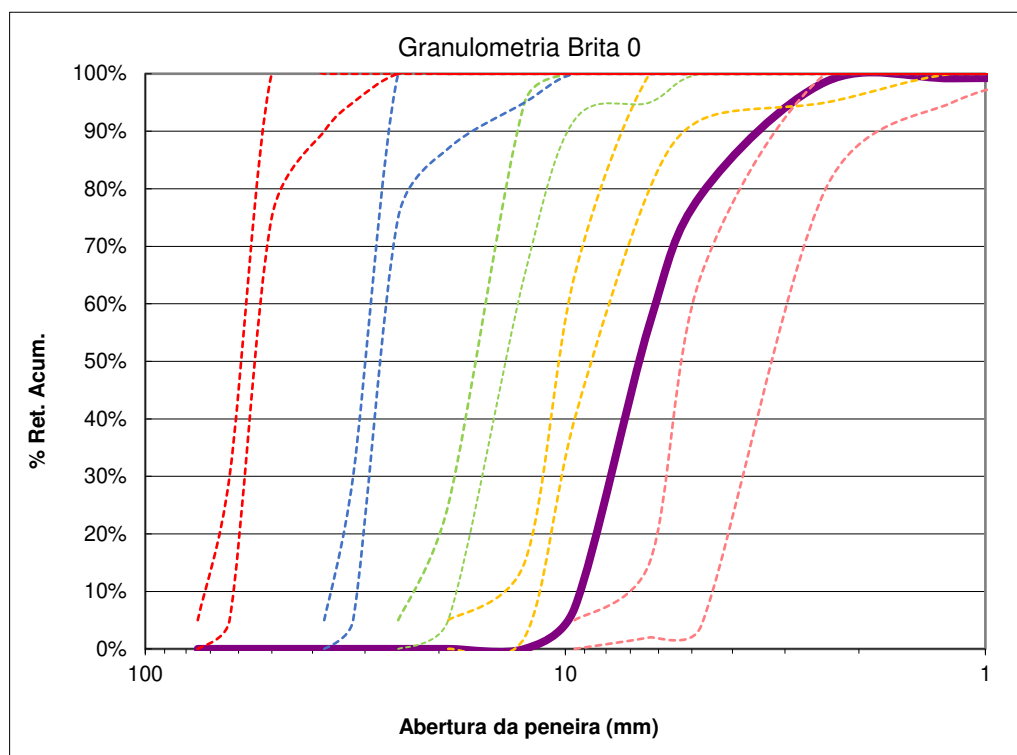
Tabela 3 - Ensaio de granulometria – Brita 0

Nº	PENEIRAS		PESO		%	
	ABERTURA		RETIDO		RETIDA	ACUMUL.
	(mm)	(g)	(g)	%	%	
3/8	9,5	214	214	7,1	7,1	
¼	6,3	1479	1479	49,4	56,5	
4	4,8	672	672	22,4	79	
8	2,4	588	588	19,6	98,6	
16	1,2	18	18	0,6	99,2	
30	0,6	0	0	0	99,2	
50	0,3	0	0	0	99,2	
100	0,15	0	0	0	99,2	
FUNDO		24	24	0,9	100	
SOMA		2995	2995	100	581,5	

Fonte: (O Autor, 2019)

Nesse caso, observa-se que 80% do material tem diâmetro superior a 4,8 mm e 93% tem diâmetro menor que 9,5mm. A Figura 11 representa graficamente a distribuição granulométrica desses dados.

Figura 11 - Distribuição granulométrica da Brita 0.



Fonte: (O Autor, 2019)

A curva de distribuição granulométrica da Brita 0 se apresenta mais contínua do que a Brita 01, porém ainda é classificada como uma distribuição uniforme.

Seguindo os ensaios de caracterização dos agregados foi feito o peneiramento do agregado miúdo (areia), e a Tabela 4 que explicita o resultado da granulometria é mostrada a seguir.

A areia foi caracterizada de acordo com os ensaios de granulometria, massa específica e absorção, em conformidade com as normas NBR NM 248:2003 Agregados – Determinação da composição granulométrica, NBR NM 52/2009 Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e NBR NM 45/2006 Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios, respectivamente. A Tabela 4 mostra a granulometria da areia natural.

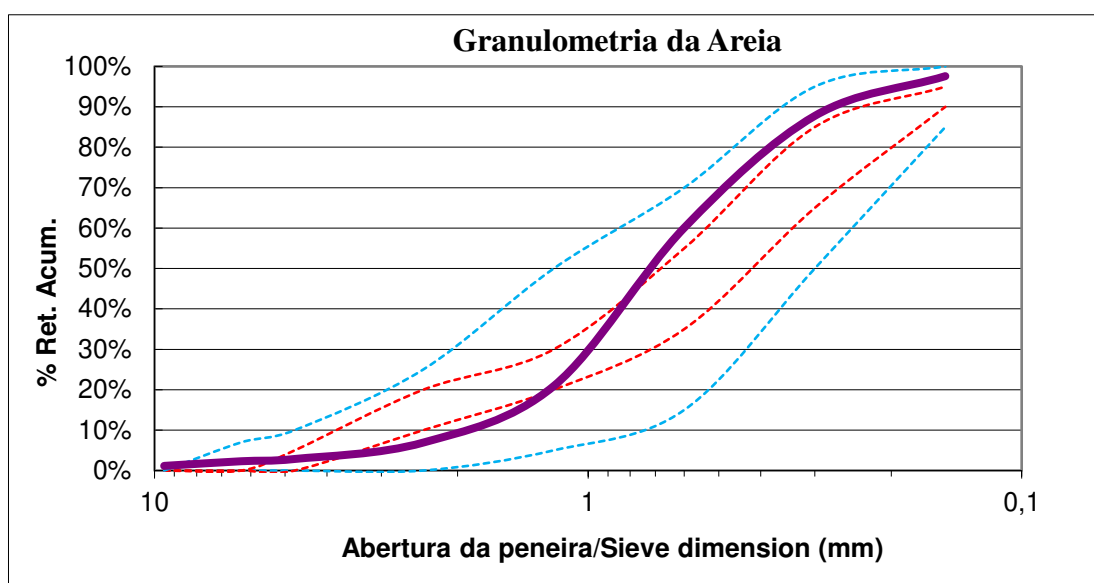
Tabela 4 – Ensaio de granulometria – Areia natural

