

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

**OSCAR BARBOSA DOS SANTOS NETO**

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO, A  
VELOCIDADE ULTRASSÔNICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO  
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL DE 25 MPa**

**FORTALEZA**

**2013**

OSCAR BARBOSA DOS SANTOS NETO

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO, A  
VELOCIDADE ULTRASSÔNICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO  
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL DE 25 MPa**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Alexandre Araújo Bertini

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- S236a Santos Neto, Oscar Barbosa dos.  
Análise da correlação entre o índice esclerométrico, a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão do concreto auto-adensável de 25MPa / Oscar Barbosa dos Santos Neto. – 2013.  
64 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Monografia(graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Graduação em Construção Civil, Fortaleza, 2013.  
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.
1. Concreto. 2. Materiais-testes. I. Título.

OSCAR BARBOSA DOS SANTOS NETO

**ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO, A VELOCIDADE ULTRASSÔNICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL DE 25 MPa**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Alexandre Araújo Bertini

Aprovada em 20 / 12 / 2013 .

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. M<sup>e</sup>. José Ramalho Torres

Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC)

---

Eng<sup>a</sup>. Jordana Hébster Ferraz Serra

Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais, Olavo e Simone.

Às minhas irmãs, Yvina e Yasmin.

À minha avó Noemia.

À minha quase irmã Mariléia.

Aos meus amigos.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me ajudado e dado força não só para elaborar este trabalho, mas também para superar os desafios encontrados ao longo de todo o curso de graduação.

Agradeço a minha família, por toda a compreensão e apoio irrestrito. E, em especial, ao meu grande mestre e pai, Olavo Cardoso, engenheiro civil, que me deu total apoio durante todo o curso, principalmente na etapa final, com o trabalho de conclusão do curso. Sempre transmitindo seus conhecimentos e experiências, tornando a engenharia um campo mais simples e, sobretudo, mais humano.

Agradeço ao professor orientador Alexandre Bertini pelo acompanhamento e pela oportunidade dada de realizar um trabalho de grande importância na área acadêmica e profissional, possibilitando a minha contribuição num assunto ainda pouco explorado.

Agradeço a todos que colaboraram diretamente no desenvolvimento do estudo, sendo estes: o NUTEC pela disponibilização das fôrmas dos corpos de prova; à concreteira Labormix, que disponibilizou as características e proporções do seu concreto; à construtora Fujita Engenharia, que disponibilizou o seu espaço para a realização da moldagem dos corpos de prova; além do Mestre Aldo de Almeida, que disponibilizou o Laboratório de Materiais de Construção da UFC.

Agradeço a minha banca examinadora composta pelo Mestre José Ramalho, que colaborou com a viabilização do trabalho, além da Mestranda Jordana Hebster, pela contribuição com sua participação, que apesar de todas as suas ocupações, puderam estar se disponibilizando para avaliar o trabalho realizado.

“Tomara que os meus caminhos sejam  
dirigidos de maneira a poder eu observar  
os teus estatutos”

*(Salmos 119:5, Bíblia Sagrada)*

## RESUMO

A construção civil é uma das atividades mais antigas da humanidade e se desenvolveu aceleradamente nos últimos séculos. Paralelamente, a Engenharia também evoluiu em diversas áreas, como a programação computacional, o controle e desenvolvimento de novos materiais, o setor de projetos, de gerenciamento e planejamento de obra, entre outras. Das evoluções citadas, pode-se enfatizar a evolução da tecnologia dos materiais e programas computacionais, os quais hoje são capazes de prescrever o material mais adequado para uma função específica, seja esta estrutural, de vedação, estética, etc. No presente trabalho, o material de estudo é o concreto, o qual deve atender a diversos parâmetros de desempenho para ser utilizado em uma construção, de acordo com a sua finalidade. Quando sua função é estrutural, sua resistência característica é o principal parâmetro. Em estruturas já concretadas, torna-se difícil a determinação da resistência atingida pelo concreto, já que é necessário fazer a extração de corpos de prova da estrutura para realizar o ensaio de rompimento através de prensa hidráulica, o que caracteriza uma solução onerosa e lenta. Felizmente, existem no mercado equipamentos que podem, de maneira rápida e prática, determinar a resistência do concreto sem causar danos à estrutura da qual se extraiu o corpo de prova, sendo assim chamados de métodos não destrutivos. Contudo, os ensaios não destrutivos não são tão precisos quanto o ensaio de rompimento do corpo de prova, podendo gerar valores irreais. No presente estudo, analisar-se-á dois desses métodos não destrutivos: a esclerometria e o ultrassom, visando obter um valor mais preciso da resistência à compressão do concreto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio de ultrassom. Ensaio de esclerometria. Métodos não destrutivos. Ensaio destrutivo. Ensaio de compressão axial. Correlação entre métodos não destrutivos com método destrutivo.



## ABSTRACT

Construction is one of the oldest activities of humanity, and has developed fast over the last centuries. At the same time, Engineering also evolved in many subjects, such as computer programming, control and development of new materials, structure design, management and planning of constructions, to name a few. Among these, emphasis can be given to the development of materials and computer programs, which can now prescribe the best material to be used for a specific function, either structural, insulation, aesthetics, etc. In the present work, the studied material is the concrete, which must meet several performance parameters to be used in a construction site, according to its role in it. If concrete's function is structural, the characteristic compressive strength is the main parameter. When the structure has already been built, it is difficult to determine the strength achieved by the concrete, since an extraction of samples is necessary for them to be tested, which turns into a costly and slow solution. Fortunately, there are, in the market, equipment that can quickly and practically determine the strength of concrete structures without causing any damage to the structure from which the samples were taken, known as non-destructive methods. However, non-destructive tests are less accurate than the conventional sample compression tests, possibly producing unrealistic values. In this study, two non-destructive methods will be analysed: sclerometry and ultrasound, aiming a more accurate value for concrete's compressive strength.

**KEY-WORDS:** Ultrasound test. Sclerometry test. Non-destructive methods. Destructive tests. Axial compression test. Non-destructive and destructive methods correlation.

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BS	<i>British Standard</i>
CAA	Concreto auto-adensável
CP	Corpo de prova
EN	<i>European Standard</i>
F <sub>ck</sub>	Resistência característica do concreto
F <sub>c</sub>	Resistência à compressão
IE	Índice esclerométrico
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira (norma da ABNT)
UFC	Universidade Federal do Ceará
V	Velocidade ultrassônica

**LISTA DE FIGURAS**

<b>FIGURA 1</b>	<b>Exemplo de ábaco pelo método de SONREB.....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 2</b>	<b>Equipamento de ultrassom, <i>Tico</i>.....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 3</b>	<b>Equipamento de esclerometria, <i>Original Schmidt N/NR</i>.....</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 4</b>	<b>Prensa hidráulica analógica.....</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 5</b>	<b>Mini usina da Labormix no canteiro de obra da Fujita Engenharia.....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 6</b>	<b>Detalhe da marcação do CP.....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 7</b>	<b>Lixamento para regularização do CP.....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 8</b>	<b>Procedimento do ensaio de ultrassom.....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 9</b>	<b>Procedimento do ensaio de esclerometria.....</b>	<b>41</b>

**LISTA DE QUADROS**

<b>QUADRO 1</b>	<b>Resultados do ensaio de ultrassom.....</b>	<b>43</b>
<b>QUADRO 2</b>	<b>Resultados do ensaio de esclerometria.....</b>	<b>44</b>
<b>QUADRO 3</b>	<b>Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.....</b>	<b>46</b>
<b>QUADRO 4</b>	<b>Resumo geral dos resultados dos ensaios.....</b>	<b>47</b>
<b>QUADRO 5</b>	<b>Valores da velocidade ultrassônica e da resistência à compressão.....</b>	<b>49</b>
<b>QUADRO 6</b>	<b>Valores do índice esclerométrico e resistência à compressão.....</b>	<b>51</b>
<b>QUADRO 7</b>	<b>Valores dos ensaios de ultrassom, esclerometria e resistência à compressão.....</b>	<b>54</b>
<b>QUADRO 8</b>	<b>Valores dos erros percentuais da correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.....</b>	<b>57</b>
<b>QUADRO 9</b>	<b>Valores dos erros percentuais da correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.....</b>	<b>58</b>
<b>QUADRO 10</b>	<b>Valores dos erros percentuais da correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão.....</b>	<b>59</b>

**LISTA DE GRÁFICOS**

<b>GRÁFICO 1</b>	<b>Tendência da velocidade ultrassônica.....</b>	<b>48</b>
<b>GRÁFICO 2</b>	<b>Tendência do índice esclerométrico.....</b>	<b>48</b>
<b>GRÁFICO 3</b>	<b>Tendência da resistência à compressão axial.....</b>	<b>49</b>
<b>GRÁFICO 4</b>	<b>Relação entre os valores de ensaio da velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.....</b>	<b>50</b>
<b>GRÁFICO 5</b>	<b>Correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.....</b>	<b>51</b>
<b>GRÁFICO 6</b>	<b>Correlação padrão do equipamento entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.....</b>	<b>52</b>
<b>GRÁFICO 7</b>	<b>Correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.....</b>	<b>53</b>
<b>GRÁFICO 8</b>	<b>Comparação entre a correlação padrão do equipamento e a correlação obtida pelos valores do ensaio.....</b>	<b>54</b>
<b>GRÁFICO 9</b>	<b>Ábaco, pelo método SONREB, da correlação entre o índice esclerométrico, velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.....</b>	<b>56</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemática e problema de pesquisa .....</b>	<b>15</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Problemática.....</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Problema de pesquisa.....</i>	<i>15</i>
<b>1.2</b>	<b>Questões de pesquisa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos da pesquisa.....</b>	<b>17</b>
<i>1.3.1</i>	<i>Do ponto de vista teórico .....</i>	<i>17</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Do ponto de vista prático.....</i>	<i>17</i>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Moldagem dos corpos de prova.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Realização dos ensaios.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise dos dados.....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Ensaio.....</b>	<b>22</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Ensaio destrutivo .....</i>	<i>23</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Ensaio não destrutivos.....</i>	<i>23</i>
<i>3.2.2.1</i>	<i>Método da velocidade de propagação ultrassônica .....</i>	<i>25</i>
<i>3.2.2.2</i>	<i>Método do esclerômetro de reflexão .....</i>	<i>28</i>
<b>3.3</b>	<b>Correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>Correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Correlação combinada entre os ensaios de ultrassom e esclerometria para determinação da resistência à compressão. ....</b>	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>Vantagens e desvantagens da combinação entre os ensaios de ultrassom e esclerometria.....</b>	<b>33</b>
<b>3.7</b>	<b>Aplicação dos resultados do trabalho.....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Características do concreto ensaiado .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Características dos equipamentos dos ensaios.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3</b>	<b>Moldagem dos corpos de prova.....</b>	<b>38</b>
<b>4.4</b>	<b>Realização dos ensaios.....</b>	<b>39</b>

4.5	Análise dos dados.....	42
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
5.1	Ensaio de ultrassom.....	43
5.2	Ensaio de esclerometria .....	44
5.3	Ensaio de resistência à compressão .....	45
5.4	Resumo geral dos resultados .....	46
5.5	Correlações entre os ensaios.....	49
5.5.1	<i>Correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão axial.....</i>	<i>49</i>
5.5.2	<i>Correlação entre o índice esclerométrico e resistência à compressão axial .....</i>	<i>51</i>
5.5.3	<i>Correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e resistência à compressão axial.....</i>	<i>54</i>
5.6	Erros percentuais das correlações .....	56
5.6.1	<i>Erro percentual da correlação entre velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.....</i>	<i>56</i>
5.6.2	<i>Erro percentual da correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.....</i>	<i>58</i>
5.6.3	<i>Erro percentual da correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão .....</i>	<i>59</i>
6	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
6.1	Correlação entre velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.....	60
6.2	Correlação entre índice esclerométrico e a resistência à compressão .....	61
6.3	Correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão .....	61
6.4	Sugestões para trabalhos futuros.....	62
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problemática e problema de pesquisa

### 1.1.1 *Problemática*

Os ensaios não destrutivos são uma importante ferramenta para obter informações quanto às propriedades do concreto das estruturas, seja durante a sua fase construtiva ou em estruturas prontas cujas condições se deseja investigar. Entretanto, a confiabilidade da avaliação dessas propriedades depende da experiência do profissional que realiza os ensaios e das curvas empregadas para correlacionar as grandezas medidas nos ensaios com as propriedades do concreto investigado.

São vários os fatores que implicam em diferenças nos resultados, podendo-se citar as diferenças no tipo e no teor de cimento utilizado, na granulometria, nos aditivos, no grau de compactação, nas condições da superfície do corpo de prova, cura, idade, temperatura, teor de umidade, tipo de agregado, tamanho e forma do corpo de prova, etc.

Este estudo pretende prover aos engenheiros curvas de correlação que os possibilitem estimar mais precisamente a resistência à compressão do concreto para um determinado traço de uma determinada concreteira, por meio da utilização de ensaios não destrutivos de esclerometria e ultrassom.

### 1.1.2 *Problema de pesquisa*

Muito comumente necessita-se avaliar a resistência do concreto nas mais diversas idades na obra, nesta situação, pode-se aplicar alguns métodos não destrutivos, sendo o objeto de estudo deste trabalho os ensaios não destrutivos de esclerometria e ultrassom.

O maior desafio na implementação de ensaios não destrutivos para esta finalidade é quanto à precisão das correlações entre a resistência e a propriedade medida. Já que, segundo Machado (2005), cada mistura do concreto para determinado tipo de agregado possui uma correlação própria a ser obtida. Sendo assim, a correlação obtida para uma mistura não se aplica a outra mistura de concreto.



