

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**MYRELA VIEIRA DE ARAÚJO**

**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA DO  
CONCRETO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

São Luís

2018

**MYRELA VIEIRA DE ARAÚJO**

**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA DO  
CONCRETO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar

Co-Orientador: Prof. Esp. Luciano Carneiro Reis

São Luís

2018

Araújo, Myrela Vieira de.

Avaliação da interferência da carbonatação na resistência do concreto através de ensaios não destrutivos / Myrela Vieira de Araújo. – São Luís, 2018.

107 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar.

1. Carbonatação. 2. Concreto. 3. Ensaios não destrutivos. I. Título.

CDU 691.32

**MYRELA VIEIRA DE ARAÚJO**

**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA DO  
CONCRETO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 28 / 06 / 2018

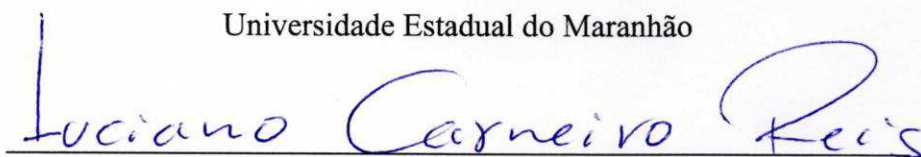
**BANCA EXAMINADORA**



---

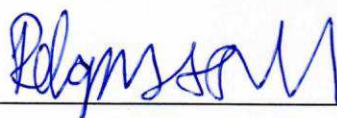
Orientador: **Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar**

Universidade Estadual do Maranhão



Co-Orientador: **Prof. Esp. Luciano Carneiro Reis**

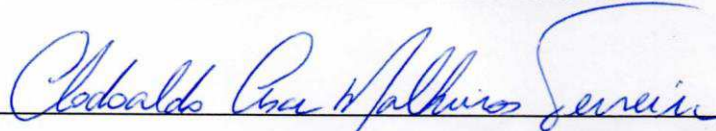
Universidade Estadual do Maranhão



---

1º Membro: **Prof. Dr. Rodrigo de Azevedo Neves**

Universidade Estadual do Maranhão



---

2º Membro: **Prof. Msc. Clodoaldo César Malheiros Ferreira**

Universidade Estadual do Maranhão

Aos meus pais e meu irmão pelos incentivos, amor, ensinamentos que me fazem ser melhor a cada dia e sem eles, eu não chegaria aonde estou.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, meu Pai que sempre esteve comigo, me dando saúde física e psicológica que me sustentou durante toda a pesquisa. Através dEle, eu cheguei aonde estou e pela intercessão de Maria, mãe de Jesus, vou avançar cada dia mais na profissão que decidi escolher.

Agradeço a minha mãe, Eugênia Rodrigues, pelas conversas, orações, conselhos, carinho, dedicação e ensinamentos que me motivam a continuar caminhando em direção aos meus sonhos. Também agradeço ao meu irmão, Raimundo Nonato Netto que me estimulou a ingressar no projeto de pesquisa e sempre se disponibilizou a me ajudar na mesma. Meu pai, Emídio Eugênio, também é presente minha gratidão, pois mesmo ele não estando mais presente entre nós na Terra, sempre me ensinou a estudar muito e ser uma pessoa melhor.

Às minhas avós, Jovita Motta Andrade e Julieta Maria Vieira e madrinhas Tetê e Didi que são minhas preciosidades, sempre intercedendo junto a Deus por mim.

Ao meu namorado, Antônio Helson, que quando possível, me ajudou nos ensaios laboratoriais, além das palavras de motivação e conselhos que me proporcionou maior alegria e amor sobre a pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Aguiar e meu co-orientador Luciano Carneiro Reis, pelas atenções e disposições de sempre me ajudarem na pesquisa, me motivando a crescer na esfera da engenharia civil. Ao laboratorista Jurandir Amorim Morais Filho que quando possível, me auxiliou nos ensaios necessários para a realização desta etapa. Ao Laboratório de Concreto e Materiais pela disponibilização dos equipamentos e materiais necessários para a produção dos ensaios.

A Prefeitura do CAMPUS Paulo VI por proporcionar parcelas de materiais essenciais para a confecção do concreto. Agradeço a Coordenação de Bens e Suprimentos da UEMA por ter concedido equipamentos fundamentais para o início da pesquisa.

Aos meus amigos do curso de engenharia civil, especialmente ao meu grupo de estudo formado pela Mariana Brito, Laryssa Karla, Ana Isabella, Ravanna Maia e Évila, pois foram meu sustento em todo meu percurso durante o curso.

As minhas amigas de infância Jade Garrido, Sarah Miranda, Tainah Enes e Ana Paula Ferreira que me acompanharam durante toda minha pesquisa, me auxiliando por meio de conselhos e orações.

A todos os colegas que colaboraram para a realização desta etapa.

*“Seja forte e corajoso! Não fique desanimado, nem tenha medo, porque eu, o Senhor, o seu Deus, estarei com você em qualquer lugar para onde você for”*

Josué 1:9

## RESUMO

O concreto possui uma grande capacidade de resistir a esforços compreensivos, mas para medir a resistência dos esforços à compressão, suportados por uma superfície ou peça, é necessário que faça ensaios destrutivos ou não destrutivos. Esse estudo visa fazer os ensaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria, sendo o primeiro fundamentado em ondas de ultrassom para avaliação de espessura de paredes, detectar descontinuidades internas em materiais e o segundo é baseado em uma espécie de martelo que impulsionado por uma mola, choca-se contra a área que é ensaiada, aferindo a dureza superficial do concreto em diferentes partes da estrutura. Em centros urbanos como túneis e viadutos, o concreto está exposto à alta concentração de gás carbônico, e dependendo da idade do concreto e da exposição ao CO<sub>2</sub>, a superfície pode estar carbonatada e influenciar muito os resultados obtidos nos ensaios não destrutivos. Além disso, a carbonatação depende de outros fatores que podem dificultar ou facilitar a entrada de CO<sub>2</sub>, como a umidade do ambiente, tempo de cura, lançamento e adensamento do concreto, teor de cimento, relação água/cimento. Nesse sentido, realizou-se avaliações no concreto, inicialmente com ensaios de ultrassom em corpos de prova e posteriormente ensaios de compressão uniaxial nos mesmos moldes. Seguidamente, cumpriu-se os ensaios de esclerometria em caixas cúbicas, com ambas espécies de moldes submetidos à carbonatação e outros não.

Palavras-chave: Carbonatação; Concreto; Ensaio não destrutivos.



## **ABSTRACT**

Concrete has a great ability to withstand comprehensive efforts, but to measure the strength of compressive stresses supported by a surface or part, it is necessary to perform destructive or non-destructive tests. This study aims to do the non-destructive tests of ultrasound and sclerometry, the first being based on ultrasound waves to assess wall thickness, detect internal discontinuities in materials and the second is based on a kind of hammer that is driven by a spring, collides against the area being tested, gauging the surface hardness of the concrete in different parts of the structure. In urban centers such as tunnels and viaducts, concrete is exposed to the high concentration of carbon dioxide, and depending on the age of the concrete and exposure to CO<sub>2</sub>, the surface may be carbonated and greatly influence the results obtained in non-destructive tests. In addition, carbonation depends on other factors that may hinder or facilitate CO<sub>2</sub> entry, such as ambient humidity, curing time, concrete release and density, cement content, water/ cement ratio. In this sense, evaluations were performed in the concrete, initially with ultrasound tests on proof body and later tests of uniaxial compression in the same molds. Then, the sclerometry tests were performed in cubic boxes, with both species of molds submitted to carbonation and others not.

**Keywords:** Carbonation; Concrete; Non-destructive testing.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Esquema simplificado das reações de carbonatação.....	28
<b>Figura 2</b>	Ação da carbonatação.....	35
<b>Figura 3</b>	Representação das ondas no concreto.....	41
<b>Figura 4</b>	Disposição dos transdutores na transmissão direta.....	43
<b>Figura 5</b>	Disposição dos transdutores na transmissão indireta.....	43
<b>Figura 6</b>	Disposição dos transdutores na transmissão semidireta.....	44
<b>Figura 7</b>	Relação entre dimensão máxima do agregado graúdo, a velocidade do ultrassom e a resistência do elemento.....	48
<b>Figura 8</b>	Correlação entre a resistência à compressão e a velocidade do pulso ultrassônico para concretos com diferentes relações de água/cimento.....	49
<b>Figura 9</b>	Componentes do equipamento esclerômetro de reflexão.....	50
<b>Figura 10</b>	Locais indicados para a aplicação do esclerômetro.....	52
<b>Figura 11</b>	Remoção do agregado miúdo retido / Disposição da areia nas peneiras.....	57
<b>Figura 12</b>	Remoção do agregado graúdo retido /Agitação mecânica da brita.....	57
<b>Figura 13</b>	Curva granulométrica do agregado graúdo.....	58
<b>Figura 14</b>	Curva granulométrica do agregado miúdo.....	58
<b>Figura 15</b>	Ensaio de massa específica do agregado miúdo.....	59
<b>Figura 16</b>	Ensaio de massa específica do agregado graúdo.....	60
<b>Figura 17</b>	Ensaio da massa específica do cimento.....	61
<b>Figura 18</b>	Ensaio do teor de umidade.....	62
<b>Figura 19</b>	Preparação dos agregados para serem levados à betoneira.....	63
<b>Figura 20</b>	120 corpos de prova desformados e identificados.....	64
<b>Figura 21</b>	Cubos de concreto 20 x 20 x 20 cm.....	65
<b>Figura 22</b>	Corpos de prova e caixas cúbicas acoplados na câmara de carbonatação.....	65
<b>Figura 23</b>	Capeamento dos corpos de prova.....	66
<b>Figura 24</b>	Corpos de prova capeados.....	67
<b>Figura 25</b>	Equipamento de ultrassom.....	67
<b>Figura 26</b>	Calibração do equipamento.....	68

<b>Figura 27</b>	Medição da velocidade das ondas ultrassônicas.....	69
<b>Figura 28</b>	Equipamento esclerométrico.....	70
<b>Figura 29</b>	Escolha e medição da área de ensaio.....	70
<b>Figura 30</b>	Medição do índice esclerométrico.....	71
<b>Figura 31</b>	Prensa eletrohidráulica para a realização do rompimento dos CPs.....	72
<b>Figura 32</b>	Aplicação de fenolftaleína nas seções dos CPs.....	73
<b>Figura 33</b>	Seções longitudinais do corpo de prova preparados para a medição da profundidade de carbonatação.....	73
<b>Figura 34</b>	Gráfico de dispersão para corpos de prova não carbonatados.....	76
<b>Figura 35</b>	Gráfico de dispersão para corpos de prova carbonatados.....	76
<b>Figura 36</b>	Gráfico de dispersão para caixas cúbicas não carbonatadas.....	80
<b>Figura 37</b>	Gráfico de dispersão para caixas cúbicas carbonatadas.....	80
<b>Figura 38</b>	Profundidade carbonatada dos corpos de prova da 1º câmara de carbonatação em cm.....	85
<b>Figura 39</b>	Profundidade carbonatada dos corpos de prova da 2º câmara de carbonatação em cm.....	86
<b>Figura 40</b>	Profundidade carbonatada dos corpos de prova da 3º câmara de carbonatação em cm.....	86
<b>Figura 41</b>	Profundidade carbonatada das caixas cúbicas da 1º câmara de carbonatação em cm.....	86
<b>Figura 42</b>	Profundidade carbonatada das caixas cúbicas da 2º câmara de carbonatação em cm.....	87
<b>Figura 43</b>	Profundidade carbonatada das caixas cúbicas da 3º câmara de carbonatação em cm.....	87
<b>Figura 44</b>	Profundidade carbonatada de seções no plano longitudinal das caixas cúbicas com relação água/cimento na ordem de 0,8; 0,6; 0,4.....	88
<b>Figura 45</b>	Profundidade carbonatada de seções no plano transversal dos corpos de prova com relação água/cimento na ordem de 0,8; 0,6; 0,4.....	88
<b>Figura 46</b>	Resistência a compressão pelo ensaio de ultrassom para o traço de 1:1:2.....	90

<b>Figura 47</b>	Resistência a compressão pelo ensaio de ultrassom para o traço de 1:2:3.....	90
<b>Figura 48</b>	Resistência a compressão pelo ensaio esclerométrico para o traço de 1:1:2.....	91
<b>Figura 49</b>	Resistência a compressão pelo ensaio esclerométrico para o traço de 1:2:3.....	91

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 -</b>	Concentração volumétrica de CO <sub>2</sub> no ar em relação a alguns tipos de ambientes.....	30
<b>Tabela 2 -</b>	Relação da profundidade da carbonatação com o tempo em anos de concreto.....	36
<b>Tabela 3 -</b>	Qualidade do concreto de acordo com a velocidade de propagação...	46
<b>Tabela 4 -</b>	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para distintas rochas.....	47
<b>Tabela 5 -</b>	Relação dos traços com a quantidade de moldes.....	62
<b>Tabela 6 -</b>	Resistência dos corpos de prova carbonatados de traço 1:1:2.....	77
<b>Tabela 7 -</b>	Resistência dos corpos de prova carbonatados de traço 1:2:3.....	77
<b>Tabela 8 -</b>	Resistência dos corpos de prova não carbonatados de traço 1:1:2.....	78
<b>Tabela 9 -</b>	Resistência dos corpos de prova não carbonatados de traço 1:2:3.....	78
<b>Tabela 10 -</b>	Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre o índice esclerométrico e resistência à compressão simples das caixas cúbicas não carbonatados.....	79
<b>Tabela 11 -</b>	Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre o índice esclerométrico e resistência à compressão simples das caixas cúbicas carbonatados.....	79
<b>Tabela 12 -</b>	Resistência das caixas cúbicas carbonatadas.....	81
<b>Tabela 13 -</b>	Resistência das caixas cúbicas não carbonatadas.....	81
<b>Tabela 14 -</b>	Profundidade média de carbonatação de cada corpo de prova da câmara de carbonatação 1.....	82
<b>Tabela 15 -</b>	Profundidade média de carbonatação de cada corpo de prova da câmara de carbonatação 2.....	83
<b>Tabela 16 -</b>	Profundidade média de carbonatação de cada corpo de prova da câmara de carbonatação 3.....	83
<b>Tabela 17 -</b>	Profundidade média de carbonatação de cada caixa cúbica.....	84

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 -</b>	Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras em função da concentração de gás carbônico.....	31
<b>Quadro 2 -</b>	Principais indicadores de pH utilizados para avaliação de carbonatação no concreto.....	36
<b>Quadro 3 -</b>	Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre velocidade de onda ultrassônica e resistência à compressão simples de corpos de prova não carbonatados.....	74
<b>Quadro 4 -</b>	Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre velocidade de onda ultrassônica e resistência à compressão simples de corpos de prova carbonatados.....	75

## LISTA DE ABREVEATURA E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
BS	British Standard
CB	Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
CP	Corpo de prova
CP II E	Cimento Portland composto com escória
CP II F	Cimento Portland composto com Fíler
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V	Cimento Portland de alta resistência inicial
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
END	Ensaio não destrutivo
IE	Índice Esclerométrico
ISO	International Organization for Standardization
LABCOM	Laboratório de Concreto e Materiais
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Associação Mercosul de Normatização
NUTENGE	Núcleo Tecnológico de Engenharia
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems, and Structures
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual
°C	Grau Celsius
a/c	Água/cimento
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
Ca <sup>2+</sup>	Cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato
cm	Centímetro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
f <sub>ce</sub>	Resistência à compressão estimada
f <sub>ck</sub>	Resistência à compressão característica
f <sub>cm</sub>	Resistência média do concreto à compressão
g	Gramma
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogénio
Hz	Hertz
K <sup>+</sup>	Potássio
kg	Kilograma
KHz	Quilo – hertz
KOH	Hidróxido de potássio
MgCl <sub>2</sub>	Cloreto de magnésio
MgSO <sub>4</sub>	Sulfato de magnésio
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
NaCl	Cloreto de sódio
Na <sup>+</sup>	Sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
pH	Potencial de hidrogénio
PVC	Policloreto de polivinila
s	Segundo
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
Tf	Tonelada-força



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.1.1	Objetivo geral .....	18
1.1.2	Objetivos específicos .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Características do concreto.....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Vantagens do concreto.....	20
2.1.2	Cimento Portland .....	20
2.1.3	Agregados .....	21
2.1.4	Atributos da água .....	22
2.1.5	Dosagem .....	23
2.1.6	Concreto no estado fresco.....	23
2.1.7	Concreto no estado endurecido.....	25
2.1.8	Fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto.....	27
<b>2.2</b>	<b>O fenômeno da carbonatação no concreto .....</b>	<b>27</b>
2.2.1	Processos químicos .....	28
2.2.2	Método de difusão do CO <sub>2</sub> no concreto .....	29
2.2.3	Variáveis que influenciam na carbonatação .....	29
2.2.4	Estudo e verificação da carbonatação .....	33
<b>2.3</b>	<b>Métodos de ensaio para análise da resistência à compressão do concreto .....</b>	<b>37</b>
2.3.1	Ensaio não destrutivo.....	37
2.3.2	Ensaio destrutivo .....	39
<b>2.4</b>	<b>Método de ensaio não destrutivo através do uso de ultrassom.....</b>	<b>39</b>
2.4.1	Ondas ultrassônicas no concreto.....	40
2.4.2	Benefícios e restrições .....	41
2.4.3	Aplicações e apropriações dos transdutores .....	42
2.4.4	Orientações acerca da análise dos resultados .....	44
2.4.5	Condições que interferem os resultados dos ensaios de ultrassom.....	46
<b>2.5</b>	<b>Método de ensaio não destrutivo através do esclerômetro .....</b>	<b>50</b>
2.5.1	Índice esclerométrico no concreto .....	51
2.5.2	Benefícios e restrições .....	51
2.5.3	Aplicações e recomendações do ensaio .....	52

2.5.4	Condições que interferem os resultados dos ensaios de esclerometria.....	52
2.5.5	Orientações acerca da análise dos resultados .....	55
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>56</b>
<b>3.1</b>	<b>Pesquisas bibliográficas.....</b>	<b>56</b>
<b>3.2</b>	<b>Atividades laboratoriais .....</b>	<b>56</b>
3.2.1	Caracterização granulométrica dos agregados.....	56
3.2.2	Determinação da massa específica dos agregados e cimento .....	58
3.2.3	Determinação do teor umidade da areia .....	61
3.2.4	Dosagem .....	62
3.2.5	Produção do concreto .....	63
3.2.6	Moldagem dos corpos de prova e caixas cúbicas .....	63
3.2.7	Desmoldagem dos moldes e cura úmida .....	64
3.2.8	Penetração do dióxido de carbono nos moldes de concreto .....	65
3.2.9	Capecamento .....	66
3.2.10	Ensaio de Ultrassom .....	67
3.2.11	Ensaio de esclerometria .....	69
3.2.12	Ensaio de resistência a compressão axial .....	71
3.2.13	Medição da profundidade carbonatada.....	72
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio ultrassônico x ensaio de compressão uniaxial.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio esclerométrico x ensaio de compressão uniaxial .....</b>	<b>79</b>
<b>4.3</b>	<b>Profundidade de carbonatação.....</b>	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS .....</b>	<b>85</b>
<b>5.1</b>	<b>Profundidade de carbonatação nos moldes de concreto .....</b>	<b>85</b>
<b>5.2</b>	<b>Resistência a compressão dos moldes de concreto.....</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS .....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE B – ROMPIMENTO DE CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em construções civis realizadas no Brasil e no mundo, conforme a necessidade de matérias primas, o concreto é o mais utilizado, aumentando a cada ano por oferecer uma facilidade na locomoção, na produção e manejo, uma vez que é uma substância plástica, sendo um dos materiais mais baratos e frequentemente disponível em todo mundo, além de ser um material favorável para resistir à ação da água.

O concreto é um material estabelecido de muitos elementos composto de distintas propriedades, formas e dimensões, fazendo com que possa nascer muitas dificuldades na obra se esses materiais não responderem perfeitamente aos requerimentos calculados. Portanto, o controle de qualidade do concreto possui um papel de suma importância, e incluso nele está o controle da resistência a compressão, sendo parte integrante da introdução da segurança no projeto estrutural, situando-se dentro dessa necessidade de comprovação daquilo que está sendo executado frente ao que foi adotado no projeto da estrutura.

Ademais, vale ressaltar sobre as patologias que agredem as estruturas de concreto no decorrer dos anos, por exemplo, o fenômeno da carbonatação. Ele consiste em um procedimento físico-químico entre os compostos da pasta de cimento e o gás carbônico, presente na atmosfera, alcançando como resultado principal a precipitação do carbonato de cálcio na região do cobrimento, fazendo com que uma camada passe a ter uma alcalinidade menor que aquela não atingida por esse acontecimento. A carbonatação do concreto é, portanto, o processo de neutralização da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , e de outros compostos alcalinos hidratados do concreto (FIGUEIREDO, 1993).

Diante disso, é importante que verifique a resistência à compressão da estrutura executada e as formas com que isso se realize são por ensaios destrutivos, como o ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos e ensaios não destrutivos, como os de ultrassom e esclerometria. Os ensaios não destrutivos podem ser utilizados em estruturas antigas visando avaliar a integridade e capacidade de resistir às solicitações. No caso de estruturas novas, procura-se monitorar a evolução da resistência ou esclarecer dúvidas sobre a resistência ou a homogeneidade do concreto, sendo assim, os ensaios não destrutivos podem ser aplicados em estruturas de qualquer idade (CASTRO, 2009).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Abordar e correlacionar métodos já existentes de avaliação da resistência à compressão de moldes de concreto que passaram pelo processo de carbonatação e os moldes que não passaram pelo processo, elaborados com materiais da região metropolitana da cidade de São Luís. A correlação será efetuada a partir dos resultados alcançados do método de rompimento de corpos de prova, exposto pela NBR 5739:2007, dos parâmetros resultantes do ensaio de ultrassom, segundo a NBR 8802:2013, e do ensaio de esclerometria, conforme NBR 7584:2012.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Conferir a existência da relação entre os valores de resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas;
- Conferir a existência da relação entre os valores de resistência à compressão e o índice esclerométrico;
- Correlacionar a resistência à compressão de corpos de prova e cubos de concreto carbonatados com a resistência à compressão de corpos de prova e cubos de concreto não carbonatados;
- Verificar a profundidade de carbonatação e correlacioná-lo com o desempenho do concreto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão apresentados os aspectos teóricos deste trabalho, associando estudos já realizados a respeito do tema e características específicas dos parâmetros analisados.

### 2.1 Características do concreto

O concreto é o principal elemento empregado nas construções e na atualidade que quando anexo a uma estrutura, essa importância cresce diante as diversas aplicações e da resistência que passa a contrair. O concreto é um compósito constituído basicamente por agregados miúdos e graúdos, dispersos em uma matriz formada pelas reações químicas durante a hidratação do cimento Portland pela água (SILVA, 2006). As razões para o uso tão difundido do concreto são: a facilidade com que elementos estruturais de concreto podem ser executados, numa variedade de formas e tamanhos; mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obra (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Para as bases estruturais das construções, o concreto é um material favorável, pois ao ser desenvolvido, os espaçamentos entre suas moléculas se contraem, ocupando todos os espaços e resultando em uma disposição granulométrica perfeita, respondendo as devidas precisões por ser um material maleável antes do seu endurecimento e também resistente. Segundo ALMEIDA (2002), para se obter um concreto resistente, durável, econômico e de bom aspecto, deve-se estudar: as propriedades de cada um dos materiais componentes; os fatores que podem alterá-las; a proporção correta; execução atenta da mistura; cura cuidadosa.

Através de dosagens da mistura denominadas de traço, podemos identificar o concreto em três classes básicas, são elas: concreto de densidade normal, concreto leve e concreto pesado. Além disso, existe outra classificação do concreto com relação à sua resistência à compressão ( $f_{ck}$ ). Há concreto de baixa resistência, não adequado à finalidade estrutural que possui a resistência de menos 20 Mpa, o concreto de resistência normal no valor de 20 a 50 Mpa, e por fim, o concreto de alta resistência com o valor maior que 50 Mpa.

A resistência a compressão, geralmente, é utilizada como controle de fabricação, e reconhece-se que proporciona todos os conhecimentos relativos à resistência e à desforma do concreto. Essa resistência é adquirida por meio de ensaios com corpos de prova cilíndricos, sendo uma tendência dos calculistas, engenheiros de obras e projetistas em se preocupar somente com a mesma. Esta realidade apresenta a impossibilidade de desempenhar outros

ensaios por não serem acessíveis ou por razões financeiras ou revela a falta de um conhecimento maior sobre o material.