PENEIRAS		PESO RETIDO		%	
Nº	ABERTURA	(g)	(g)	RETIDA %	ACUMUL. %
	(mm)				
3/8	9,5	10	13	1,2	1,2
1/4	6,3	11	12	1,2	2,3
4	4,8	6	5	0,6	2,9
8	2,4	35	46	4,1	6,9
16	1,2	130	149	14	20,9
30	0,6	388	393	39,1	60
50	0,3	285	267	27,6	87,6
100	0,15	105	91	9,8	97,4
200	0,075	19	17	1,8	99,2
FUNDO		8	7	0,8	100
SOMA		997	1000	100	276,9

Fonte: (O Autor, 2019)

Como pode ser observado na tabela supracitada praticamente a totalidade do material tem diâmetro inferior a 9,5mm e mais de 99% possui diâmetro superior a 0,075mm. Para ser mais preciso 60% do material possui diâmetro superior a 0,6mm e inferior a 9,5mm. A Figura 12 mostra a distribuição granulométrica desse material:

Figura 12 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: (O Autor, 2019)



A areia apresenta uma curva de distribuição granulométrica que melhor se enquadra na classificação de distribuição contínua, dado que seus grãos apresentam tamanhos variados e crescentes, e a curva se distancia de um formato vertical e se aproxima de um formato sinuoso. A Tabela 4 resume os resultados de caracterização física dos agregados.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.

<b>DETERMINAÇÃO</b>	<b>Areia Natural</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>
Graduação	Media	Brita 0	Brita 1
Módulo de Finura (NBR NM 248)	2,769	5,815	7,033
DIMENSÃO MÁXIMA (NBR NM 248) (mm)	4,8	12,5	25
MASSA ESPECÍFICA (NBR NM 52 e 53) (kg/dm <sup>3</sup> )	2,63	2,66	2,72
MASSA UNITÁRIA SECA (NBR-7251) (kg/dm <sup>3</sup> )	1,41	1,4	1,46
MASSA UNITÁRIA ÚMIDA (NBR-7251) (kg/dm <sup>3</sup> )	1,21	-	-
UMIDADE DO MATERIAL (NBR 9939) (%)	4,38	0,2	0,07

Fonte: (O Autor, 2019)

### 4.3 Composição dos Concretos

Os concretos com fck de 25, 30, 35 e 45 MPa foram confeccionados na Concreteira, compreendendo um total de quatro dosagens.

O Slump Test ou determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi fixado em  $10 \pm 2$  para os traços de 25, 30 e 35MPa e para o traço de 45MPa foi fixado o abatimento de  $12 \pm 2$ .

### 4.4 Moldagem e Cura dos corpos de prova

Para cada resistência de concreto foram moldados 2 cilindros de 10 cm x 20 cm e 2 corpos prismáticos de 15 cm x 15 cm x 50 cm. Vale ressaltar que todos os cilindros foram moldados com a medida transversal mínima de 100mm, sendo esse processo

realizado em fôrmas metálicas, evitando o risco de interação fôrma-concreto.

O adensamento em ambos os casos foi manual e realizado em duas camadas, sendo que nos CPs cilíndricos foram aplicados 12 golpes por camada e nos CPs prismáticos foram aplicados 75 golpes por camada.

Como todos os CPs foram moldados em locais diferentes de onde foram ensaiados, para procedimentos de transporte foram colocados em caixas com areias molhadas para evitar que as vibrações e trepidações interferissem nas propriedades do concreto (Figura 13).

Para todos os concretos foi adotado apenas um tipo de cura: cura úmida (imersão em água + cal) até um dia antes da idade do ensaio a ser realizado, exceto os prismáticos que permaneceram em cura úmida até dois dias antes dos ensaios. A desforma de todos os corpos-de-prova ocorreu na idade de um dia. É importante mencionar que os procedimentos de moldagem, cura, adensamento e transporte foram realizados conforme é preconizado pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 13 - Cura e Transporte dos CPs.



Fonte: (O Autor, 2019)

#### 4.5 Ensaio de Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão nos corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm (Figura 14) foram realizados em conformidade com a NBR 5739 (ABNT, 2018) nas idades de 28 dias, sendo ensaiados para essa idade 2 corpos de prova cilíndricos. Vale salientar que todos os corpos de provas, mesmo após a retificação, obedeceram à relação altura/diâmetro, com valores compreendidos entre os limites superior e inferior de 2,06 e 1,94, respectivamente.