## 1.2 Questões de pesquisa

Com o embasamento da problemática apresentada foram formuladas as seguintes questões de pesquisa com o objetivo de serem solucionadas:

a) Quais os fatores e as características do concreto que influenciam nos resultados dos ensaios adotados?

b) Quais os cuidados e as precauções que se deve atentar para que o ensaio tenha como resultado um valor mais preciso de uma amostra representativa?

c) Qual a correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão do traço utilizado?

d) Qual a correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência a compressão do traço utilizado?

e) É possível encontrar uma correlação entre o índice esclerométrico, a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão do concreto para o traço utilizado?

f) Quais as equações e gráficos que fundamentam a correlação e reproduzem o comportamento do concreto para os ensaios realizados?

### **1.3 Objetivos da pesquisa**

#### ***1.3.1 Do ponto de vista teórico***

Analisar os resultados dos ensaios, fazendo um tratamento dos valores obtidos, onde se descartam ou corrigem os mesmos seguindo as normas e procedimentos.

Analisar a correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão, analisar a correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão, e, finalmente, avaliar a correlação entre os três ensaios simultaneamente para diferentes idades do concreto definido, verificando a existência ou não dessa correlação. Caso se comprove a sua existência, pretende-se determiná-la matematicamente através de gráficos e de equações.

#### ***1.3.2 Do ponto de vista prático***

Caracterizar o concreto ensaiado, tais como tipo de cimento, areia, brita, relação *água x cimento*, tipo de aditivo, proporções dos agregados, slump flow, resistência característica, além do local de produção do concreto, concreteira responsável pela sua produção, obra de destino do concreto e construtora solicitante.

Definir as características dos ensaios, como tamanho e quantidade dos corpos de prova, as idades em que serão realizados os ensaios, definir os equipamentos utilizados para realização dos ensaios, definir as normas que são utilizadas para a execução dos mesmos, definir o sequenciamento dos ensaios, além da definição do laboratório onde serão realizados os ensaios.

Realizar os ensaios de esclerometria, ultrassom, compressão axial nos dias determinados e seguindo as suas respectivas normas. Colhendo os dados obtidos e os organizando em tabelas.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia adotada faz uso de dados colhidos em laboratório através de ensaios e também através da análise dos resultados obtidos. Sendo assim, é caracterizada pelo emprego da quantificação nas modalidades de coletas de informações e no tratamento delas por meio de técnicas estatísticas. O método quantitativo representa a intenção de garantir a precisão dos resultados, com o objetivo de evitar distorções de análise de interpretações.

O presente estudo será dividido em três etapas, sendo a primeira a parte laboratorial com a moldagem dos corpos de prova, a segunda parte consiste na realização dos ensaios de esclerometria, ultrassom e compressão axial do corpo de prova e, por último, a terceira etapa, com intuito de fazer a análise dos dados.

### 2.1 Moldagem dos corpos de prova

A primeira etapa consiste na moldagem dos corpos de prova, tendo caráter laboratorial terceirizada, já que não será realizado pelo estudante, mas sim por uma concreteira especializada na produção de concreto com as mais diferentes características.

A concreteira escolhida fornecerá um traço de concreto usualmente produzido por ela, informando todas as suas características. Tais como tipo de cimento, brita, areia, relação *água x cimento*, resistência característica, tipo de aditivo, slump e proporções dos agregados.

Também é de interesse nesta etapa a determinação do número de corpos de prova a serem produzidos, já que serão ensaiados em diferentes idades, devendo ser uma amostra com representatividade.

### 2.2 Realização dos ensaios

Como se sabe, serão realizados os ensaios de esclerometria, ultrassom e o ensaio de resistência à compressão axial. Os ensaios serão realizados com corpos de prova de concreto com suas características definidas, o que promoverá uma íntima relação dos resultados obtidos nos ensaios com o material ensaiado.

O ensaios serão realizados com 3 (três), 7 (sete), 14 (quatorze) e 28 (vinte e oito) dias depois da moldagem dos corpos de prova, moldando-se 5 (cinco) corpos de prova, de dimensões 100 x 200 mm, por idade. Estes valores foram encontrados a partir de estudos anteriores que promovem a experiência necessária que comprova a representatividade da amostra, já que a norma britânica BS EN 12504-2:2001 – “*Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number*” propõe testes com no mínimo 3 amostras, o que proporcionaria uma margem de eventuais erros nos ensaios.

Tem-se, na sequência, primeiramente a realização do ensaio de ultrassom, seguindo a norma britânica BS EN 12504-4:2004 – “*Testing concrete – part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*” e a norma brasileira ABNT NBR 8802 – “Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica”. Posteriormente, realizou-se o ensaio de esclerometria, seguindo a norma ABNT NBR 7584:2012 – “Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio”, além da norma BS EN 12504-2:2001, já citado anteriormente. Encerrados os ensaios não destrutivos, ensaia-se o corpo de prova através do seu rompimento com o ensaio de resistência à compressão axial, seguindo-se a norma ABNT NBR 5739:2007 – “Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”.

Após a realização dos ensaios nos dias determinados, tem-se os dados colhidos e, sendo assim, pode-se passar para a próxima etapa da pesquisa, a análise dos dados.

### **2.3 Análise dos dados**

Com os corpos de prova moldados e ensaiados, tem-se os dados necessários para que se possa avançar no estudo fazendo-se a análise dos dados e, assim, encontrar a correlação entre os ensaios e resultados.

Primeiramente, o resultado fornecido pelo equipamento de compressão é dado em quilograma-força (Kgf), onde se faz o cálculo da pressão em megapascal (MPa), o que é feito a partir da utilização da área superficial do CP e da aceleração da gravidade.

Faz-se necessário fazer o tratamento dos dados colhidos. Este tratamento deve seguir as normas dos ensaios citados no item anterior. Onde os dados possuem

algumas regras de aceitação. Em caso de incompatibilidade com o proposto pela norma, o ensaio deve ser descartado, o que promove uma maior uniformidade dos resultados.

Com os dados tratados, faz-se, então, a correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência encontrada nos ensaios, fazendo uso do *software Microsoft Excel 2007*, através do *Pundit Function to Estimate Compressive Strength of Concrete v1.01*, que é uma macro disponibilizada pelo fabricante do equipamento de ultrassom utilizado no ensaio. A macro fornecida permite encontrar a curva do ensaio e o valor dos parâmetros que constituem a equação da curva, sendo esta equação desenvolvida no *software Maple 12.0*.

Faz-se, agora, a correlação entre a esclerometria e a resistência encontrada nos ensaios, utilizando-se o *software Microsoft Excel 2007* através do *Silver Schmidt/Original Schmidt Function to Estimate Compressive Strength of Concrete v1.04*, que é uma macro disponibilizada pelo fabricante do esclerômetro utilizado no ensaio. A equação encontrada na correlação será comparada com a curva do equipamento, dando a oportunidade de fazer ponderações e comparações, ajudando na obtenção de conclusões pertinentes ao estudo. No decorrer da análise, também se faz utilização do programa de modelagem matemática, o *software Maple 12.0*.

Finalmente, faz-se a correlação de todos os ensaios. Onde os valores dos ensaios de esclerometria e ultrassom são variáveis independentes e a resistência à compressão é a variável dependente. Nessa correlação, denominada correlação combinada, utiliza-se o *software Microsoft Excel 2007*, além da utilização do *software Maple 12.0*, no desenvolvimento de sistemas de equações, gráficos e solução de equações. Nesta etapa, faz-se utilização do método SONREB, através da macro fornecida pelo fabricante dos equipamentos utilizados, sendo esta a macro *Determination of SONREB curve coefficients v1.04*.

Com todas as equações obtidas nas três formas de correlação realizadas, faz-se a observação da precisão dos resultados estimados. A partir de então, verifica-se a existência ou não da correlação entre os ensaios e, além da verificação da utilização do método combinado entre os ensaios de esclerometria e ultrassom gerando, ou não, uma maior precisão na estimativa da resistência à compressão.

A precisão de cada correlação é encontrada fazendo-se o cálculo:

$$P(\%) = \frac{|R_{ensaio} - R_{estim.}|}{R_{ensaio}} \times 100 \quad (1)$$

Onde,  $P(\%)$  é a porcentagem de erro entre o valor da resistência encontrada no ensaio de compressão ( $R_{ensaio}$ ) e o valor da resistência estimada pelo método da correlação ( $R_{estim.}$ ). O valor do erro percentual médio da correlação será realizado fazendo-se a média de todas as porcentagens dos erros ( $P(\%)$ ).

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Tem-se como objetivo neste tópico do trabalho, uma breve abordagem dos assuntos mais significativos no que se refere à explicação dos ensaios destrutivos e não destrutivos, além de sua importância e os fatores que influenciam os seus resultados.

#### **3.1 Introdução**

De acordo com Machado (2005), “O dimensionamento de estruturas de concreto armado está diretamente relacionado com a resistência do concreto à compressão”. A resistência à compressão adquirida pelo material em condições controladas de temperatura e umidade, numa determinada idade, é uma propriedade mecânica de fundamental importância no cálculo estrutural.

A comprovação de que o concreto utilizado na execução da estrutura atende às exigências estabelecidas no projeto é feita a partir de ensaios de resistência à compressão geralmente aos 28 dias em corpos de prova cilíndricos ou cúbicos, sendo estes moldados, curados e rompidos de acordo com as normas técnicas vigentes em cada país. Embora confiáveis e mundialmente aceitos, esses ensaios apresentam a desvantagem dos corpos de prova não representarem de maneira fiel o concreto existente na estrutura, devido às diferentes condições de lançamento, de compactação de cura.

A utilização de ensaios não destrutivos surge como uma opção alternativa, uma vez que a peça estrutural a ser avaliada não sofre dano algum ou danos considerados insignificantes que são facilmente reparáveis, não comprometendo o seu desempenho estrutural, o que permite uma maior quantidade de ensaios ou a realização do mesmo ensaio durante várias idades.

Segundo Machado (2005), cada tipo de concreto gera novos gráficos de correlação, sendo assim, para a obtenção de curvas de correlação mais confiáveis, devem-se desenvolver curvas para cada tipo de concreto em questão.

#### **3.2 Ensaaios**

Para a realização dos ensaios é de fundamental importância o conhecimento das normas técnicas para moldagem e cura de corpos de prova, para que assim, os

ensaios a serem realizados de ultrassom, esclerometria e de compressão axial estejam padronizados e normalizados. Sendo a etapa de moldagem e cura normalizada pela ABNT NBR 5738:2003 – “Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”.

### **3.2.1 Ensaio destrutivo**

Os ensaios destrutivos envolvem a ruptura completa ou a perda de resistência por parte da peça ensaiada, envolvendo a moldagem de corpos de prova ou a extração de testemunhos.

Um ensaio destrutivo bastante difundido é a extração de testemunhos, que consiste na retirada de amostras de concreto *in situ* e seu posterior rompimento em ensaios de compressão. Segundo Machado (2005), tal ensaio apresenta as desvantagens de além de ser oneroso, também possuir restrição dos locais de retirada das amostras, para que não se comprometa a estabilidade da estrutura existente. Devido a isso, o número de amostras coletadas é relativamente pequeno, não permitindo um completo mapeamento dos níveis de resistência do concreto da estrutura.

O ensaio de compressão axial deve seguir a ABNT NBR 5739:2007 – “concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”. O ensaio pode ser realizado com corpos de prova moldados, realizando-se a cura ou então pela extração de testemunhos de peças estruturais já executadas em campo. Informando, ao final do ensaio, valores precisos e reais da resistência do concreto.

### **3.2.2 Ensaio não destrutivos**

Os ensaio não destrutivos, segundo Machado (2005), apresentam-se como uma solução mais viável, menos onerosa e de maior possibilidade de colheita de amostras e dados, já que diferentemente da extração de testemunho, que necessita ser retirado cuidadosamente de pontos restritos que não afetem a estabilidade da estrutura existente, os ensaios não destrutivos podem ser feitos nos mais diferentes elementos e em toda a sua extensão, permitindo um completo mapeamento dos níveis de resistência do concreto da estrutura, além de não necessitar de etapas de reparo e recuperação das peças ensaiadas, evitando gastos e acompanhamentos posteriores.



De acordo com Evangelista (2002), algumas propriedades do concreto, tais como módulo de elasticidade, resistência, massa específica, dureza superficial, permeabilidade, condições de umidade e absorção, podem ser avaliadas por meio de ensaios não destrutivos. Sendo de objetivo do estudo, a utilização de ensaios não destrutivos de esclerometria e ultrassom para a estimação da resistência do concreto.

Segundo Machado (2005), ensaios não destrutivos e semi-destrutivos são aqueles que podem ser usados para avaliar o elemento estrutural *in situ*, e se houver danos ao elemento durante a execução dos ensaios, estes danos não deverão prejudicar a sua aparência e nem o seu desempenho, fala também que os ensaios não destrutivos oferecem vantagens significativas no que diz respeito à velocidade de execução, custo e ausência de danos à estrutura em relação aos ensaios que requerem a remoção de amostras para um posterior exame. Eles permitem a realização de uma maior quantidade de ensaios, possibilitando, assim, uma investigação mais abrangente da estrutura em estudo. Outra vantagem que merece destaque é a imediata disponibilidade de resultados que eles propiciam.

Os ensaios não destrutivos podem ser aplicados tanto em estruturas novas quanto em estruturas existentes. Nas estruturas novas, eles podem ser empregados no monitoramento da evolução da resistência e para diminuir dúvidas sobre os processos executivos ou a qualidade dos materiais empregados durante a construção. No caso de estruturas mais antigas, eles são empregados na avaliação de sua integridade ou da capacidade de resistir às novas solicitações.