### 2.1.1 Vantagens do concreto

O concreto é um material que pode ser satisfatório ou insatisfatório, mesmo sendo formado pelos mesmos componentes, pois o que os diferencia são as habilidades e eficiência na execução do serviço. Existem dois critérios pelos quais ele pode ser estabelecido: deve ser satisfatório em seu estado endurecido e em seu estado fresco.

Usualmente, as determinações no estado fresco são que a consistência da mistura seja tal que o concreto possa ser adensado com os elementos acessíveis no canteiro de obras, além da mistura ser também coesa para que no processo de transporte e lançamento não haja segregação com os meios disponíveis. Para o concreto endurecido, a determinação é a resistência à compressão suficiente.

Dois vantagens do concreto o destacam como material construtivo, são elas: sua plasticidade que permite obter formas construtivas singulares, por exemplo, nas obras arquitetônicas de Niemayer. A segunda característica é sua resistência a água, pois sofre menos deterioração quando exposto à água, assim, ela é utilizada em armazenamento, controle e transporte de água.

De acordo com Arnaldo Forti Battagin, chefe dos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), com relação as definições de sustentabilidade, o concreto armado consome menos energia e emite menos gases e elementos poluentes em comparação a outros materiais, como o vidro, o aço e o alumínio.

### 2.1.2 Cimento Portland

Cimento Portland é o nome dado ao cimento obtido pela mistura íntima de calcário, argila ou outros materiais siliciosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro. Essa mistura é queimada à temperatura de clinquerização, sendo o material resultante dessa queima, o clínquer moído. (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Neste momento, o cimento Portland é julgado como um material genérico. Porém, quando hidratados, cimentos com variadas composições químicas arriscam proporcionar propriedades distintas. Dessa maneira, é admissível escolher composições de matérias-primas de acordo com as propriedades desejadas para produção de cimentos. O Brasil possui de oito

tipos básicos normalizados de cimento Portland e aborda mais de duas dezenas de subtipos e classes de resistência acessíveis para variadas aplicações que se diferenciam de acordo com a quantidade de sulfatos de cálcio, clínquer e adições.

Para garantir uma boa durabilidade do concreto sob uma variedade de condições, diversos cimentos foram produzidos. Porém, com relação aos problemas de durabilidade do concreto, é inviável descobrir na composição do cimento uma resposta completa. A resistência, permeabilidade, retração, fluência que são propriedades mecânicas e físicas do concreto endurecido, apesar de ter grande influência na velocidade de desenvolvimento da resistência, também são atingidas por condições além da composição do cimento.

### 2.1.3 Agregados

Agregados são materiais com configuração de grãos, sem tamanho e forma determinados que possuem origem natural ou artificial. A primeira é derivada de rochas presentes na crosta da Terra dependente ao processo de intemperismo, ciclos de umedecimento e secagem e outros métodos que pertencem, por exemplo, da topografia. Na segunda, os agregados são determinados por métodos industriais complexos, incluindo, frequentemente, aglomeração, pulverização, que apontam usualmente, à obtenção de propriedades especiais, por exemplo, propriedades de isolamento térmico.

A qualidade dos agregados no concreto é essencial, pois 75% do volume do concreto é ocupado por ele. As propriedades térmicas, químicas e físicas influem no comportamento do concreto, com relação às da pasta de cimento, por exemplo, beneficiando sua durabilidade e estabilidade dimensional. A classificação dos agregados pode ser dada quanto a dimensão dos grãos, são elas: agregados graúdos e agregados miúdos.

#### 2.1.3.1 Agregado miúdo

É aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075mm em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 com peneiras de acordo com ABNT NBR ISO 3310-1:2010. (ZANELLA, 2014).

### 2.1.3.2 Agregado graúdo

Segundo a norma ABNT NBR 7211:2004, é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 152mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, com peneiras padronizadas pela norma ABNT NBR ISO 3310-1:2010 (ZANELLA, 2014).

### 2.1.4 Atributos da água

A quantidade de água destinada ao amassamento do concreto é fundamental para resistência da mesma, pois suas impurezas podem interferir na pega do cimento, causar manchamento na superfície do concreto, podendo ainda levar à corrosão das armaduras. A utilização de água potável e água não potável, em geral, é seguro e satisfatória para a produção do concreto. Como regra, qualquer água com pH (grau de acidez) entre 6,0 e 8,0, sem sabor salino ou salobro é adequado ao uso.

Eventualmente, o uso de água do mar como água de amassamento precisa ser considerado. A água do mar tem, tipicamente, uma salinidade total de 3,5% (sendo 78% dos sólidos dissolvidos NaCl e 15% MgCl<sub>2</sub> e MgSO<sub>4</sub>). Essa água resulta em uma resistência inicial um pouco maior, mas menor nas maiores idades. A perda de resistência é geralmente menor que 15% e pode, portanto, ser tolerada. A água do mar tem a tendência de causar umidade constante e eflorescências. Essa água não deve ser utilizada onde a aparência do concreto seja importante (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Para o concreto armado, principalmente em países tropicais, a água do mar expande o risco de corrosão da armadura. No entanto, quando o concreto armado está em constância em água do mar ou doce, o emprego da água do mar na mistura apresenta não dispor de consequências prejudiciais. Porém, julga-se não recomendável o seu uso para o amassamento na prática.

Em geral, a água satisfatória para amassamento também é adequada para a cura. Entretanto, ferro ou matéria orgânica podem causar manchamento, em especial se a água flui lentamente sobre o concreto e evapora rapidamente. Em alguns casos, a ocorrência de descoloração não é importante e, sendo assim, qualquer água adequada ao amassamento ou mesmo de qualidade um pouco inferior é aceitável para realização de cura. É essencial que a água de cura seja isenta de substâncias que ataquem o concreto endurecido, por exemplo, águas que contenham CO<sub>2</sub> livre. (NEVILLE e BROOKS, 2013).



### 2.1.5 Dosagem

A dosagem, habitualmente denominada de traço, é compreendida como os métodos fundamentais para o alcance da melhor proporção entre os elementos constituintes do concreto. Essa proporção é possível ser determinada em massa ou em volume, sendo mais aconselhável e exigente a proporção manifestada em massa seca dos materiais.

No estudo de dosagem do concreto, é preciso ser executado com os materiais disponíveis da região com a finalidade de alcançar uma melhor mistura e mais econômica, alcançando uma sequência de exigências. Essa sequência poderá ser maior ou menor, de acordo com a complexidade do trabalho a ser praticado e de acordo com o grau de conhecimento técnico e prático do usuário do concreto que requereu o estudo.

### 2.1.6 Concreto no estado fresco

O concreto é um material formado por elementos em todas as fases, isto é, líquidos, gel, sólido e gases. Através de uma adequada hidratação do cimento, na qual a pasta resultante envolve e aderi satisfatoriamente os sólidos presentes, é obtido o concreto estrutural, sendo seu objetivo principal atingir um material predominantemente sólido com poucos vazios e alta resistência.

As fundamentais características do concreto fresco são a consistência, a trabalhabilidade e a homogeneidade. Durante a sua produção e na moldagem da estrutura, o adensamento a que o concreto é sujeito, interfere em suas propriedades finais. Além disso, existem outras condições que influenciam na durabilidade da estrutura e nas propriedades do concreto. A primeira denominada de cura do concreto, submetida após o adensamento e a segunda o início de pega.

#### 2.1.6.1 Consistência e trabalhabilidade

Consistência corresponde a maior ou menor capacidade que o concreto fresco tem de se deformar; está relacionada ao processo de transporte, lançamento e adensamento do concreto e varia, em geral, com a qualidade de água empregada, granulometria dos agregados e pela presença de produtos químicos específicos. (CARVALHO e FILHO, 2012).

De acordo com a NBR 7223:1998, é determinada a consistência pelo abatimento de tronco de cone. Esse ensaio ocorre através do abaixamento que uma quantidade certa de massa,

disposto em um molde metálico de forma tronco-cônica, que possuirá no momento em que o molde for removido.

Um concreto com slump alto é, em geral, fácil de ser lançado e adensado e, portanto, considerado de boa “trabalhabilidade”. O conceito de trabalhabilidade de um concreto está ligado basicamente à maneira de efetuar seu adensamento. Quando o concreto no estado fresco manifesta dimensões máximas do agregado e consistência apropriados ao perfil de obra a que se destina, é avaliado como trabalhável. (CARVALHO e FILHO, 2012)

Na trabalhabilidade, há diversos fatores que a influenciam, sendo elas: o tipo e a granulometria dos agregados, a relação agregado/cimento, a finura do cimento, o comparecimento de aditivos e a quantidade de água. O último fator já citado é a principal influência, pois apenas uma simples adição de água, aumenta a lubrificação entre as partículas.

#### 2.1.6.2 Homogeneidade

A disposição dos agregados graúdos dentro da massa do concreto é denominada de homogeneidade. Essa é uma razão importante que influencia na qualidade do concreto, pois quanto mais uniformes os agregados graúdos se expõem distribuídos na massa, sem identificar desagregação, melhor será o concreto para o acabamento, sem a urgência de reparos imediatos, além de um adequado concreto no que se refere a proteção e permeabilidade disponibilizado à armadura.

Uma adequada homogeneidade pode ser alcançada com uma excelente mistura do concreto na fase de fabricação, em seguida, um zeloso transporte dirigindo-se ao local de emprego da estrutura e o lançamento do concreto das fôrmas de maneira apropriada. Na NBR 14931:2003 são definidos os cuidados que devem ser constatados quanto ao transporte, lançamento e adensamento do concreto.

#### 2.1.6.3 Início de pega do concreto

Usualmente, define-se o início de pega quando a consistência do concreto não permite mais sua trabalhabilidade, ou seja, quando não é mais possível lança-lo nas fôrmas ou adensá-lo. (CARVALHO e FILHO, 2012).

É nomeado pega o intervalo entre o início do endurecimento até ele alcançar uma circunstância que seja capaz de ser desenformado, iniciado poucas horas após sua formação, mesmo não alcançando sua resistência total.

O início de pega pode ser definido, em meio prático, estabelecendo a medição da profundidade de penetração de uma haste no concreto, com peso e tamanhos predeterminados. Na ocasião de que a profundidade alcançada proporcionar um valor menor que um limite prefixado, avalia-se que houve o início de pega.

#### 2.1.6.4 Cura do concreto

A hidratação do concreto cresce em ampla velocidade logo após o início de pega e ao longo desse tempo, a água que constitui na mistura, possui a propensão de retirar-se pelos poros do material e evaporar. Dessa maneira, o concreto poderá passar por uma perda de volume maior que o frequente. Porém, essa retração poderá ser impossibilitada em armaduras e fôrmas, conseqüentemente criando tensões de tração que devido à pouca idade do concreto, não conseguem ser resistidas pelo mesmo.

À vista disso, é importante preservar a umidade essencial para as reações de hidratação, impedindo a evaporação precoce, até o momento que as características previstas sejam alcançadas. Essas medidas compostas são denominadas de cura. É apropriado julgar se é preferível que a cura do concreto aconteça sob pequenas ou grandes temperaturas. A segunda opção é satisfatória, pois agilizam o desenvolvimento de ganho de resistência.

#### 2.1.7 Concreto no estado endurecido

As principais características que compõe o concreto endurecido são as de resistência à compressão e à tração. Os ensaios realizados para identificar a resistência do concreto são executados de maneira rápida e seus resultados são motivados pelas características dos ensaios e pela configuração do corpo de prova. Não há ainda uma lei única para estabelecer a resistência dos materiais que seja conveniente para toda variedade concebíveis de solicitação.

Contudo, nos cálculos de estruturas de concreto armado, determina-se como aproximação admissível em função da resistência a compressão, a resistência do concreto para variadas espécies de solicitações. Dessa forma, a NBR 6118:2003, manifesta uma variedade de expressões que alcança as resistências do concreto para muitas variedades de solicitações conforme a resistência à compressão.

### 2.1.7.1 Resistência a compressão

A resistência à compressão axial está relacionada direta ou indiretamente com outras características do concreto endurecido, sobretudo àquelas associadas com a durabilidade. Ela é determinada pelo ensaio de corpos de prova sujeitos à compressão centrada e muitos fatores podem influenciar nos seus resultados, por exemplo, quando dois ou mais corpos de prova, oriundos da mesma amassada e constitui uma mesma idade, manifestam diferentes resultados para a resistência. Isso é verificado em virtude das diferenças no procedimento de moldagem, cura, quantidade de cimento e agregados.

De acordo com a ABNT NBR 5738:2008, para a determinação da resistência à compressão axial, encontra-se uma espécie de molde que pode ser utilizada: a configuração cilíndrica. O corpo de prova padrão utilizado possui a altura igual ao dobro do diâmetro, sendo mais usual o emprego de moldes com 100mm x 200mm, especialmente à sua simplicidade de manuseio. A resistência à compressão do concreto, de acordo com a NBR 6118:2003, tem de ser associado à idade de 28 dias; sua moldagem é descrita pela NBR 5738:2008 e o ensaio praticado segundo a NBR 5739:2007.

No ensaio de curta duração do corpo de prova, a resistência à compressão é alcançada pela fórmula:

$$f_{cj} = \frac{N_{rup}}{A} \quad (1)$$

na qual:

$f_{cj}$  – Resistência à compressão do corpo de prova de concreto na idade de (j) dias;

$N_{rup}$  – Carga de ruptura do corpo de prova;

$A$  – Área de seção transversal do corpo de prova.

### 2.1.7.2 Resistência característica do concreto à compressão

Quando há necessidade de avaliação da resistência de um concreto à compressão, é preparado um determinado número de ensaios de corpos de prova. Com os resultados deste, é observado que os valores encontrados são dispersos, mesmo utilizando o mesmo concreto, logo, é preciso encontrar o valor da resistência representativa deles.

Em vista disso, é admitido a definição de resistência característica, uma base estatística que presume o valor da média aritmética ( $f_{cm}$ ) das cargas de ruptura dos ensaios dos

corpos de prova e o desvio da série de valores, através do coeficiente de variação,  $\delta$ . Mais especificamente, a resistência característica ( $f_{ck}$ ) do concreto à compressão é conceituado como o valor que desenvolve grau de confiança de 95%, isto é,  $f_{ck}$  é o valor da resistência de maneira que 5% dos resultados dos ensaios encontrem-se abaixo dele ou 95% acima.

#### 2.1.8 Fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto

Há diversos elementos que indicam influência na resistência mecânica do concreto, como as propriedades dos componentes quanto à relação água/cimento que segundo Aitcin (2000), tem sido pilar da tecnologia do concreto por aproximadamente um século, se tornando adequado e compreensível, contanto que o concreto obtenha apenas o cimento Portland como material cimentício.

A dependência existente entre a relação a/c e a resistência do concreto varia para cada tipo de cimento e idade, bem como para as condições de cura (NEVILLE, 1997). Para interesses experimentais, a resistência do concreto é tradicionalmente definida pelo valor aos 28 dias.

Conforme todo material compósito, a conclusão da resistência do concreto no estado endurecido resultará da zona de transição entre o agregado e a pasta e das propriedades do agregado graúdo, como a composição mineralógica, textura superficial e forma das partículas e distribuição granulométrica. Agregados britados proporcionam aos concretos elaborados uma maior resistência à compressão em relação ao seixo rolado, devido a uma maior ligação física presente entre o agregado e a pasta de cimento, além de apresentarem uma forma irregular e textura superficial rugosa.

## 2.2 O fenômeno da carbonatação no concreto

O concreto armado está dependente a variações ao longo do tempo em decorrência de interações entre os elementos que o estabelecem, tais como areia, cimento, brita, água que implicam o desempenho da estrutura, gerando resultados estéticos indesejáveis e provocando desconforto psicológico nos consumidores.

Entre as patologias que conseguem agredir as estruturas de concreto armado, sendo umas das mais pesquisadas e preocupantes é o fenômeno da carbonatação, associada à ação de  $CO_2$ , procede de variações da microestrutura e perda do pH do concreto, diminuindo a proteção passiva das armaduras, crescendo a vulnerabilidade à corrosão e conseqüentemente

influenciando na durabilidade da estrutura. Felizmente, a sua propagação sucede a uma velocidade lenta, atenuando-se com o tempo.

O fenômeno da carbonatação é mais acentuado e expressivo em ambientes em que se encontram concentrações mais elevadas de  $\text{CO}_2$ , porém, ela também é presumível em ambientes cuja concentração desse gás no ar seja pequena quanto cerca de 0,03% em volume, sendo este um teor característico de um meio rural.

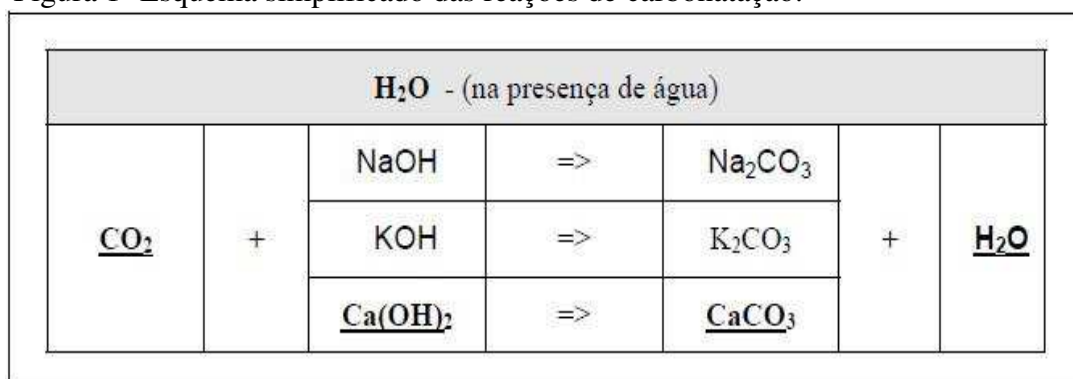
### 2.2.1 Processos químicos

A carbonatação significa em converter íons alcalinos que são originados da reação de hidratação do cimento, como íons de sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e especialmente o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) em sais de carbonatos desses elementos, através da ação ácida do dióxido de carbono presente no ar.

Os hidróxidos de sódio ( $\text{NaOH}$ ), potássio ( $\text{KOH}$ ) e cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), tanto dissolvidos na fase aquosa quanto precipitados, propiciam um ambiente de elevada alcalinidade ao concreto, fruto do alto pH da solução do poro contida na pasta de cimento (CASCUDO e CARASEK, 2011). Quando esses compostos são consumidos ocorre uma significativa redução no pH desta solução. O pH do concreto, originalmente apresenta valores superiores a 12,5 e após o processo de carbonatação pode chegar a valores inferiores a 8,5 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Além disso, a baixa alcalinidade também pode ser ocorrida a ações preponderantes de outros gases ácidos, por exemplo, o  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , os quais agem nas superfícies expostas das estruturas de concreto. Entretanto, a maior dela é o dióxido de carbono, originando como produto deste fenômeno o  $\text{CaCO}_3$ , que ocorre de forma simples e lenta.

Figura 1- Esquema simplificado das reações de carbonatação.



Fonte: Helene (1986).

### 2.2.2 Método de difusão do CO<sub>2</sub> no concreto

O desenvolvimento do gás carbônico para camadas mais profundas do concreto ocorre pelo método de difusão. Na situação de que existe uma camada superficial seca no concreto ou poros com nenhuma umidade, sucede a difusão molecular do CO<sub>2</sub>, enquanto que na fase líquida, quando os poros estão parcialmente ou inteiramente de água intersticial, a maneira com a qual o gás carbônico penetra no interior do concreto é através do transporte difusional do íon carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>).

As taxas de difusão do CO<sub>2</sub> são diferenciadas quando estão na presença do ar e na água. De acordo com Bakker (1988), a velocidade de difusão do gás carbônico no ar é aproximadamente de 10<sup>4</sup> vezes mais alta que na água. A penetração de CO<sub>2</sub> será estabelecida pela configuração da estrutura do poro, além de ter o conhecimento de que estão envolvidos por água ou não.

### 2.2.3 Variáveis que influenciam na carbonatação

A profundidade e a velocidade de carbonatação provêm de diversos fatores unidos ao pH do concreto e ao sistema de poros que estão integrados principalmente à execução da estrutura e à disposição do concreto. Considerando-se que a carbonatação é alcançada através do método de difusão, as condições apropriadas oferecidas pelas características do ambiente na qual a estrutura está exposta, também influencia na profundidade e na velocidade de carbonatação. Entre os principais elementos, estão o teor de CO<sub>2</sub>, a relação água/cimento, o teor de cimento no concreto, compactação e tempo de cura úmida, adições minerais, umidade relativa e temperatura.

Segundo Pauletti (2009), a influência do ambiente de exposição e a proteção do concreto contra intempéries são elementos importantes para a carbonatação natural, enquanto que para ensaios acelerados, a metodologia é um requisito necessário no controle da carbonatação. Esta revisão da literatura faz uma análise de acordo com variáveis consideradas na metodologia do programa experimental, assim, os seguintes elementos intervenientes na carbonatação são: teor de CO<sub>2</sub>, a relação água/cimento, o teor de cimento no concreto, compactação e tempo de cura úmida.

### 2.2.3.1 Concentração de CO<sub>2</sub> no ar

Ambientes em que concentrações de CO<sub>2</sub> sejam elevadas, causarão notáveis gradientes de CO<sub>2</sub> entre o espaço externo e a área interna do concreto, desempenhando uma ação intensa no processo de carbonatação do concreto. Segundo Helene (1993), o macroclima e a atmosfera que contornam a estrutura, influenciam de maneira conjunta na taxa de carbonatação.

O gás CO<sub>2</sub> está presente na atmosfera em aproximadamente 0,03% por volume de ar. Para ambientes abertos e fechados, a concentração de CO<sub>2</sub> modifica-se consideravelmente, pois em ambientes fechados não há uma constante renovação de ar, fazendo-o conter uma taxa de concentração de CO<sub>2</sub> superior a ambientes abertos. Neville (1997) exhibe dados muito distintos para concentração de gás carbônico conforme o tipo de ambiente, como pode ser verificada na tabela 1 abaixo:

Tabela 1- Concentração volumétrica de CO<sub>2</sub> no ar em relação a alguns tipos de ambientes.

<b>Concentração de CO<sub>2</sub> no ar (em volume)</b>	<b>Tipo de Ambiente</b>
0,03%	Ambiente rural
0,1%	Ambiente de laboratório (não ventilado)
0,3%	Ambiente urbano
1,0%	Ambiente urbano-industrial

Fonte: CASCUDO e CARASEK, 2011

Na tabela 1 é observado que há diferenças significativas da concentração de CO<sub>2</sub>, chegando a valores 10 vezes superiores para um ambiente urbano em comparação a um ambiente rural. Essa diferença é bem maior quando relacionada ao ambiente urbano-industrial, pois esta é capaz de ser 33 vezes superior quando relacionada ao ambiente rural.

Compreendendo que a concentração de CO<sub>2</sub> podem diversificar de ambiente para ambiente, a NBR 6118/2003 realizou uma classificação dos ambientes, associando-o com agressividade de gás carbônico sobre as armaduras, conforme o quadro 1:



Quadro 1 – Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras em função da concentração de gás carbônico

Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras			
Classe da agressividade	Macro-clima	Micro-clima	Gás carbônico no ambiente
I	Atmosfera rural	UR $\leq$ 60%	$\leq$ 0,3%
II	Urbana	UR de 60% a 95%	$\leq$ 0,3%
III	Marinha ou industrial	UR de 60% a 98%	$\geq$ 0,3%
IV	Pólos industriais	Interiores úmidos de indústrias	$>$ 0,3%

Fonte: (NBR 6118/2003)

É válido ressaltar que em regiões específicas de definidas estruturas podem ocasionar em carbonatação mais acentuada se relacionadas ao restante da estrutura, por exemplo, em regiões de subsolo de garagens de edifício que contém elementos de concreto aparente. Isto porque, em regra, esses ambientes não apresentam muita ventilação, dispondo uma capacidade relativa de gases procedentes dos escapamentos de veículos. Desta maneira, a consequência é uma maior presença de CO<sub>2</sub> em relação a outros espaços do edifício.

#### 2.2.3.2 Relação água/cimento (a/c)

A relação a/c atua consideravelmente na porosidade do concreto, como nas suas dimensões, conectividade e quantidade. Em decorrência disto, há uma facilidade ou não de penetração do CO<sub>2</sub>. A velocidade de carbonatação é maior quando há uma maior relação a/c. Em pastas de cimento, quando a relação a/c aumenta de 0,4 para 0,8, o volume de poros cresce cerca de cinco vezes (MEHTA & MONTEIRO, 2008) e o coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> aumenta mais de dez vezes. (HOUST; WITMANN, 1994).

