

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DAS CONSTRUÇÕES E ESTRUTURAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**MATEUS JOSÉ BRANDÃO**

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO NOS  
ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM EM CONCRETO**

São Luís - MA  
2016

**MATEUS JOSÉ BRANDÃO**

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO NOS  
ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM EM CONCRETO**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros

Aguiar

Co-Orientador: Me. Jorge Antônio Silva Rayol

São Luís - MA  
2016

Brandão, Mateus José.

Análise de influência da carbonatação do concreto nos ensaios de esclerometria e ultrassom em concreto / Mateus José Brandão. – São Luís, 2016.

63f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar.

Co-Orientador: Me. Jorge Antônio Silva Rayol

1. Carbonatação. 2. Esclerometria. 3. Ultrassom. 4. Ensaios não-destrutivos. I. Título

CDU: 620.179-033.3

**MATEUS JOSÉ BRANDÃO**

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO NOS  
ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA E ULTRASSOM EM CONCRETO**

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

Aprovada em: 13 / 07 / 2016.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar**  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Co-Orientador: Me. Jorge Antônio Silva Rayol**  
Engenheiro Civil

---

**1º Membro: Prof. Solon Tupinambá Leite**  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**2º Membro: Prof. Me. Clodoaldo César Malheiros Ferreira**  
Universidade Estadual do Maranhão

São Luís – MA  
2016

*A meus pais e irmão.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a meus pais, Antônio José Brandão e Marta Helena Brandão, por tudo que fizeram, e fazem, por mim. Por seu amor, carinho, cuidado, dedicação à família e exemplo diário de integridade, honestidade e superação.

A meu pai novamente, por ser um exemplo de engenheiro, o qual sempre irei admirar e me espelhar.

Ao meu irmão, Rafael Antônio Brandão, pela amizade e exemplo de dedicação e amor a profissão.

A todos os familiares e amigos que mesmo longe me apoiam, incentivam e torcem por mim.

Aos meus avós (in memoriam).

Aos amigos e amigas da turma 2010.2 que dividiram esses anos de graduação comigo. Em especial ao Eng. Vinicius Balby, Vinicius Ribeiro, Raul Cutrim, Bruno Diniz e Mauricio Diniz, companheiros de carro em nossa jornada diária até a universidade.

A Mariana Bonfim pela amizade incentivo.

A Aline Pinheiro pelo companheirismo, incentivo e ajuda durante o último ano de graduação e na realização deste trabalho.

Ao Eng. Gustavo Henrique Beckman pelas orientações e conselhos que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar e meu co-orientador Me. Jorge Antônio Silva Rayol, por terem sido fundamental no desenvolvimento deste estudo.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão pela importante contribuição na minha formação profissional.

Ao laboratorista Jurandir Amorim Moraes Filho, por ter sido fundamental para a realização deste estudo, estando sempre disponível a colaborar e auxiliar quando necessário.

*“O maior inimigo do conhecimento não é ignorância, mas a ilusão do conhecimento.”*  
*Stephen Hawking*