Segundo Machado (2005), as estimativas de valores das resistências a partir de ensaios não destrutivos, devem ser feitas a partir da realização de ensaios que correlacionem as grandezas obtidas nestes ensaios com a resistência à compressão do elemento. Machado também afirma que para que se obtenham resultados confiáveis, devem-se desenvolver curvas de correlação adequadas, sendo esta desenvolvida para o tipo de concreto em questão.

De acordo com Malhotra (1984), sempre que houver mudanças dos materiais envolvidos na confecção do concreto, uma nova curva de correlação deverá ser estabelecida. Erros consideráveis poderão ser cometidos na avaliação da resistência à compressão do concreto caso sejam utilizadas indiscriminadamente curvas de correlação fornecidas pelos fabricantes dos aparelhos utilizados nesses ensaios, uma vez que elas foram estabelecidas para condições de ensaio e materiais específicos.

Para o Instituto Americano de Concreto, ACI 228.1R (2003), a utilização de ensaios não destrutivos no campo deve ser precedida pelo estabelecimento de curvas de correlação, obtidas de ensaios realizados no laboratório em corpos de prova (cilíndricos ou cúbicos) de concretos feitos com os mesmos materiais utilizados na estrutura a ser avaliada. Nestes corpos de prova, são realizadas medições de uma determinada grandeza, por meio de um ensaio não destrutivo e, logo a seguir, eles são submetidos a ensaios de resistência à compressão. Por fim, os pares de resultados obtidos são submetidos a análises para obtenção de expressões que melhor caracterizem a correlação desejada.

De acordo com Malhotra (1984), os ensaios não destrutivos não devem ser encarados como substitutos dos ensaios de resistência à compressão padronizados, mas somente como uma técnica adicional.

Segundo Neville (1997), o maior obstáculo para a obtenção de curvas de correlação adequadas consiste no fato de que os fatores que influenciam a resistência à compressão nem sempre afetam nas mesmas proporções ou da mesma forma as grandezas obtidas dos ensaios não destrutivos.

### ***3.2.2.1 Método da velocidade de propagação ultrassônica***

As primeiras publicações sobre medições de velocidade de pulsos mecanicamente gerados apareceram nos Estados Unidos em meados de 1940. Bungey (1989) constatou que a velocidade depende das propriedades elásticas do material e quase não depende da sua geometria.

O ensaio consiste na medição, através de dispositivos eletrônicos, do tempo que o pulso leva para percorrer, através do concreto, a distância entre os transdutores emissor e receptor. O ensaio está normalizado pela ABNT NBR 8802:2013 – “concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica”. Sendo também normalizado pela BS EN 12504-4:2004 – “*Testing concrete - part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*”. Sendo última esta uma norma britânica.

Segundo Bungey (1989) e Popovics *et al* (1995), a velocidade da onda depende principalmente dos seguintes fatores: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica do concreto, além da presença de armadura.

No ensaio, as medições podem ser feitas de três formas diferentes, sendo elas com os transdutores em faces opostas (transmissão direta), em faces adjacentes (transmissão semi-direta) ou na mesma face (transmissão indireta ou superficial).

Segundo Naik e Malhotra (1991), a transmissão direta é a mais adequada, uma vez que a energia máxima do pulso é totalmente transmitida e recebida. Na transmissão semi-direta deve-se ter o cuidado de não deixar os transdutores tão afastados entre si, pois o pulso transmitido pode ser atenuado e não ser recebido. Este tipo de transmissão é vantajoso quando se deseja evitar região de concentração de armaduras.

A transmissão indireta ou superficial é a menos recomendada, uma vez que o valor da velocidade ultrassônica ( $V$ ) é influenciado apenas pelo concreto próximo à superfície. Este concreto superficial pode ter composição diferente da que a encontrada nas camadas mais profundas, fazendo com que os resultados obtidos não representem o concreto como um todo. Esse tipo de transmissão deve ser utilizado quando se tem acesso a somente uma das faces do elemento estrutural em estudo.

Segundo Pundit Manual (1994), tem-se a seguinte equação para a medição da velocidade ultrassônica a partir da medição de forma indireta:

$$V = \sqrt{\frac{K \times Ed}{\rho}} \quad (2)$$

Em que:

$$K = \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu)} \quad (3)$$

Onde,  $V$  é a velocidade de ondas ultrassônicas, em km/s;  $Ed$  é o módulo de elasticidade dinâmico, em MPa;  $\rho$  é a massa específica, kg/m<sup>3</sup>; e  $\mu$  é o Coeficiente de Poisson dinâmico.

No caso da transmissão direta ou semi-direta, a NM 58, 1996, indica a utilização da equação:

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad (4)$$

Onde,  $V$  é a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, em m/s;  $L$  é a distância entre os transdutores, em metros (m); e  $t$  é o tempo de propagação da onda entre os transdutores, em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ).

Segundo Machado (2005), a utilização do método de ensaio de ultrassom possui como vantagem o baixo custo relativo do equipamento e a rapidez com que as medições de velocidade são feitas. Sendo outra vantagem a integridade da peça após o ensaio, devido o método ser totalmente não destrutivo, o que possibilita a repetição do ensaio no mesmo local em diferentes idades. O método permite a avaliação do concreto de um elemento estrutural ao longo de toda a sua espessura, desde que seja utilizada a transmissão direta.

Segundo Naik e Malhotra (1991), o perfeito contato entre os transdutores e o concreto do elemento em estudo constitui um ponto crítico desse método. Caso este perfeito contato não seja alcançado, cria-se um bolsão de ar entre o transdutor e o elemento, que acarreta um erro na determinação do tempo de percurso da onda. Este erro ocorre devido ao fato de que somente uma parcela insignificante do pulso pode ser transmitida pelo ar. Para assegurar o perfeito contato, recomenda-se a utilização de produtos, tais como graxa e sabão líquido, que devem ser aplicados em finas camadas.

De acordo com a BS 1881:Part 201 (1986), os valores da velocidade de pulso, para a grande maioria das misturas de concreto comercialmente utilizadas, situam-se em uma faixa restrita, tornando-se necessário uma medição rigorosa, tanto do comprimento do percurso quanto do tempo gasto pela onda. Além disso, as medições dos valores de  $V$  podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como: textura da superfície, teor de umidade, temperatura, tamanho das amostras, presença de armaduras e pelo nível de tensão. Ainda segundo essa norma citada, as correlações entre o valor de  $V$  e a resistência à compressão são difíceis de serem obtidas, pois estas são influenciadas, consideravelmente, pelas propriedades e proporções dos materiais constituintes e pela maturidade do concreto. Segundo Sturup *et al.* (1984), a correlação entre o valor de  $V$  e a resistência à compressão pode ser distorcida devido à presença de fissuras, vazios ou outras descontinuidades do concreto.

De acordo com Naik e Malhotra (1991), temos como fatores do concreto que afetam as medições de velocidade da onda ultrassônica, o tipo, o teor, o tamanho e a graduação do agregado graúdo, o tipo de cimento, a relação *água x cimento*, o uso de aditivos, o grau de compactação, as condições de cura e a idade do concreto. Já para os fatores que afetam as medições e não estão relacionados com as propriedades do

concreto temos: o perfeito contato entre os transdutores e o concreto, a temperatura do concreto, as condições de umidade do concreto, o comprimento de propagação da onda, o tamanho e formas das amostras, o nível de tensão e a presença de armaduras.

### **3.2.2.2 Método do esclerômetro de reflexão**

Em 1948, o engenheiro suíço Ernest Schmidt desenvolveu um aparelho conhecido mundialmente como “Schmidt Hammer”, destinado à medição da dureza superficial do concreto. Segundo Neville (1997), o método do esclerômetro é baseado no princípio do ricochete, segundo o qual o rebote de uma massa elástica depende da dureza da superfície contra a qual ela é lançada.

Segundo Machado (2005), apesar de ser um dos mais antigos ensaios não destrutivos, o esclerômetro de Schmidt continua sendo utilizado em diversos países devido principalmente à simplicidade de seu manuseio, baixo custo e rapidez em avaliar a uniformidade do concreto existente numa estrutura.

Neville (1997) explica o mecanismo do ensaio de esclerometria. Afirma que uma massa com uma mola possui uma quantidade de energia devido à extensão da mola até uma posição determinada, que ocorre quando se comprime o pistão do aparelho contra a superfície do concreto que está sendo testado. Quando se solta a mola, a massa sofre rebote ao se chocar contra o pistão, ainda em contato com o concreto, e a distância percorrida pela massa no retorno, em porcentagem da deformação inicial, é denominada índice esclerométrico (IE).

De acordo com a ACI 228.1R (2003), a distância percorrida pela massa no retorno depende do valor da energia cinética no martelo antes do impacto com o êmbolo e o quanto desta energia é absorvida durante o impacto. Uma parcela desta energia é absorvida pela fricção mecânica decorrente da utilização do aparelho, enquanto que a parcela restante é absorvida na interação do êmbolo com o concreto, sendo esta interação o fator que possibilita a utilização do índice esclerométrico como um indicador das propriedades do concreto. A energia absorvida pelo concreto depende da relação tensão-deformação deste e, portanto, ela está relacionada com a resistência e a rigidez do concreto.

Segundo Machado (2005), a vantagem da utilização do ensaio de esclerometria advém da facilidade de manuseio e do baixo custo do equipamento, além da rapidez com que uma grande quantidade de dados é obtida. Outro fator importante é

que o ensaio praticamente não gera danos na superfície ensaiada. Os danos aparecem como pequenas marcas e ocorrem apenas em concretos de baixa idade ou de baixa resistência. O que propicia a repetição do ensaio nos mesmos locais para idades diferentes.

O método de ensaio com o uso do esclerômetro indica as propriedades da camada superficial do concreto com cerca de 20 ou 30 mm, logo, segundo Machado (2005), o que proporcionará alterações nos resultados são fatores que podem influenciar apenas a superfície do concreto tais como grau de saturação superficial, que diminui o índice esclerométrico, ou a carbonatação, que eleva o índice esclerométrico. O ensaio possui pouca influência sobre o concreto nas partes mais profundas, sendo esta a principal limitação desse tipo de ensaio.

Segundo Malhotra (1991) e diversas normas técnicas consultadas, os principais fatores que influenciam os resultados do ensaio esclerométrico são: tipo de acabamento e geometria da superfície, tamanho, forma, rigidez e idade da peça a ser ensaiada, condições de umidade da superfície, tipo de agregado graúdo, tipo e teor de cimento, tipo de material utilizado nas fôrmas, carbonatação e posição do esclerômetro em relação à superfície a ser ensaiada.

O ensaio com esclerômetro é regido pela normalização brasileira pela ABNT NBR 7584:2012 – “Concreto endurecido - avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - método de ensaio”. E, pela normalização britânica BS EN 12504-2:2001 – “*Testing concrete in structures - part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number*”.

### **3.3 Correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão**

Segundo Evangelista (2002), para a relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico, os maiores coeficientes de determinação foram obtidos para os tipos de curva linear, polinômio do segundo grau, logarítmica e potência.

No presente estudo, utiliza-se a curva do tipo polinomial do terceiro grau, dando ainda mais precisão à correlação. Esta é uma aproximação de curva, pelo método da regressão não linear múltipla, realizada pela macro do *software Excel*, já citada, referente à correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão. A equação possui a forma:

$$f_c = a \times EI^3 + b \times EI^2 + c \times EI + d \quad (5)$$

Onde  $f_c$  é a resistência à compressão,  $EI$  é o índice esclerométrico e “a”, “b”, “c” e “d” são parâmetros encontrados pelo *software*.

### 3.4 Correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão

Machado (2005) estudou diversas curvas, como a do tipo linear, potência, exponencial, polinomial do segundo grau e logarítmica. Com o decorrer da análise das equações, afirma que as equações devem ser escolhidas pelo menor desvio padrão residual. O que o fez propor que as curvas mais indicadas para a correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência a compressão seriam as do tipo potência, linear e exponencial. Sendo a exponencial a mais indicada dentre as três citadas. A equação exponencial possui a forma:

$$f_c = a \times e^{b \times V} \quad (6)$$

Onde,  $f_c$  é a resistência à compressão do concreto,  $e$  é o exponencial natural,  $V$  é a velocidade ultrassônica e “a” e “b” são parâmetros da curva.

Nos estudos realizados por Evangelista (2002), constatou-se que os fatores que mais influenciam a correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão são a massa específica do agregado graúdo e o tipo de cimento.

A macro do *software Excel* referente à correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão, já citada anteriormente, faz uso de métodos estatísticos de regressão não linear múltipla para ajustar os valores dos ensaios a uma curva exponencial, encontrando os parâmetros “a” e “b”.

### 3.5 Correlação combinada entre os ensaios de ultrassom e esclerometria para determinação da resistência à compressão.

De acordo com Samarin (1991), os métodos de ensaios não destrutivos combinados envolvem técnicas onde um método aumenta a confiabilidade e a precisão

do outro método utilizado em conjunto na avaliação de uma determinada propriedade do concreto como, por exemplo, a resistência.