Figura 14 - Resistência à compressão do concreto



Fonte: (O Autor, 2019)

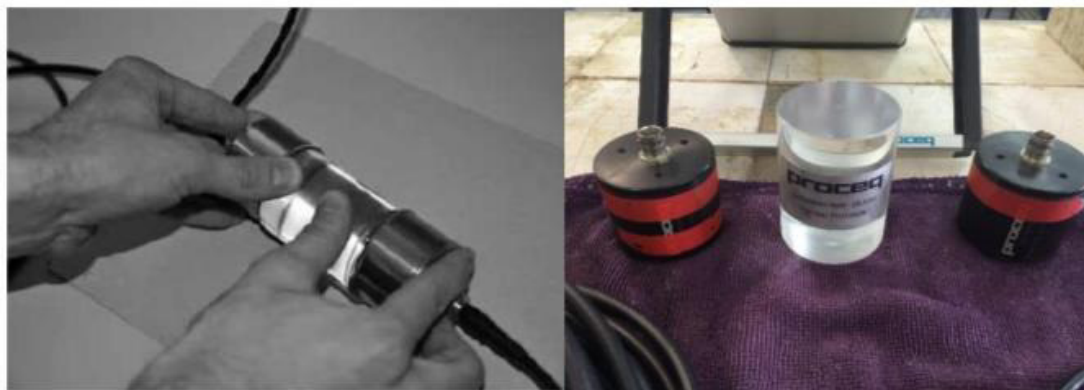
#### 4.6 Ensaio de Ultrassom

De acordo com a BS1881: Part 203 (1986) é recomendado no mínimo a moldagem de no mínimo 3 corpos de prova para cada betonada. Em cada corpo de prova devem ser feitas 3 medições entre o topo e a base deste, sendo que a variação dos resultados num único corpo de prova deve ser menor que 5% do valor médio das 3 medições. Contudo, devido às limitações de disponibilidade de materiais, foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos por betonada. Em cada CP foi realizado três medições, realizadas na direção longitudinal.

Para este ensaio foi utilizado o equipamento Pundit Lab com transdutores de 54 kHz e diâmetro de 50 mm. O procedimento adotado foi o da NBR 8802 (ABNT, 2019) e utilizou-se a transmissão direta entre os transdutores.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram retirados da cura úmida até 24 horas antes do ensaio, objetivando mantê-los na cura até um dia antes do rompimento. O equipamento foi calibrado antes da realização de cada ensaio com o auxílio de um bloco de calibração Pundit de 25,4  $\mu$ s, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Calibração dos transdutores.



(Fonte: O Autor, 2019)

Com o objetivo de garantir o perfeito contato entre os transdutores e facilitar a transmissão do pulso ultrassônico pela superfície do corpo-de-prova, foi utilizado o Gel Conductor Incolor para Ultrassom – RMC.

#### 4.7 Ensaio de Esclerometria

Os corpos de prova foram retirados da cura 48 horas antes do ensaio, passando esse tempo secando à temperatura ambiente dentro do laboratório, para realização do ensaio com a superfície seca como é recomendado.

Neste ensaio foi utilizado o esclerômetro suíço de reflexão SilverSchmidt da Proceq com energia de impacto de 2,207 Nm e com faixa de resistência à compressão do concreto de 10 – 100 MPa. A execução do ensaio foi de acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2013), antes de cada ensaio foi feita a calibração do esclerômetro utilizando-se uma bigorna de aço, realizando 10 leituras (Figura 16). Após 10 leituras foi calculado o coeficiente de correção (K).

Figura 16 - Calibração do esclerômetro com a Bigorna.



Fonte: (O Autor, 2019)

Para a idade de 28 dias, foram ensaiados dois corpos-de-prova prismáticas e 8 medições foram realizadas em cada face, totalizando 16 medições por CP. Vale salientar que, conforme recomenda RILEM NDT 3 (1984), foi realizado as medições em faces opostas e além disso foi mantido um espaçamento mínimo entre as batidas de 4 centímetros de distância, um centímetro a mais do que o valor recomendado por norma. Foi evitado também realizar medições em locais de porosidade elevada para não enviesar o resultado.

O prisma foi fixado em uma prensa hidráulica com um carregamento médio de 1,5 MPa com a finalidade de evitar a movimentação do mesmo durante o procedimento de ensaio de esclerometria.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de esclerometria, para os CPs prismáticos, bem como os resultados dos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão, que foram realizados em CPs cilíndricos.

Na proposição das curvas de correlação, com os dados obtidos a partir dos ensaios não destrutivos e a resistência à compressão, foram usados os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios realizados em laboratórios. A escolha do tipo de curva de correlação mais adequada para representar as diferentes correlações, segue o critério do maior coeficiente de correlação ( $r^2$ ), conforme é verificado no estudo de diversos autores.

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

### 5.1 Ensaio Resistência à Compressão (fc)

Os resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos estudados aos estão apresentados na Tabela 5.