## RESUMO

A avaliação da qualidade do concreto endurecido por meio de ensaios não destrutivos (ENDs) têm ganhado cada vez mais espaço na construção civil brasileira. Dentre os ensaios não destrutivos, os ensaios de esclerometria e ultrassom, devido a sua praticidade e custos, são os mais utilizados. Entretanto, estes ensaios são sensíveis a diversos fatores que podem influenciar nos seus resultados finais, por isso uma boa interpretação dos seus resultados é fundamental. O concreto ao longo de sua vida útil está suscetível ao ataque de diversos agentes químicos e físicos que podem comprometer suas propriedades. A carbonatação é um exemplo de reação química que ocorre no concreto. Esta reação acontece em função da penetração do  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera nos poros do concreto. A medida que a carbonatação avança, as partes carbonatadas vão tendo sua alcalinidade reduzida e os carbonatos resultante da reação vão se depositando nos poros do concreto. Desta forma, a parte de concreto carbonatada tem suas propriedades alteradas, tornando-se mais denso. Com isso, a pesquisa buscou analisar se essas mudanças ocorridas no concreto são influentes ou não nos ensaios ultrassom e esclerometria. Para isso os corpos de prova e cubos de concreto utilizados foram divididos em dois grupos. Um grupo foi colocado em uma câmara, na qual se injetou dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para criar um ambiente com alta concentração do gás e desta forma induzir a ocorrência acelerada da carbonatação. O outro grupo permaneceu em ambiente de laboratório, onde o processo de carbonatação ocorre à velocidade muito lenta. Os corpos de prova foram utilizados para o ensaio de ultrassom e os cubos para o de esclerometria. As peças de concreto foram então ensaiadas e tiveram sua profundidade de carbonatação medida. A frente de carbonatação observada se mostrou muito dispersa e pouco profunda de uma forma geral. O topo e fundo dos corpos de prova carbonatados apresentaram pequena profundidade da frente de carbonatação, já a superfície radial apresentou avanços significativos, porém, não considerada. Já os cubos de concreto carbonatados apresentaram uma superfície de carbonatação menor que 5 mm. Com os resultados dos ensaios em mãos, observou-se que para os níveis de carbonatação atingidos, não se observou nenhuma influência direta tanto na velocidade de propagação do pulso ultrassônico quanto no valor do índice esclerométrico.

**Palavras-chave:** Carbonatação, Esclerometria, Ultrassom, Ensaios não destrutivos.

## ABSTRACT

Evaluation of hardened concrete quality using nondestructive testing methods has been more widely used in Brazil. Among the many types of non-destructive testing, the ultrasonic pulse velocity method and the rebound test are those most applied ones due to their low cost and usability. However, many factors can have considerable influence on nondestructive tests results. For that reason, a proper analysis of the results is necessary for a good interpretation of the data. During its using life, concrete is susceptible to chemical and physical changes that can affect its properties and quality negatively. Concrete carbonation is an example of how a chemical reaction can act over concrete properties. It is a complex reaction that basically occurs due to carbon dioxide penetration through concrete pores. As the carbonation penetrates the concrete, the layers of carbonated concrete have an alkalinity decrease. On the other hand, concrete carbonation leads to a decrease of concrete porosity, what can be positive under some perspectives. This project aimed to analyze if changes on concrete properties due to carbonation reaction have any influence over ultrasonic pulse velocity and rebound test results. Cylindrical concrete specimens and concrete cubes were molded and then split into two groups. One of this groups was placed into a chamber with high concentration of carbon dioxide in order to induce and accelerate carbonation reaction. The other group was placed in the laboratory atmosphere and used as control sample. Both groups were then tested using ultrasonic pulse velocity and rebound test methods. Then the carbonation depth of the cylindrical concrete specimens and concrete cubes were measured and analyzed. The top and the bottom of the cylindrical specimens had low rate of carbonation and the measured depth was of only few millimeters. The same was observed in the concrete cubes, where the carbonated surface was less than five millimeters deep. Under the circumstances of concrete carbonation of this project, no influence over the results of the nondestructive testing methods applied was noticed.