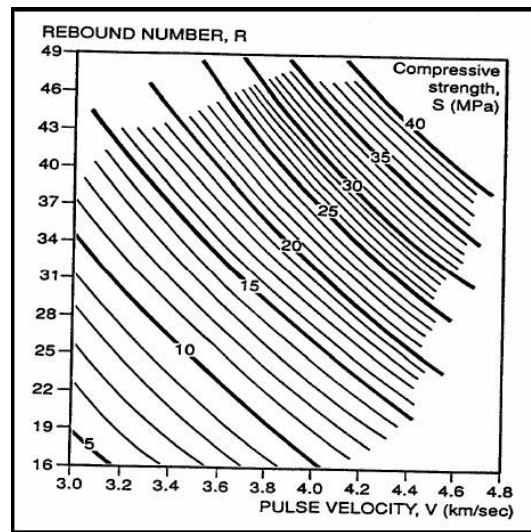
Segundo RILEM NTD 4 (1993), o aumento da acurácia da grandeza a ser avaliada, ao se utilizar os métodos combinados, deve-se ao fato de que um método isolado mede apenas uma única propriedade física do concreto. Para que a combinação de dois ou mais métodos seja vantajosa, é necessário que cada método forneça informações sobre diferentes propriedades que influenciem a resistência do concreto; que cada método seja apropriado para ensaiar elementos de tamanhos e formas diferentes; que a preparação das amostras não requeira nenhum procedimento especial, fora aqueles normalmente utilizados; que os ensaios sejam realizados de forma rápida; que os métodos em questão forneçam a estimativa da resistência com níveis similares de acurácia; e que os ensaios não afetem o desempenho estrutural do elemento sob investigação.

De acordo com Samarin (1991), o método que combina a velocidade do ultrassom com a esclerometria pode ser dividido em dois grupos. No Grupo 1, o principal objetivo é determinar a evolução da resistência do concreto e/ou determinar a variação da resistência de concretos preparados com as mesmas proporções, porém provenientes de diferentes betonadas. Neste caso, são conhecidos todos os componentes do concreto em questão, bem como as suas proporções. Já no Grupo II, o principal objetivo é determinar a resistência à compressão do concreto no local quando existem suspeitas com relação à sua qualidade. Neste caso, tanto os componentes do concreto em questão, quanto as suas proporções são desconhecidos.

De acordo com Facaoaru (1984) e a RILEM NDT 4 (1993), o método SONREB desenvolvido por Facaoaru (1984), baseia-se na definição de um concreto de referência, para o qual é traçado um ábaco onde estão representadas as três grandezas envolvidas (velocidade da onda ultrassônica, índice esclerométrico e resistência à compressão do concreto). A definição do concreto de referência leva em conta parâmetros como: tipo e teor de cimento, natureza petrográfica, graduação do agregado e presença de aditivos.



Figura 1 – Exemplo de ábaco pelo método de SONREB.



Fonte: Machado (2005)

O programa disponibilizado pelo fabricante do equipamento faz uso do método SONREB, correlacionando a velocidade ultrassônica e o índice esclerométrico à resistência à compressão. Faz esta correlação fazendo uma regressão não linear para uma equação do tipo:

$$f_c = a \times V^b \times EI^c \quad (7)$$

No intuito de obter diferentes valores experimentais necessários ao traçado das curvas, a variação da resistência nas amostras a serem ensaiadas pode ser obtida variando-se a relação *água x cimento*, o grau de compactação, a maturidade do concreto, as condições de cura, a proporção de material fino nos agregados e o teor de cimento.

Ao se realizar os ensaios, elabora-se uma equação ou um ábaco que correlacione os valores obtidos com a resistência do concreto utilizado, o que permite a estimativa de valores de resistência para novos ensaios não destrutivos realizados com aquele tipo de concreto utilizado. Caso deseje-se realizar ensaios com concreto diferente daquele utilizado como referência, Facaoaru (1984) recomenda que o valor da resistência à compressão obtida no ábaco para o concreto padrão, a partir dos valores da velocidade da onda ultrassônica e do índice esclerométrico encontrados no local seja multiplicado por um fator de correção (Ct). As maneiras de se obter o valor de Ct

variam de acordo com a disponibilidade de amostras ou testemunhos e do conhecimento prévio da composição do concreto a ser investigado.

### **3.6 Vantagens e desvantagens da combinação entre os ensaios de ultrassom e esclerometria**

Segundo Facaoaru (1984), o método SONREB apresenta como vantagem o fato da precisão dos resultados obtidos não ser influenciada pelo teor de umidade e nem pela maturidade do concreto. Além disso, ela é influenciada de forma menos significativa pelo teor de cimento e pela graduação dos agregados se comparado ao método de propagação de ondas ultrassônicas, e de forma menos significativa pelos efeitos da carbonatação que o método do esclerômetro. Também garante como vantagem o fato dos resultados fornecerem informações de toda a espessura do elemento analisado, além de que não há necessidade de nenhuma preparação especial antes da concretagem e de não ocorrerem danos ao elemento estrutural avaliado durante os ensaios.

De acordo com Samarin (1991), as limitações do método combinado são as mesmas apresentadas pelos dois métodos de ensaio isoladamente, porém variações nas propriedades do concreto que produzem efeitos opostos nos resultados de cada método, como por exemplo, o aumento do teor de umidade, que aumenta o valor da velocidade ultrassônica e diminui o valor do Índice esclerométrico, podem ter seus efeitos minimizados quando ocorre a combinação dos métodos, aumentando desta forma a acurácia da grandeza avaliada.

A RILEM NDT4 (1993) não recomenda a utilização do método SONREB em concretos onde ocorram consideráveis diferenças entre as camadas superficiais e as camadas mais internas do elemento estrutural, e considera inadequada a utilização desse método na detecção de defeitos locais no concreto, tais como vazios e fissuras. Em ambos os casos, ela recomenda a utilização do método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas isoladamente.

### **3.7 Aplicação dos resultados do trabalho**

A aplicação do método combinado da velocidade do ultrassom com a esclerometria tem sido proposta para estimar a resistência à compressão do concreto

com maior acurácia (Tanigawa *et al.*, 1984, Samarin e Dhir, 1984, RILEM NDT 4, 1993).

De acordo com Facaoaru (1984), nenhum dos métodos de ensaios não destrutivos conhecidos pode ser aplicado na estimativa da resistência à compressão sem o conhecimento da composição do concreto e, em alguns casos, da sua maturidade.

Samarin (1991), por sua vez, afirma que o método combinado da velocidade do ultrassom com a esclerometria pode ser utilizado na estimativa da resistência à compressão de concretos de composições desconhecidas, desde que sejam conhecidas, com uma razoável acurácia, essas duas variáveis: a natureza petrográfica dos agregados e a idade aproximada do concreto.

O tempo de trânsito da onda ultrassônica através do concreto, que é um meio sabidamente heterogêneo, é a soma dos tempos de trânsito através das fases individuais da microestrutura do concreto, ou seja:

$$T_c = T_p + T_a \quad (8)$$

Onde,  $T_c$  é o tempo de trânsito da onda ultrassônica através do concreto;  $T_p$  é o tempo de trânsito da onda ultrassônica através da pasta de cimento; e  $T_a$  é o tempo de trânsito da onda ultrassônica através dos agregados. O  $T_p$  está relacionado com a resistência da pasta de cimento, cujas propriedades dependem da idade do concreto, enquanto o  $T_a$  está relacionado com a resistência dos agregados que, por sua vez, depende da sua natureza petrográfica. Sendo assim, Samarin (1991) considera o conhecimento dessas duas variáveis indispensável e suficiente para estimar a resistência à compressão do concreto *in situ*, utilizando o método combinado, com uma acurácia aceitável.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo será dividido em três etapas, sendo a primeira parte laboratorial com a moldagem dos corpos de prova, a segunda parte consiste na realização dos ensaios de esclerometria, ultrassom e compressão axial do corpo de prova e, por último, a terceira etapa, com intuito de fazer a análise dos dados.

### 4.1 Características do concreto ensaiado

A primeira parte do trabalho consistiu na definição dos materiais, além da determinação das características do concreto como traço, resistência característica, relação *água x cimento*, entre outros.

Sendo assim, o concreto utilizado foi um concreto do tipo auto-adensável (CAA) com resistência característica à compressão de 25 MPa e slump flow de 65 cm, com materiais tipicamente utilizados pela concreteira Labormix. O concreto é composto por cimento do tipo CP (Cimento Portland) V ARI RS, que, segundo a Votorantim Cimentos, é um cimento que atinge elevada resistência nos primeiros dias, além de ser resistente a sulfatos. Na produção deste cimento, o clínquer é o mesmo utilizado em outros tipos de cimento, mas este permanece por um tempo mais prolongado no moinho.

No traço do concreto foi adicionado areia média natural de rio e britas de tamanhos zero e um, onde a brita zero corresponde à brita de dimensões que variam de 2,36 a 12,5 mm, e a brita um possui dimensões que variam de 4,75 a 25,0 mm.

A relação *água x cimento* é outra característica importante no traço do concreto. Neste traço, utilizou-se uma relação de 0,47 sendo este valor em litros de água por quilograma de cimento.

No concreto auto-adensável da Labormix, faz-se uso do aditivo superplastificante MC POWERFLOW 3100, que possui como características: pouco tempo de mistura, ação rápida, reduz a viscosidade do concreto, elevada capacidade de plastificação, produz uma superfície acabada de alta qualidade e não causa corrosão na armadura. Sendo utilizada uma proporção de 0,01 litros de aditivo por quilograma de cimento.

Com a nota fiscal fornecida pela concreteira pode-se chegar à proporção de materiais, chamado de traço em massa do concreto. Logo, para um quilograma de

cimento, teremos 2,6 kg de areia, 1,4 kg de brita zero, 1,1 kg de brita número um, 0,01 L de aditivo e 0,47 L de água. Sendo assim, para um traço com um saco de cimento (equivalente a 50 kg de cimento) tem-se: um saco de cimento, 130 kg de areia, 70 kg de brita zero, 55 kg de brita número um, 500 mL de aditivo e 23,5 L de água.

O cimento utilizado foi um tipo comum entre as concreteiras para concreto auto-adensável. Já a areia teve sua granulometria obtida de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 – “Agregados - Determinação da composição granulométrica”. Os agregados graúdos britados foram caracterizados por meio dos ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária, de acordo com as NBR NM 248, ABNT NBR NM 45:2006 – “Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios” e a ABNT NBR NM 53:2009 – “Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. Sendo estas determinações realizadas pela própria concreteira. A água utilizada atende aos padrões necessários para sua utilização em elementos estruturais.

#### 4.2 Características dos equipamentos dos ensaios

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas fôrmas de dimensões 200 x 100 mm. Sendo um total de 25 fôrmas, já que são cinco corpos de prova em cada uma das cinco idades ensaiadas.

O ensaio de ultrassom foi realizado utilizando o equipamento *Tico Ultrasonic Instrument* do tipo 32540006, fabricado pela Proceq.

Figura 2 – Equipamento de ultrassom, *Tico*.



Fonte: Próprio autor.

No ensaio de esclerometria foi utilizado o equipamento *Original Schmidt N/NR*, fabricado pela Proceq.

Figura 3 – Equipamento de esclerometria, *Original Schmidt N/NR*.



Fonte: Próprio autor.

Para o ensaio de compressão axial, foi utilizada uma prensa hidráulica mecânica analógica proveniente do Laboratório de Materiais de Construção da UFC.

Figura 4 – Prensa hidráulica analógica



Fonte: Próprio autor.

### 4.3 Moldagem dos corpos de prova

A concreteira Labormix fez a dosagem do concreto auto-adensável de resistência característica de 25 MPa com materiais e agregados usuais de sua rotina, já citados anteriormente. O concreto foi produzido no próprio canteiro da obra, através de uma mini usina montada no empreendimento Cidade Jardim da construtora Fujita Engenharia.

Figura 5 – Mini usina da Labormix no canteiro de obra da Fujita Engenharia.



Fonte: Próprio autor.

Com o devido convênio e parceria com a construtora responsável, utilizou-se o seu espaço para fazer a moldagem dos corpos de prova no dia 21 de outubro de 2013, seguindo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 5738: “Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”.

A norma britânica faz uso de três corpos de prova por idade para cinco idades em cada ensaio. A favor de uma maior margem de certezas e seguranças nos resultados, resolveu-se utilizar cinco corpos de prova para cada idade de ensaio do concreto, onde se poderia, seguindo a norma, desprezar os valores mais discrepantes e, ainda assim, ter um mínimo de três corpos de prova para tornar o ensaio válido e poder fazer uso dos seus resultados.

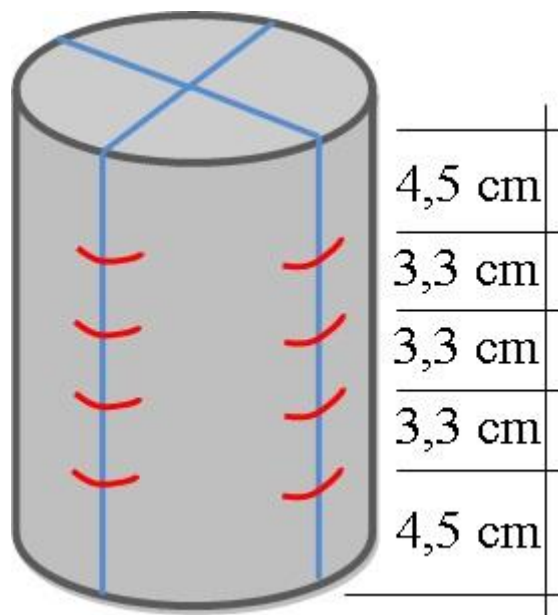
Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em local arejado e protegido das intempéries, ainda no próprio canteiro. Após 24 horas da moldagem, os

CP's foram levados cautelosamente para o Laboratório de Materiais de Construção da UFC, onde foi feita a desfôrma, a cura por imersão dos mesmo em um tanque com água e cal além da regularização da superfície dos CP's através da serragem dos mesmos.