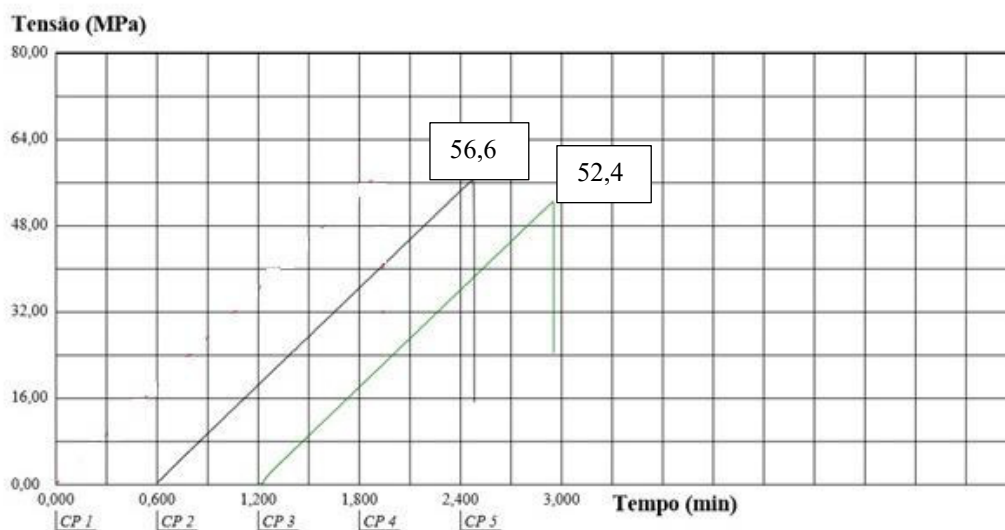
Tabela 5 - Resistência à compressão dos CPs cilíndricos.

<b>Resistência Nominal (MPa)</b>	<b>Fck (MPa)</b>	<b>Δ (Delta %)</b>
45	56,6	26%
	52,4	16%
35	48,7	39%
	45,7	31%
30	37,2	24%
	39	30%
25	41,9	68%
	41,6	66%

Fonte: (O Autor, 2019)

Em posse dos resultados, pode-se observar que o todos tiveram fck no mínimo 10% superior ao da resistência nominal, o que é bom para os fatores de segurança das estruturas de concreto, mas é ruim para a empresa fabricante, porque significa que ela está superdosando os traços, principalmente o de resistência nominal de 25 MPa, que resultou em acréscimo de resistência aos 28 dias da ordem de 60%. As Figuras 17, 18 e 19, apresentam as curvas correspondentes aos ensaios de resistência à compressão (28 dias) dos CPs cilíndricos de 45MPa, 25MPa e 35MPa, e o de 30MPa, respectivamente.

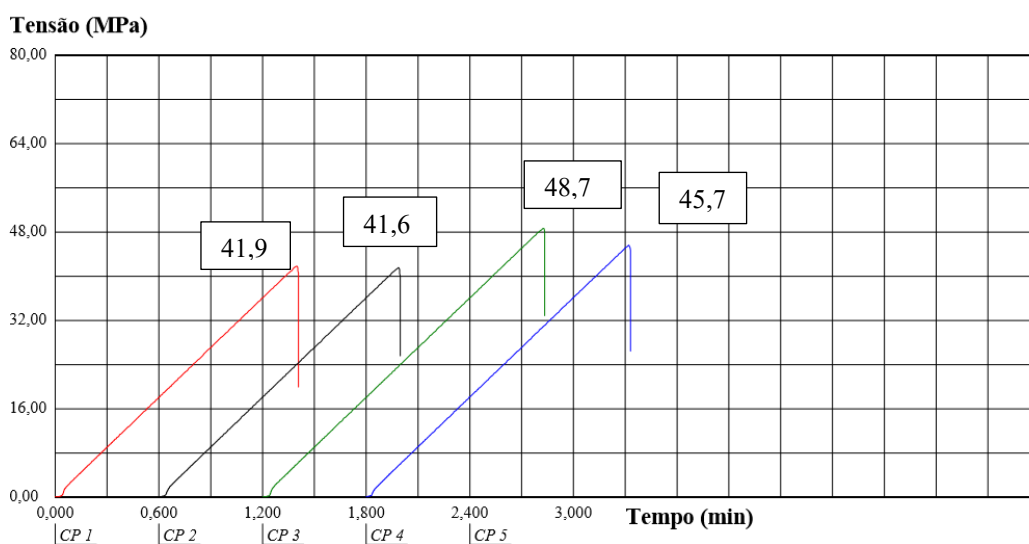
Figura 17 - Gráfico de Resistência à Compressão dos CPs 45MPa



Fonte: (O Autor, 2019)

Na Figura 17, as curvas correspondentes ao CP2 e CP3 representam o comportamento dos dois CPs de 45 MPa na realização do ensaio de resistência à compressão.

Figura 18 - Resistência à compressão dos CPs de 25MPa e 35MPa.

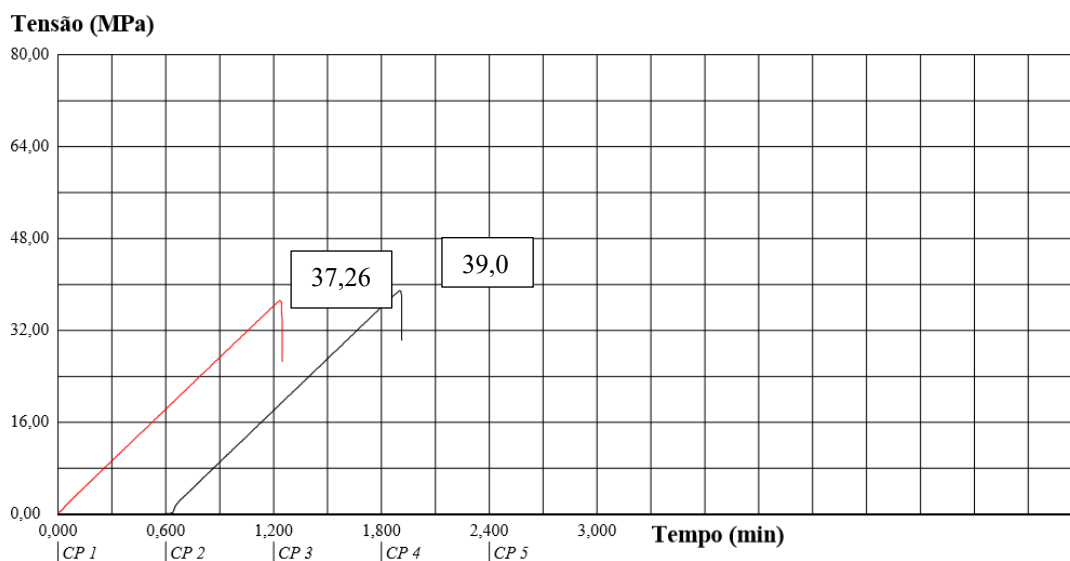


Fonte: (O Autor, 2019)