### 2.2.3.3 Teor de cimento no concreto

Nos poros do concreto a quantidade de hidróxido de cálcio acessível na solução é proporcional ao teor de clínquer presente no proporcionamento da mistura, fazendo com que um maior teor de cimento presente na composição do concreto diminua a velocidade de carbonatação. Além disso, uma situação positiva do teor de cimento verificada acontece quando à medida que há uma maior quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  na pasta, a presença da carbonatação evolui mais calmamente para o interior do concreto.

### 2.2.3.4 Compactação e cura úmida do concreto

Realiza influência na qualidade do concreto os passos da prática executiva da estrutura do concreto, sendo elas: a mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura do concreto, envolvendo maior ou menor propensão a carbonatação. Especialmente, no que diz respeito à cura úmida, esta é muito restringida quando o concreto for sujeito a períodos de cura inicial por um longo tempo; ocasiona melhor hidratação do cimento e crescimento da compacidade, por consequência, reduzindo a porosidade.

Quando a cura é realizada de boa forma, há uma dificuldade na rápida evaporação de água de amassamento do concreto nas idades iniciais que está entre 30 minutos e 6 horas, impedindo o fenômeno da retração plástica no concreto, conseqüentemente, prevenindo que haja fissuras em virtude desse fenômeno.

Partindo da premissa que um processo de cura eficiente do concreto diminui os números de vazios e ligações entre poros e também evita fissuras de retração, conclui-se que um bom processo de cura é fundamental para reduzir o efeito da carbonatação. Diversas microfissuras surgem na superfície do concreto mal curado. A pré-existência de fissuras nas estruturas facilita a entrada do  $\text{CO}_2$  e pode acelerar o processo de carbonatação. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Através da difusão  $\text{CO}_2$ , a carbonatação é um processo que se ocasiona de fora para dentro, logo, a cura é um instrumento importante que pode certificar a durabilidade da estrutura a respeito da carbonatação, além de ajudar na consolidação da pasta do cimento e da qualificação do concreto, principalmente na região do cobrimento da armadura, produzindo uma capa superficial parcialmente compactada e consolidada.

#### 2.2.4 Estudo e verificação da carbonatação

Existem muitos métodos e sistemas empregados para o estudo e análise da carbonatação. Para descrever um ambiente especialmente positivo à ocasião de carbonatação no concreto, operam-se câmaras de carbonatação quando a finalidade é o estudo através da indução acelerada do procedimento em laboratório.

Com o intuito de determinar a profundidade carbonada do concreto, encontram-se muitos métodos, alguns deles são procedimentos realizados in situ enquanto outros são realizados em laboratório. O método difundido que proporciona a profundidade carbonada de maneira técnica e simples é através do emprego de um indicador de pH, sendo o mais aplicado aquele que constitui por uma solução a base de fenolftaleína.

Quando há necessidade de estudos mais exatos e desenvolvidos sobre o conteúdo e avaliação da carbonatação, existem outros métodos mais aprimoradas e caras que podem ser empregadas, como: difração de raios X, espectroscopia de infravermelho, análise termogravimétrica, densimetria por radiação gama e análise termogravimétrica.

##### 2.2.4.1 Métodos naturais e ensaios acelerados

Em situações naturais de uma obra, as condições ambientais são modificáveis, cíclicas e distintas, enquanto que para ensaios de laboratório sob condições equilibradas, o ensaio torna-se mais padronizado que quando relacionadas, criam um assunto de difícil solução.

Para os ensaios acelerados de carbonatação, Kazmierczac (1995) ressalta a importância da conclusão dos ensaios acelerados, declarando que, devido ao processo de carbonatação demandar longos períodos, maiores que 5 anos, nasce a necessidade de curto período executados com teores elevados de CO<sub>2</sub>.

No Brasil, atualmente, a comissão de estudo da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) vinculada ao Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18), a CE 18:300.06: Durabilidade do Concreto, está elaborando normas relativas aos ensaios de carbonatação. Estão sendo estudados textos para a determinação da profundidade de carbonatação em corpos-de-prova de laboratório e também para in situ, em estruturas de concreto (CASCUDO e CARASEK, 2011).

Planejando à indução da carbonatação em ensaios acelerados de laboratórios, a sugestão inicialmente é o desempenho de um condicionamento dos corpos de prova e das amostras que são divididas em duas etapas, sendo elas respectivamente: pré-secagem e a segunda a distribuição da umidade uniformemente no corpo de prova. O condicionamento estabelece no período entre a cura das amostras e o princípio do ensaio de carbonatação.

A disposição de umidade interna introdutórias do material que influencia na cinética das reações de carbonatação, faz com que o período de condicionamento torne-se um ponto crítico nos ensaios acelerados, uma vez que distintas maneiras de condicionamento pode obter para o mesmo concreto como conclusão, profundidades de carbonatação consideravelmente diferentes.

Os ensaios de carbonatação acelerada são passíveis a alterações, de acordo com Isaia (2002), pois a propagação do CO<sub>2</sub> diverge quanto a temperatura e umidade interna do concreto. Além disso, há uma outra razão que interfere significativamente nesta propagação: os teores de adições minerais. Isso acontece pois, com o crescimento do teor nas misturas, a reserva alcalina decresce, crescendo a velocidade de carbonatação que em intensas concentrações de CO<sub>2</sub>, tornam-se significativas.

#### 2.2.4.2 Utilização dos índices de pH para avaliação da carbonatação

A carbonatação do concreto pode ser medida através do uso de indicadores, por exemplo, a timolftaleína, amarelo de alizarina e fenolftaleína. Esses índices de carbonatação são substâncias químicas que obtêm colorações típicas com o início de uma estabelecida faixa de pH da solução, em razão do seu contato com a solução alcalina do concreto.

Algumas atenções precisam ser realizadas no decorrer do processo de medida, especificamente na execução da fratura e determinação da frente de carbonatação com a finalidade dos resultados não serem falsos, sendo elas: não utilizar o corte do concreto com ferramentas atribuídas de disco (de corte); não conter demasiada areia na superfície do concreto que será analisado.

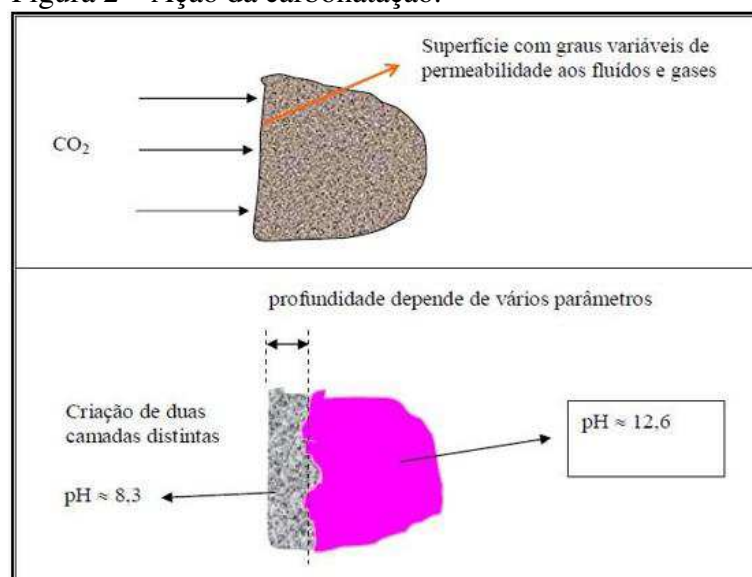
Para a aplicação dessa técnica, há uma referência internacional através do ensinamento da CPC 18 da RILEM (1988) que expõe as dimensões dos corpos de prova para ensaios de laboratório, idade dos ensaios, exatidão da medida, modos de exibição dos ensaios, situações de exposição (temperatura e umidade) e duração de tempo para a aplicação da verificação da frente de carbonatação. Para a exatidão da medição, a orientação é durante o intervalo de tempo entre a propagação do indicador e a leitura da frente de carbonatação

aconteça em 24 horas, quando os locais carbonatados e não carbonatados estivessem mais explícitos.

Em regra, para descobrir os locais que sofreram carbonatação com que não foram atingidas por ela, deve-se aspergir o indicador que em nível prático, o concreto é reconhecido como não carbonatado quando ele alcança uma coloração típica, enquanto que conservando o incolor, o concreto é declarado como carbonatado.

Vale ressaltar que cada um dos indicadores (timolftaleína, amarelo de alizarina, fenolftaleína) conquistam uma coloração diferente e pH distintos quando reagem a solução alcalina do concreto. A timolftaleína contrai uma coloração azul ou violeta com pHs na faixa de 9,3 a 10,5 ou maiores; o amarelo de alizarina contém uma coloração amarela com pHs na ordem de 10,1 a 12,0 ou superiores; e por último a fenolftaleína que contrai vermelha carmim com uma faixa de pHs maiores ou inseridos entre 8,0 e 9,8. A figura 2 expõe um perfil de concreto com soluções de fenolftaleína.

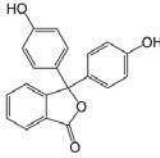
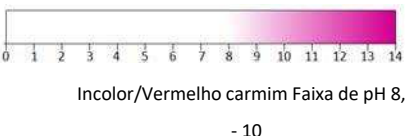
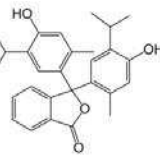

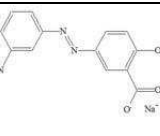
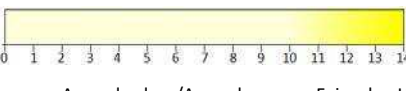
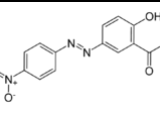
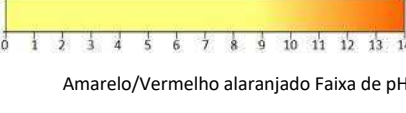
Figura 2 – Ação da carbonatação.



Fonte: Libório (1998).

No quadro 2 exprime as características de cada indicador de pH, como sua fórmula química, o intervalo onde ocorre a mudança de cor na qual identifica o local onde o concreto está carbonatado ou não, e a maneira de produzir a solução de cada um deles.

Quadro 2 - Principais indicadores de pH utilizados para avaliação de carbonatação no concreto

Indicador de pH	Fórmula química (estrutural) do reagente	Intervalo de mudança de cor	Preparo da solução
Fenolftaleína			Dissolver 10g do reagente em 700 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 300cm <sup>3</sup> de água destilada
Timolftaleína			Dissolver 0,4g do reagente em 600 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 400cm <sup>3</sup> de água destilada
Amarelo de alizarina GG (ácido meta-nitrobenzenoazosalicílico) C.I. 14025			Dissolver 1g do reagente em 100 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 900cm <sup>3</sup> de água destilada
Amarelo de alizarina R (ácido para-nitrobenzenoazosalicílico) C.I. 14030			Dissolver 0,5g do reagente em 800 cm <sup>3</sup> de etanol e diluir em 200cm <sup>3</sup> de água destilada

Fonte: Castro (2003)

Além disso, a velocidade de carbonatação pode ser estimada, de acordo com Fusco (2008), pela seguinte relação:

Tabela 2: Relação da profundidade da carbonatação com o tempo em anos do concreto

Profundidade de carbonatação em centímetros	Tempo em anos
1	5
1,5	20
2,0	50
2,5	100

Fonte: Fusco (2008)

## 2.3 Métodos de ensaio para análise da resistência à compressão do concreto

Em virtude do envelhecimento das estruturas com o decorrer dos anos, vem crescendo consideravelmente a quantidade de estruturas com evidências de patologias em seus componentes de concreto, conforme Helene (2001). As origens e causas dessas patologias são decorrentes de diversos fatores, como motivações intrínsecas, através de falhas humanas na execução e emprego de peças estruturais e por ações externas, como acidentes; motivações extrínsecas, por meio de agressões na estrutura de fora para dentro no período de concepção e vida útil da estrutura.

O concreto armado possui uma estrutura interna altamente complexa e heterogênea, e está sujeito a alterações ao longo do tempo entre seus próprios constituintes ou interações com agentes externos no local de implantação da estrutura. Essas interações são conhecidas como mecanismos de degradação do concreto, disto, resultam anomalias que podem comprometer o desempenho da estrutura (SAHUINCO, 2011).

Diante do exposto, para realizar uma avaliação conveniente de uma estrutura de concreto, muitos métodos podem ser empregados, envolvendo ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos. A primeira consiste em uma possibilidade mais moderna de analisar as características das estruturas de concreto, sem remover uma amostra da estrutura e sem produzir danos na mesma. O segundo ensaio é aquele que emite algum indício no corpo de prova ou na peça que está sujeito ao ensaio.

### 2.3.1 Ensaio não destrutivo

Sem danificar o posterior emprego dos itens examinados, os ensaios não destrutivos (END) estabelecem testes que fazem o controle de qualidade do concreto, verificando defeitos e ausência de homogeneidade em peças acabadas ou semi-acabadas, por meio de fundamentos físicos determinados.

Os ensaios não destrutivos são definidos como métodos de avaliação das propriedades do concreto sem prejudicar o desempenho estrutural das peças ensaiadas. Para as estruturas de concreto moldadas in loco, estes ensaios têm como o objetivo: estimar imediatamente o valor da resistência à compressão do concreto e localizar defeitos internos que as peças de concreto possam vir a ter (PALACIOS, 2012).

Na inspeção de metais, a utilização de métodos de ensaios não destrutivos já está consolidada, porém, para o concreto, isso é uma prática relativamente nova. O desenvolvimento lento de técnicas não destrutivas para inspeção e avaliação das propriedades do concreto se deve ao fato desse material ser heterogêneo, causando interferências nas medidas realizadas, como atenuação, dispersão, difração e reflexão dos sinais (MONTEIRO, 2008).

Para o emprego de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto, constituem em via de regra, dois métodos. O primeiro é utilizado termografia infravermelha e propagação de ondas para verificar defeitos e caracterizar materiais, enquanto no segundo método tem a finalidade de determinar a resistência do elemento, através do ensaio de resistência a penetração, ensaio de arrancamento e ensaio de dureza superficial com o emprego do esclerômetro.

Os ENDS mais empregados são o ultrassom e o esclerômetro pois podem ser utilizados com a estrutura em uso, possuem incomplexidade quanto ao seu desempenho e acessibilidade econômica, além de serem procedimentos normalizados no Brasil. Para estimar a resistência a compressão do concreto, esses ensaios não geram o valor verídico, seguro e imediato da resistência do componente de que se trata. Portanto, para encontrar a resistência do concreto, são essenciais curvas de correlação entre os resultados dos parâmetros dados pelos instrumentos, como a velocidade de propagação ultrassônica oferecida pelo ultrassom e a dureza superficial emitida pelo esclerômetro com a resistência à compressão utilizando corpos de prova-padrão cilíndricos.

Os ENDS são aplicados, dentre outras alternativas, para propiciar:

- a) em componentes de concreto *in loco*, o controle tecnológico;
- b) ações de deterioração de um ambiente;
- c) a verificação da uniformidade do concreto;
- d) a localização de fissuras e falhas de concretagem;
- e) a estimativa da durabilidade do concreto;
- f) as influências das propriedades elásticas e a densidade do material sobre os resultados;
- g) o monitoramento das variações ao longo do tempo.



### 2.3.2 Ensaio destrutivo

Ensaio destrutivo é um método que ocasiona deterioração no elemento analisado, porém, seus resultados são julgados como os mais exatos e não precisam ser determinados por meio de uma correlação entre os diferentes parâmetros do concreto, pois sua resistência é adquirida diretamente através da ruptura por compressão de um corpo de prova.

Ainda assim, há condições que prejudicam a realização do ensaio, por exemplo, componentes estruturais que não contenham uma extensão satisfatória para a remoção de testemunhos; concretos que manifestam fissuras; ambientes que contenham grandes quantidades de armaduras que conseqüentemente dificultam a extração do corpo de prova.

Um procedimento destrutivo muito empregado em território brasileiro é o método de extração de testemunhos que são frequentemente peças de configuração cilíndrica ou prismática extraídas da estrutura, representado pela NBR 7680:2015 que podem produzir graves problemas se forem realizadas da maneira incorreta.

Essas amostras devem ser sujeitas a ensaios que visam determinar sua resistência à compressão, tração, módulo de deformação e diagrama de tensão-deformação do concreto e, no caso do aço, resistência à tração, módulo de deformação e diagrama de tensão-deformação (CÁNOVAS, 1988).

Ao longo do ensaio para a conquista da resistência a compressão, há alguns elementos que são responsáveis por ocasionarem falhas antecipadas no testemunho, mas a exemplo, serão expostas duas. A primeira são microfissurações advindas pela vibração promovida pela broca. A segunda são as degradações entre os elementos constituintes do concreto, promovidos por cortes dos agregados graúdos nas extremidades dos corpos de prova. Com essas imperfeições mecânicas, o valor resultante da resistência precisará de uma sequência de correções.

## 2.4 Método de ensaio não destrutivo através do uso de ultrassom

O ensaio de ultrassonografia consiste na utilização de um gerador de ondas, capaz de emitir ondas de pequenos comprimentos e frequências superiores a 20Hz, estando acima da capacidade auditiva do ser humano (BAUER, 1994). É o método de ensaio não destrutivo mais antigo para avaliar a resistência do concreto, além de ser barato e de simples operação, baseando-se no tempo em que uma onda longitudinal percorre um comprimento que não seja desconhecido, em função do módulo de deformação do concreto e da densidade. As frequências

de onda normalmente utilizadas são de 20 kHz a 150 kHz e o tempo de percurso é medido de forma eletrônica (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A metodologia de execução do ensaio não destrutivo por meio de pulso ultrassônico está descrita na norma NBR 8802:2013, na qual determina a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um elemento de concreto, sendo a velocidade das ondas dependente diretamente da densidade e das propriedades elásticas desse material.

O ensaio se traduz na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas através do elemento estudado, situado entre o transmissor e o receptor. A distância entre os transdutores dividida pelo tempo de propagação resulta na velocidade média de propagação da onda (MALHOTRA, 1984). A partir deste momento, pode-se supor uma correlação entre a velocidade das ondas ultrassônicas no concreto e sua resistência a compressão.

O equipamento empregado para a emissão do pulso ultrassônico é desenvolvido de uma fonte que se conecta a dois transdutores, um transmissor e outro receptor. O primeiro converte pulsos elétricos lançados pela fonte em ondas acústicas de alta frequência, que se propagam por todo o material avaliado. As ondas são captadas pelo receptor, transformadas novamente em sinais elétricos. Aplicando parâmetros como o tempo e distância percorrida, calcula-se a velocidade de propagação das ondas.

#### 2.4.1 Ondas ultrassônicas no concreto

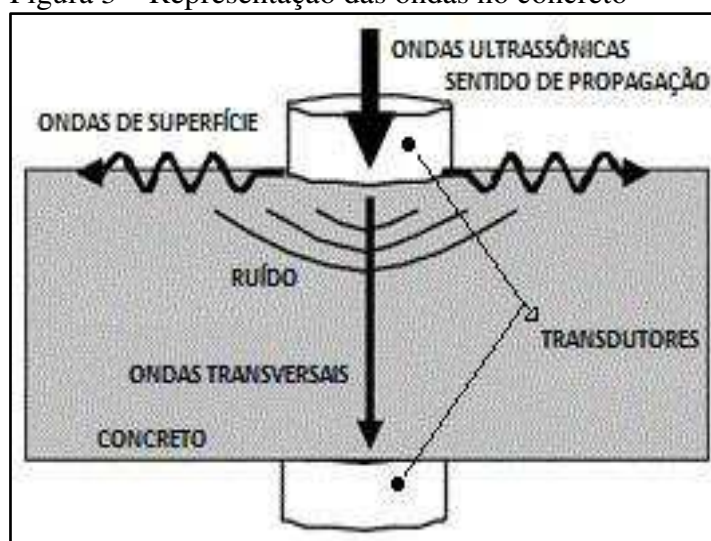
As primeiras publicações sobre medições de velocidade de pulsos mecanicamente gerados apareceram nos Estados Unidos em meados de 1940. Constatou-se que a velocidade depende das propriedades elásticas do material e quase não depende da sua geometria (Bungey, 1989).

Considerando-se a aplicação deste método na avaliação de rochas, sabe-se que o mesmo permite avaliar, indiretamente, o grau de alteração e de coesão das rochas, tendo como vantagem ser um dos poucos ensaios não destrutivos, disponível para verificação de propriedades rochosas. Em função disso é especialmente útil para comparação das propriedades físicas entre os corpos de prova de uma mesma amostra ou entre amostras petrograficamente semelhantes (Frasca, 2003).

Um padrão de cálculo fundamental, de acordo com Schickert e Krause (2010) é um meio da qual a disseminação de ondas elásticas em sólidos é mais acessivelmente observada, além de notáveis estimativas para muitos acontecimentos práticos. No padrão empregado, são dispostos dois ambientes homogêneos estabelecidos por gás e sólidos distante por um plano, na qual as ondas de pressão se dispõem em se difundir. Como as ondas se difundem na superfície do sólido de maneira longitudinal ao sentido do plano da disseminação, elas são denominadas de ondas longitudinais, ou de superfície.

Fazendo uma alteração no padrão citado estabelecidos anteriormente por gás e sólidos, agora representada por ar e concreto, Schickert e Krause (2010) declara que devido a sua composição composta por cimento, agregados e poros de ar, que conseqüentemente ocasiona em vazios, há um espalhamento contínuo de ondas propagadas por meio do elemento de concreto. Estas ondas dissipadas ocasionam em ruído estrutural, apresentados em valores impróprios e ondas indeterminadas. Medições executadas por Schickert e Krause (2010) ressaltam que primeiro as ondas coerentes chegam, seguidas do ruído estrutural.

Figura 3 – Representação das ondas no concreto



Fonte: Irie, Yoshida, Sakurada e Ito, 2008.

#### 2.4.2 Benefícios e restrições

O equipamento para este ensaio é de fácil operação e de custo não muito elevado. O ensaio correspondente a este método é completamente não destrutivo, e pode avaliar o concreto em toda a espessura do elemento estrutural, caso seja feita a transmissão direta (Swamy e Al-Hamed, 1984, PHOON et al., 1999). Além disso, o equipamento é empregado para constatar e estabelecer a amplitude das falhas e imperfeições internas no concreto. É válido

ressaltar que para impedir a elaboração de resultados prematuros baseados em simples ensaios, é preciso profissionais qualificados e possuam conhecimento na interpretação dos resultados.

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, Sturup et al,1984, ACI-364,1993). Quanto as restrições, a presença de vazios e fissuras podem confundir a associação da velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência do concreto.

Sobre o que foi exposto anteriormente, não existe uma única relação entre eles, de acordo com Phoon et al (1999), em razão da idade, teor de umidade e essência e dimensão dos materiais que compreende o concreto. Em materiais como concreto, madeira, metais não ferrosos que contém alta atenuação acústicas ou materiais em alta temperatura e unidades de configuração complexa, a execução dos ensaios é mais trabalhosa.

### 2.4.3 Aplicações e apropriações dos transdutores

O método de análise não destrutivo através do uso de ultrassom pode ser aplicado para muitas situações, tais como avaliar a resistência à compressão do concreto quando feita a correlação anteriormente; avaliar os danos provocados pelos agentes químicos, fogo e congelamento; determinar a uniformidade do concreto; identificar os vazios no interior do concreto pelas diferenças da velocidade de propagação das ondas.

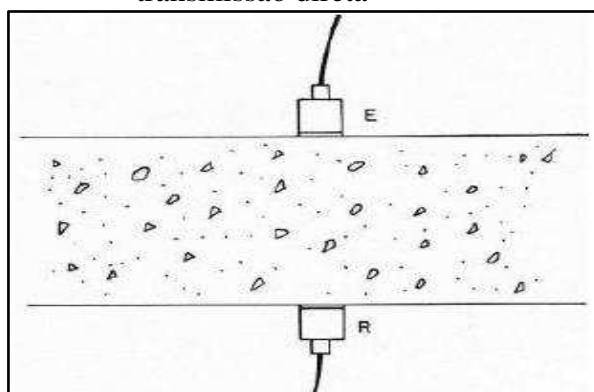
Nas primeiras idades do concreto, verifica-se uma ampla diferença de densidade, devido a ação da hidratação do cimento que ocasionam alterações consideráveis na velocidade de propagação ondas ultrassônicas, logo, as curvas de correlação entre a velocidade das ondas e a resistência do concreto adquiridas nas idades iniciais, não se utiliza para idades mais desenvolvidas. Para uma dada composição de concreto, quando a resistência à compressão aumenta com a idade, há um pequeno aumento da velocidade, porém não na mesma proporção. Desta forma, ao atingir-se uma determinada idade, a velocidade não é mais sensível ao aumento de resistência (ACI 228,1989).