#### 4.4 Realização dos ensaios

Primeiramente, necessita-se preparar os corpos de prova para que se possam realizar os ensaios. Esta etapa consiste em retirar os corpos de prova do tanque com água para que possa secar. Após isto ocorre a regularização da superfície do CP pela serragem de um centímetro da superfície. Já secos e regularizados, os CP's recebem marcações que orientarão o ensaio de esclerometria. Como se necessitam de 16 pontos para o ensaio de esclerometria, divide-se o CP em quatro linhas verticais diametralmente opostas e cada linha vertical é dividida em quatro pontos, com medidas de 4,5 cm das extremidades e 3,3 cm entre os pontos.

Figura 6 – Detalhe da marcação do CP.



Fonte: Próprio autor.

Após a marcação do CP, faz-se a regularização dos pontos de aplicação do equipamento de esclerometria, através do lixamento do CP.



Figura 7 – Lixamento para regularização do CP.



Fonte: Próprio autor.

Após este processo de preparo do CP, pôde-se utilizá-lo para a realização dos ensaios de ultrassom, esclerometria e de resistência à compressão axial, nesta ordem citada. O ensaio de ultrassom, seguindo a norma britânica BS EN 12504-4:2004 – “*Testing concrete – part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*” e a norma brasileira NBR 8802 – “*Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*”. Onde o gel transmissor era colocado nos transdutores do equipamento e os mesmos eram postos na posição axial do CP. O tamanho do CP era informado ao equipamento, que informava como retorno o valor da velocidade ultrassônica e o tempo que a onda levava para percorrer o CP.

Figura 8 – Procedimento do ensaio de ultrassom.



Fonte: Próprio autor.

Realizou-se, então, o ensaio de esclerometria, seguindo a norma ABNT NBR 7584:2012 – “Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio”, além da utilização da norma britânica BS EN 12504-2:2001 – “*Testing concrete in structures - part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number*”. O ensaio foi feito utilizando a prensa hidráulica para fixar o CP, que recebeu neoprene em suas extremidades, e assim, aplicar o equipamento de esclerometria seguindo as marcações realizadas previamente. Contudo, a carga dada na prensa hidráulica foi insuficiente para a correta realização do ensaio, o que gerou valores de índice esclerométrico ilusórios. Sendo assim, o estudo realizado valerá de consulta da metodologia utilizada.

Figura 9 – Procedimento do ensaio de esclerometria



Fonte: Próprio autor.

Finalmente, encerrados os ensaios não destrutivos, ensaiaram-se os corpos de prova através do seu rompimento com o ensaio de resistência a compressão axial, seguindo-se a norma ABNT NBR 5739:2007 – “Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”.

Após a realização dos ensaios, obtiveram-se os dados colhidos e, sendo assim, pode-se passar para a próxima etapa da pesquisa, a análise dos dados.

#### **4.5 Análise dos dados**

Com os corpos de prova moldados e ensaiados, obtiveram-se os dados necessários para que se possa avançar no estudo fazendo-se a análise dos dados e, assim, encontrar a correlação entre os ensaios e os resultados.

A análise dos dados compreende realizar o que já foi descrito na metodologia no item 3.3, além da utilização do que foi exposto na revisão bibliográfica.

Com os resultados obtidos, puderam-se realizar discussões mais reais no que tange a correlação entre os ensaios, determinação de curvas e equações que apontem ou não uma relação persistente entre os resultados, o que resultou em dados mais precisos para a estimativa do valor da resistência característica do concreto de elementos estruturais sem que haja necessidade de extração de testemunhos e realização de ensaios destrutivos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Ensaio de ultrassom

O ensaio de determinação da velocidade ultrassônica foi realizado seguindo a norma NBR 8802, onde se obteve os seguintes resultados conforme o quadro:

Quadro 1 – Resultados do ensaio de ultrassom.

<b>DIA ENSAIO</b>	<b>CP</b>	<b>COMPRIM. CP (cm)</b>	<b>TEMPO (µs)</b>	<b>VELOC. ULT. (m/s)</b>
<b>1° dia</b>	1	20,0	61,60	3250
	2	20,0	64,50	3100
	3	20,0	68,00	2940
	4	20,0	67,90	2950
	5	20,0	62,10	3220
<b>3° dia</b>	6	19,0	52,40	3660
	7	19,0	51,70	3770
	8	19,0	49,70	3820
	9	19,0	51,80	3670
	10	19,0	50,60	3760
<b>7° dia</b>	11	19,0	47,10	4140
	12	19,5	47,20	4130
	13	19,0	45,30	4190
	14	19,0	46,80	4060
	15	19,5	46,40	4200
<b>14° dia</b>	16	19,5	49,10	3990
	17	19,5	46,10	4190
	18	19,0	46,80	4080
	19	19,0	46,60	4060
	20	19,0	47,00	4030
<b>28° dia</b>	21	19,5	46,40	4160
	22	19,5	47,00	4100
	23	19,0	45,10	4210
	24	19,0	48,00	3960
	25	19,0	45,60	4190

Fonte: Própria do autor

## 5.2 Ensaio de esclerometria

Como se sabe, o ensaio proporcionou valores incorretos devido a pouca carga dada para segurar o CP, contudo, são informados os resultados para que se possa observar como é realizado a análise dos valores e a realização da correlação. Sendo os valores de ensaio exibidos no seguinte quadro:

Quadro 2 – Resultados do ensaio de esclerometria.

<b>DIA ENSAIO</b>	<b>CP</b>	<b>ESCLEROMETRIA</b>								<b>ÍNDICE ESCLEROM.</b>	
<b>1° dia</b>	1	8	10	10	8	8	9	12	8	9,7	
		9	11	13	10	8	10	12	10		
	2	8	11	11	8	9	11	14	12	10,8	
		8	10	11	9	9	12	11	9		
	3	8	10	10	8	8	10	10	9	9,9	
		13	10	10	8	8	14	12	8		
	4	8	10	13	9	8	10	10	8	9,7	
		8	9	12	14	8	11	10	8		
	5	9	12	18	10	8	11	12	9	10,2	
		10	10	10	8	8	10	13	8		
	<b>3° dia</b>	6	10	12	12	8	13	14	13	8	12,0
			12	13	14	13	9	12	12	8	
7		10	12	14	10	13	14	11	8	11,8	
		9	12	16	10	9	12	14	8		
8		8	10	11	8	8	12	12	12	10,0	
		8	10	11	10	8	10	10	10		
9		13	11	13	13	8	12	13	10	11,8	
		9	12	13	12	8	14	13	8		
10		10	12	16	8	10	10	12	9	10,5	
		8	10	14	10	8	14	15	10		
<b>7° dia</b>	11	10	13	14	15	10	14	16	14	13,6	
		10	14	16	14	10	13	13	22		
	12	15	15	16	11	13	13	15	12	15,2	
		25	14	16	18	12	12	19	13		
	13	10	14	14	14	10	12	15	12	12,2	
		12	12	16	13	10	12	15	8		
	14	8	14	14	10	10	12	14	9	12,0	
		8	12	15	10	10	13	12	10		
	15	14	12	8	10	12	12	15	10	12,0	
		10	23	15	11	10	14	14	10		

14° dia	16	10	13	16	14	12	12	16	19	14,0
		18	14	15	12	10	14	16	10	
	17	10	12	18	12	12	16	14	13	13,6
		10	16	19	19	13	12	15	13	
	18	8	14	14	13	10	12	16	10	13,4
		10	15	15	20	10	14	23	9	
	19	20	20	16	12	10	15	15	12	15,3
		12	17	19	16	10	14	16	10	
	20	19	15	16	10	10	14	16	10	14,0
		10	14	16	12	10	16	16	10	
28° dia	21	15	14	18	13	18	18	19	18	17,3
		13	20	24	16	15	20	16	10	
	22	15	19	20	16	16	17	21	16	17,0
		15	18	22	14	14	20	20	15	
	23	12	16	16	21	23	15	17	11	15,9
		21	10	15	15	11	17	18	12	
	24	13	16	16	15	12	17	19	10	14,2
		14	17	18	12	10	14	15	12	
	25	16	16	15	16	10	14	23	12	16,0
		21	28	22	13	13	25	14	10	

Fonte: Própria do autor

### 5.3 Ensaio de resistência à compressão

Após realizado o ensaio de resistência à compressão axial para os 25 corpos de prova em um, três, sete, quatorze e vinte e oito dias, chegou-se à seguinte tabela:

Quadro 3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.

DIA	CP	Valor ensaio (Kgf)	Área do CP (cm <sup>2</sup> )	Resistência (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
1° dia	1	6400	78,54	81,49	8,15
	2	7800	78,54	99,31	9,93
	3	5200	78,54	66,21	6,62
	4	3200	78,54	40,74	4,07
	5	8700	78,54	110,77	11,08
3° dia	6	16400	78,54	208,81	20,88
	7	16000	78,54	203,72	20,37
	8	16600	78,54	211,36	21,14
	9	16000	78,54	203,72	20,37
	10	16100	78,54	204,99	20,50
7° dia	11	23500	78,54	299,21	29,92
	12	23000	78,54	292,84	29,28
	13	21100	78,54	268,65	26,87
	14	22000	78,54	280,11	28,01
	15	20000	78,54	254,65	25,46
14° dia	16	26300	78,54	334,86	33,49
	17	24400	78,54	310,67	31,07
	18	25500	78,54	324,68	32,47
	19	25300	78,54	322,13	32,21
	20	25300	78,54	322,13	32,21
28° dia	21	25800	78,54	328,50	32,85
	22	28300	78,54	360,33	36,03
	23	25000	78,54	318,31	31,83
	24	27500	78,54	350,14	35,01
	25	25900	78,54	329,77	32,98

Fonte: Própria do autor

#### 5.4 Resumo geral dos resultados

Para a apresentação do resumo geral dos resultados faz-se primeiramente o tratamento dos dados colhidos. Pois a norma ABNT NBR 7584:2012 – “Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio” encontra o valor do índice esclerométrico da seguinte forma: faz-se a média de todos os 16 valores obtidos no ensaio. Após isto, retiram-se os valores individuais

fora do intervalo de mais ou menos 10% da média encontrada. Os valores dentro do intervalo de 10% irão compor uma nova média. Esta média será o índice esclerométrico. Contudo, este índice esclerométrico deve ser uma média composta por no mínimo cinco valores, caso não seja, este ensaio deve ser descartado. Sendo assim, excluíram-se os ensaios realizados no CP's 7, 9, 14, 15, 20 e 25, chegando-se a seguinte tabela de resumo de todos os ensaios:

Quadro 4 – Resumo geral dos resultados dos ensaios.

<b>DATA ENSAIO</b>	<b>NÚMERO DE DIAS</b>	<b>CP</b>	<b>ÍNDICE ESCLEROMT.</b>	<b>VELOCIDADE ULTRASSON. (m/s)</b>	<b>RESISTÊNCIA (MPa)</b>
22/10/2013	1	<b>1</b>	9,7	3250	8,15
		<b>2</b>	10,8	3100	9,93
		<b>3</b>	9,9	2940	6,62
		<b>4</b>	9,7	2950	4,07
		<b>5</b>	10,2	3220	11,08
24/10/2013	3	<b>6</b>	12,0	3660	20,88
		<b>8</b>	10,0	3820	21,14
		<b>10</b>	10,5	3760	20,50
28/10/2013	7	<b>11</b>	13,6	4140	29,92
		<b>12</b>	15,2	4130	29,28
		<b>13</b>	12,2	4190	26,87
04/11/2013	14	<b>16</b>	14,0	3990	33,49
		<b>17</b>	13,6	4190	31,07
		<b>18</b>	13,4	4080	32,47
		<b>19</b>	15,3	4060	32,21
18/11/2013	28	<b>21</b>	17,3	4160	32,85
		<b>22</b>	17,0	4100	36,03
		<b>23</b>	15,9	4210	31,83
		<b>24</b>	14,2	3960	35,01

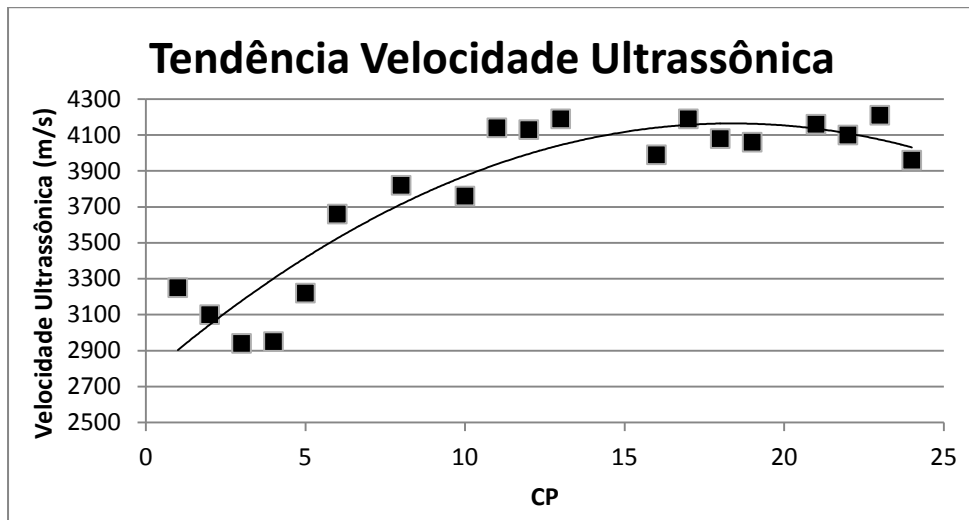
Fonte: Própria do autor

Com os valores tratados podem-se fazer algumas análises iniciais, como os gráficos apresentando as tendências dos ensaios com o tempo.