As curvas correspondentes ao CP1 e CP2 (Figura 5) representam o comportamento dos CPs de 25 MPa na realização do ensaio de resistência à compressão.

Já as curvas correspondentes ao CP3 e CP4 representam o comportamento dos CPs de 35MPa quando submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Mesmo sendo de resistência diferentes, esses corpos de prova estão presentes no mesmo gráfico pois foram moldados no mesmo dia, e conseqüentemente, foram rompidos na mesma data.

Figura 19 - Gráfico de Resistência à Compressão dos CPs 30Mpa



Fonte: (O Autor, 2019)

As curvas CP 1 e CP 2 (Figura 19) explicitam graficamente os resultados do ensaio de resistência à compressão dos CPs de resistência nominal de 30MPa.

É importante salientar que todos os corpos de prova foram ensaiados na mesma prensa hidráulica, EMIC PCE100, para ratificar que todos foram submetidos às mesmas condições de rompimento. Foi observado que todas as curvas alcançam um pico de tensão, que é o de ruptura, porém ocorre um pequeno decréscimo na carga atuante, que se deve à calibração da máquina, para que ela “entenda” que o CP rompeu. Após 10% de perda de carga deste, o ensaio é encerrado, evitando o esmagamento do corpo de prova.

## 5.2 Correlação do Índice Esclerométrico com o Fck do Concreto.

Foram obtidos dois índices esclerométricos e dois valores de resistência à compressão para cada traço. Tendo em vista que estes ensaios foram realizados em corpos de prova diferentes, para realizar uma melhor associação de dados, foi calculada a média de cada par de valores resultantes da esclerometria, nos CPs pismáticos e do fck do



concreto, nos CPs prismáticos. A Tabela 6 apresenta esses resultados.

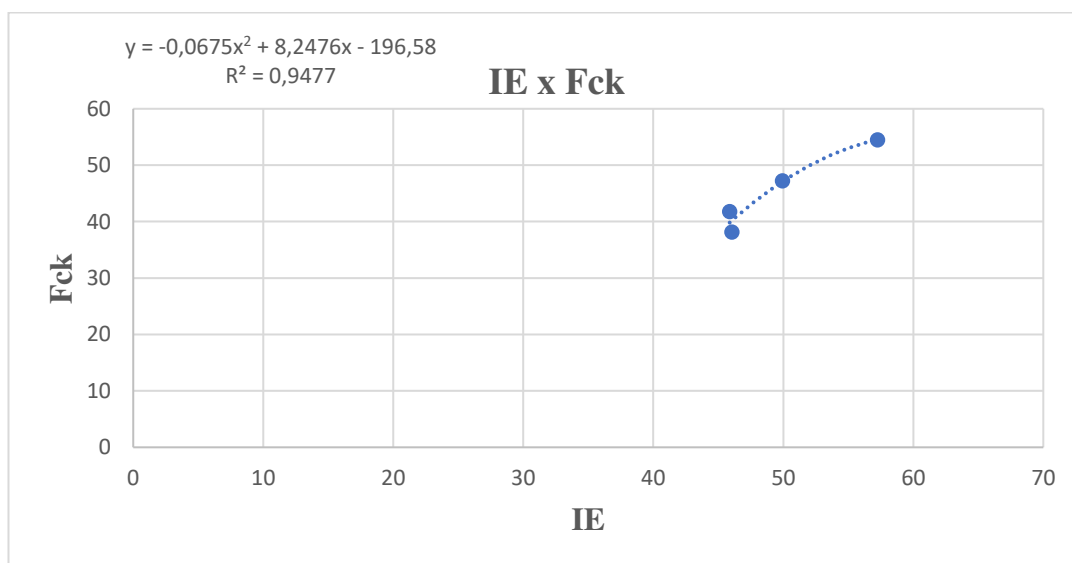
Tabela 6 - Índice Esclerométrico e Fck Médio.

IE	Fck (MPa)
57,25	54,5
49,94	47,21
45,88	41,76
46,05	38,135

Fonte: (O Autor, 2019)

Posteriormente, foi feita uma análise de dispersão entre essas duas variáveis, e plotada a curva de tendência entre elas, como pode ser observado na Figura 20:

Figura 20 - Índice Esclerométrico x Resistência à Compressão (28 dias)



Fonte: (O Autor, 2019)

Para plotagem da Figura 20, utilizou-se os dados obtidos a partir dos ensaios realizados nos CPs de traços de 25, 30, 35 e 45 MPa. O tipo de linha de tendência que forneceu o maior coeficiente de correlação foi o polinomial, sendo esta escolhida para representar os dados.