De acordo com NBR 8802:2013, a adequação dos transdutores do pulso ultrassônico sobre o elemento realiza-se de três maneiras distintas, sendo elas: direta, indireta e semidireta.

### 2.4.3.1 Transmissão direta

Na primeira, os transdutores devem estar em faces opostas da estrutura, permitindo uma maior intensidade dos sinais coletados, conseqüentemente diminuindo inconsistências. Diante disso, ela é mais conveniente para a determinação correta da velocidade de propagação.

Figura 4 – Disposição dos transdutores na transmissão direta

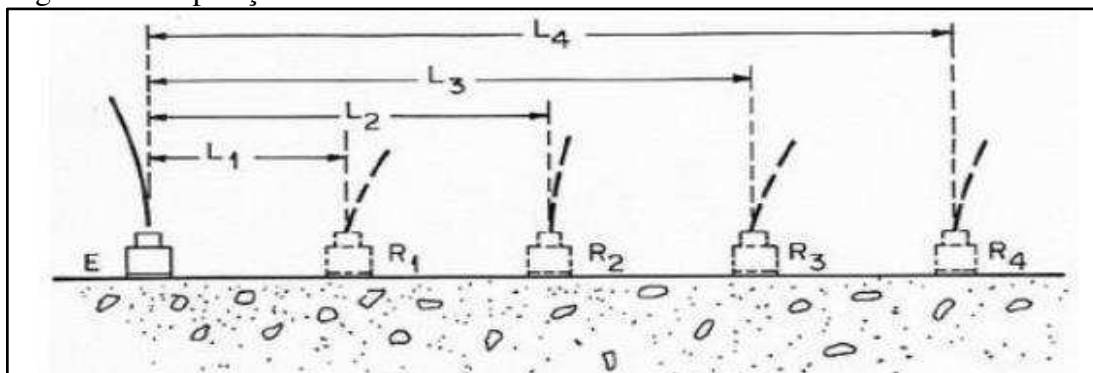


Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2013, p.6)

### 2.4.3.2 Transmissão indireta

Ela é utilizada quando o ingresso à peça está restrito a apenas uma de suas faces, não conseguindo empregar a transmissão direta, ou quando o comprimento da peça ofereça deslocamento do receptor ao longo de sua superfície. Dessa forma, para que seja feita a leitura da velocidade de propagação, estabiliza-se o transmissor no ponto E, e o receptor faz a leitura nos diferentes pontos equidistantes. A disposição indireta é essencialmente utilizada para encontrar profundidade de fissuras e analisar a qualidade da superfície.

Figura 5 – Disposição dos transdutores na transmissão indireta

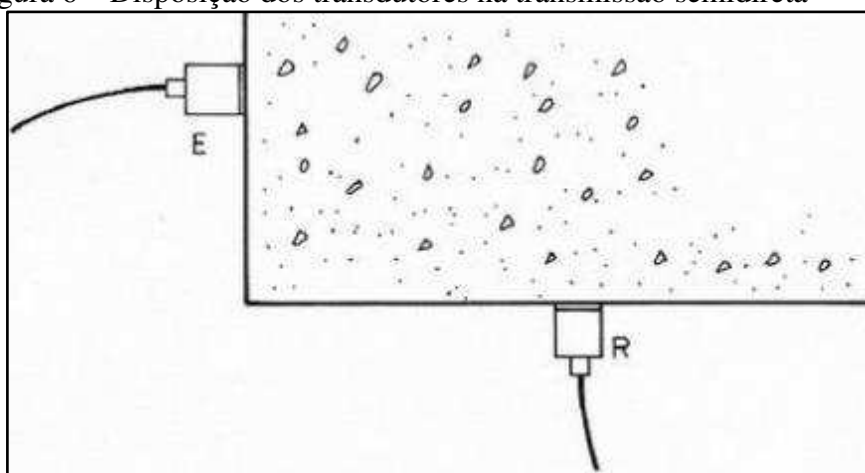


Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2013, p.6)

### 2.4.3.3 Transmissão semidiretas

São empregadas quando a única face disponível não proporciona comprimento suficiente para o arranjo de transmissão indireta, e também quando os ingressos a duas faces opostas forem limitados. Portanto, os transdutores são posicionados de acordo com a figura abaixo:

Figura 6 – Disposição dos transdutores na transmissão semidireta



Fonte: NBR 8802 (ABNT, 2013, p.6)

Essa transmissão é mais eficaz que a indireta, porém, a sua sensibilidade é inferior com relação a transmissão direta. Dessa maneira, a mais recomendável para ser utilizada é a disposição dos transdutores da forma direta.

### 2.4.4 Orientações acerca da análise dos resultados

A complexidade da estrutura interna do concreto influencia na correlação da resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Mas há fatores que influenciam a velocidade de propagação de forma diferente da resistência à compressão, pois a primeira é controlada pelas propriedades do agregado, enquanto a resistência é ajustada pela pasta do cimento.

De acordo com Evangelista (2002), a RILEM NDT1 (1972) proporciona duas maneiras para aferir a resistência do concreto através da velocidade de propagação de ondas de ultrassom: (a) elaborar gráficos de correlação entre resistência à compressão ( $f_c$ ) e a velocidade de propagação de onda ultrassônica ( $V$ ); (b) empregar equações que correlacione  $f_c$  e  $V$ .

Sobre o primeiro exemplo de aferição, ela é alcançada verificando o mínimo de 10 pontos, adquiridos em corpos de prova de mesma proporção, sem variação no valor do traço e tipologia do traço. Porém, para alcançar valores diferentes da resistência, é preciso modificar o fator água-cimento.

Além disso, conferir a resistência final do concreto utilizando equações que correlacione a resistência a compressão e a velocidade de propagação também foi um exemplo citado. Ele pode ser adquirido, segundo RILEM 207-INR (2012), por meio de uma equação de compatibilidade entre a velocidade de propagação de onda e o módulo dinâmico de elasticidade do concreto, pois este aumenta quanto a resistência também no decorrer da idade. Por essa razão, da velocidade de propagação de onda para a estimativa da resistência do concreto pode ser empregada. Na equação 2, certifica essa relação numérica referida pelo autor entre a velocidade e outros parâmetros.

$$V = \sqrt{\frac{Ed(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

Onde:

V: Velocidade de propagação de onda (km/s)

Ed: Módulo dinâmico de elasticidade (MPa)

$\rho$ : Densidade do concreto (kg/m<sup>3</sup>)

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

Whitehurst (1951) propôs uma tabela de escalas de velocidade que correlacionam faixas de velocidade do pulso ultrassônico com classificação indicativa da qualidade do concreto, verificada na tabela 3.

Tabela 3: Qualidade do concreto de acordo com a velocidade de propagação.

<b>Velocidade de Propagação (m/s)</b>	<b>Qualidade do concreto</b>
Maior que 4570	Excelente
Entre 3660 e 4570	Geralmente boa
Entre 3050 e 3660	Questionável
Entre 2130 e 3050	Geralmente baixa
Abaixo de 2130	Muito baixa

Fonte: Whitehurst, 1951.

#### 2.4.5 Condições que interferem os resultados dos ensaios de ultrassom

Na propagação de ondas ultrassônicas no concreto, há diversos aspectos que o interferem, veracidade também declarada por Malhotra, Naik e Popovics (2004), que divide em dois grupos os aspectos interferentes:

- Aspectos consequentes diretamente das propriedades do concreto: tipo de cimento; relação água/cimento; quantidade, dimensão e tipo de agregados; aditivos e idade do concreto;
- Outros aspectos: temperatura e umidade do concreto; distância entre os transdutores; contato entre transdutores e a superfície do elemento de concreto; presença de armadura; nível de tensão na amostra.

De acordo com a facilidade de detecção desses interferentes, apenas alguns aspectos serão desmembrados dos que foram citados.

##### 2.4.5.1 Presença de armadura

A presença de armadura é um fator que altera muito as leituras ultrassônicas no concreto, pois o aço apresenta velocidade de propagação do pulso ultrassônico da ordem de 1,4 a 1,7 vezes a do concreto simples (MALHOTRA et al., 2004). Deste modo, as análises da velocidade em locais próximas às barras de aço necessitam ser impedidas. Porém, se não for possível e o percurso de onda do emissor ao receptor percorrer pela armadura, será necessário efetuar uma correção nos valores alcançados. Em regiões onde há fissuras, a velocidade de propagação é menor.



#### 2.4.5.2 Agregado graúdo

A velocidade do pulso nas rochas é elevada com relação à pasta de cimento, em razão das suas propriedades físicas. Por isso, de acordo com Malhotra et al. (2004), quanto maior o comparecimento dos agregados graúdos no concreto, maior será a velocidade do pulso ultrassônico no mesmo, evidenciado quando a onda mais ágil atinge o transdutor receptor em razão dos elementos que compõe o agregado graúdo.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas relaciona-se principalmente com as propriedades elásticas e massa específica do concreto, e para diferentes tipos de rochas são obtidas diferentes velocidades de propagação (Chung e Law, 1983 apud EVANGELISTA, 2002).

Os agregados graúdos empregados na confecção do concreto possuem diversas singularidades oriundas de fontes distintas, elaborando concretos de diferentes velocidades de pulso ultrassônico, mas com valores de resistências permanecendo a mesma. Isso pode ser verificado na tabela 4, onde expõem a velocidade de propagação das ondas para origem mineralógica diferente.

Tabela 4 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para distintas rochas

<b>Origem mineralógica</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>
Arenito	2550 / 4230
Basalto	5270 / 6020
Calcário	3910 / 5780
Dolomita	4370 / 6090
Granito	4000 / 5790
Quartzito	5570 / 5720

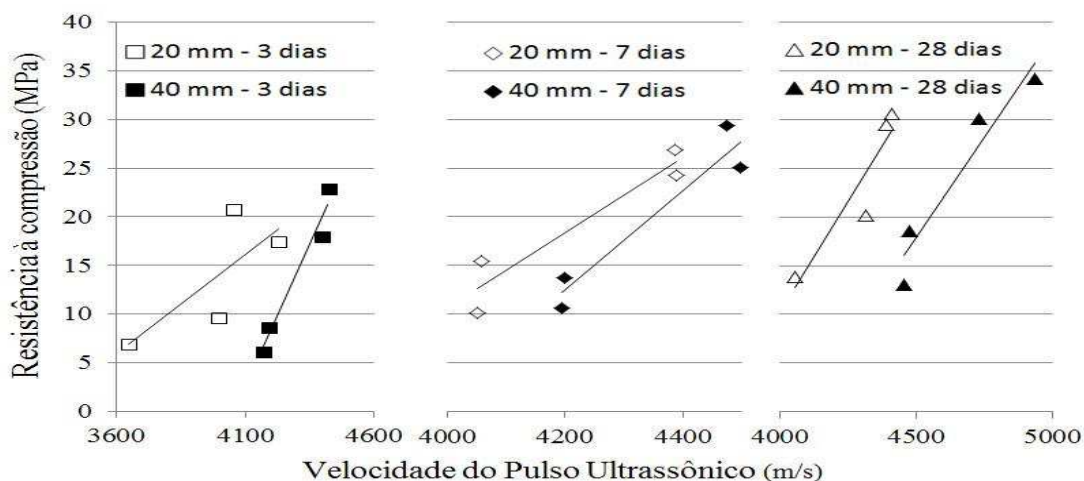
Fonte: Chung *et al.* (1983)

Diante do exposto, é importante conhecer o tipo de agregado graúdo que está sendo empregado na produção do concreto.

A dimensão do agregado graúdo também é um fator que influencia na análise das leituras de ultrassom. Na figura 7, pode ser observada que quanto maior o tamanho do agregado graúdo, maior é a velocidade de propagação de pulso ultrassônico. Na mesma figura, contêm

amostras de concretos de diferentes idades (3, 7 e 28 dias), para cada dimensão de agregado (20 mm e 40 mm), estudadas por Sturup et al. (1984).

Figura 7 – Relação entre dimensão máxima do agregado graúdo, a velocidade do ultrassom e a resistência do elemento



Fonte: adaptado de Sturup *et al.* (1984, *apud* EVANGELISTA, 2002)

#### 2.4.5.3 Distância dos transdutores

O valor da velocidade de propagação da onda ultrassônica não procede da dimensão do caminho que a onda transitou. Porém, isto é válido apenas para distância bastante pequenas. Bungey, Millard e Grantham (2006), afirmam que quando a distância de propagação das ondas ultrassônicas passa de 3m para 6m, a velocidade da mesma reduz 5%. A RILEM (ND1-1972) sugere que a dimensão mínima do caminho que a onda percorrer é de: 100 mm para concreto com agregado graúdo de dimensão máxima de 30 mm e 150 mm para concreto com agregado graúdo de dimensão máxima de 45 mm.

#### 2.4.5.4 Temperatura e teor de umidade do concreto

Em estruturas de concreto expostos a temperatura de 40°C a 60°C, são identificados microfissuras que ocasionam em uma perda da velocidade de propagação das ondas. Em temperaturas entre 5°C e 30°C, de acordo com Malhotra e Carino (2004), não há alterações na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Mas valores inferiores a 5°C e superiores a 30°C influem diretamente na velocidade. Em locais de congelamento, ocorre a solidificação das

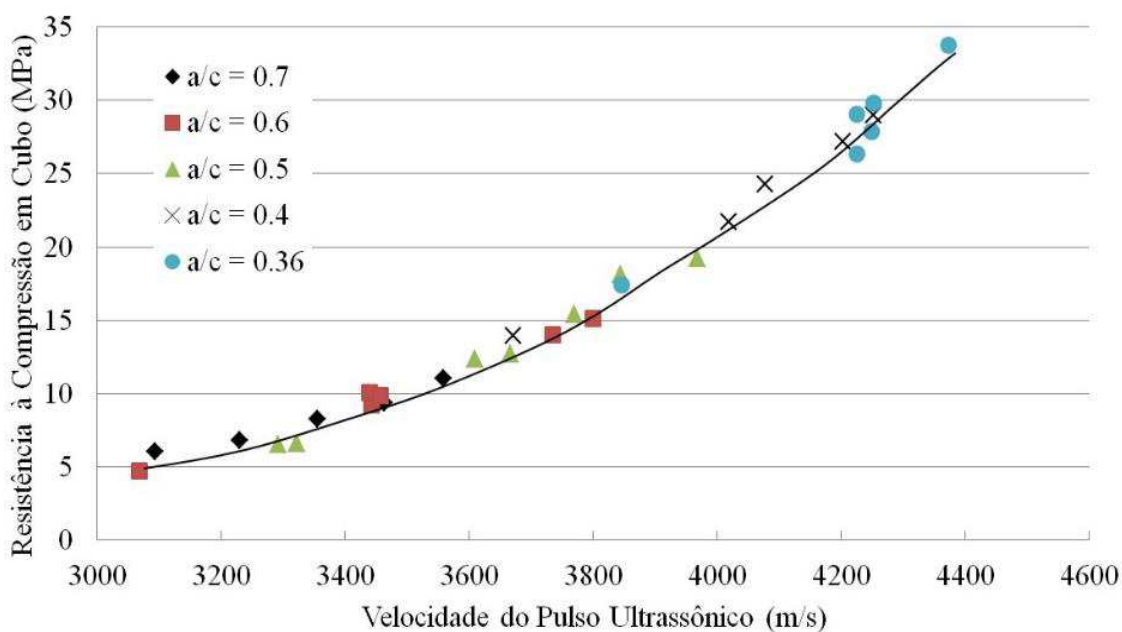
partículas de água existentes nos vazios do concreto, ocasionando um aumento na velocidade de propagação das ondas.

Com relação a interferência da umidade na velocidade das ondas, segundo Nepomuceno (1999), em um concreto úmido, a velocidade de propagação é 5% mais rápida quando relacionada ao concreto seco. Essa interferência é menor em concretos de alta resistência, enquanto que em concretos de baixa resistência, sua influência é maior.

#### 2.4.5.5 Relação água/cimento

O módulo de elasticidade do concreto está unido a resistência final da mesma, também significativo para a propagação de uma onda de tensão. Isso esclarece o que, de acordo com Kaplan (1959, apud MALHOTRA et al. 2004), apenas o aumento da relação água/cimento pode ocasionar em uma redução da resistência final do concreto, da mesma forma a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Na figura 8, verifica-se que a relação água/cimento é inversamente proporcional a resistência do concreto e a velocidade do pulso ultrassônico.

Figura 8 – Correlação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para concretos com diferentes relações de água/cimento



Fonte: adaptado de Facaoaru (1961) apud Hamassaki, 1986)

## 2.5 Método de ensaio não destrutivo através do esclerômetro

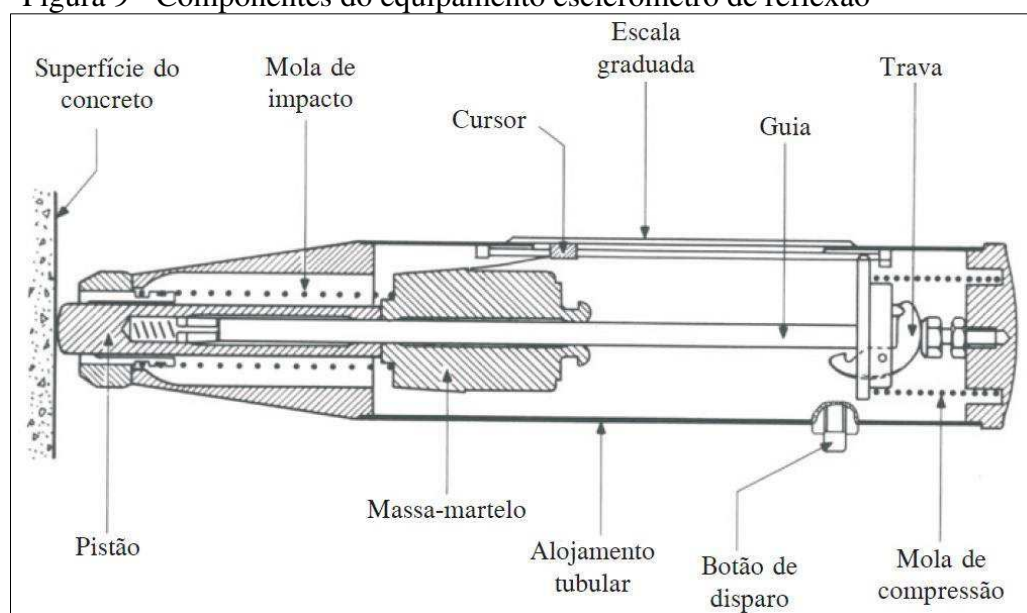
O esclerômetro é um equipamento leve, simples de operar e barato. Com esse instrumento é possível avaliar a uniformidade da resistência mecânica do concreto "in loco", com danos praticamente nulos à superfície do material (EVANGELISTA, 2002).

O método de ensaio consiste no uso do equipamento, esclerômetro reflexão, que constitui um martelo controlado por mola que transmite uma carga a um êmbolo, que causa um impacto a superfície, avaliando a dureza superficial de uma estrutura ensaiada (NBR 7584, 2012).

Neste ensaio, a energia cinética da massa-martelo é crucial. No momento que a massa-martelo é lançada, ela adquire uma certa energia cinética, proporcional ao quadrado de sua velocidade inicial. No instante do impacto com o elemento ensaiado, uma parcela da energia cinética converte-se em energia de deformação, provocando uma deformação na peça, mesmo que mínima (ACI 228, 1989 apud EVANGELISTA, 2002).

Assim como outros ensaios não destrutivos, o ensaio de esclerometria no concreto não pode avaliar de maneira direta a resistência à compressão, por isso, a dureza superficial, um parâmetro encontrado nesse ensaio, é correlacionada com a resistência. Na figura 9, é exposto o dispositivo e seus elementos que o compõe.

Figura 9 - Componentes do equipamento esclerômetro de reflexão



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

### 2.5.1 Índice esclerométrico no concreto

Este método é conhecido como “rebound hammer method”. O método consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de uma forma padronizada, usando uma determinada massa com uma dada energia, medindo o valor do ricochete, ou seja, o índice esclerométrico (I.E.), com unidade de medida adimensional (EVANGELISTA, 2002; FONTANA 2015).

Para que a obtenção dos resultados da dureza superficial apresente melhor acurácia, é preciso que equipamento seja calibrado na bigorna, obtendo a leitura de 10 índices esclerométricos de acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012).

### 2.5.2 Benefícios e restrições

O esclerômetro é um dispositivo leve e de fácil operação que oferece uma grande série de informações quando requeridos. Para a realização do ensaio, não é preciso de uma fonte de alimentação, logo, pode ser desempenhada em qualquer lugar, além de não implicar altos investimentos iniciais na obtenção do equipamento, tornando o ensaio econômico.

O ensaio analisa a uniformidade do concreto; estima a resistência da mesma através do parâmetro encontrado, ou seja, o índice esclerométrico; supervisiona o progresso da resistência no decorrer do tempo. Durante o ensaio, mínimas marcas são ocasionadas na superfície do concreto de pequenas resistências ou em concretos novos, mas não envolvendo a qualidade da estrutura.

O uso do ensaio de esclerometria em estruturas muito antigas apresenta variações consideráveis o que dificulta uma boa avaliação devido à possível degradação do concreto (AYDIN e SARIBIYIK, 2010). A partir das análises dos dados dos ensaios, diferentes autores concluíram que, devido à grande variação do ensaio, a esclerometria não é um método satisfatório para predizer o desenvolvimento da resistência do concreto em idades precoces (MALHOTRA e CARINO 2004). Para obtenção de corretos valores dos parâmetros que o ensaio oferece, é preciso de profissionais capacitados e com o conhecimento na interpretação de resultados.

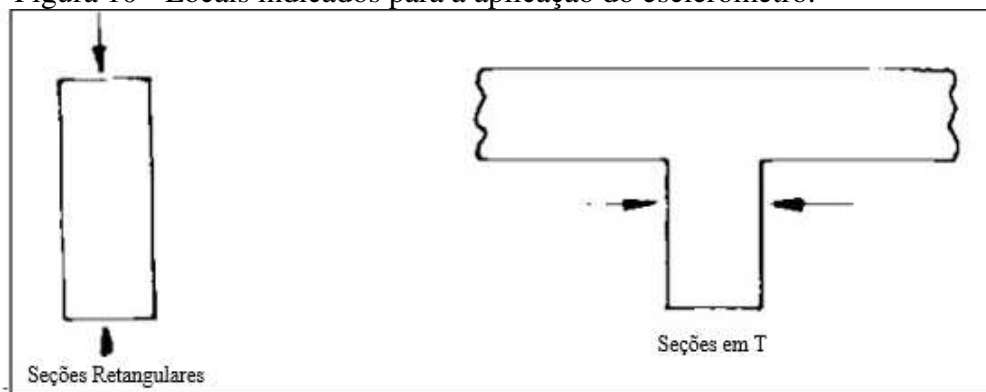
### 2.5.3 Aplicações e recomendações do ensaio

O ensaio não destrutivo por esclerometria é aplicado, de acordo com a NBR 7584:1995, com a finalidade de comparar as peças de concreto; analisar a homogeneidade do concreto e determinar sua resistência através de uma curva de correlação entre o índice de esclerometria e a resistência a compressão do concreto.

Na execução do ensaio, peças que contenham um alto volume de concreto precisam ser avaliadas não a menos que duas áreas, porém, é sugerido uma área de ensaio por elemento de concreto. A dimensão das peças que sofreram o ensaio deve conter um valor igual ou superior a 10 cm, pois impedem interferências a fenômenos de ressonância, vibração e dissipação de energia e assim possuir uma considerável rigidez. Para peças que possuem dimensão menor que 10 cm, poderão ser ensaiadas quando colocado um apoio na face oposta ao impacto para atribuir a ele rigidez.

Segundo a NBR 7584:1995, os impactos devem ser executados na posição de maior inércia do componente ensaiado, de preferência, em concordância com a figura abaixo:

Figura 10 - Locais indicados para a aplicação do esclerômetro.



Fonte: ABNT NBR 7584:1995

### 2.5.4 Condições que interferem os resultados dos ensaios de esclerometria

Existem condições que interferem nos resultados dos índices esclerométricos, dificultando a execução do ensaio. Essas condições são referentes ao concreto no estado fresco e no estado endurecido, são elas: relação água/cimento; tipo e dimensão do agregado; teor de ar incorporado no concreto; teor de umidade do concreto; tipo de cimento; rigidez do elemento ensaiado; tipo de cura úmida; idade do concreto e presença de armadura. Nessa temática, apenas algumas condições serão desmembradas das que foram citadas anteriormente.