**Key words:** Concrete Carbonation, Rebound test, Ultrasonic pulse velocity method, nondestructive testing methods

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do circuito de medição de velocidade de onda.....	21
Figura 2: Transmissão direta .....	22
Figura 3: Transmissão indireta .....	22
Figura 4: Transmissão semidireta.....	23
Figura 5: Típico contorno de velocidade de pulso ultrassônico em uma viga .....	27
Figura 6: Esquema representativo do mecanismo de carbonatação .....	30
Figura 7: Classes de agressividade ambiental .....	33
Figura 8: Esquema do ensaio de esclerometria e do martelo de Schimidt .....	34
Figura 9: Locais recomendados para utilização do esclerômetro em seções retangulares e T. ....	36
Figura 10: Corpos de prova recém moldados.....	41
Figura 11: Corpos de prova em processo de cura submersa. ....	42
Figura 12: Câmara de carbonatação com os corpos de prova para ensaio de ultrassom.....	43
Figura 13: Blocos de concreto na câmara de carbonatação.....	44
Figura 14: Corpos de prova capeados. ....	45
Figura 15: Capeador .....	45
Figura 16: Calibragem do equipamento. ....	46
Figura 17: Medição do corpo de prova.....	47
Figura 18: Equipamento utilizado na realização do ensaio. ....	48
Figura 19: Execução do ensaio de esclerometria.....	49
Figura 20: Corpo de prova posicionado para ensaio. ....	50
Figura 21: Medição da carbonatação em um corpo de prova.....	51
Figura 22: Aspersão da solução de fenolftaleína sobre o bloco .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio de ultrassom - corpos de prova carbonatados .....	52
Tabela 2: Ensaio ultrassom - corpos de prova não carbonatados .....	53
Tabela 3: Resultados dos ensaios de esclerometria .....	54
Tabela 4: Variação de velocidade - Traço 1 .....	55
Tabela 5: Variação de velocidade - Traço 2 .....	56
Tabela 6: Variação de velocidade - Traço 3 .....	56

## LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Norma Brasileira

NM - Norma Mercosul

LABCOM – Laboratório de Concreto e Materiais

UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

END – Ensaio não destrutivo

CP – Cimento Portland

I.E. – Índice Esclerométrico

## LISTA DE SÍMBOLOS

a/c – Água/Cimento

C - carbono

Ca(CO)<sub>3</sub> – carbonato de cálcio

Ca(OH)<sub>2</sub> - hidróxido de cálcio

CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono

E – módulo de elasticidade

H<sub>2</sub>O – molécula de água

kg – quilogramas

kg/m<sup>3</sup> – quilograma por metro cúbico

km/s – quilômetros por segundo

kN/mm<sup>2</sup> – quilo-Newton por milímetro quadrado

KOH – hidróxido de potássio

m/s – metros por segundo

mm -milímetro

MPa – mega Pascal

NaOH – hidróxido de sódio

pH – potencial hidrogeniônico

S - enxofre

s – segundo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Aspectos do Concreto .....</b>	<b>16</b>
3.1.1 Componentes Básicos.....	16
3.1.1.1 Cimento Portland.....	16
3.1.1.2 Agregados.....	16
3.1.1.2.1 Agregado Miúdo.....	17
3.1.1.2.2 Agregado Graúdo .....	17
3.1.2 Relação água/cimento (a/c) .....	17
3.1.3 Permeabilidade e Porosidade.....	17
3.1.4 Resistência à Compressão .....	18
3.1.4.1 Ensaios de resistência à compressão do concreto.....	18
<b>3.2 Ensaios não destrutivos em concreto endurecido .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Ensaio da velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto .....</b>	<b>19</b>
3.3.1 Descrição do método .....	19
3.3.2 Fatores de influência no resultado de leitura .....	23
3.3.2.1 Temperatura e Umidade .....	24
3.3.2.2 Tipo, quantidade e dimensão do agregado graúdo .....	24
3.3.2.3 Condições de superfície.....	24
3.3.2.4 Densidade do concreto e proporções de mistura .....	25
3.3.2.5 Presença de barras de aço no concreto, fissuras e falhas na concretagem.....	25
3.3.3 Aplicação, vantagens e limitações do ensaio.....	26
<b>3.4 Carbonatação do concreto .....</b>	<b>27</b>
3.4.1 Conceitos gerais.....	27
3.4.2 Forma de ocorrência da carbonatação .....	28
3.4.3 Fatores influenciadores de carbonatação .....	30
3.4.3.2 Tipo de cimento .....	31
3.4.3.3 Concentração de CO <sub>2</sub> e umidade relativa .....	31
3.4.3.4 Temperatura e ambiente de exposição.....	32