Foram plotadas 4 tipos de equação fornecidos a partir das análises de dispersão e a partir destas foi escolhida a mais conveniente, levando em consideração o maior coeficiente  $r^2$  e o erro mínimo entre o valor obtido pela equação e o valor real. Além disso,

os resultados obtidos foram bastante satisfatórios dado que os coeficientes de correlação se apresentaram superiores a 0,71, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de Correlações das Curvas

<b>CORRELAÇÃO</b>	<b>REGRESSÃO</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
<b>IE x Fck (28 dias)</b>	LINEAR	0,93
	EXPONENCIAL	0,9
	POTÊNCIA	0,91
	POLINÔMIAL	0,95

Fonte: (O Autor, 2019)

O coeficiente de correlação ( $r^2$ ) aplicado à curva citada, alcançou valores da ordem de 0,95, estando compreendido entre  $0,71 \leq R^2 \leq 1,00$ , o que permite classificar a dependência entre essas duas variáveis como forte.

### 5.3 Correlação da Velocidade do Pulso Ultrassônico com o Fck do Concreto.

Foram obtidas as velocidades do pulso ultrassônico e o Fck do concreto a partir da realização dos seus ensaios nos CPs cilíndricos. Para isso, foram ensaiadas as resistências nominais de 25, 30, 35 e 45MPa e de posse resultados (Tabela 8), foi feita a análise de regressão linear simples e plotada a linha de tendência explicitada na Figura 21.

O ensaio de ultrassom e de resistência à compressão do concreto puderam ser realizados no mesmo corpo de prova, o que corroborou para que cada velocidade medida pudesse ser atribuída a cada resistência identificada, não necessitando calcular a média por CP.

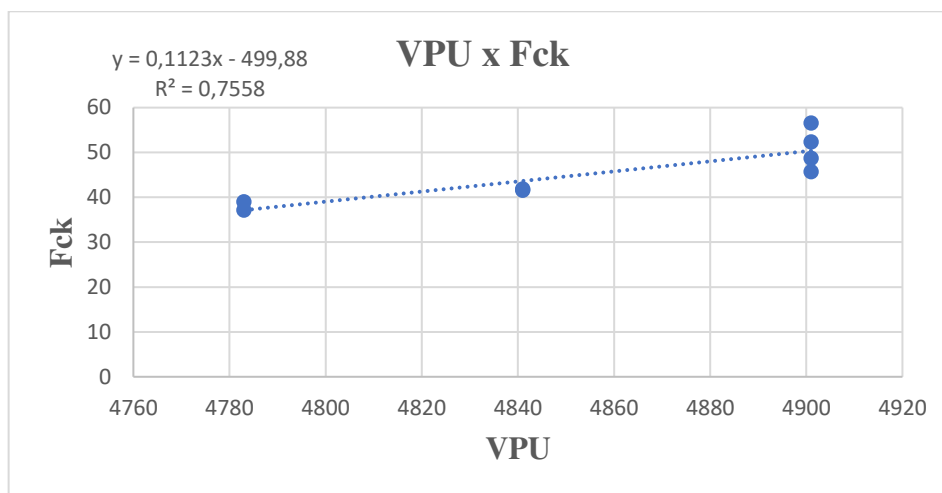
Tabela 8 - Resultados de VPU e Fck dos CPs cilíndricos.

<b>Fck</b>	<b>VPU (m/s)</b>	<b>Fck (MPa)</b>
45 Mpa	4901	56,6
	4901	52,4
35 MPa	4901	48,7
	4901	45,7
30 MPa	4783	37,2
	4783	39
25 MPa	4841	41,9

4841	41,6
------	------

Fonte: (O Autor, 2019)

Figura 21 - VPU x Resistência à Compressão (28 dias)



Fonte: (O Autor, 2019)

A linha de tendência plotada fornece um coeficiente de correlação  $r^2$  da ordem de 0,76, estando compreendido  $0,71 \leq R^2 \leq 1,00$ , o que permite classificar a relação de dependência dessas duas variáveis como forte. Isso demonstra que os dados obtidos a partir da realização dos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão do concreto foram satisfatórios.

Foram plotadas 4 tipos de equação fornecidos a partir das análises de dispersão e a partir destas foi escolhida a mais conveniente, levando em consideração o maior coeficiente  $r^2$  e o erro mínimo entre o valor obtido pela equação e o valor real. Os índices de correlação obtidos estão explicitados na tabela 9. Todos os índices apresentaram  $r^2$  superior a 0,71, o que ratifica o alto grau de correlação entre as variáveis.

Tabela 9 - Índices de Correlações das Curvas de Ultrassom

CORRELAÇÃO	REGRESSÃO	$r^2$
<b>VPU x Fck (28 dias)</b>	LINEAR	0,76
	EXPONENCIAL	0,8
	POTÊNCIA	0,8
	POLINÔMIAL	0,78

Fonte: (O Autor, 2019)

#### 5.4 Escolha do Tipo de Curva de Correlação.

O modelo de curva escolhido para a correlação do ultrassom foi o linear e para a esclerometria foi a equação polinomial. Embora o modelo linear tenha apresentado índices de correlações classificados como fortes, eles não foram os maiores obtidos nas análises. Diante desse fato, essa escolha pode ser justificada pelos valores dos erros das equações, onde aquelas fornecidas por modelos de regressão linear forneciam valores de resistência do concreto menos díspares do valor real em detrimento das outras, por exemplo.

Para a obtenção dos valores dos erros ( $\Delta$ ), foram inseridos valores de índice esclerométricos e de velocidade do ultrassom como “inputs” das equações, as quais forneceram um valor de fck. Posteriormente, foi comparado este valor com o valor real de resistência à compressão.