Os ensaios de avaliação da dureza superficial não são recomendados para superfícies com textura grosseira ou rugosa. Superfícies não adjacentes às formas no período de moldagem, ou que tenham grande porção de agregados expostos, tendem a ser mais irregulares, sendo sujeitas ao esmagamento da superfície pelo êmbolo, reduzindo o IE, ou a superestimação do índice por conta da maior dureza conferida pelos agregados. Apesar de a NBR 7584:2011 prever a realização de polimento da superfície, é mais indicado que se evite superfícies irregulares, uma vez que o polimento nesses casos pode ser trabalhoso e ainda assim não garantir resultados representativos (ESTEVEVES, 2016).

#### 2.5.4.1 Presença de armadura

A presença de armadura pode gerar erros de leitura do índice esclerométrico de até um 10% dependendo do diâmetro e do revestimento. Para um mesmo revestimento a influência da armadura no ensaio de esclerometria vai aumentando conforme aumenta o diâmetro da barra de aço. Além disso, independentemente do diâmetro, a influência das barras de aço diminui com o revestimento e torna-se quase nula com 30 mm de revestimento (VECCA e LUCERO 2010).

#### 2.5.4.2 Agregado graúdo

A composição granulométrica, forma geométrica dos agregados, porosidade, massa específica, determinam as propriedades do concreto no estado fresco. Tais características podem afetar a resistência do concreto, bem como sua dureza e módulo de elasticidade e conseqüentemente, influenciam várias propriedades do concreto endurecido que contenha o agregado (ISAIA, 2007; BAUAER, 2008).

O tipo e dimensão do agregado graúdo interfere significativamente no resultado do índice esclerométrico. Referente à primeira situação, a resistência à compressão é inferior para um estabelecido índice de esclerometria quando a correlação é composta por agregado de seixo ao invés de agregado de calcário, afirma Neville (1997), interferindo na dureza do concreto. De acordo com a NBR 7584 (1995), as diversidades de agregados podem promover concretos de mesma resistência, entretanto, com distintos índices esclerométricos, observando uma maior alteração em situações que se utilizam agregados leves e pesados.

De acordo Ferreira (2011) e Castro (2009), em relação a agregados de maior tamanho, foi verificado um aumento considerável do índice esclerométrico. Isso pode ser

constatado nos estudos de Evangelista (2002) quando afirma que os valores obtidos no índice esclerométrico são mais distintos, atingindo até 10% de diferença em concretos compostos por agregados de diâmetro máximo característico de 19 mm quando comparados à concretos constituídos por agregados de diâmetros 9,5 mm.

Vecca e Lucero (2010) em seus estudos, observaram também a influência do diâmetro dos agregados nos resultados do ensaio de esclerometria. Eles adotaram para suas análises agregados de diâmetros entre 12,7 mm e 38,00 mm, compreendendo que para concreto de mesma resistência, porém, com diferentes relações de agregado graúdo/agregado miúdo, há um aumento do índice esclerométrico conforme cresce a quantidade de agregado graúdo.

#### 2.5.4.3 Rigidez do elemento ensaiado

A rigidez da peça a ser ensaiada é um fator que também influencia o valor de índice esclerométrico, assim a energia absorvida pelo concreto depende da relação tensão-deformação. Uma baixa resistência, baixa rigidez o concreto absorverá mais energia que no caso contrário. No entanto, quando dois corpos-de-prova têm a mesma resistência e diferente rigidez, os índices esclerométricos obtidos de cada corpo-de-prova são diferentes (ACI 228.1R-03, 2003).

#### 2.5.4.4 Tipo e teor de cimento e cura úmida

De acordo com a BS 1881: 202 (1986), os índices esclerométricos são inferiores para aqueles que possuem concreto com elevado conteúdo de cimento que aqueles com pouco conteúdo de cimento. Para um estabelecido índice esclerométrico, afirma Teodoru (1988) que dispõe de um concreto com alto teor de cimento ou cimento de alta resistência, poderá apresentar a resistência a compressão maior. Mas de acordo com Bungey (1989), alterações no teor de cimento não condiz a alterações na dureza superficial do concreto.

Por meio de um estudo sobre os resultados dos índices esclerométricos do concreto composto por cimento CP III e CP V, Evangelista (2002) verificou que para uma mesma relação água/cimento e idade, os maiores valores foram identificados em concretos composto por cimento CP V.

De acordo com a NM 78 (1996), concretos confeccionados por cimento aluminoso ou cimento supersulfatado (80% a 85% de escória de alto forno + 10% a 15% de sulfato de cálcio) desenvolvem correlações distintas das adquiridas com cimento portland comum. Quando



houver mudança do tipo de cimento, a NBR 7584 (1995) afirma que é preciso adquirir novas curvas de correlação.

O tipo de cura úmida é um outro aspecto que é expressivo na alteração do índice esclerométrico, afirma Câmara (2006). Concretos expostos a cura úmida manifestam índices esclerométricos de até 33%, mas aqueles compostos de relações água/cimento reduzidas, a diferença é pequena, indicando resultados próximos.

#### 2.5.4.5 Relação água/cimento

Nos estudos realizados por Ercolani et al. (2007) foi conferido que alteração no valor da relação água/cimento de 0,45 até 0,56 pode modificar o resultado do índice esclerométrico de 3% a 10%. Essa influência significativa da relação água/cimento também foi compreendido nos estudos de Pereira et al. (2011) que constatou uma alteração de 10% do resultado do índice esclerométrico com relações água/cimento de 0,43 até 0,59.

#### 2.5.5 Orientações acerca da análise dos resultados

Para adquirir a resistência do elemento ensaiado, de acordo com a ABNT NBR 7584:2012, calcula-se a média aritmética de todos os valores, composto no total de 16 impactos no local ensaiado, excluindo em seguida, valores de índice esclerométrico que contêm mais de 10% de afastamento do valor médio adquirido a princípio. Vale ressaltar que o valor final do índice esclerométrico deve conter no mínimo 5 valores individuais que corresponde a cada impacto. Se não conter o valor suficiente, é preciso desocupar a área ensaiada.

O índice esclerométrico final é adquirido multiplicando o índice esclerométrico médio com o coeficiente de correção pertencente à posição que o esclerômetro estava ao longo do impacto e o coeficiente de correção do índice, adquirido durante a aferição do esclerômetro. Por fim, alcança-se apenas um índice esclerométrico final para cada área ensaiada.

Todavia o concreto utilizado para a calibração do aparelho pode ser diferente do concreto a ser ensaiado, recomenda-se verificação prévia com concretos de qualidades semelhantes (CÁNOVAS, 1988). Dessa maneira, para estimar a resistência a compressão do concreto, é recomendável o uso de curva de correlação entre os resultados alcançados do índice de esclerometria e a resistência do concreto.

### **3 METODOLOGIA**

Para alcançar os objetivos apresentados nesta pesquisa, dividiu-se a metodologia em duas fases, são elas: pesquisa bibliográfica e atividades laboratoriais.

#### **3.1 Pesquisas bibliográficas**

Este passo se estabelece pela coleta bibliográfica dos acervos disponíveis, dissertações, normas técnicas, teses, trabalhos de conclusão de curso correlatos aos apurados assuntos: Ensaio destrutivo; Ensaio não destrutivo; Resistência do concreto à compressão; Avaliação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas por ultrassom; Avaliação da dureza superficial por meio do esclerômetro; Avaliação da resistência à compressão do concreto através de ensaios não destrutivos.

#### **3.2 Atividades laboratoriais**

Esta etapa formou-se dos ensaios realizados no Laboratório de Concreto e Materiais (LABCOM) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), situado no Núcleo Tecnológico de Engenharia (NUTENGE), ligado ao Centro de Ciências Tecnológicas (CCT). As ferramentas e materiais utilizados para a confecção do concreto e definição dos parâmetros avaliados foram oferecidos pela Prefeitura do CAMPUS Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão e pelo Laboratório da mesma.

##### **3.2.1 Caracterização granulométrica dos agregados**

Os agregados utilizados para a confecção do concreto foram areia fina (agregado miúdo) e brita 1 (agregado graúdo), ambos doados pela Prefeitura do CAMPUS Paulo VI da UEMA. Para definir a granulometria dos agregados, executou-se o ensaio de caracterização granulométrica, conforme a NBR 248:2003. As figuras 11 e 12, demonstram alguns processos do ensaio de caracterização do agregado.

Figura 11 – Remoção do agregado miúdo retido / Disposição da areia nas peneiras



Fonte: Autor, 2018

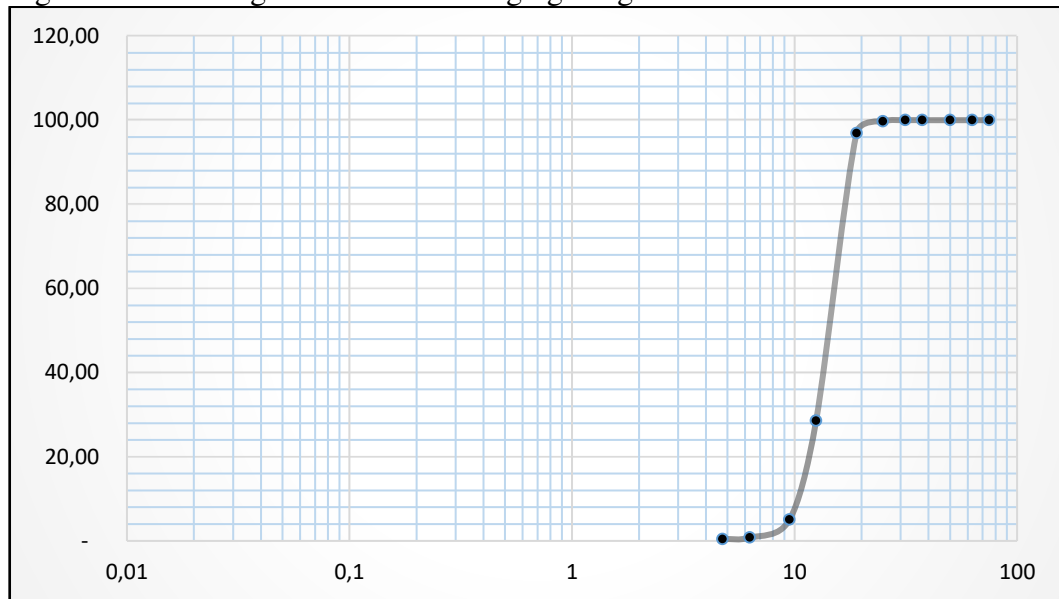
Figura 12 – Remoção do agregado gráudo retido / Agitação mecânica da brita



Fonte: Autor, 2018

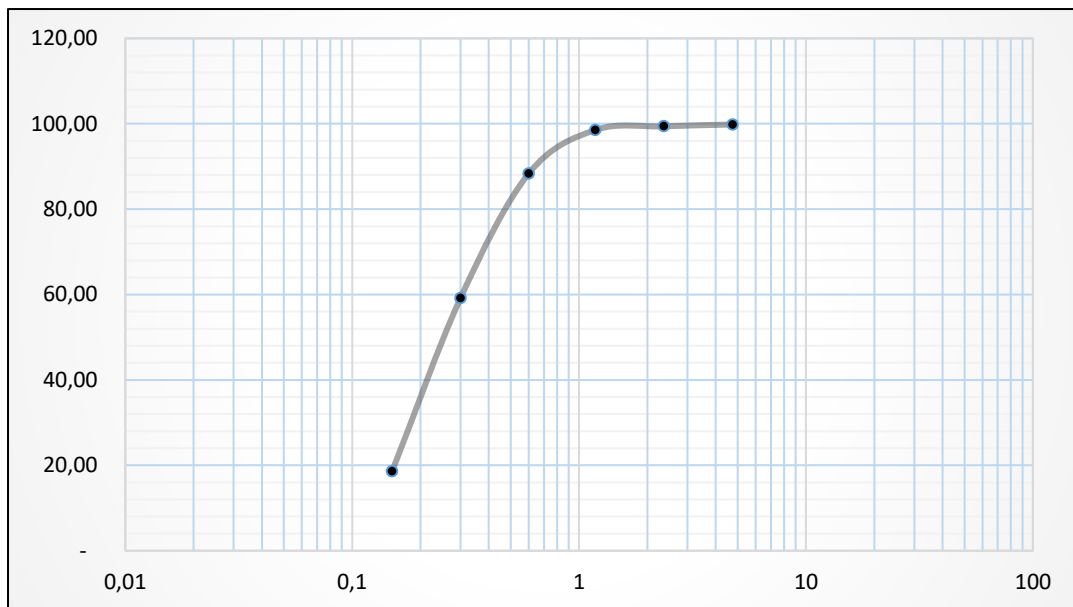
Após o ensaio, foram realizadas curvas granulométricas individuais para os agregados gráudos e miúdos, verificados nas figuras 13 e 14, respectivamente abaixo:

Figura 13 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor, 2018

Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.2 Determinação da massa específica dos agregados e cimento

A massa específica do agregado miúdo foi definida de acordo com a NBR 9776/1987 que prescreve realizar duas vezes o ensaio consecutivo com amostra de mesmo agregado miúdo através da equação:

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (3)$$

Onde:

$\gamma$  é a massa específica do agregado miúdo ( $\text{g/cm}^3$ );

L é a leitura do frasco (volume ocupado pela mistura água-agregado miúdo).

Figura 15 – Ensaio de massa específica do agregado miúdo



Fonte: Autor, 2018

A massa específica do agregado graúdo foi definida de acordo com a Norma Mercosul 53 [33], ensaiada em frações, calculado pela equação 4, 5 e 6:

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (4)$$

Onde:

d é a massa específica do agregado seco ( $\text{g/cm}^3$ );

$m_a$  é a massa da água da amostra (g);

$m_s$  é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g).

$$d_a = \frac{m}{m - m_a} \quad (5)$$

Onde:

$d_a$  é a massa específica aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$  é a massa ao ar da amostra seca em estufa (g);

$m_a$  é a massa em água da amostra saturada (g).

$$d_p = 1 / \left( \frac{P_1}{d_1} + \frac{P_2}{d_2} + \dots + \frac{P_n}{d_n} \right) \quad (6)$$

Onde:

$d_p$  é a massa específica média ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$P_1, P_2, \dots, P_n$  são as porcentagens em massa de cada fração, presentes na amostra original;

$d_1, d_2, \dots, d_n$  são os valores de massa específica de cada fração em função do tipo de massa específica de que está sendo determinada a média.

Figura 16 – Ensaio de massa específica do agregado graúdo



Fonte: Autor, 2018

A massa específica do cimento foi definida utilizando o Frasco volumétrico de Le Chatelier de acordo com a Norma Mercosul 23:2000, pela equação 7.

$$\rho = \frac{m}{V_1 - V_2} \quad (7)$$

Onde:

$\rho$  é o peso específico dado em (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  é massa do aglomerante (g);

$V_1$  é a leitura do volume inicial em (cm<sup>3</sup>);

$V_2$  é a leitura do volume final em (cm<sup>3</sup>)

Figura 17 – Ensaio da massa específica do cimento



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.3 Determinação do teor umidade da areia

O teor de umidade da areia foi definido conforme a norma DNER-ME 213/94 que relaciona a massa de água presente em um certo volume de solo e a massa das partículas sólidas, no mesmo volume, pela equação 8.

$$h = \frac{m_u - m_s}{m_s - m} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

$h$  é a umidade (dada em porcentagem);

$m_u$  é a massa úmida correspondente à massa do recipiente mais a amostra do material úmido (g);

$m$  é a massa do recipiente (g);

ms é a massa seca correspondente à massa do recipiente mais a amostra do material seco (g)

Figura 18 – Ensaio do teor de umidade



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.4 Dosagem

Com o objetivo de alcançar uma melhor precisão nos resultados, foram produzidos 138 moldes de concreto, sendo eles 120 corpos de prova e 18 caixas cúbicas. Os 138 moldes foram submetidos a dois diferentes dias de cura úmida, de 7 e 28 dias e separados em 2 traços distintos em que cada traço contém três relações água/cimento. A relação dos traços com os dias de cura úmida e a quantidade de corpos de prova e caixas cúbicas é verificado na tabela 5.

Tabela 5 - Relação dos traços com a quantidade de moldes

Nº	Traço	Agregado graúdo	Fator a/c	Dias de cura úmida	Quantidade de CPs	Quantidade de caixas cúbicas
I	1:1:2	Brita 1	0,4	7	10	2
				28	10	2
II	1:1:2	Brita 1	0,6	7	10	2
				28	10	2
III	1:1:2	Brita 1	0,8	7	10	2
				28	10	2
IV	1:2:3	Brita 1	0,4	7	10	2
				28	10	-
V	1:2:3	Brita 1	0,6	7	10	2
				28	10	-
VI	1:2:3	Brita 1	0,8	7	10	2
				28	10	-

Fonte: Autor, 2018



### 3.2.5 Produção do concreto

Para a confecção do concreto realizada na LABCOM, foi feito inicialmente a proporção de materiais em massa em relação à massa do cimento de acordo com cada traço. Os agregados foram cedidos pela Prefeitura do CAMPUS Paulo VI da UEMA e o aglomerante empregado foi o CP II E 32 RS indicado para estruturas de concreto em geral, por exemplo, em fundações, pavimentos de concreto e outras estruturas de concreto que permaneçam em contato direto com meios quimicamente agressivos. Imediatamente após a divisão de cada material, foi iniciada a mistura na betoneira, de acordo com a NBR 12655:2015, observada na figura 19 a seguir.

Figura 19 - Preparação dos agregados para serem levados à betoneira



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.6 Moldagem dos corpos de prova e caixas cúbicas

A moldagem dos corpos de prova acompanhou a NBR 5738:2015, utilizando moldes metálicos e de PVC cilíndricos com ambos formados por diâmetros de 10 cm e altura de 20 cm. Os moldes das caixas cúbicas são de madeirite, confeccionados pela UEMA com dimensões de 20x20x20cm. Antes de iniciar a moldagem dos corpos de prova e das caixas cúbicas, os moldes foram limpos e submetidos a aplicação de uma fina camada de óleo mineral no seu revestimento interno.

O modo de adensamento do concreto nos moldes foi manual, adensando o concreto em 2 camadas de volume igual por meio da aplicação de 12 golpes com a haste metálica cilíndrica, em seguida, batendo na superfície externa dos moldes para evitar a criação de vazios na massa de concreto. Logo após o adensamento da última camada, foi realizado o rasamento da superfície com a borda do molde através uma colher de pedreiro, em conformidade com a norma. Depois da moldagem, os moldes foram colocados à sombra em uma superfície horizontal rígida por um período de 24 horas para passar por uma cura inicial.

### 3.2.7 Desmoldagem dos moldes e cura úmida

Após 24 horas da moldagem de cada corpo de prova e caixa cúbica, os mesmos foram desmoldados e identificados para, em seguida, serem submetidos ao processo de cura imersa. Este processo se deu quando os corpos de prova e caixas cúbicas foram postos em um tanque aberto e amplo do LABCOM que suportou todos os moldes confeccionados.

No processo de cura úmida, o tanque na qual os corpos de prova e as caixas cúbicas ficaram armazenadas, até o momento do ensaio, possuíam uma solução saturada de hidróxido de cálcio a  $(23 \pm 2) ^0 C$ , de forma que este elemento intervisse na proliferação de algas. O período de cura úmida dos moldes variou de 7 dias e 28 dias, conforme a tabela 5 já citada.

Figura 20 – 120 corpos de prova desmoldados e identificados



Fonte: Autor, 2018

Figura 21 – Cubos de concreto de 20 x 20 x 20 cm



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.8 Penetração do dióxido de carbono nos moldes de concreto

Com os corpos de prova e as caixas cúbicas curados, foi iniciado o processo de carbonatação do concreto em apenas metade dos corpos de prova e caixas cúbicas, resultando em um total de 69 moldes de concreto. Estes moldes foram divididos e colocados em três câmaras de carbonatação simulado por três isopores de duzentos de noventa litros, submetidos a aplicação de dióxido de carbono por três extintores de incêndio, um para cada câmara no período de dois meses, conforme ilustra a figura 22.

Esse procedimento foi realizado para em seguida, analisar a resistência dos corpos de prova através do ensaio de compressão uniaxial e ensaio de ultrassom, e verificar a resistência das caixas cúbicas por meio do ensaio de esclerometria.

Figura 22- Corpos de prova e caixas cúbicas acoplados na câmara de carbonatação



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.9 Capeamento

As bases dos corpos de prova em seu método de moldagem, não ganham acabamento apropriado para ser submetido aos ensaios da NBR 5739:2007 e NBR 8802:2013. Assim, para assegurar a ortogonalidade e planicidade das faces, são realizados capeamentos feitos com gesso, argamassa ou enxofre, deixando a superfície perpendicular ao eixo axial do corpo de prova.

Nesta pesquisa, foi empregado uma mistura em proporção 1:1 entre gesso e Cimento Portland para a composição da argamassa de capeamento, originando uma superfície resistente e lisa. O capeamento foi executado por meio de um equipamento chamado Capeador, verificado na figura 23, que alinha o corpo de prova que se encontra no sentido vertical à uma base circular, solucionando suas imperfeições.

Figura 23 - Capeamento dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2018

De acordo com a norma, os capeamentos não podem ser superiores a espessura máxima estabelecida de 3,0 mm em cada topo. Na figura 24 são apresentados os corpos de prova capeados, finalizados para os ensaios.

Figura 24 – Corpos de prova capeados



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.10 Ensaio de Ultrassom

Para uma correta verificação dos resultados da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, foi preciso seguir duas fases importantes, de acordo com a NBR 8802:2013: calibrar o dispositivo ultrassônico e fazer a medição do comprimento do corpo de prova. O aparelho de Ultrassom utilizado é do modelo Pundit Lab, do fabricante Proceq e domínio da LABCOM, desenvolvido essencialmente para ser operado em laboratórios, de acordo com a figura 25 abaixo:

Figura 25 – Equipamento de Ultrassom



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.10.1 Calibração do Ultrassom

O fabricante determina que o ultrassom necessita ser calibrado por meio de um elemento cilíndrico de acrílico chamado de bloco de calibração, oferecida juntamente com o equipamento pelo fabricante. Os transdutores serão acoplados a esse bloco de calibração, aplicando gel a cada um dos transdutores. Esse elemento cilíndrico obtém características padronizadas que consente o ajuste do aparelho, na qual a propagação da onda passa por um intervalo de tempo já padronizado, conforme ilustra a figura 26.

Figura 26 – Calibração do equipamento



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.10.2 Medição do comprimento do corpo de prova

Para medir a velocidade do pulso é necessário medir a extensão do trajeto entre os dois transdutores, pois o aparelho verifica o tempo que as ondas ultrassônicas levam para percorrer o meio trabalhado, precisando do comprimento longitudinal para fazer a entrada dos dados. Dessa maneira, após o capeamento dos corpos de prova, foi feita a medição do comprimento longitudinal de cada corpo de prova ensaiado através de um paquímetro calibrado, sendo um passo muito importante para a precisão dos resultados, pois um valor do comprimento longitudinal incorreto, causará em um resultado de velocidade incoerente.

Para alcançar precisão do comprimento do corpo de prova, a leitura foi realizada 3 vezes, conservando o paquímetro centrado ao seu eixo perpendicular. Após a medição, este

dado é introduzido junto ao dispositivo de ultrassom, trocando o valor de acordo com cada corpo de prova ensaiado.

### 3.2.10.3 Medição da velocidade de propagação ultrassônica

Após a realização dos passos citados, é feita a verificação das velocidades das ondas alcançadas por meio do dispositivo ultrassônico. Para tal fim, primeiramente, coloca-se uma quantidade de gel nos transdutores para obter uma perfeita transmissão das ondas ultrassônicas para o elemento, acoplando-os na superfície do corpo de prova de maneira com que eles fiquem totalmente centrados e alinhados ao eixo do elemento. Dessa maneira, a leitura é realizada três vezes consecutivas, fazendo logo após uma média dos valores obtidos para ser utilizada na correlação com os valores de resistência a compressão simples.

Figura 27 – Medição de velocidade das ondas ultrassônicas



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.11 Ensaio de esclerometria

O dispositivo utilizado para encontrar o índice esclerométrico é da fabricante Proceq, modelo Original Schmidt, conforme a figura 28. Para a correta aferição do índice esclerométrico, é necessária uma área de ensaio adequada, conforme a ABNT NBR 7584:2012

Figura 28 – Equipamento esclerométrico



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.11.1 Escolha da área de ensaio

Na execução do ensaio esclerométrico, o primeiro passo a ser analisado é verificar em qual área será realizado o ensaio. A área ideal para fazer a medição do índice esclerométrico deve ser compreendida, aproximadamente quadrados de lados entre 9cm e 20cm, precisando estar limpa e seca ao ar e de preferência, plana e afastadas de regiões afetadas por segregação, cantos, arestas. É recomendável fazer em pelo menos uma área de ensaio por elemento.