3.4.4 Medição da profundidade da carbonatação .....	33
<b>3.5 Ensaio de Esclerometria.....</b>	<b>34</b>
3.5.1 Descrição do método .....	34
3.5.2 Aplicação, vantagens e limitações.....	35
3.5.3 Recomendações normativas para execução do ensaio .....	35
3.5.3.1 Execução e recomendações para o ensaio .....	35
3.5.3.2 Análise dos resultados .....	36
3.5.4 Fatores de influência do índice esclerométrico .....	37
3.5.4.1 Teor e tipo de cimento .....	37
3.5.4.2 Agregado graúdo .....	38
3.5.4.3 Tipo de superfície, condição de umidade e carbonatação .....	38
3.5.4.4 Massa e compactação .....	38
3.5.4.5 Idade, taxa de dureza e tipo de cura.....	39
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1 Pesquisas Bibliográficas .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2 Atividades Laboratoriais .....</b>	<b>40</b>
4.2.1 Confeção e cura dos corpos de prova e blocos de concreto.....	40
4.2.1.1 Moldagem.....	41
4.2.1.2 Desmoldagem e processo de cura.....	42
4.2.2 Câmara de carbonatação.....	43
4.2.3 Capeamento .....	44
4.2.4 Ensaio de ultrassom .....	46
4.2.4.1 Calibragem do equipamento .....	46
4.2.4.2 Medição do corpo de prova .....	47
4.2.4.3 Aferição da velocidade de propagação nos corpos de prova.....	47
4.2.5 Ensaio de Esclerometria .....	48
4.2.6 Ensaio de resistência à compressão .....	49
4.2.7 Medição da carbonatação .....	50
<b>4.3 Resultados .....</b>	<b>51</b>
4.3.1 Carbonatação .....	51
4.3.2 Ensaio de Ultrassom .....	52
4.3.3 Ensaio de Esclerometria .....	53
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
<b>5.1 Carbonatação.....</b>	<b>55</b>

<b>5.2 Ensaio de Ultrassom .....</b>	<b>55</b>
<b>5.3 Ensaio de Esclerometria.....</b>	<b>57</b>
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A análise da qualidade e desempenho de uma peça estrutural de concreto geralmente é feita por meio da extração de testemunhos da própria estrutura. Muitas vezes, devido a seção da peça estrutural, fica-se impossibilitada a extração de tal testemunho, uma vez que o seccionamento causado para extração do testemunho pode comprometer a segurança da estrutura. Nesses casos, e em outros no qual não se deseja causar nenhum dano ao concreto a ser ensaiado, lança-se mão de algum método de ensaio não destrutivo.

Os ensaios não destrutivos de concreto são alternativas menos danosas a estrutura, uma vez que não necessitam a extrair testemunhos de concreto para análise, e são utilizados para verificar determinadas propriedades do concreto endurecido. Por meio desses ensaios, é possível, por exemplo, estimar o módulo de elasticidade de um determinado concreto, sua dureza superficial, detectar falhas de concretagem e até mesmo estimar a resistência à compressão do concreto, entre outros.

Muitos estudos são desenvolvidos com o objetivo de tentar aprimorar e aumentar o grau de confiabilidade dos resultados obtidos com esses ensaios. Por se tratar da análise de um material heterogêneo, como o concreto, os ensaios não destrutivos lidam com uma grande quantidade de variáveis que podem exercer influência no resultado final.

A carbonatação do concreto é uma reação química que pode ocorrer ao longo dos anos e, que por alterar o pH do concreto, pode (dependendo de sua profundidade) comprometer a proteção das armaduras presentes no concreto armado. Tal fato, contribui para a redução da durabilidade, eficiência e segurança da estrutura. A literatura existente afirma que a carbonatação altera, também, a dureza superficial do concreto, uma vez que a medida que a reação se desenvolve, os poros existentes no concreto vão sendo preenchidos.