Para a velocidade ultrassônica, encontra-se a seguinte tendência por uma curva polinomial do terceiro grau:



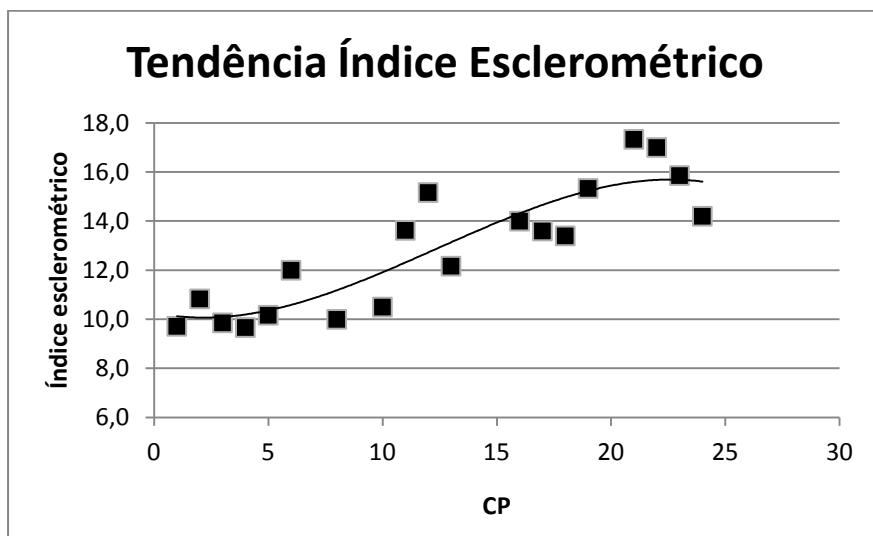
Gráfico 1 – Tendência da velocidade ultrassônica.



Fonte: Própria do autor

Para o índice esclerométrico, encontra-se a seguinte tendência por uma curva polinomial do terceiro grau:

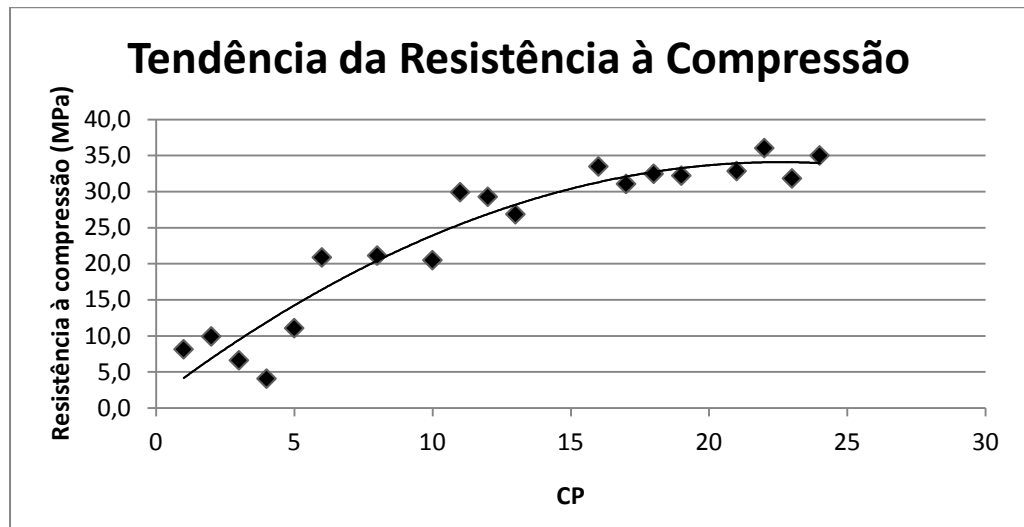
Gráfico 2 – Tendência do índice esclerométrico.



Fonte: Própria do autor

Para o valor da resistência à compressão axial, encontra-se a seguinte tendência por uma curva polinomial do segundo grau:

Gráfico 3 – Tendência da resistência à compressão axial.



Fonte: Própria do autor.

## 5.5 Correlações entre os ensaios

### 5.5.1 Correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão axial

Primeiramente, colocam-se os dois ensaios numa única tabela:

Quadro 5 – Valores da velocidade ultrassônica e da resistência à compressão.

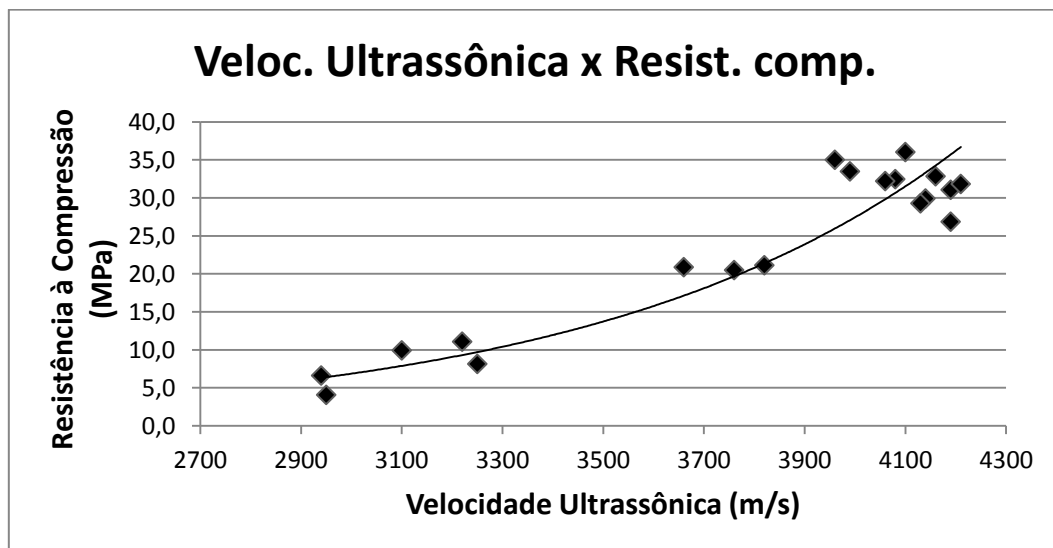
DIA ENSAIO	CP	VELOC. ULT. (m/s)	RESISTÊNCIA (MPa)
1° dia	1	3250	8,15
	2	3100	9,93
	3	2940	6,62
	4	2950	4,07
	5	3220	11,08
3° dia	6	3660	20,88
	8	3820	21,14
	10	3760	20,50
7° dia	11	4140	29,92
	12	4130	29,28
	13	4190	26,87

<b>14° dia</b>	16	3990	33,49
	17	4190	31,07
	18	4080	32,47
	19	4060	32,21
<b>28° dia</b>	21	4160	32,85
	22	4100	36,03
	23	4210	31,83
	24	3960	35,01

Fonte: Próprio autor

Adicionando os valores dos ensaios a um gráfico de dispersão e esboçando esta relação através de uma curva exponencial, tem-se:

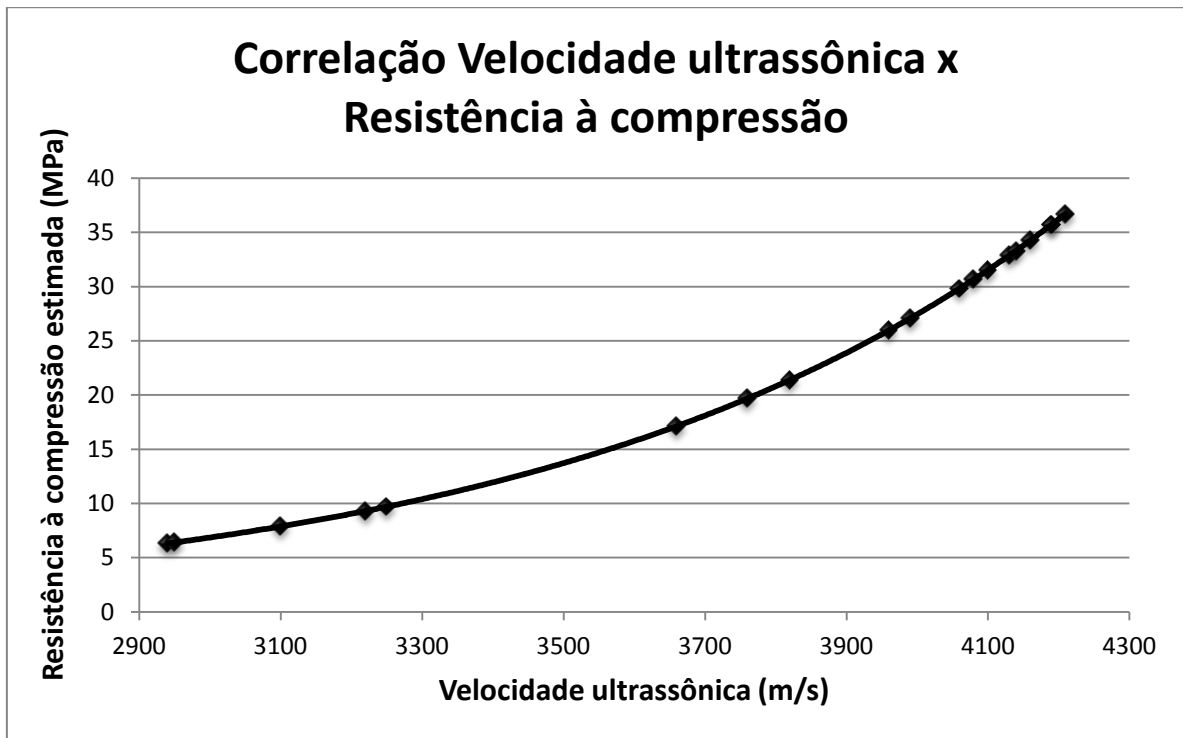
Gráfico 4 – Relação entre os valores de ensaio da velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.



Fonte: Próprio autor

Utilizando a macro fornecida pelo fabricante, já citado na metodologia do estudo, encontram-se a curva de correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão axial:

Gráfico 5 – Correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.



Fonte: Próprio autor

A equação que forma a curva de correlação apresentada é, como já explicado, do tipo exponencial e já com suas constantes encontradas, tem-se:

$$f_c = 0,10748 \times e^{V \times 0,001386} \quad (9)$$

### 5.5.2 Correlação entre o índice esclerométrico e resistência à compressão axial

Primeiramente, colocam-se os dois ensaios numa única tabela:

Quadro 6 – Valores do índice esclerométrico e resistência à compressão.

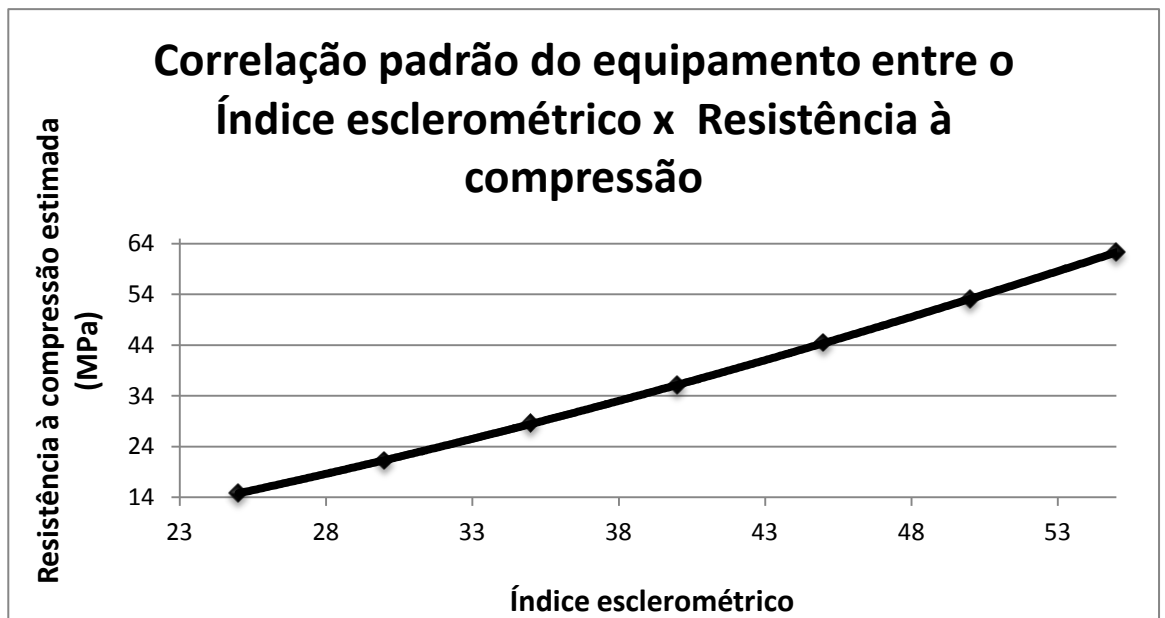
DIA ENSAIO	CP	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO	RESISTÊNCIA À COMP. (MPa)
1º dia	1	9,7	8,1
	2	10,8	9,9
	3	9,9	6,6
	4	9,7	4,1
	5	10,2	11,1

3° dia	6	12,0	20,9
	8	10,0	21,1
	10	10,5	20,5
7° dia	11	13,6	29,9
	12	15,2	29,3
	13	12,2	26,9
14° dia	16	14,0	33,5
	17	13,6	31,1
	18	13,4	32,5
	19	15,3	32,2
28° dia	21	17,3	32,8
	22	17,0	36,0
	23	15,9	31,8
	24	14,2	35,0

Fonte: Próprio autor

Tem-se a curva do equipamento, que correlaciona a velocidade ultrassônica com a resistência à compressão do concreto padrão utilizado pelo fabricante.