Dessa maneira, a região escolhida para o ensaio em cada caixa cúbica foi de dimensão 20 cm x 20 cm, livres de irregularidades, sem superfície áspera ou curvas com apenas uma área de ensaio para cada item.

Figura 29 – Escolha e medição da área de ensaio



Fonte: Autor, 2018



### 3.2.11.2 Medição do índice esclerométrico

Após a escolha da região de ensaio, foram divididos os locais que sofreriam o impacto em 16 pontos distintos, uniformemente distribuídos, mantendo uma distância mínima entre os centros dos impactos de 3cm. Com os pontos de impacto escolhidos, foi verificado o índice esclerométrico de cada um e calculando em seguida a média da área ensaiada. Foram desprezados os valores afastados em mais de 10% da média alcançado. Após isso, recalcula-se a média aritmética.

Figura 30 – Medição do índice esclerométrico



Fonte: Autor, 2018

### 3.2.12 Ensaio de resistência a compressão axial

Os corpos de prova preparados foram ensaiados a compressão simples conforme os sistemas estabelecidos pela NBR 5739:2007, executada na Prensa Eletrohidráulica pertencente ao LABCOM, marca SOLOTEST, modelo ST 20000, capacidade máxima de carga de 200 toneladas, ilustrado na figura 31 abaixo.

Figura 31 – Prensa eletrohidráulica para a realização do rompimento dos CP's.



Fonte: Autor, 2018

#### 3.2.12.1 Medição da resistência a compressão

Para dar início ao ensaio, o corpo de prova com auxílio do círculo concêntrico de referência, foi colocado de forma centrada aos eixos centrais dos pratos da Prensa Eletrohidráulica, cujas superfícies estavam limpas e secas, conforme a norma. À vista disso, a prensa foi iniciada, comprimindo o corpo de prova com taxa constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s. O mesmo método foi seguido para cada corpo de prova ensaiado.

#### 3.2.13 Medição da profundidade carbonatada

A profundidade de carbonatação do concreto nos corpos de prova foram medidas por meio da aspersão de fenolftaleína no plano de ruptura longitudinal e conferida pelo paquímetro, conforme as figuras 32 e 33.

Figura 32 – Aplicação de fenolftaleína nas seções dos CPs



Fonte: Autor, 2018

Figura 33 – Seções longitudinais do corpo de prova preparados para a medição da profundidade de carbonatação



Fonte: Autor, 2018

## 4 RESULTADOS

Logo após o alcance dos índices esclerométricos de cada caixa cúbica e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas de cada corpo de prova, os valores foram tabelados para melhor compreensão. O ensaio de resistência a compressão simples pela NBR 5739:2007, foi realizada nos corpos de prova após o ensaio de ultrassom e seus valores estão localizados no Apêndice B ao fim deste trabalho.

Por meio dos dados encontrados pelos ensaios não destrutivos e destrutivos, são realizadas as curvas de correlação. Porém, para escolher a melhor curva que descreva as correlações, o critério seguido é eleger aquele que contém o maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre todas as regressões simples verificadas. ASSIS, A.P. (2011), desenvolve a interpretação para os valores de  $r^2$ .

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

### 4.1 Ensaio ultrassônico x ensaio de compressão uniaxial

Os dados da velocidade de propagação ultrassônica e a resistência a compressão simples foram dispostos no software Microsoft Excel, e em seguida foram realizados dois gráficos de dispersão, sendo o primeiro para os corpos de prova carbonatados e outro para os não carbonatados, testando diferentes curvas de correlação por meio da regressão simples, verificado nos quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre velocidade de onda ultrassônica e resistência à compressão simples de corpos de prova não carbonatados

CORPOS DE PROVA NÃO CARBONATADOS		
Regressão	R <sup>2</sup>	Equação
Exponencial	0,641	$f_{ce} = 0,0273e^{0,0015V}$
Linear	0,672	$f_{ce} = 0,0386.V - 141,94$
Polinomial	0,676	$f_{ce} = -1.10^{-05}.V^2 + 0,1476.V - 383,13$
Potência	0,649	$f_{ce} = 2.10^{-24}.V^{6,9077}$

Fonte: Autor, 2018

Quadro 4 – Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre velocidade de onda ultrassônica e resistência à compressão simples de corpos de prova carbonatados

CORPOS DE PROVA CARBONATADOS		
Regressão	R <sup>2</sup>	Equação
Exponencial	0,8181	$f_{ce} = 0,0328e^{0,0015V}$
Linear	0,7964	$f_{ce} = 0,0353.V - 127,63$
Polinomial	0,8166	$f_{ce} = 2.10^{-05}.V^2 - 0,1121.V + 191,12$
Potência	0,8197	$f_{ce} = 5.10^{-23}.V^{6,4971}$

Fonte: Autor, 2018

Conforme as tabelas apresentadas, as melhores curvas que descrevem as correlações são a linear e de potência para os corpos de prova não carbonatados e carbonatados, respectivamente. Apesar da curva polinomial apresentar o maior  $r^2$  para os corpos de prova não carbonatados, quando substituído os parâmetros necessários para encontrar a resistência ( $f_{ce}$ ), o resultado é muito distante do esperado. Dessa forma, foi escolhido a curva linear que constitui o segundo maior valor de  $r^2$ . Seguem abaixo as equações para correlacionar  $f_{ce}$  com a velocidade:

a) Para moldes de concreto não carbonatados:

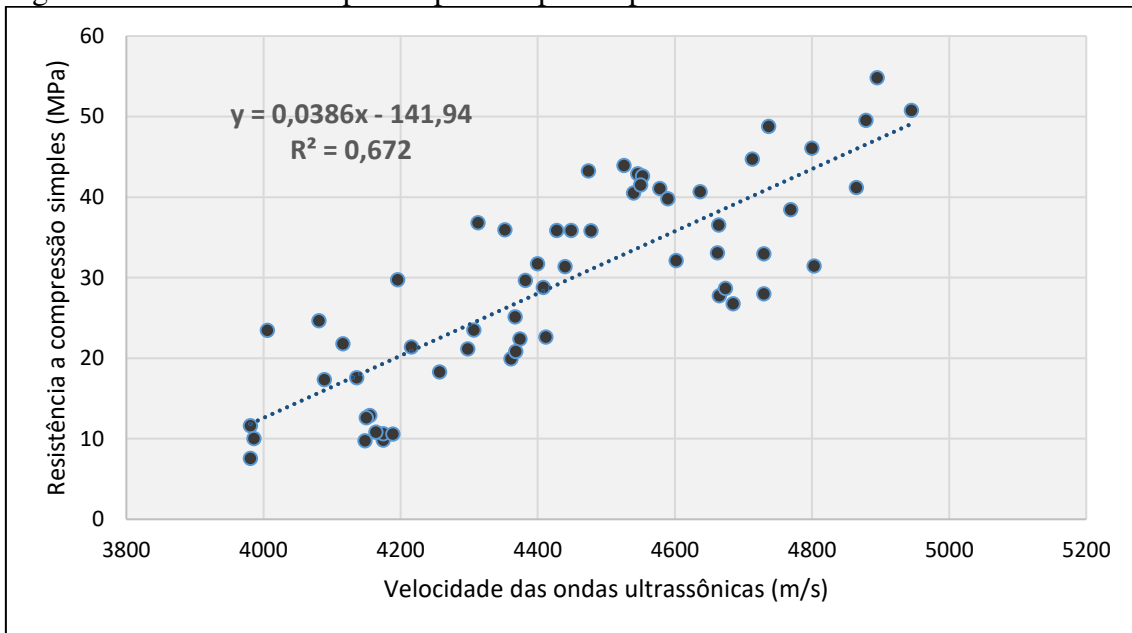
$$f_{ce} = 0,0386.V - 141,94 \quad (9)$$

b) Para moldes de concreto carbonatados:

$$f_{ce} = 5.10^{-23}.V^{6,4971} \quad (10)$$

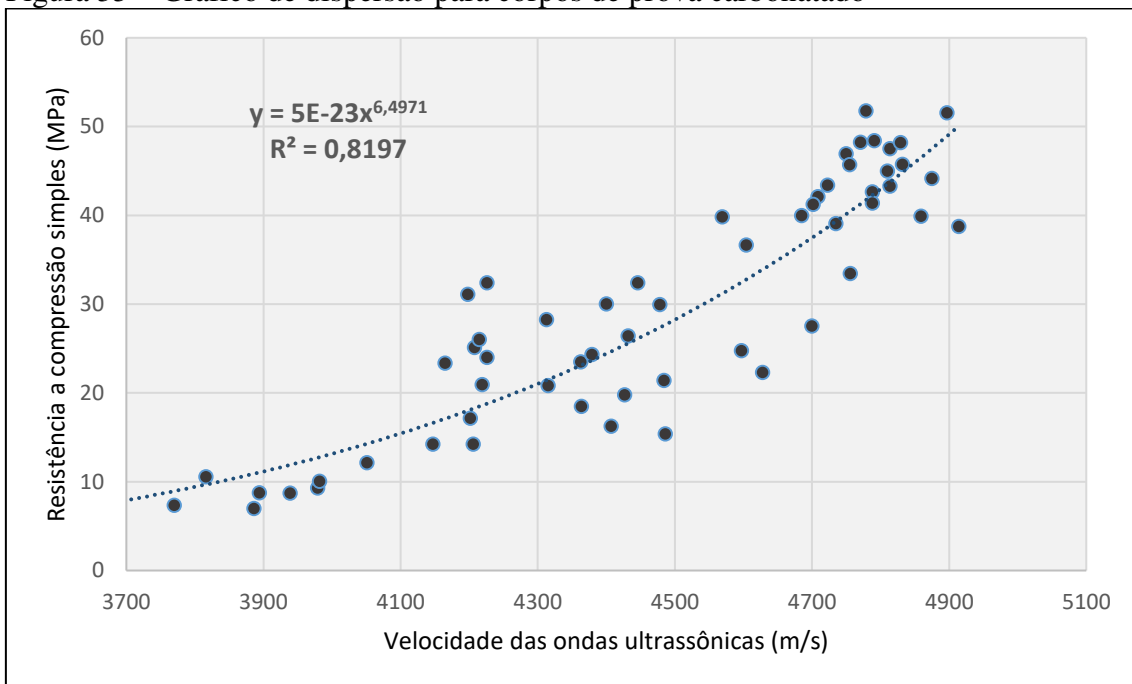
As figuras 34 e 35 expressam as curvas de correlação propostas para os corpos de prova não carbonatados e carbonatados, respectivamente:

Figura 34 – Gráfico de dispersão para corpos de prova não carbonatados



Fonte: Autor, 2018

Figura 35 – Gráfico de dispersão para corpos de prova carbonatado



Fonte: Autor, 2018

Substituindo os valores da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas de cada corpo de prova nas suas respectivas equações de correlação, são determinadas as resistências do concreto, conforme as tabelas 6, 7, 8 e 9.

Tabela 6 – Resistência dos corpos de prova carbonatados de traço 1:1:2

CPs CARBONATADOS (Traço: 1:1:2)								
Nº	Relação a/c = 0,4 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,6 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,8 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)
1	4814	42,13	11	4709	36,51	21	4208	17,58
2	4897	47,08	12	4859	44,75	22	4165	16,44
3	4814	42,13	13	4569	30,01	23	4363	22,23
4	4832	43,16	14	4875	45,72	24	4206	17,52
5	4829	42,99	15	4604	31,53	25	4147	15,99
6	4771	39,74	16	4400	23,49	26	4202	17,42
7	4779	40,18	17	4313	20,63	27	4427	24,44
8	4750	38,62	18	4198	17,31	28	4364	22,27
9	4446	25,13	19	4226	18,07	29	4407	23,73
10	4791	40,84	20	4478	26,33	30	4486	26,64

Fonte: Autor, 2018

Tabela 7 – Resistência dos corpos de prova carbonatados de traço 1:2:3

CPs CARBONATADOS (Traço: 1:2:3)								
Nº	Relação a/c = 0,4 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,6 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,8 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)
31	4723	37,22	41	4315	20,69	51	3979	12,22
32	4810	41,90	42	4215	17,77	52	3816	9,31
33	4788	40,67	43	4700	36,05	53	3894	10,62
34	4755	38,89	44	4432	24,62	54	3684	7,41
35	4788	40,67	45	4226	18,07	55	3688	7,46
36	4702	36,15	46	4219	17,88	56	4051	13,73
37	4685	35,31	47	4628	32,61	57	3982	12,28
38	4914	48,15	48	4484	26,56	58	3939	11,44
39	4735	37,83	49	4597	31,22	59	3886	10,48
40	4756	38,94	50	4379	22,77	60	3770	8,61

Fonte: Autor, 2018

Tabela 8 – Resistência dos corpos de prova não carbonatados de traço 1:1:2

CPs NÃO CARBONATADOS (Traço: 1:1:2)								
Nº	Relação a/c = 0,4 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,6 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,8 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)
61	4526	32,76	71	4382	27,21	81	4006	12,69
62	4546	33,54	72	4352	26,05	82	4089	15,90
63	4474	30,76	73	4400	27,90	83	4116	16,94
64	4540	33,30	74	4400	29,44	84	4136	17,71
65	4553	33,81	75	4478	30,91	85	4081	15,59
66	4800	43,34	76	4408	28,21	86	4257	22,38
67	4895	47,01	77	4730	40,64	87	4298	23,96
68	4737	40,91	78	4664	38,09	88	4367	26,63
69	4945	48,94	79	4602	35,70	89	4216	20,80
70	4879	46,39	80	4662	38,01	90	4196	20,03

Fonte: Autor, 2018

Tabela 9 – Resistência dos corpos de prova não carbonatados de traço 1:2:3

CPs NÃO CARBONATADOS (Traço: 1:2:3)								
Nº	Relação a/c = 0,4 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,6 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)	Nº	Relação a/c = 0,8 Velocidade (m/s)	fce (Mpa)
91	4550	33,69	101	4685	38,90	111	4155	13,44
92	4449	29,79	102	4665	38,13	112	4175	13,61
93	4313	24,54	103	4803	43,46	113	4175	13,61
94	4578	34,77	104	4674	38,48	114	4189	13,74
95	4428	28,98	105	4730	40,64	115	4164	13,52
96	4865	45,85	106	4374	26,90	116	4148	13,58
97	4769	42,14	107	4361	26,39	117	3981	11,96
98	4590	35,23	108	4412	28,36	118	3986	12,01
99	4713	39,98	109	4307	24,31	119	4150	13,39
100	4637	37,05	110	4368	26,66	120	3981	11,96

Fonte: Autor, 2018



## 4.2 Ensaio esclerométrico x ensaio de compressão uniaxial

Os valores dos índices esclerométricos e a resistência a compressão simples foram dispostos também no software Microsoft Excel, em seguida foram realizados gráficos de dispersão para cada situação de exposição, ou seja, para moldes submetidos ou não a emissão de CO<sub>2</sub>, testando diferentes curvas de correlação através da regressão simples, assim como no item 4.1. Devido ao ensaio de esclerometria proporcionar apenas um índice esclerométrico para cada caixa cúbica, foi realizada a média da resistência a compressão simples dos corpos de prova para aquela respectiva caixa com traço e relação água/cimento determinados, encaminhando em seguida para uma correlação.

Tabela 10 – Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre o índice esclerométrico e resistência à compressão simples das caixas cúbicas não carbonatadas

CAIXAS CÚBICAS NÃO CARBONATADAS		
Regressão	R <sup>2</sup>	Equação
Exponencial	0,6969	$f_{ce} = 3,8088e^{0,0748x}$
Linear	0,788	$f_{ce} = 2,072.IE - 24,856$
Polinomial	0,8039	$f_{ce} = -0,0916.IE^2 + 7,1001.IE - 91,751$
Potência	0,7239	$f_{ce} = 0,0336.IE^{2,0579}$

Fonte: Autor, 2018

Tabela 11 – Coeficientes de determinação das regressões verificadas para correlações entre o índice esclerométrico e resistência à compressão simples das caixas cúbicas carbonatadas

CAIXAS CÚBICAS CARBONATADAS		
Regressão	R <sup>2</sup>	Equação
Exponencial	0,7585	$f_{ce} = 2,4013e^{0,0823x}$
Linear	0,8772	$f_{ce} = 2,283.IE - 36,867$
Polinomial	0,8842	$f_{ce} = -0,0477.IE^2 + 5,1587.IE - 78,885$
Potência	0,7698	$f_{ce} = 0,007.IE^{2,4535}$

Fonte: Autor, 2018

Segundo as tabelas apresentadas, a melhores curvas que descrevem as correlações para ambas as situações de exposição ou não ao CO<sub>2</sub>, são as polinomiais. À vista disso, seguem abaixo as equações para correlacionar  $f_{ce}$  com o índice esclerométrico:

c) Para moldes de concreto não carbonatados:

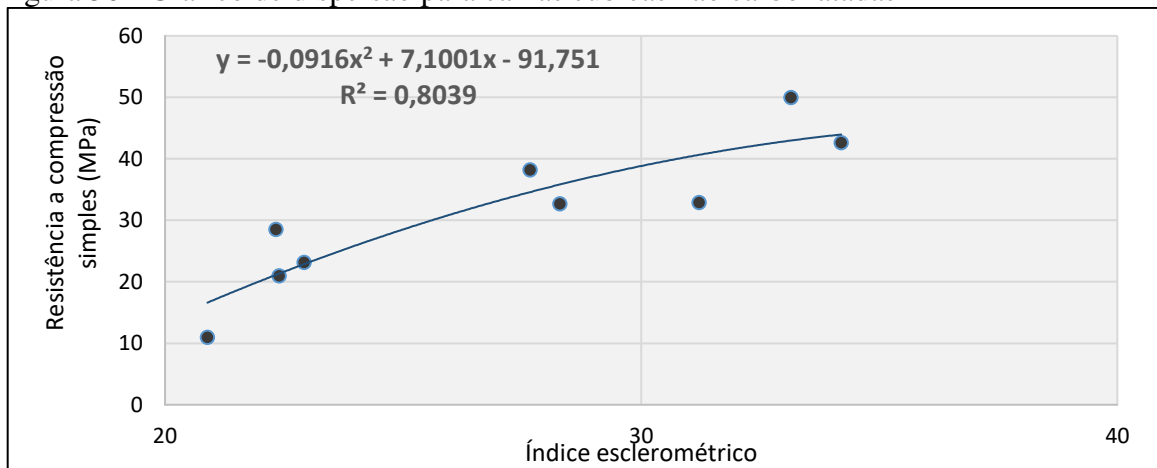
$$f_{ce} = -0,0916 \cdot IE^2 + 7,1001 \cdot IE - 91,751 \quad (11)$$

d) Para moldes de concreto carbonatados:

$$f_{ce} = -0,0477 \cdot IE^2 + 5,1587 \cdot IE - 78,885 \quad (12)$$

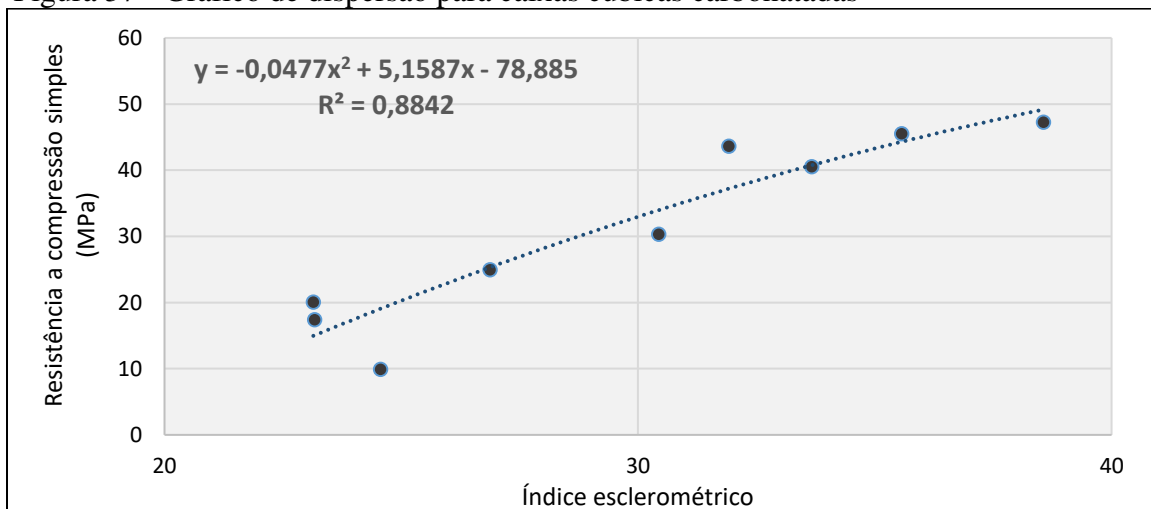
As figuras 36 e 37 expressam as curvas de correlação propostas para as caixas cúbicas não carbonatadas e carbonatadas, respectivamente:

Figura 36 - Gráfico de dispersão para caixas cúbicas não carbonatadas



Fonte: Autor, 2018

Figura 37 - Gráfico de dispersão para caixas cúbicas carbonatadas



Fonte: Autor, 2018

Substituindo os valores do índice esclerométrico de cada caixa cúbica de concreto nas suas respectivas equações de correlação, são determinadas as resistências do concreto, conforme as tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Resistência das caixas cúbicas carbonatadas

CAIXAS CÚBICAS CARBONATADAS					
Nº	Traço	Relação a/c	Dias de cura úmida	Índice esclerométrico	fce (Mpa)
121	1:1:2	0,4	7	38,56	49,11
122	1:1:2	0,4	28	35,57	44,26
123	1:1:2	0,6	7	33,67	40,73
124	1:1:2	0,6	28	30,44	33,94
125	1:1:2	0,8	7	23,14	14,95
126	1:1:2	0,8	28	23,17	15,03
127	1:2:3	0,4	7	31,92	37,17
128	1:2:3	0,6	7	26,88	25,30
129	1:2:3	0,8	7	24,56	19,05

Fonte: Autor, 2018

Tabela 13 – Resistência das caixas cúbicas não carbonatadas

CAIXAS CÚBICAS NÃO CARBONATADAS					
Nº	Traço	Relação a/c	Dias de cura úmida	Índice esclerométrico	fce (Mpa)
130	1:1:2	0,4	7	34,2	43,93
131	1:1:2	0,4	28	33,15	42,96
132	1:1:2	0,6	7	31,22	40,63
133	1:1:2	0,6	28	28,29	35,80
134	1:1:2	0,8	7	22,4	21,33
135	1:1:2	0,8	28	22,92	22,86
136	1:2:3	0,4	7	27,67	34,58
137	1:2:3	0,6	7	22,33	21,12
138	1:2:3	0,8	7	20,89	16,60

Fonte: Autor, 2018

### 4.3 Profundidade de carbonatação

O ensaio de carbonatação para localizar a área carbonatada dos moldes, foi realizada após a ruptura dos corpos de prova no ensaio de compressão uniaxial, e as caixas cúbicas foram submetidas a ruptura pela Prensa Eletrohidráulica para facilitar na busca da melhor face de análise. Para ambos tipos de moldes, foram extraídas medidas do plano longitudinal de uma das faces do concreto. Com a sua abertura, aplicou-se fenolftaleína e aqueles que ficaram com a coloração violeta, determinou a área sem carbonatação, enquanto os que ficaram ausentes de cor, determinou a área carbonatada.

Metade de todos os corpos de prova e caixas cúbicas confeccionadas sofreram carbonatação, ou seja, 60 corpos de prova e 9 caixas cúbicas. Com a disponibilidade de três câmaras de carbonatação, como descrito no item 3.2.8, cada câmara de carbonatação acolheu 20 corpos de prova e 3 caixas cúbicas. Dessa forma, as tabelas 14, 15, 16 e 17 mostram a profundidade carbonatada de cada molde de concreto de acordo com a câmara de carbonatação que ele se encontrava.