Frente a essas situações, surgem as seguintes indagações: a reação de carbonatação do concreto é capaz de ser um fator de influência nos resultados de ensaios não destrutivos de concreto utilizando ultrassom e esclerômetro? O quão significativa é essa influência para o resultado final dos ensaios, numa eventual avaliação da qualidade do concreto ensaiado?

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar se há influência ou não da carbonatação do concreto sobre o índice esclerométrico (obtido através do ensaio de esclerometria) e sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica, obtido através do ensaio de ultrassom em concreto.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a influência da carbonatação na estimativa de resistência à compressão do concreto quando o mesmo é ensaiado utilizando-se ultrassom ou esclerômetro;
- Investigar a existência de relação ou não entre a profundidade de carbonatação e variação do índice esclerométrico.
- Investigar a existência de relação ou não entre a profundidade de carbonatação e variação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.
- Identificar eventual influência da carbonatação na resistência do concreto.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Aspectos do Concreto

O concreto é o resultado de uma mistura, devidamente dosada e preparada, de: agregado miúdo, agregado graúdo, aglomerante (cimento Portland) e água. Alguns aditivos químicos ou outros componentes podem ser adicionados à mistura com a finalidade de melhorar algumas das propriedades do concreto. Chama-se pasta, a mistura entre aglomerante (grãos de cimento) e solução aquosa. Denomina-se matriz o conjunto formado pela pasta mais os espaços vazios preenchidos por ar.

Segundo Carvalho e Filho (2011), o concreto é um material composto por elementos em fases gasosa, líquida, gel e sólida, caracterizando-o como heterogêneo. Em nível macroscópico, o concreto pode ser considerado bifásico, basicamente constituído por partículas de agregados dispersos em uma matriz de pasta de cimento. Entretanto, à níveis microscópicos, fica evidente que essas duas fases não estão homogeneamente distribuídas nem são homogêneas entre si (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Devido a essa característica heterogênea apresentada pelo concreto, vários aspectos podem influenciar na sua qualidade final.

#### 3.1.1 Componentes Básicos

##### 3.1.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é o aglomerante amplamente utilizado na construção civil para a produção de concreto.

Cimento Portland é o produto obtido pela pulverização de clínquer constituído basicamente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego (BAUER, 2000, p. 35).

##### 3.1.1.2 Agregados

Segundo Bauer (2000), agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de mistura de partículas que cobrem uma extensa gama de tamanhos. Podem ser classificados de acordo com sua origem entre agregados naturais e

industrializados; quanto às dimensões das partículas, dividindo-os entre agregados graúdos e miúdos; e pelo seu peso específico aparente, classificando-os como leves, médios ou pesados.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define os agregados para concreto por meio da NBR 7211:2009.

#### 3.1.1.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo mais comum na construção civil é a areia. De acordo com Bauer (2000) é um sedimento clástico não consolidado, e seus grãos são, em geral, quartzosos. De acordo com a NBR 7211:2009, agregado miúdo é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm até a peneira de 0,075 mm.

#### 3.1.1.2.2 Agregado Graúdo

Os agregados graúdos são caracterizados pelas britas (agregados artificiais) e cascalho (agregado natural). A pedra britada, ou simplesmente brita, é amplamente utilizada. Caracteriza-se por ser o produto da quebra de rochas. Possui uma resistência à compressão geralmente maior que a do concreto e é classificada de acordo com sua granulometria como pó de brita, pedrisco (também conhecido como brita 0), brita 1, brita 2, brita 3, brita 4. Para a NBR 7211:2009, é agregado graúdo todo material que se encontra na faixa granulométrica entre 4,8 e 152 mm.