Gráfico 6 – Correlação padrão do equipamento entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.



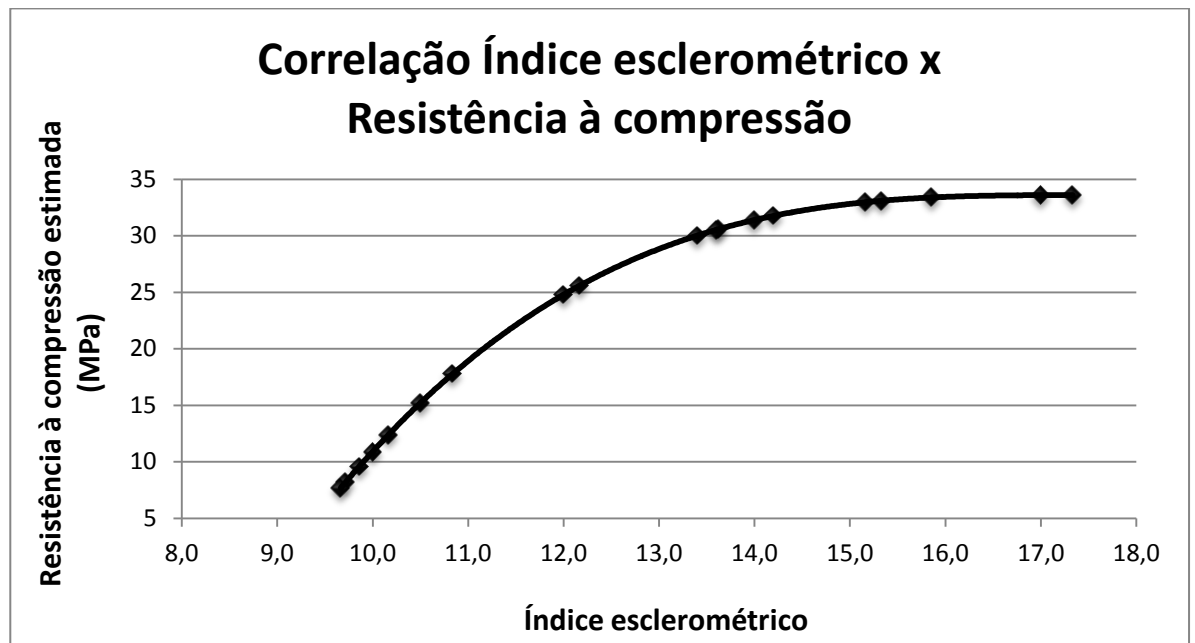
Fonte: Próprio autor.

A curva de correlação feita pelo fabricante com seu concreto padrão é produzida a partir da fórmula:

$$f_c = -0,000047 \times EI^3 + 0,016253 \times EI^2 + 0,519568 \times EI - 7,611810 \quad (10)$$

Utilizando a macro fornecida pelo fabricante, já citado na metodologia do estudo, encontram-se a curva de correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão axial:

Gráfico 7 – Correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.



Fonte: Próprio autor.

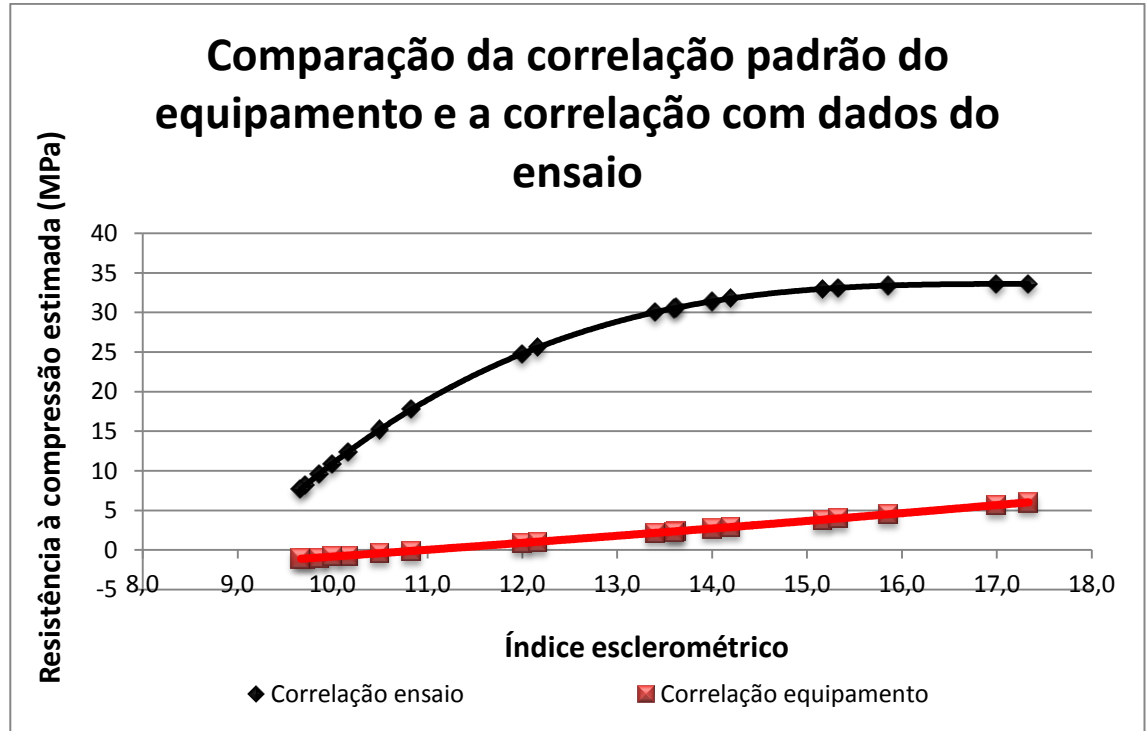
Esta curva de correlação, realizada a partir dos ensaios, é produzida pela fórmula gerada através de uma regressão não linear múltipla, gerando a fórmula:

$$f_c = 0,055429 \times EI^3 - 2,900393 \times EI^2 + 50,565320 \times EI - 260,113608 \quad (11)$$

Como se pode observar, as curvas são bem distintas, o que confirma a hipótese de cada mistura de concreto apresentar uma curva de correlação própria. Valendo-se lembrar que os valores do índice esclerométrico não são representativos. Ao se realizarem novos ensaios, encontrando-se os valores corretos de índice

esclerométrico, encontram-se novos valores das constantes, o que irá modificar a fórmula.

Gráfico 8 – Comparação entre a correlação padrão do equipamento e a correlação obtida pelos valores do ensaio.



Fonte: Próprio autor

### 5.5.3 Correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e resistência à compressão axial

Primeiramente, colocam-se os valores dos ensaios numa tabela para facilitar a comparação e correlação dos mesmos.

Quadro 7 – Valores dos ensaios de ultrassom, esclerometria e resistência à compressão

DATA ENSAIO	NÚMERO DE DIAS	CP	ÍNDICE ESCL.	VELOC. ULTR. (m/s)	RESIST. (MPa)
22/10/2013	1	1	9,7	3250	8,15
		2	10,8	3100	9,93
		3	9,9	2940	6,62
		4	9,7	2950	4,07
		5	10,2	3220	11,08

24/10/2013	3	<b>6</b>	12,0	3660	20,88
		<b>8</b>	10,0	3820	21,14
		<b>10</b>	10,5	3760	20,50
28/10/2013	7	<b>11</b>	13,6	4140	29,92
		<b>12</b>	15,2	4130	29,28
		<b>13</b>	12,2	4190	26,87
04/11/2013	14	<b>16</b>	14,0	3990	33,49
		<b>17</b>	13,6	4190	31,07
		<b>18</b>	13,4	4080	32,47
		<b>19</b>	15,3	4060	32,21
18/11/2013	28	<b>21</b>	17,3	4160	32,85
		<b>22</b>	17,0	4100	36,03
		<b>23</b>	15,9	4210	31,83
		<b>24</b>	14,2	3960	35,01

Fonte: Próprio autor

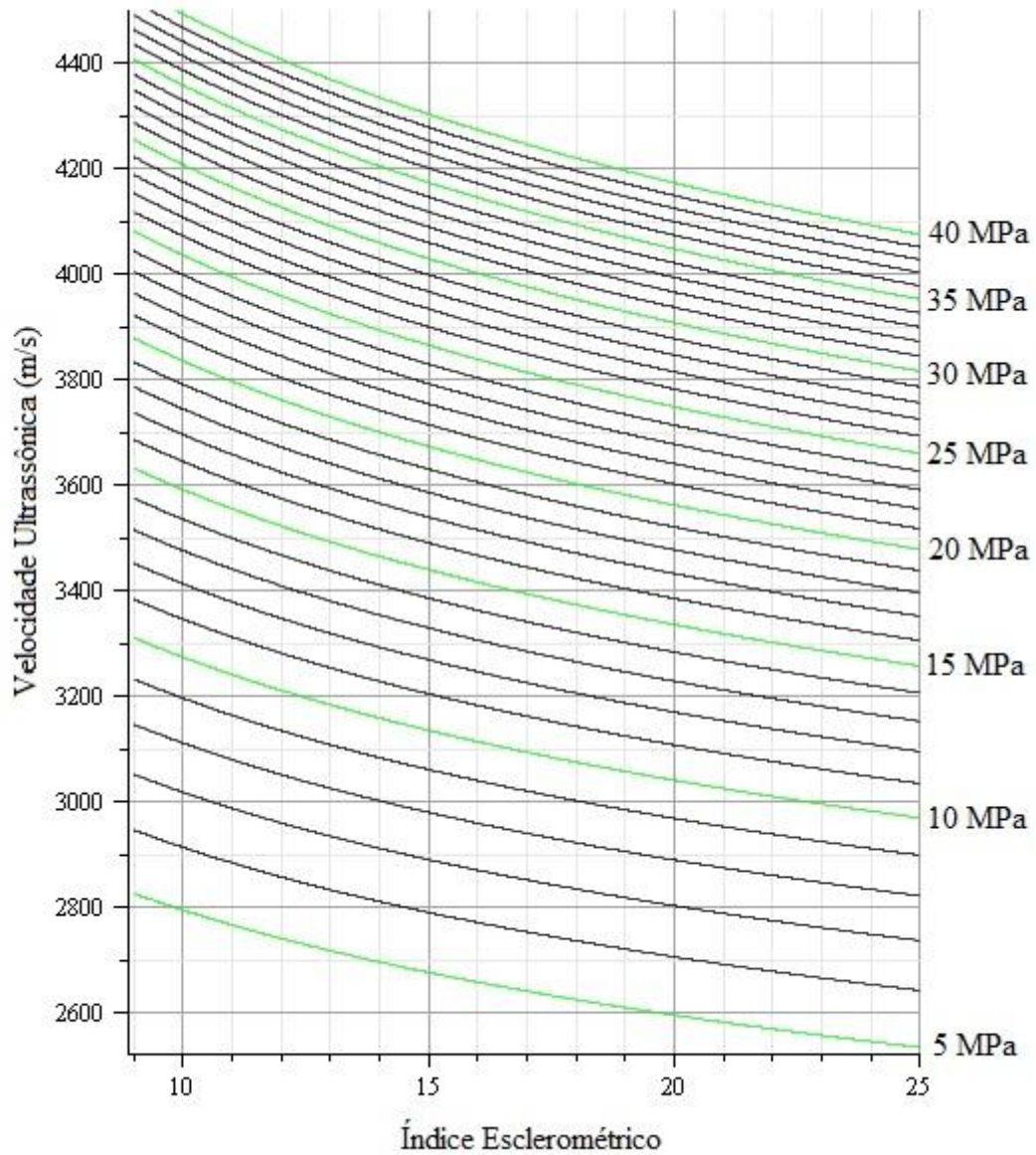
Utilizando-se o método SONREB através da macro disponibilizada pelo fabricante, como já explicado na metodologia, desenvolveu-se a seguinte equação que correlaciona os valores dos ensaios e propicia a estimação do valor da resistência à compressão fazendo uso dos ensaios não destrutivos de esclerometria e ultrassom.

$$f_c = 1,35042 \times 10^{-15} \times V^{4,381657935} \times EI^{0,46749279} \quad (12)$$

Pode-se, então, encontrar o Ábaco pelo método SONREB:



Gráfico 9 – Ábaco, pelo método SONREB, da correlação entre o índice esclerométrico, velocidade ultrassônica e a resistência à compressão



Fonte: Próprio autor

## 5.6 Erros percentuais das correlações

### 5.6.1 Erro percentual da correlação entre velocidade ultrassônica e a resistência à compressão

Utilizando-se as equações de correlação dos ensaios para estimar a resistência à compressão do CP, encontram-se os percentuais dos erros em cada método. Primeiramente os erros da correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão:

Quadro 8 – Valores dos erros percentuais da correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão.

<b>DIA ENSAIO</b>	<b>CP</b>	<b>VELOC. ULT. (m/s)</b>	<b>RESIST. ENSAIO (MPa)</b>	<b>RESIST. ESTIMADA (MPa)</b>	<b>MÓDULO DO ERRO (%)</b>
<b>1° dia</b>	1	3250	8,1	9,7	19,0
	2	3100	9,9	7,9	20,5
	3	2940	6,6	6,3	4,8
	4	2950	4,1	6,4	57,1
	5	3220	11,1	9,3	16,0
<b>3° dia</b>	6	3660	20,9	17,1	18,1
	8	3820	21,1	21,4	1,3
	10	3760	20,5	19,7	3,9
<b>7° dia</b>	11	4140	29,9	33,3	11,3
	12	4130	29,3	32,9	12,3
	13	4190	26,9	35,7	32,9
<b>14° dia</b>	16	3990	33,5	27,1	19,1
	17	4190	31,1	35,7	14,9
	18	4080	32,5	30,7	5,4
	19	4060	32,2	29,8	7,5
<b>28° dia</b>	21	4160	32,8	34,3	4,4
	22	4100	36,0	31,5	12,6
	23	4210	31,8	36,7	15,3
	24	3960	35,0	26,0	25,7
<b>MÉDIA DOS ERROS</b>					<b>15,9</b>

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o erro médio encontrado a partir da correlação citada entre a resistência encontrada a partir dos ensaios e a resistência estimada foi de 14,9%.