Tabela 14 – Profundidade média de carbonatação de cada corpo de prova da câmara de carbonatação 1

CÂMARA DE CARBONATAÇÃO 1							
Nº	Traço	Relação a/c	Profundidade média (cm)	Nº	Traço	Relação a/c	Profundidade média (cm)
1	1:1:2	0,4	0,7	21	1:1:2	0,8	1,9
2	1:1:2	0,4	0,6	22	1:1:2	0,8	1,8
3	1:1:2	0,4	0,8	23	1:1:2	0,8	1,7
4	1:1:2	0,4	0,8	24	1:1:2	0,8	1,9
5	1:1:2	0,4	0,7	25	1:1:2	0,8	2,1
11	1:1:2	0,6	1,1	31	1:2:3	0,4	0,8
12	1:1:2	0,6	1,3	32	1:2:3	0,4	1,0
13	1:1:2	0,6	1,4	33	1:2:3	0,4	1,1
14	1:1:2	0,6	1,4	34	1:2:3	0,4	0,7
15	1:1:2	0,6	1,0	35	1:2:3	0,4	0,5

Fonte: Autor, 2018

Tabela 15 – Profundidade média de carbonatação de cada corpo de prova da câmara de carbonatação 2

CÂMARA DE CARBONATAÇÃO 2							
Nº	Traço	Relação a/c	Profundidade média (cm)	Nº	Traço	Relação a/c	Profundidade média (cm)
6	1:1:2	0,4	0,3	41	1:2:3	0,6	0,5
7	1:1:2	0,4	0,2	42	1:2:3	0,6	0,5
8	1:1:2	0,4	0,2	43	1:2:3	0,6	0,7
9	1:1:2	0,4	0,3	44	1:2:3	0,6	0,8
10	1:1:2	0,4	0,2	45	1:2:3	0,6	0,9
16	1:1:2	0,6	0,5	51	1:2:3	0,8	1,3
17	1:1:2	0,6	0,2	52	1:2:3	0,8	2,0
18	1:1:2	0,6	0,2	53	1:2:3	0,8	1,0
19	1:1:2	0,6	0,2	54	1:2:3	0,8	1,5
20	1:1:2	0,6	0,5	55	1:2:3	0,8	1,5

Fonte: Autor, 2018

Tabela 16 – Profundidade média de carbonatação de cada corpo de prova da câmara de carbonatação 3

CÂMARA DE CARBONATAÇÃO 3							
Nº	Traço	Relação a/c	Profundidade média (cm)	Nº	Traço	Relação a/c	Profundidade média (cm)
26	1:1:2	0,8	0,6	46	1:2:3	0,6	0,6
27	1:1:2	0,8	0,6	47	1:2:3	0,6	0,7
28	1:1:2	0,8	0,8	48	1:2:3	0,6	0,9
29	1:1:2	0,8	0,5	49	1:2:3	0,6	1,2
30	1:1:2	0,8	0,5	50	1:2:3	0,6	1,0
36	1:2:3	0,4	0,9	56	1:2:3	0,8	1,7
37	1:2:3	0,4	0,5	57	1:2:3	0,8	1,8
38	1:2:3	0,4	0,5	58	1:2:3	0,8	1,9
39	1:2:3	0,4	0,4	59	1:2:3	0,8	1,4
40	1:2:3	0,4	0,8	60	1:2:3	0,8	1,8

Fonte: Autor, 2018

Tabela 17 – Profundidade média de carbonatação de cada caixa cúbica

<b>CÂMARA DE CARBONATAÇÃO 1</b>			
<b>Nº</b>	<b>Traço</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Profundidade média (cm)</b>
121	1:1:2	0,4	0,6
123	1:1:2	0,6	1,0
125	1:1:2	0,8	1,8
<b>CÂMARA DE CARBONATAÇÃO 2</b>			
122	1:1:2	0,4	0,2
124	1:1:2	0,6	0,8
126	1:1:2	0,8	1,0
<b>CÂMARA DE CARBONATAÇÃO 3</b>			
127	1:2:3	0,4	0,6
128	1:2:3	0,6	1,4
129	1:2:3	0,8	1,6

Fonte: Autor, 2018

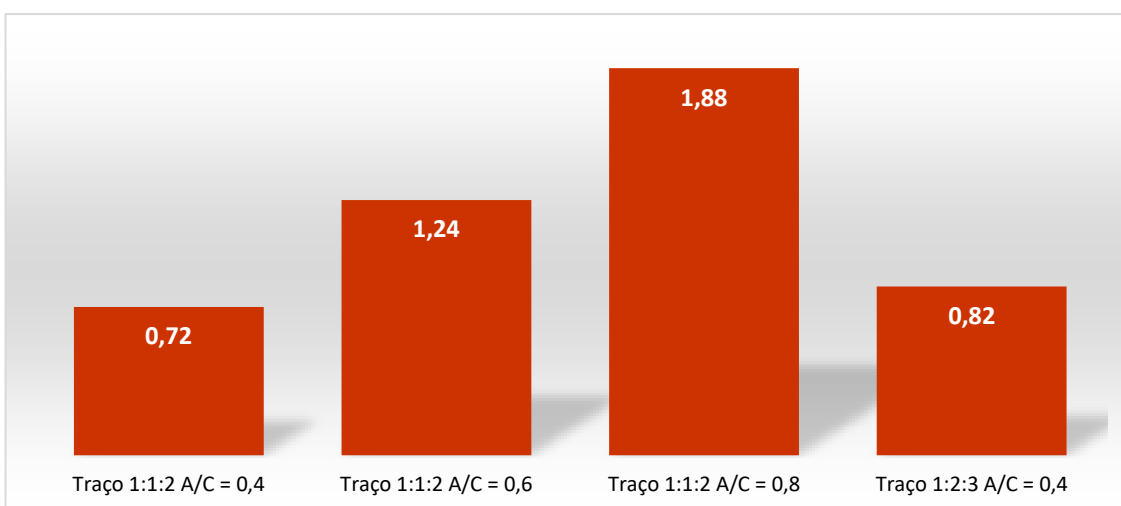
## 5 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

Após a conquista das resistências dos moldes de concreto pelo ensaio de compressão uniaxial, ensaio de ultrassom e ensaio de esclerometria, foram realizados gráficos de colunas para comparar as resistências dos moldes de concreto carbonatados com os não carbonatados e a profundidade de carbonatação para cada traço e relação água/cimento diferentes, visando a analisar os fatores que aceleram a velocidade de carbonatação.

### 5.1 Profundidade de carbonatação nos moldes de concreto

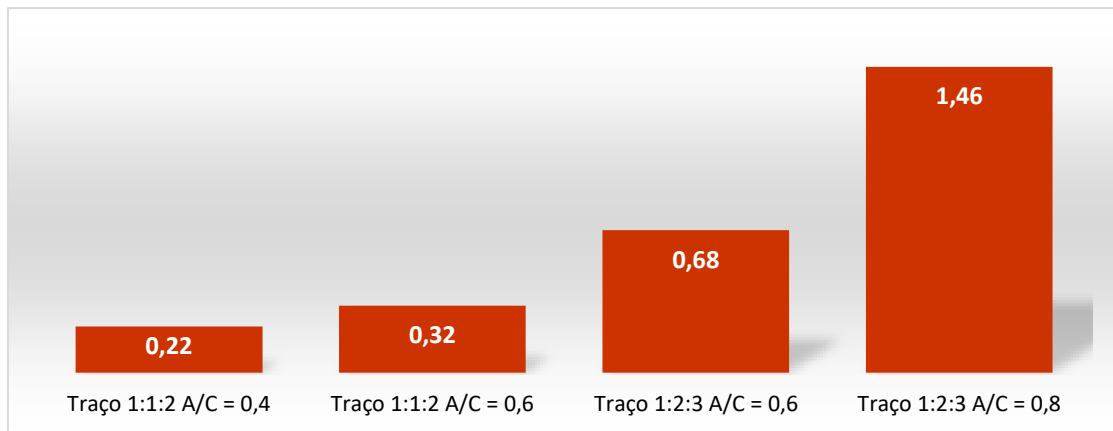
Com os valores da profundidade carbonatada de cada molde de concreto, foram realizados seis gráficos de colunas, sendo três relacionados a carbonatação dos corpos de prova e os outros três das caixas cúbicas. Cada gráfico está relacionado a câmara de carbonatação que os moldes de concreto se encontravam, pois não havia como medir o teor de  $\text{CO}_2$  que se emitia e se encontrava em cada câmara, logo, o teor de carbonatação eram distintas para cada uma. Além disso, para cada gráfico, há uma média de profundidade para um determinado traço com sua relação a/c.

Figura 38 – Profundidade carbonatada dos corpos de prova da 1ª câmara de carbonatação em cm



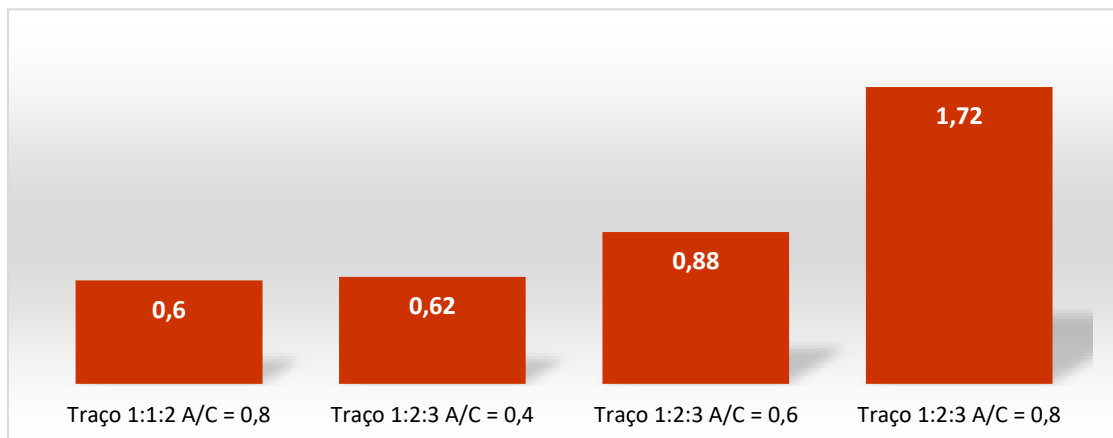
Fonte: Autor, 2018

Figura 39 – Profundidade carbonatada dos corpos de prova da 2ª câmara de carbonatação em cm



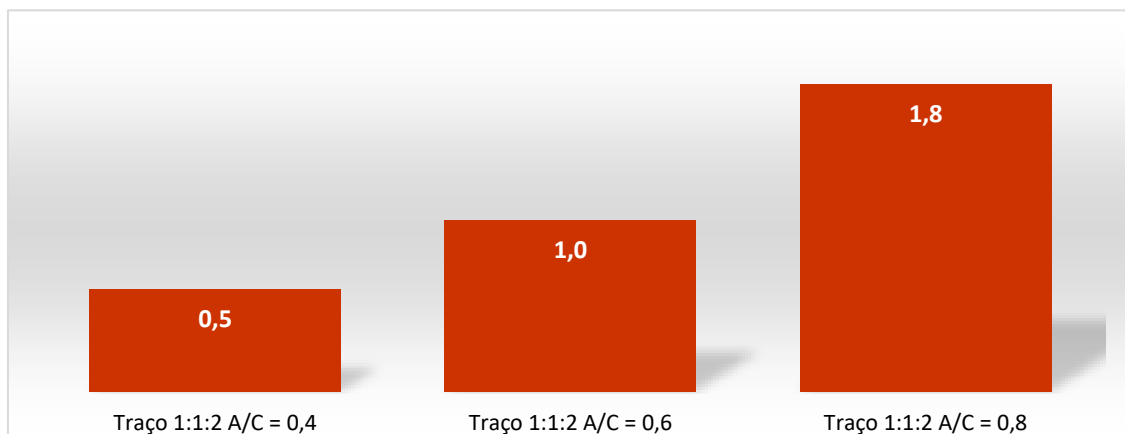
Fonte: Autor, 2018

Figura 40 – Profundidade carbonatada dos corpos de prova da 3ª câmara de carbonatação em cm



Fonte: Autor, 2018

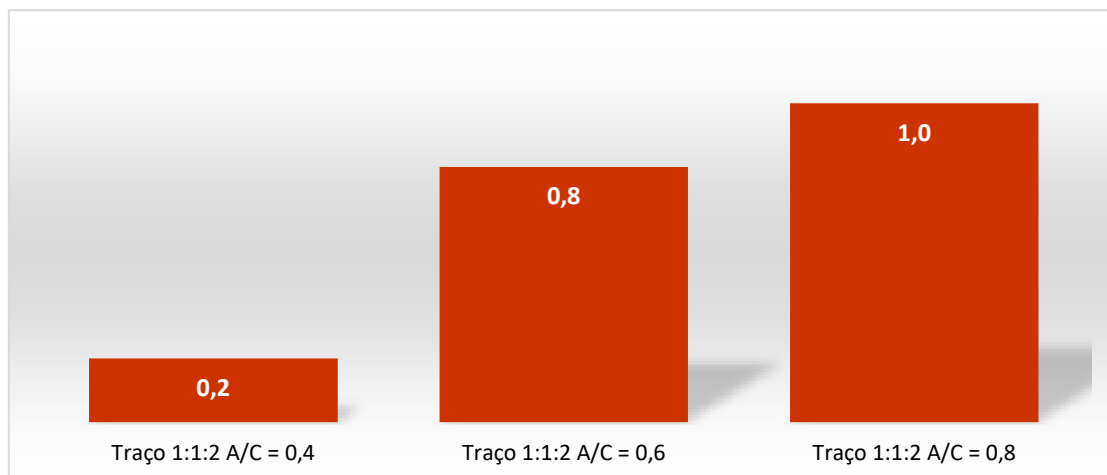
Figura 41 – Profundidade carbonatada das caixas cúbicas da 1ª câmara de carbonatação em cm



Fonte: Autor, 2018

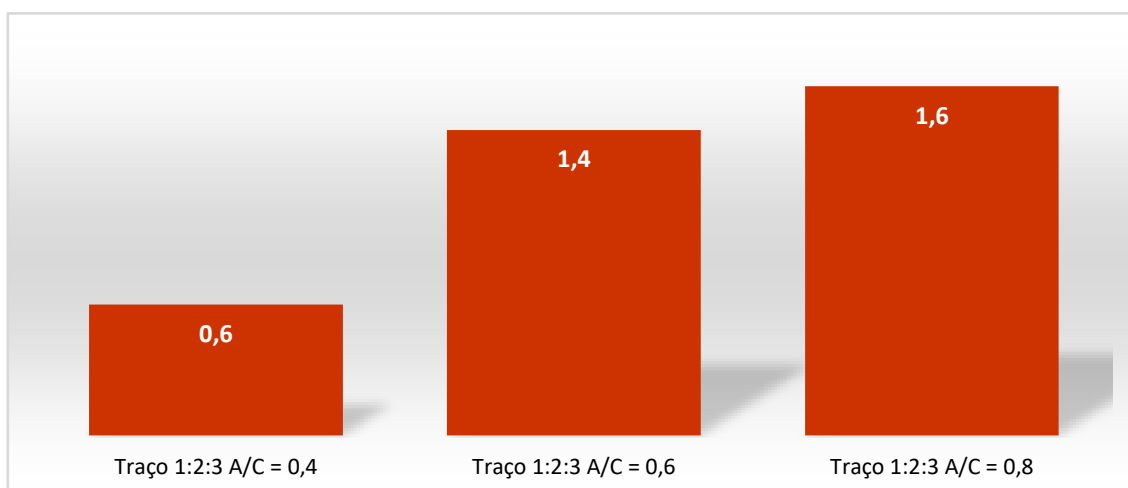


Figura 42 – Profundidade carbonatada das caixas cúbicas da 2º câmara de carbonatação em cm



Fonte: Autor, 2018

Figura 43 – Profundidade carbonatada das caixas cúbicas da 3º câmara de carbonatação em cm



Fonte: Autor, 2018

Através da composição dos gráficos, observou-se que em todos os casos, a profundidade de carbonatação aumentava nos corpos de prova e caixas cúbicas à medida que a relação água/cimento aumentava também, ou seja, em concretos mais porosos, a penetração de  $\text{CO}_2$  foi maior. Na figura 40, o valor da profundidade carbonatada para o traço 1:1:2 com relação  $a/c = 0,8$  foi muito abaixo do esperado, uma vez que o concreto era muito poroso, a frente de carbonatação deveria avançar mais. Possivelmente isso ocorreu devido aos corpos de prova estarem longe do local de inspeção de  $\text{CO}_2$  da sua câmara de carbonatação.

Nas figuras 44 e 45, contém de maneira mais evidente essa análise da profundidade carbonatada nas caixas cúbicas e corpos de prova com relação a/c de 0,8; 0,6; 0,4, respectivamente.

Figura 44 – Profundidade carbonatada de seções no plano longitudinal das caixas cúbicas com relação água/cimento na ordem de 0,8; 0,6; 0,4



Fonte: Autor, 2018

Figura 45 – Profundidade carbonatada de seções no plano transversal dos corpos de prova com relação água/cimento na ordem de 0,8; 0,6; 0,4



Fonte: Autor, 2018

Além disso, para todos corpos de prova que se encontravam na mesma câmara de carbonatação que continham traços diferentes, mas com o mesmo fator água/cimento, a profundidade carbonatada aumentava para aqueles cujo teor de cimento era menor. Por

exemplo, na figura 39, para ambas as relações água/cimento de 0,6, o traço 1:1:2 obteve uma profundidade carbonatada de 0,32, enquanto no traço 1:2:3, o valor alcançado foi de 0,68. Ou seja, houve um aumento de 112,5% da profundidade de carbonatação para menores concentrações de cimento.

Com relação as caixas cúbicas com menores teor de cimento, de acordo com a figura 43, a profundidade de carbonatação para a relação água/cimento 0,4 e 0,6 foram maiores, em comparação com as outras caixas cúbicas carbonatadas,

Outro fator que influencia na velocidade de carbonatação do concreto e pôde ser observada na análise dos resultados são os dias de cura úmida. A câmara de carbonatação 2 onde englobavam as caixas cúbicas que passaram um período de 28 dias de cura imersa, observada na figura 42, alcançaram menor profundidade de carbonatação em comparação as outras caixas cúbicas que permaneceram apenas 7 dias de cura imersa.

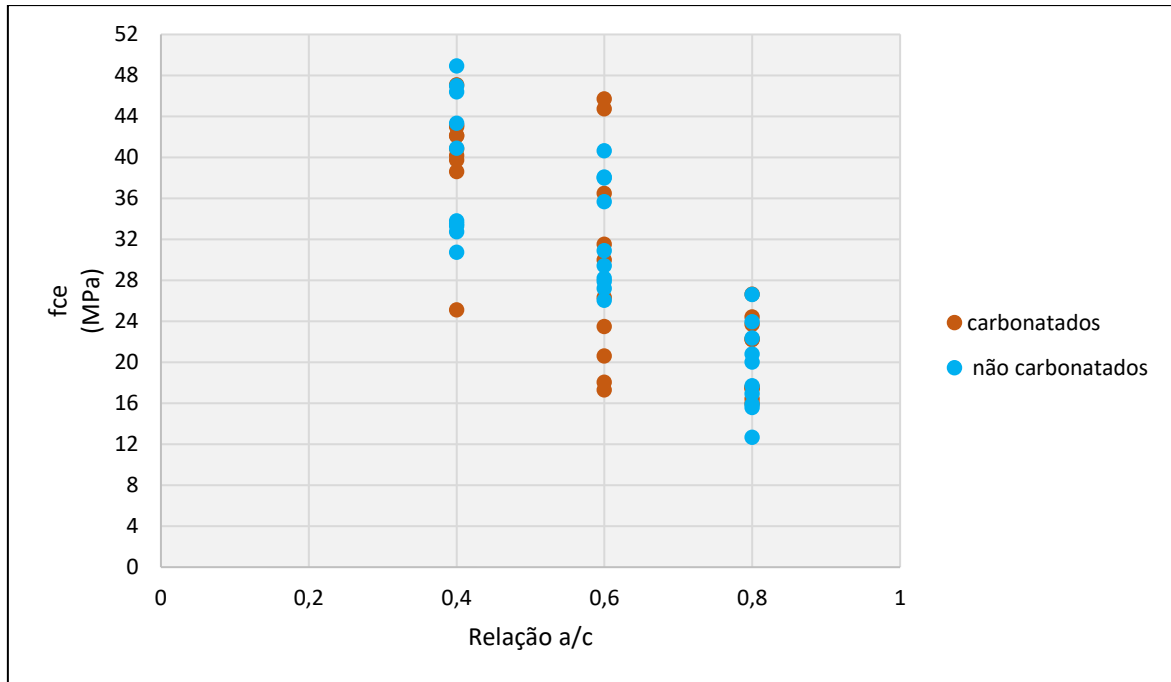
A mesma observação foi encontrada para os corpos de prova de traço 1:1:2, pois a profundidade de carbonatação foi menor para aqueles que foram submetidos a cura imersa de 28 dias, verificando e reafirmando o que a bibliografia disse, quando declarou que concretos sujeitos a longos tempos de cura inicial, diminui sua porosidade, devido a melhor hidratação do cimento, reduzindo o efeito da carbonatação.

Porém, a mesmo fundamento não foi encontrado para o traço 1:2:3, pois a profundidade de carbonatação aumentou para aqueles cuja cura úmida foram de 28 dias, resultado esse podendo estar influenciado pela maior presença de CO<sub>2</sub> na câmara de carbonatação.

## **5.2 Resistência a compressão dos moldes de concreto**

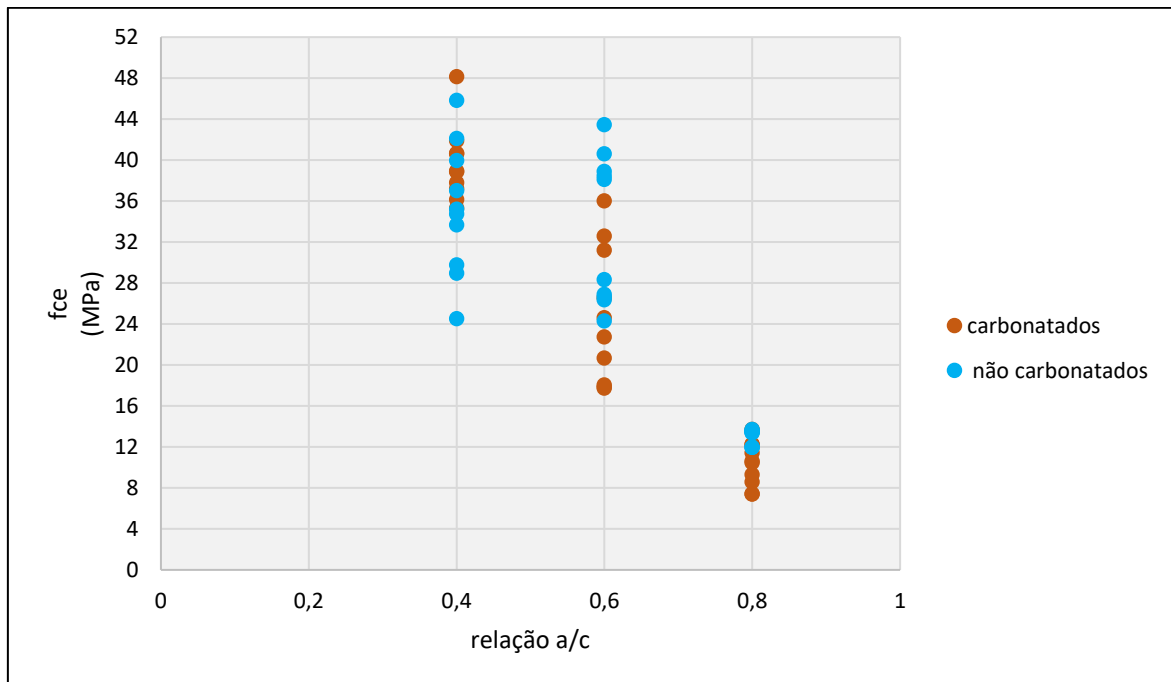
Com os resultados da resistência a compressão para cada método de ensaio não destrutivo, confeccionou-se gráficos de dispersão em que cada ponto se refere a resistência a compressão do molde para determinado traço com sua relação água/cimento, relacionando a resistência dos moldes carbonatados com os não carbonatados.