Tabela 10 - Distribuição dos erros percentuais de cada modelo.

<b>CURVA</b>	<b>Y - IE (MPa)</b>	<b>Y - VPU(MPa)</b>	<b>Fck(Mpa)</b>	<b><math>\Delta</math>-IE</b>	<b><math>\Delta</math> -VPU</b>
LINEAR	55,04	50,5	54,5	1%	-7%
EXPON.	55,22	41,9	54,5	1%	-23%
POTÊNCIA	55,23	46,87	54,5	1%	-14%
POLIN.	54,36	1203,6	54,5	0%	2108%

Fonte: (O Autor, 2019)

Tabela 11 - Distribuição dos erros percentuais de cada modelo (2)

<b>CURVA</b>	<b>Y - IE (MPa)</b>	<b>Y - VPU(MPa)</b>	<b>Fck(Mpa)</b>	<b><math>\Delta</math>-IE</b>	<b><math>\Delta</math> -VPU</b>
LINEAR	40,6	37,25	38,135	6%	-2%
EXPON.	40,54	31,2	38,135	6%	-18%
POTÊNCIA	40,5	34,9	38,135	6%	-8%
POLIN.	40,08	1135,99	38,135	5%	2879%

Fonte: (O Autor, 2019)

Como pode ser evidenciado nas Tabelas 10 e 11, fazendo uma comparação entre o valor do fck real e o valor fornecido por cada modelo, percebe-se que, para a esclerometria, a equação polinomial fornece valores mais próximos da realidade, porém, para o ultrassom o modelo linear é o que melhor se adequa. Vale ressaltar que para os demais valores testados, foi constatada a mesma conclusão.

### 5.5 Análise comparativa entre resultados diferentes.

Um dos objetivos principais do presente estudo é verificar se os materiais de construção estão evoluindo no quesito qualidade e na seara de possibilitar inferência do fck a partir dos NDTs com o tempo.

Com isso, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos com essa pesquisa e os resultados obtidos por Fiuza (2016), o qual realizou um estudo semelhante com materiais da região há três anos. Foram comparados os erros apresentados entre os dois estudos nas tabelas que seguem.

Tabela 12 - Comparação entre erros das equações esclerométricas atuais e passadas.

ESCLEROMETRIA						
TIPO DE EQUAÇÃO	$\Delta$ -ATUAL	$\Delta$ -FIUZA	$\Delta$ -ATUAL	$\Delta$ -F	$\Delta$ -ATUAL	$\Delta$ -F
LINEAR	1%	1%	-3%	-12%	-3%	-18%
EXPONENCIAL	1%	33%	-4%	-6%	-3%	-19%
POTÊNCIA	1%	16%	-4%	-9%	-4%	-19%
POLINÔMIAL	0%	21%	-1%	-7%	-5%	-19%

Fonte: (O Autor, 2019)

Tabela 13 - Comparação entre erros das equações de ultrassom atuais e passadas.

ULTRASSOM						
TIPO DE EQUAÇÃO	$\Delta$ -ATUAL	$\Delta$ -FIUZA	$\Delta$ -ATUAL	$\Delta$ -F	$\Delta$ -ATUAL	$\Delta$ -F
LINEAR	-7%	-25%	-2%	-46%	5%	-24%
EXPONENCIAL	-23%	-62%	-18%	8%	-14%	-63%
POTÊNCIA	-14%	-34%	-8%	-620%	-3%	-35%
POLINÔMIAL	2108%	-464%	2879%	-6%	2693%	-610%

Fonte: (O Autor, 2019)

Pode-se constatar, portanto, que os erros obtidos atualmente, para todos os tipos de equações são bem menores que os obtidos por Fiuza (2016). Isso permite a seguinte conclusão: os materiais atualmente empregados na fabricação do concreto proporcionam inferências do seu fck mais fidedignas à realidade, o que ratifica que esses ensaios podem ser empregados para essa finalidade.

## 6 CONCLUSÃO

A pesquisa corroborou para o aumento da confiabilidade dos métodos não destrutivos de esclerometria e ultrassom na avaliação da resistência à compressão dos corpos de prova de concretos. Estes foram confeccionados com materiais presentes na cidade de Fortaleza, fornecidos por uma concreteira de alta atividade comercial na região.

Com a realização do presente estudo, foi possível constatar que a partir dos dados fornecidos através dos ensaios não destrutivos, como o de ultrassom e esclerometria, podem ser feitas inferências acerca do Fck do concreto, fato que é possibilitado através das curvas de correlação e das suas equações. Contudo, isso só é viável quando for verificado que os índices fornecidos pelos ensaios supracitados têm forte correlação com a resistência à compressão do concreto, fato que foi evidenciado nos resultados do trabalho. A possibilidade de inferir a resistência do concreto se faz uma ferramenta muito importante, visto que ela permite o monitoramento da evolução da resistência do concreto com o tempo e possibilita também avaliar o Fck de estruturas novas e antigas, facilitando os trabalhos de inspeções e perícias nestas, por exemplo.

A partir de uma conclusão bibliográfica pôde-se constatar que nem sempre o fator que influencia um ensaio, terá influência nos outros. Um exemplo disso é a possibilidade de confeccionar dois concretos com composições petrográficas diferentes e eles terem a mesma resistência à compressão, mas valores de IE e velocidade do ultrassom diferentes. Além disso, um fator que tem maior impacto em um ensaio, pode não ser relevante para os resultados de outro, no ultrassom, por exemplo, a dimensão máxima do agregado graúdo é o mais preponderante, já no ensaio de esclerometria o teor de agregado se apresenta como mais fulcral. Com isso, pode-se concluir que o fator que mais influencia nos resultados do ultrassom do concreto é a dimensão máxima do agregado graúdo e o tempo de cura, porém, para o ensaio esclerométrico é o tipo de cimento, tipo e teor de agregado graúdo.