### 5.6.2 Erro percentual da correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão

Segue, então, o quadro com os erros percentuais referentes à estimação da resistência a partir da correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão:

Quadro 9 – Valores dos erros percentuais da correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.

DIA ENSAIO	CP	ÍNDICE ESCLEROM.	RESIST. ENSAIO (MPa)	RESIST. ESTIMADA (MPa)	MÓDULO DO ERRO (%)
1° dia	1	9,7	8,1	8,2	0,6
	2	10,8	9,9	17,8	79,2
	3	9,9	6,6	9,6	45,0
	4	9,7	4,1	7,7	89,0
	5	10,2	11,1	12,4	11,9
3° dia	6	12,0	20,9	24,8	18,8
	8	10,0	21,1	10,9	48,4
	10	10,5	20,5	15,2	25,9
7° dia	11	13,6	29,9	30,6	2,3
	12	15,2	29,3	33	12,7
	13	12,2	26,9	25,6	4,7
14° dia	16	14,0	33,5	31,4	6,2
	17	13,6	31,1	30,5	1,8
	18	13,4	32,5	30	7,6
	19	15,3	32,2	33,1	2,8
28° dia	21	17,3	32,8	33,6	2,3
	22	17,0	36,0	33,6	6,8
	23	15,9	31,8	33,4	4,9
	24	14,2	35,0	31,8	9,2
<b>MÉDIA DOS ERROS</b>					<b>20,0</b>

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o erro médio, encontrado a partir da correlação citada, entre a resistência encontrada a partir dos ensaios e a resistência estimada foi de 20,0%.

### 5.6.3 Erro percentual da correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão

Expõe-se, agora, o quadro com os erros percentuais referentes à estimação da resistência a partir da correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão:

Quadro 10 – Valores dos erros percentuais da correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão.

DIA ENSAIO	CP	ÍNDICE ESCLEROM.	VELOC. ULTR. (m/s)	RESIST. ENSAIO (MPa)	RESIST. ESTIMADA (MPa)	MÓDULO DO ERRO (%)
1° dia	1	9,7	3250	8,1	9,5	17,2
	2	10,8	3100	9,9	8,2	17,7
	3	9,9	2940	6,6	6,2	6,4
	4	9,7	2950	4,1	6,2	53,0
	5	10,2	3220	11,1	9,4	15,5
3° dia	6	12,0	3660	20,9	17,7	15,0
	8	10,0	3820	21,1	19,6	7,0
	10	10,5	3760	20,5	18,8	8,5
7° dia	11	13,6	4140	29,9	32,3	8,0
	12	15,2	4130	29,3	33,6	14,7
	13	12,2	4190	26,9	32,3	20,2
14° dia	16	14,0	3990	33,5	27,8	16,9
	17	13,6	4190	31,1	34,0	9,5
	18	13,4	4080	32,5	30,1	7,4
	19	15,3	4060	32,2	31,3	2,7
28° dia	21	17,3	4160	32,8	39,9	21,5
	22	17,0	4100	36,0	34,3	4,7
	23	15,9	4210	31,8	37,3	17,2
	24	14,2	3960	35,0	27,1	22,6
<b>MÉDIA DOS ERROS</b>						<b>15,0</b>

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o erro médio encontrado a partir da correlação citada, entre a resistência encontrada a partir dos ensaios e a resistência estimada foi de 15,0%.

## 6 CONCLUSÃO

Sabe-se que os ensaios de esclerometria possuem valores que devem ser usados apenas para apresentação do procedimento de análise da correlação, contudo, as conclusões tomadas são formuladas tomando-os como reais, para que se possam entender os resultados da correlação caso retornassem valores de erros percentuais eventualmente parecidos com os obtidos no estudo.

### 6.1 Correlação entre velocidade ultrassônica e a resistência à compressão

A correlação realizada entre a velocidade ultrassônica e a resistência à compressão foi realizada utilizando-se a macro *Pundit Function to Estimate Compressive Strength of Concrete v1.01*, fornecida pelo fabricante do equipamento de ultrassom. Retornando como resultado a equação exponencial (9):

$$f_c = 0,10748 \times e^{V \times 0,001386}$$

Utilizando a fórmula encontrada para estimar os valores das resistências, obteve-se um erro percentual médio de 15,9%. O valor aparentemente alto de imprecisão é, na verdade, um valor aceitável, já que se, por exemplo, a estimativa da resistência encontrada for de 25 MPa, tem-se uma margem de mais ou menos 4 MPa, logo, o valor estimado variaria de 21 a 29 MPa. O valor é aceitável, pois uma mistura de concreto é dimensionada de modo a fornecer uma folga do valor da resistência característica. Como exemplo desta folga pode-se citar a própria mistura utilizada, que foi dimensionada para uma resistência de 25 MPa e, na verdade, chegou a atingir 36 MPa aos 28 dias. Desta forma, o valor variaria de 30,3 a 41,7 MPa, o que traria uma margem superior à 25MPa, desta forma o concreto estaria com resistência acima do que foi requerido, sendo assim, o concreto seria dado como aceito.

Como se pode observar no quadro dos erros referentes à correlação da velocidade ultrassônica e a resistência (QUADRO 8), os corpos de prova com resistência menor que 25 MPa e, sendo assim, deveriam ser desprezados na hora de um recebimento em campo por ser menor que a resistência característica, também seriam desprezados pela estimativa realizada pela correlação, sendo este um bom indicador de funcionamento do método.

## 6.2 Correlação entre índice esclerométrico e a resistência à compressão

A correlação realizada entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão foi realizada utilizando-se a macro *Silver Schmidt/Original Schmidt Function to Estimate Compressive Strength of Concrete v1.04*, fornecida pelo fabricante do equipamento de esclerometria. Retornando como resultado a equação (10):

$$f_c = -0,000047 \times EI^3 + 0,016253 \times EI^2 + 0,519568 \times EI - 7,611810$$

Ao se utilizar a equação encontrada para estimar os valores das resistências, obteve-se um erro percentual médio de 20%. O valor da imprecisão encontrada pelo ensaio foi superior ao valor da imprecisão do ensaio de ultrassom. O valor apresentado já mostra ser um valor elevado, mas pode ser aceito, pois, assim como ocorreu com o erro da correlação entre a velocidade ultrassônica e a resistência, para o valor de ensaio de 36 MPa apresenta uma margem que traria a aceitação do concreto, pois o mesmo estaria superior à resistência característica do pedido feito à concreteira. Sendo o intervalo estimado entre 28,5 e 43,2 MPa. Pode-se observar, pelo quadro que apresenta os erros referentes à estimativa da resistência à compressão pela correlação do índice esclerométrico com a resistência (QUADRO 9), que os corpos de prova que não deveriam ser aceitos por serem menores que a resistência característica também não foram aceitos pelo valor estimado.

Se ao invés de fazer uso da estimativa realizada pela correlação em estudo, fizesse-se uso da equação do próprio equipamento, ter-se-iam valores de resistência negativos, o que é um resultado irreal e impossível, o que confirma a ideia de que cada mistura de concreto teria sua própria correlação. Sendo assim, o concreto utilizado para fazer a curva do equipamento é impróprio de ser comparado com o concreto utilizado no estudo.

## 6.3 Correlação combinada entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão

A correlação realizada utilizando o método SONREB entre a velocidade ultrassônica, o índice esclerométrico e a resistência à compressão foi realizada utilizando-se a macro *Determination of SONREB curve coefficients v1.04*, fornecida

pelo fabricante dos equipamentos de ultrassom e esclerometria. Retornando como resultado a equação (12):

$$f_c = 1,35042 \times 10^{-15} \times V^{4,381657935} \times EI^{0,46749279}$$

A equação possibilitou estimar o valor da resistência com um erro percentual médio de 15%. O valor encontrado comprova que a correlação combinada é mais precisa do que a correlação de cada método separadamente. Logo, a correlação entre os métodos não destrutivos e a resistência à compressão existe e é em torno de um por cento mais precisa que a correlação da velocidade ultrassônica e em torno de cinco por cento mais precisa que a correlação do índice esclerométrico. Sendo assim, como feito para os outros métodos, para uma resistência estimada de 36 MPa, ter-se-ia uma margem de valores entre 30,6 a 41,4 MPa.

Como se pode observar no quadro dos erros referentes à correlação combinada (QUADRO 10), os corpos de prova com resistência menor que 25 MPa e, sendo assim, deveriam ser desprezados na hora de um recebimento em campo por ser menor que a resistência característica, também seriam desprezados pela estimativa realizada pela correlação, sendo este um bom indicador de funcionamento do método.

O fato de sua precisão ser apenas um por cento maior que a correlação da velocidade ultrassônica com a resistência, não se justifica a sua utilização, pois seria necessário um esforço maior com a realização do ensaio de esclerometria, tornando o processo de estimação da resistência mais lento e mais oneroso, este maior esforço não compensaria o ganho de um por cento de precisão.

Logo, verifica-se a existência da correlação entre os ensaios, contudo, para o presente estudo, observa-se que a realização apenas do ensaio de ultrassom já seria suficiente para estimar o valor da resistência com uma precisão aceitável.

#### **6.4 Sugestões para trabalhos futuros**

Nos primeiros dias após a moldagem dos corpos de prova o concreto ainda apresenta grandes variações nos ensaios realizados. Segundo Bungey (1989), a idade ideal para a realização do ensaio de esclerometria é a partir dos sete dias após a moldagem. Sendo assim, cabe aos próximos estudos decidir entre iniciar a realização dos ensaios mais tardiamente ou moldar mais corpos de prova, possibilitando o ensaio

em idades maiores, o que acarretaria na obtenção de dados mais homogêneos e, sendo assim, correlações mais precisas.

No presente estudo, não se pôde simplesmente eliminar as primeiras idades e refazer as equações de correlação, uma vez que, ao se fazer a regressão através das macros fornecidas pelo equipamento, um parâmetro de confiabilidade nos dados não é atendido, o que faz necessário a adição de novos resultados de ensaios, o que não é possível pelo fato de não existirem mais ensaios realizados.

O presente estudo fez uso de cinco corpos de prova por idade. A norma britânica, já comentada anteriormente, faz menção de três corpos de prova por idade. Segundo a experiência adquirida com a realização do trabalho, a quantidade de cinco corpos de prova é ideal para que se possa descartar alguns valores, segundo a norma, e ainda assim possuir um mínimo necessário de três corpos de prova exigidos.

Recomenda-se dar a correta carga ao CP para a realização do ensaio de esclerometria, pois como se pôde observar, no presente estudo não foi dada a correta carga, o que provocou valores inconsistentes de índice esclerométrico, o que comprometeu os resultados e a análise das correlações.

Como já foi informado anteriormente ao longo do estudo, sabe-se que para cada traço do concreto ou materiais e características dos mesmos tem-se uma curva própria de correlação entre os ensaios. Com base no que foi exposto, tem-se como sugestão, a realização do estudo para combinações diferentes de materiais e mudanças em suas propriedades, sendo assim, obtemos diferentes curvas de correlação, abrangendo um número maior de obras de construção que possam estar utilizando este traço em estudo. Faz-se isso no intuito de que, futuramente, se tenha uma gama de curvas de correlação que possam ser utilizadas para varias obras ou então de fazer um ábaco reunindo todas as curvas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 228, **In-place Methods to Estimate Concrete Strength: ACI 228.1R-03**, American Concrete Institute, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5738, **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**, Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5739, **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2007.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6118, **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, Rio de Janeiro, 2007.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7584, **Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8802, **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**, Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8953, **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**, Rio de Janeiro, 2009.

British Standard, BS EN 12504: 2014, **Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity**, 2014.

BUNGEY, J.H., **Testing of Concrete in Structures**, 2<sup>th</sup> ed., Spon Press, 1989.

EVANGELISTA, JORGE, **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio Não Destrutivos**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002.

FACAOARU, I., **Romanian Achievements in Nondestructive Strength Testing of Concrete**, In *Situ / Nondestructive Testing of Concrete*, Special Publication SP – 82, American Concrete Institute, Detroit, 1984.

LIMA, F. B., SILVA, M. F. B., **Correlação Entre a Resistência à Compressão do Concreto e a sua Dureza Superficial**, In: *Anais IV Congresso de Engenharia Civil*, Ed. Interciência, Juiz de Fora, 2000.

MACHADO, MAURICIO DORNELLAS, **Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos Usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaio Não Destrutivos**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

MALHOTRA, V. M., **In Situ / Nondestructive Testing of Concrete**, American Concrete Institute, Michigan University, Detroit, 1984.

NEVILLE, A.M, **Propriedades do Concreto**, 2ª edição, Ed. Pini, Brasil, 1997.

POPOVICS, S. AND POPOVICS, J., **Computerization of the Strength Versus W/C Relationship**, Concrete international, 1995.

PUNDIT MANUAL, CNS Eletronics Ltd., London.

RILEM , TC, **Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials**, E & FN SPON, 1994.

SAMARIN, A., **Combined Methods**. In: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), **CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 1 ed., chapter 8, Boston, USA, CRC Press, 1991.