Figura 46 – Resistência a compressão pelo ensaio de ultrassom para o traço de 1:1:2



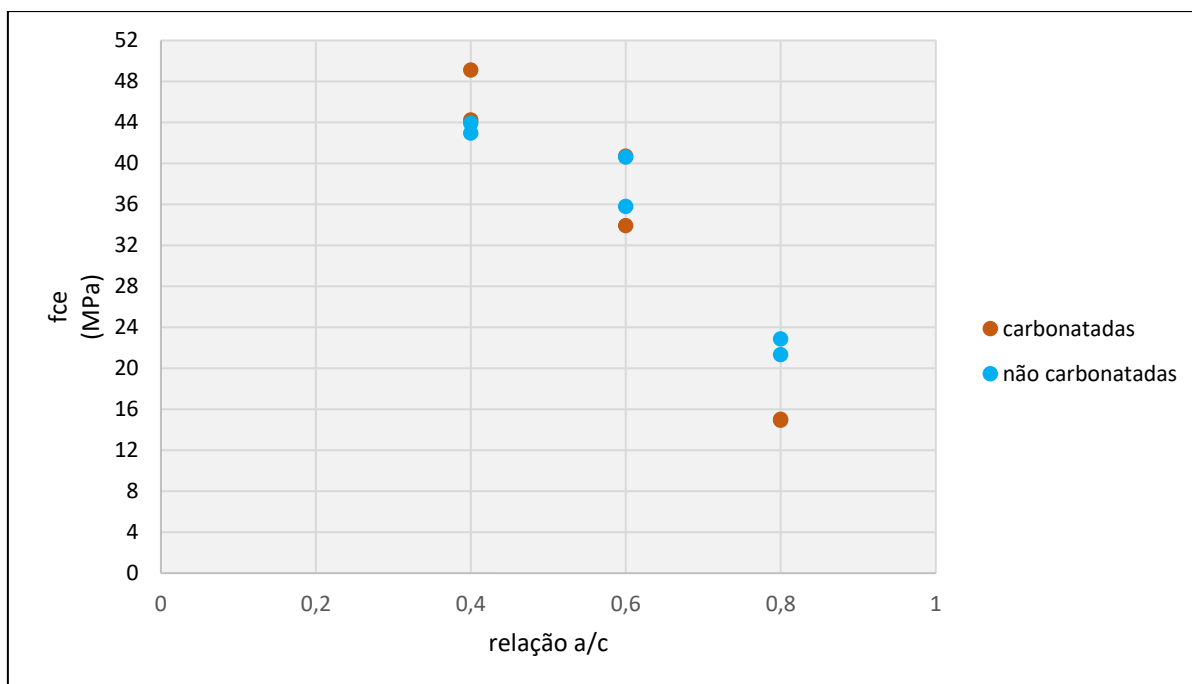
Fonte: Autor, 2018

Figura 47 – Resistência a compressão pelo ensaio de ultrassom para o traço de 1:2:3



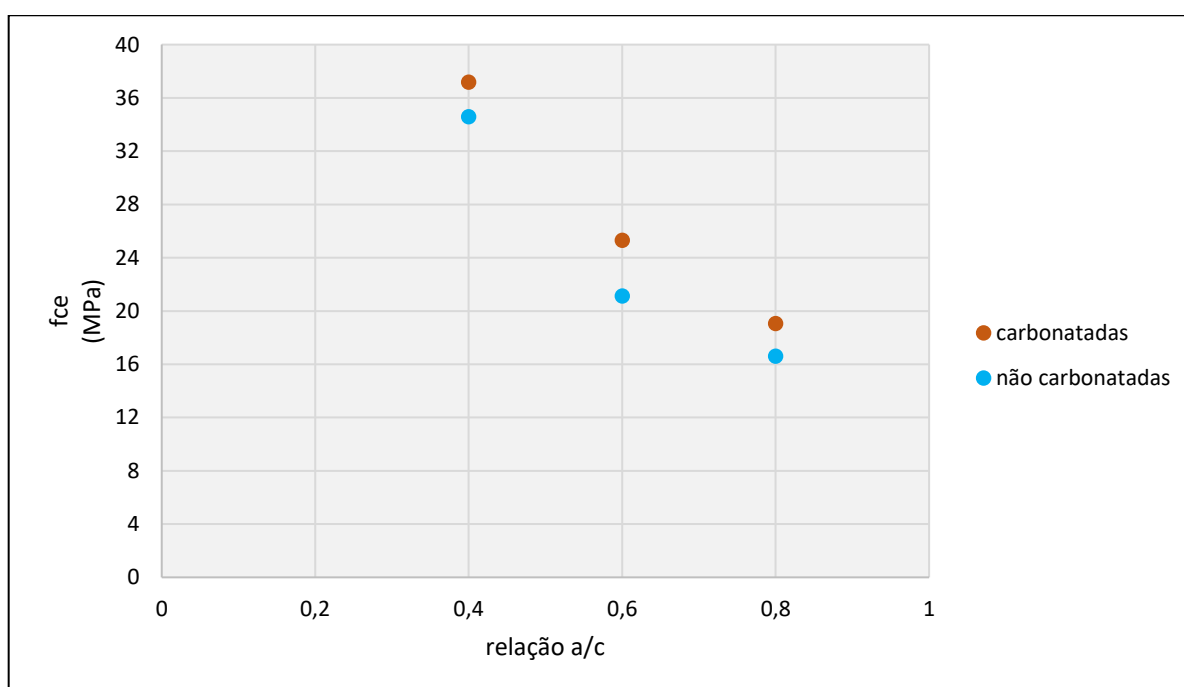
Fonte: Autor, 2018

Figura 48 – Resistência a compressão pelo ensaio esclerométrico para o traço de 1:1:2



Fonte: Autor, 2018

Figura 49 – Resistência a compressão pelo ensaio esclerométrico para o traço de 1:2:3



Fonte: Autor, 2018

Por meio da análise dos gráficos, é observado que nos ensaios de ultrassom, a resistência em alguns corpos de prova carbonatados foram maiores que os não carbonatados, por exemplo, na relação água/cimento de 0,6 e 0,8 para o traço 1:1:2 e na relação água/cimento de 0,4 para o traço 1:2:3. Nos ensaios de esclerometria, a resistência nas caixas cúbicas

carbonatadas foram todas maiores que as não carbonatadas para o traço de 1:2:3 e relações a/c distintas, porém, para o traço 1:1:2, a resistência dos carbonatados ultrapassou apenas para a relação a/c de 0,4.

Além disso, é válido destacar que todas as caixas cúbicas carbonatadas que continham um menor teor de cimento, as resistências foram todas superiores que as não carbonatadas. Entretanto, a mesma situação não foi constatada para os corpos de prova, pois a maior quantidade dos corpos de prova carbonatados com resistências superiores aos não carbonatados, foram encontrados apenas para a relação água/cimento de 0,4 de traço 1:2:3.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A grande capacidade de resistir a esforços compreensivos, são uma das características relevantes que o concreto possui, medido através de ensaios destrutivos ou não destrutivos. Os ensaios não destrutivos têm a capacidade de determinar as características e propriedades do concreto, localizando os defeitos internos que as peças de concreto pode vir a possuir, sem danificar o desempenho estrutural das peças ensaiadas, tornando o seu sistema vantajoso. Uma influência nos resultados obtidos pelos ensaios é um fenômeno denominado carbonatação, nascido quando o concreto está exposto à concentração de gás carbônico.

A partir dos estudos elaborados, em especial, na análise dos gráficos de dispersão, o fenômeno da carbonatação interferiu nos resultados da resistência a compressão do ensaio de ultrassom para as duas espécies de traço e melhorou também a dureza superficial do concreto, influenciando na leitura da resistência a compressão pelo esclerômetro, o que ocasiona em um falso diagnóstico de elevação da resistência do concreto. Uma vez que essa frente de carbonatação quanto mais avança para o interior do concreto, sua durabilidade fica comprometida.

Além disso, a porosidade é um fator que implica na durabilidade do concreto. Nos concretos moldados na pesquisa, os mais porosos foram confeccionados com a relação água/cimento de 0,8. Essa variedade de concreto obteve uma frente de carbonatação maior no interior do concreto, com uma média de aproximadamente 70% de diferença em comparação com a relação água/cimento de 0,4 das caixas cúbicas, o que ocasionou em resistências mais baixas.

Através da confecção dos moldes de concreto com diferentes relações água/cimento, foi possível analisar o comportamento crescente da frente de carbonatação e os fatores que o influenciam. Para relação água/cimento de 0,4, constatou-se que maiores resistências a compressão apresentaram menores profundidades de carbonatação e menor porosidade no concreto.

Um outro fator possível de analisar e influencia na velocidade de carbonatação é o teor de cimento no concreto. Para traço de 1:1:2, que continha maior quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  na pasta, a carbonatação dissipou de maneira mais lenta em comparação ao traço 1:2:3, pois sua profundidade de carbonatação foi menor. Portanto, os materiais e sua fração de uso são fatores que influenciam na velocidade e profundidade de carbonatação, podendo ocasionar em uma falsa resistência e mais elevada que a resistência real do concreto.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Estudo sobre as novas correlações da resistência a compressão para as diferentes faixas de idade dos concretos carbonatados;
- Estudo específico sobre as implicações da presença de CO<sub>2</sub> em estruturas de concreto armado.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7223:1998) **Determinação da Consistência pelo Tronco de Cone. SLUMP TEST.** Rio de Janeiro.

AITCIN, P-C. **Concreto de alto desempenho.** Tradução: Geraldo G. Serra. Ed. Pini. São Paulo, 2000.

ALMEIDA, L. C. **Concreto.**2002. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>>. Acesso em 18 maio de 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI - 228 - 1R - 89, 1989, **In place methods for determination of strength of concrete**, Detroit, 26pp.

ASSIS, A.P.; **Regressão e Correlação.** Brasília. 2011. 37p. Apostila do curso Métodos Estatística em Geotecnia. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pavimentação Permeável.** Disponível em:<[www.abcp.org.br](http://www.abcp.org.br)>. Acesso em 15 abril de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2014.

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, 2003.

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

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 9776. **Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655. **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931. **Execução de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **Cimento portland e outros materiais em pó** - Determinação da massa específica. 1. Ed. [S.I.]: [s.n], 2000.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. NM 53 **Agregado graúdo** – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 1. Ed. [S.I.]: [s.n], 2002.

AYDIN, F.; SARIBIYIK M. Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings. **Scientific Research and Essays** Vol. 5(13), 2010. pp. 1644-1648

BAKKER, F. M. Initiation period. In: SCHIESSL, P. (ed). &RUURVLRQ RI VWHHO LQ FRQFUHWH, RILEM Technical Committee 60 - CSC. London, Chapman e Hall, 1988

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 5º ed. Revisada, (reimpr.). v-1. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

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

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of Concrete in Structures**. Taylor & Francis eLibrary, 4th edition, 2006.

CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão do concreto utilizado usualmente na grande Florianópolis através de métodos de ensaios não destrutivos**. 2006. 152f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: PINI, 1988.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2012.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2003.

CASTRO, E. **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. 119f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto**. In: ISAIA, G. E. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. V. 2. 1984p.

CHUNG, H. W.; LAW, K. S. **Diagnosis in situ concrete by ultrasonic pulse technique**. Concrete International, October.1983.

ERCOLANI, G.D.; ORTEGA N.F.; SEÑAS L. Empleo de Ultrasonidos y Esclerometria en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. In: **IV Conferencia Panamericana de END**, Buenos Aires, Argentina, 2007. 10p.

ESTEVES, I. C. A. **Avaliação das estruturas de obra de artes especiais por métodos de ensaios não destrutivos**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, 2016.

EVANGELISTA, A. C., 2002. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 213f. 2002. Tese de Doutorado. UFRJ. Rio de Janeiro.

FERREIRA, G. **Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. 172f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Fatores Determinantes da Iniciação e Propagação da Corrosão da Armadura do Concreto**. São Paulo EPUSP-BT/PCC/121

FONTANA, T. B. **Ensaio não destrutivo para determinação da resistência à compressão sob tensão**. 180f. 2015. Monografia - Universidade Federal do Pampa. 2015.

FRASCÁ, M.H.B.O. 2003. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**. 281p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008

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

HELENE, Paulo. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras de concreto armado**. Tese de livre Docência, EPUSP, São Paulo, 1993.

HELENE, Paulo. **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001**. Workshop Sobre Durabilidade Das Construções. Novembro. São José dos Campos. 2001

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. **Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> through hydrated cement paste**. Cement and Concrete Research, vol. 24, p. 1165-1176, 1994.

IRIE, H., YOSHIDA, Y., SAKURADA Y., and ITO, T. 2008. **Non-destructive-testing Methods for Concrete Structures**. NTT Tech. Rev.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1º ed. v - 2 São Paulo: IBRACON, 2007.

KAPLAN, Fred. **The Year Everything Changed**. Disponível em:<<https://www.nytimes.com/2009/08/18/books/18cohen.html>> acesso em 06 de maio de 2018.

KAZMIERCZAK, C.S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação.** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 168p.

LIBÓRIO J. B. L. **Patologia das construções.** EESC – USP, 1998 /Notas de Aulas

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete.** 2. ed. West Conshohocken: Chemical Rubber Company Press, 2004

MALHOTRA, V. M. 1984. In Situ / Nondestructive Testing of Concrete - **A Global Review**, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1-16.

MALHOTRA, V.M.; NAIK, T.R.; Popovics, J.S., 2004. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete.** 2 ed. Boca Raton: CRC Press.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI. 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON. 2008.

NEPOMUCENO, M. C. S. **Ensaio não destrutivo em betão.** 1999. 469p. Tese – (Livre Docência) – Universidade da Beira Interior. Covilha, Portugal, 1999.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução Salvador E. Giamamusso, 2ª ed. São Paulo, PINI, 1997.

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

PALACIOS, M. P. G. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2012

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição.** 2009. Tese de Doutorado em co-tutela (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre .

PEREIRA, E.; ROCHA F.C.; GRECO, M.V.; FERREIRA, A.; MEDEIROS, M. Estimativa da resistência do concreto através de ensaios de esclerometria e “Pull Off”. In: **7º Congresso Internacional sobre Patologia e rehabilitación de las estructuras.** Fortaleza. Brasil. 2011.

PHOON, K.K., et al, 1999. Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method. **ACIMaterial Journal**. SeptemberOctober, p.568-573.

RILEM, NDT 1, 1972, **Testing of concrete by the ultrasonic pulse method**.

RILEM, 2012. Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-Art **Report of the RILEM Technical Committee.207-INR**. France.

SAHUINCO, M. H. C. **Utilização de Métodos não Destrutivos e Semi-destrutivos na Avaliação de Pontes de Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011

SCHICKERT, M. and M. KRAUSE, 2010. Ultrasonic evaluation of reinforced concrete structures. **Journal of Nondestructive evaluation**. 27, 1-3, pp. 5-21.

SILVA, D. R.. **Estudo de Inibidores de Corrosão em Concreto Armado, Visando a Melhoria na sua Durabilidade**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

SWAMY, R. N. and Al-Hamed, A. H., 1984.**The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-cured cube and hence in situ strength of concrete**. In Situ/Nondestructive Testing of Concrete. Special Publication SP-82. American Concrete Institute, Detroit.

TEODORU, G.V., 1988. **The use of simultaneous nondestructive tests to predict the compressive strength of concrete**. **Nondestructive Testing**. Special Publication SP112, American Concrete Institute, Detroit, pp137-152.

VECCA, C. R.; LUCERO R.S. **Parámetros que influyen en los resultados de los ensayos no destructivos de esclerometria y ultrasonido**. In: 1er Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Asunción, Paraguay, 2010. 8p.

WHITEHURST, E.A. 1951. **Soniscopes tests concrete structures**. J. Am. Concr. Inst. Proc. 47(6):433-448

ZANELLA, A. K. **Análise das Propriedades Mecânicas de Concretos para Pavimentação Empregando Diferentes Processos de Cura**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2014

**APÊNDICES**

## APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS

Tabela 1 – Granulometria da brita

<b>Peneira (mm)</b>	<b>% Retida média</b>	<b>% Retida acumulada</b>	<b>% Passante acumulada</b>
75	0,00	0,00	100,00
63	0,00	0,00	100,00
50	0,00	0,00	100,00
37,5	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
25	0,25	0,25	99,75
19	2,83	3,08	96,92
12,5	68,36	71,44	28,56
9,5	23,49	94,92	5,08
6,3	4,31	99,23	0,77
4,75	0,32	99,56	0,44
Fundo	0,44	100	0,0
Total	100		

Fonte: Autor, 2018

Tabela 2 – Granulometria da areia

<b>Peneira (mm)</b>	<b>% Retida média</b>	<b>% Retida acumulada</b>	<b>% Passante acumulada</b>
4,75	0,18	0,18	99,82
2,36	0,43	0,60	99,40
1,18	0,84	1,45	98,55
0,6	10,20	11,65	88,35
0,3	29,21	40,85	59,15
0,15	40,55	81,40	18,60
Fundo	18,60	100,00	0,00
Total	100		

Fonte: Autor, 2018

## APÊNDICE B – ROMPIMENTO DE CORPOS DE PROVA

Tabela 3 – Resistências do ensaio dos corpos de prova cilíndricos

CPs CARBONATADOS				
Nº	Traço – A/C	Dias de cura úmida	Força de ruptura (tf)	Resistência (MPa)
1	1:1:2 – 0,4	7	38,10	47,54
2	1:1:2 – 0,4	7	41,31	51,55
3	1:1:2 – 0,4	7	34,70	43,30
4	1:1:2 – 0,4	7	36,68	45,77
5	1:1:2 – 0,4	7	38,64	48,21
6	1:1:2 – 0,4	28	38,07	48,25
7	1:1:2 – 0,4	28	41,50	51,78
8	1:1:2 – 0,4	28	37,61	46,93
9	1:1:2 – 0,4	28	25,99	32,43
10	1:1:2 – 0,4	28	38,81	48,43
11	1:1:2 – 0,6	7	33,74	42,1
12	1:1:2 – 0,6	7	32,00	39,93
13	1:1:2 – 0,6	7	31,93	39,84
14	1:1:2 – 0,6	7	35,40	44,17
15	1:1:2 – 0,6	7	29,39	36,67
16	1:1:2 – 0,6	28	24,08	30,05
17	1:1:2 – 0,6	28	22,66	28,27
18	1:1:2 – 0,6	28	24,94	32,12
19	1:1:2 – 0,6	28	25,99	32,43
20	1:1:2 – 0,6	28	24,00	29,95

Fonte: Autor, 2018



Tabela 4 – Resistências do ensaio dos corpos de prova cilíndricos

CPs CARBONATADOS				
Nº	Traço – A/C	Dias de cura úmida	Força de ruptura (tf)	Resistência (MPa)
21	1:1:2 – 0,8	7	20,13	25,12
22	1:1:2 – 0,8	7	18,72	23,36
23	1:1:2 – 0,8	7	18,85	23,52
24	1:1:2 – 0,8	7	11,41	14,24
25	1:1:2 – 0,8	7	11,43	14,26
26	1:1:2 – 0,8	28	13,77	17,18
27	1:1:2 – 0,8	28	15,87	19,80
28	1:1:2 – 0,8	28	14,83	18,50
29	1:1:2 – 0,8	28	13,02	16,25
30	1:1:2 – 0,8	28	12,35	15,41
31	1:2:3 – 0,4	7	34,78	43,40
32	1:2:3 – 0,4	7	36,06	44,99
33	1:2:3 – 0,4	7	34,17	42,64
34	1:2:3 – 0,4	7	36,65	45,73
35	1:2:3 – 0,4	7	33,17	41,39
36	1:2:3 – 0,4	28	33,07	41,26
37	1:2:3 – 0,4	28	32,84	39,98
38	1:2:3 – 0,4	28	31,06	38,76
39	1:2:3 – 0,4	28	31,32	39,08
40	1:2:3 – 0,4	28	26,83	33,48

Fonte: Autor, 2018

Tabela 5 – Resistências do ensaio dos corpos de prova cilíndricos

CPs CARBONATADOS				
Nº	Traço – A/C	Dias de cura úmida	Força de ruptura (tf)	Resistência (MPa)
41	1:2:3 – 0,6	7	16,71	20,85
42	1:2:3 – 0,6	7	20,85	26,02
43	1:2:3 – 0,6	7	22,09	27,56
44	1:2:3 – 0,6	7	21,19	26,44
45	1:2:3 – 0,6	7	19,26	24,03
46	1:2:3 – 0,6	28	16,80	20,96
47	1:2:3 – 0,6	28	17,89	22,32
48	1:2:3 – 0,6	28	17,17	21,42
49	1:2:3 – 0,6	28	19,87	24,79
50	1:2:3 – 0,6	28	19,51	24,34
51	1:2:3 – 0,8	7	7,46	9,31
52	1:2:3 – 0,8	7	8,46	10,56
53	1:2:3 – 0,8	7	7,03	8,77
54	1:2:3 – 0,8	7	7,49	9,35
55	1:2:3 – 0,8	7	9,38	11,7
56	1:2:3 – 0,8	28	9,73	12,14
57	1:2:3 – 0,8	28	8,08	10,08
58	1:2:3 – 0,8	28	7,00	8,73
59	1:2:3 – 0,8	28	5,61	7,00
60	1:2:3 – 0,8	28	5,89	7,35

Fonte: Autor, 2018

Tabela 6 – Resistências do ensaio dos corpos de prova cilíndricos

CPs NÃO CARBONATADOS				
Nº	Traço – A/C	Dias de cura úmida	Força de ruptura (tf)	Resistência (MPa)
61	1:1:2 – 0,4	7	35,19	43,91
62	1:1:2 – 0,4	7	34,38	42,90
63	1:1:2 – 0,4	7	34,66	43,25
64	1:1:2 – 0,4	7	32,47	40,52
65	1:1:2 – 0,4	7	34,13	42,59
66	1:1:2 – 0,4	28	36,93	46,08
67	1:1:2 – 0,4	28	43,91	54,79
68	1:1:2 – 0,4	28	39,09	48,78
69	1:1:2 – 0,4	28	40,67	50,75
70	1:1:2 – 0,4	28	39,68	49,51
71	1:1:2 – 0,6	7	23,77	29,66
72	1:1:2 – 0,6	7	28,78	35,91
73	1:1:2 – 0,6	7	25,43	31,73
74	1:1:2 – 0,6	7	25,13	31,36
75	1:1:2 – 0,6	7	28,70	35,81
76	1:1:2 – 0,6	28	23,06	28,77
77	1:1:2 – 0,6	28	26,40	32,94
78	1:1:2 – 0,6	28	29,28	36,53
79	1:1:2 – 0,6	28	25,75	32,13
80	1:1:2 – 0,6	28	26,50	33,07

Fonte: Autor, 2018

Tabela 7 – Resistências do ensaio dos corpos de prova cilíndricos

CPs NÃO CARBONATADOS				
Nº	Traço – A/C	Dias de cura úmida	Força de ruptura (tf)	Resistência (MPa)
81	1:1:2 – 0,8	7	18,79	23,45
82	1:1:2 – 0,8	7	13,90	17,34
83	1:1:2 – 0,8	7	17,45	21,77
84	1:1:2 – 0,8	7	14,08	17,57
85	1:1:2 – 0,8	7	19,74	24,63
86	1:1:2 – 0,8	28	14,65	18,28
87	1:1:2 – 0,8	28	16,95	21,15
88	1:1:2 – 0,8	28	20,13	25,12
89	1:1:2 – 0,8	28	17,15	21,40
90	1:1:2 – 0,8	28	23,83	29,73
91	1:2:3 – 0,4	7	33,26	41,50
92	1:2:3 – 0,4	7	28,74	35,86
93	1:2:3 – 0,4	7	29,49	36,80
94	1:2:3 – 0,4	7	32,89	41,04
95	1:2:3 – 0,4	7	28,47	35,86
96	1:2:3 – 0,4	28	33,01	41,19
97	1:2:3 – 0,4	28	30,79	38,42
98	1:2:3 – 0,4	28	31,86	39,79
99	1:2:3 – 0,4	28	35,83	44,71
100	1:2:3 – 0,4	28	32,58	40,65

Fonte: Autor, 2018

Tabela 8 – Resistências do ensaio dos corpos de prova cilíndricos

CPs NÃO CARBONATADOS				
Nº	Traço – A/C	Dias de cura úmida	Força de ruptura (tf)	Resistência (MPa)
101	1:2:3 – 0,6	7	21,45	26,76
102	1:2:3 – 0,6	7	22,25	27,76
103	1:2:3 – 0,6	7	25,18	31,42
104	1:2:3 – 0,6	7	22,96	28,65
105	1:2:3 – 0,6	7	22,42	27,98
106	1:2:3 – 0,6	28	17,92	22,36
107	1:2:3 – 0,6	28	15,95	19,9
108	1:2:3 – 0,6	28	18,13	22,62
109	1:2:3 – 0,6	28	18,83	23,5
110	1:2:3 – 0,6	28	16,70	20,84
111	1:2:3 – 0,8	7	10,31	12,86
112	1:2:3 – 0,8	7	7,88	9,83
113	1:2:3 – 0,8	7	8,51	10,62
114	1:2:3 – 0,8	7	8,48	10,58
115	1:2:3 – 0,8	7	8,65	10,79
116	1:2:3 – 0,8	28	7,79	9,72
117	1:2:3 – 0,8	28	9,30	11,6
118	1:2:3 – 0,8	28	8,02	10,01
119	1:2:3 – 0,8	28	10,09	12,59
120	1:2:3 – 0,8	28	6,06	7,56

Fonte: Autor, 2018