Partindo-se para a análise das correlações, foram plotadas 4 tipos de curvas para cada correlação de dados e foi escolhida a mais conveniente para expressar a ligação entre as variáveis. Nos resultados apresentados, onde foram utilizados quatro tipos de regressão diferentes, foi constatado que em todos os casos foram alcançados coeficientes  $r^2$  superiores a 0,71, o que indica que há forte dependência entre as variáveis em todos os tipos de curvas testados. Portanto, as equações apresentadas para as curvas de correlação

dos concretos estudados apresentam um bom grau de confiabilidade. Isso confirma também que os materiais da região usados na confecção dos concretos locais apresentam-se de forma satisfatória.

Analisando a escolha das curvas é importante salientar que levar em consideração apenas o índice de correlação não é o mais recomendado, devendo-se também avaliar o erro proporcionado por cada tipo de equação. Diante disso, para a escolha do tipo de curva que mais se adequa para a associação de dados é importante avaliar esses dois parâmetros. Com a conclusão da presente pesquisa, pode-se constatar que todos os objetivos foram alcançados e que os resultados foram bastante satisfatórios para o acréscimo de conhecimento desse tema tão abrangente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ACI- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for Evolution of Concrete Structures Prior to Rehabilitation, ACI Committee 364.1R. Farmington Hills, 1993.**

\_\_\_\_\_. **Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. ACI Committee 228.2R. Farmington Hills, 2003.**

**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard method for pulse velocity through concrete. ASTM C 587. Philadelphia, 1983.**

\_\_\_\_\_. **Standard method for rebound number of hardened concrete. ASTM C 805. Philadelphia, 1985.**

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.**

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.**

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45: Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios, respectivamente. Rio de Janeiro, 2006.**

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.**

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 5739: Concreto- Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.**

\_\_\_\_\_. **NBR 7584: Concreto Endurecido: Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão. Rio de Janeiro, 2013.**

\_\_\_\_\_. **NBR NM 6118: Projeto de Estruturas de Concreto- Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.**

\_\_\_\_\_. **NBR NM 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.**

**BUNGEY, J. H. The Testing of Concrete in Structures. 2. ed. London: Surrey University Press, 1989.**

**BUNGEY, J.; MILLARD, S. Testing of concrete in structures. 3 ed. London: Blackie Academic & Professional, 1996.**



\_\_\_\_\_. BS 1881: Part 202. Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer. London, 1986. \_\_\_\_\_. BS 1881: Part 203. Recommendations for measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete, London, 1986.

**CÂMARA, E. Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos Utilizados na Grande Florianópolis Através de Ensaio Não Destrutivos. 2006. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.**

**CHUNG, H. W.; LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. Concrete International, v. 1, p. 42-49, 1983.**

**COMITÊ MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. Norma Mercosul - NM 58: Concreto Endurecido: Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. 1996.**

\_\_\_\_\_. Norma Mercosul - NM 78: Concreto Endurecido: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. 1996.

**EVANGELISTA, A. C. J. Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio Não Destrutivos. 2002. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.**

**FIUZA, Bruno M. S. Análise através da correlação entre ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos na avaliação da resistência do concreto. 2016. Projeto de Graduação – Curso Superior de Engenharia Civil, UFC, Fortaleza.**

**IRRIGARAY, M. A. P.; PINTO, R. C. A. Efeito do tipo de cimento e tipo de agregado na velocidade de pulsos ultrassônicos e sua correlação com a resistência à compressão. In: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Florianópolis, Brasil, 2011.**

**LAWSON, I. et al. Non-Destructive Evaluation of Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity. Research Journal of Applied Sciences, v. 1, p. 409-504, 2011.**

**MACHADO, M. D. Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos Usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaio Não Destrutivos. 2005. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.**

**MALHOTRA, V. M. In Situ / Nondestructive Testing of Concrete - A Global Review. American Concrete Institute. Detroit, p. 1-16, 1984.**

**MALHOTRA, V. M. Surface Hardness Methods. Handbook on Non-destructive Testing of Concrete. CRC Press, 2004.**

**NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2. ed. Pini Brasil, 1997.**

**PALACIOS, M. P. G. Emprego de Ensaio 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.**

**PINTO, R. C. A. et al. Correlações entre técnicas não destrutivas para avaliação da resistência à compressão do concreto. IN: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, Florianópolis, Brasil, 2004.**

**PROCEQ. Silver Schmidt. Instrução de Operação. Suíça: Proceq, 2016.**

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

**RILEM , NDT 1, 1972 ,”Testing of concrete by the ultrasonic pulse method. \_\_\_\_\_ NDT 3, 1984 ,”Recommendations for testing concrete by hardness methods.**

**STURRUP, V. R. et al. Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength. Special Publication SP. Detroit, 1984.**

**TANYIDIZI, H.; COSKUN, A. Determination of the principal parameter of ultrasonic pulse velocity and compressive strength of lightweight concrete by using variance method. Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 44, n. 9, p. 639-646, 2008.**

**THAI, K. C. et. al. A técnica de emissão ultra-sonora para avaliação das propriedades mecânicas do concreto. IN: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Florianapolis, 2011.**