#### 3.1.2 Relação água/cimento ( $a/c$ )

É a relação direta entre a quantidade de água e cimento usada na dosagem do concreto. Possui influência direta na resistência final do concreto e também na sua porosidade. “[...] a relação  $a/c$ -resistência no concreto pode ser facilmente explicada como consequência natural do enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade com o aumento da relação água/cimento” (METHA E MONTEIRO, 2008, p. 54).

#### 3.1.3 Permeabilidade e Porosidade

O concreto é um material poroso em função de diversos fatores. Para Bauer (2000) os vazios presentes no concreto são de origens diversas, podendo ser consequência de excesso

de água na mistura, ar incorporado, eventuais fissuras, má dosagem, dentre outros. A permeabilidade de um concreto tem influência direta na sua durabilidade à medida que concretos mais porosos estão mais vulneráveis a ataques de agentes agressivos. De acordo com Metha e Monteiro (2008) em materiais multifásicos como o concreto, a porosidade de cada componente da microestrutura pode se tornar um fator limitante para a resistência.

### 3.1.4 Resistência à Compressão

A resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante para projetistas e engenheiros de qualidade. Ela está condicionada a uma série de variáveis e fatores uma vez que, o concreto, é um material heterogêneo. Os valores da resistência e outras propriedades do concreto endurecido são limitados pela composição da matriz, particularmente pelo seu teor de cimento (BAUER, 2000).

Como já citado, a relação água/cimento é considerada o principal fator relacionado à resistência final do concreto. Entretanto, Metha e Monteiro (2008) afirmam que outros fatores como o adensamento, as condições de cura, mineralogia e dimensão do agregado, tipos de aditivos, adições, condições de umidade e geometria do corpo de prova, tipo de tensão e velocidade de carregamento também podem vir a ter efeito importante sobre a resistência.

#### 3.1.4.1 Ensaios de resistência à compressão do concreto

O concreto utilizado na construção civil sempre passa por testes que certificam a sua resistência à compressão e a conformidade do que fora produzido com o solicitado em projeto. Para construções novas, o usual é a retirada de amostras do concreto fresco que serão então utilizadas para a moldagem de corpos de prova, geralmente cilíndricos no território brasileiro, para então, após determinados prazos de cura, serem testados à compressão. No Brasil, a moldagem de corpos de prova de concreto fresco e o procedimento para o ensaio de compressão axial seguem as orientações prescritas nas NBR's 5738:2015 e 5739:2007, respectivamente. Já a NBR NM 33:1998 orienta quanto à amostragem do concreto fresco.

Quando se trata de obras já executadas, construções antigas ou qualquer peça estrutural da qual deseja-se saber a resistência à compressão do concreto utilizado, outros métodos de ensaios do concreto devem ser considerados, como a extração de testemunho de concreto ou ensaios não destrutivos.

### 3.2 Ensaios não destrutivos em concreto endurecido

A necessidade de avaliar concretos endurecidos sem causar danos à estrutura, levou ao desenvolvimento de técnicas de ensaios não destrutivos (END), nos quais vêm se difundindo cada vez mais no meio da construção civil brasileira. Os métodos de ENDs mais comuns (devido sua facilidade de execução, custo e praticidade) são a esclerometria e o ensaio de propagação de pulso ultrassônico.

Nenhum método de ensaio não destrutivo, entretanto, avalia diretamente a resistência à compressão do concreto avaliado. Porém, é possível correlacionar os resultados obtidos nestes ensaios para estimar a resistência do concreto. Além dos dois métodos já citados, são classificados como ENDs, entre outros, os seguintes ensaios:

- Ensaio de resistividade elétrica do concreto;
- Ensaio de determinação do potencial de corrosão;
- Método de penetração de pino
- Método “pull-off”.

### 3.3 Ensaio da velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto

#### 3.3.1 Descrição do método

A velocidade de propagação de onda ultrassônica em concretos, vem sendo utilizada há muitos anos para detectar eventuais falhas de concretagem e para verificação de suas diversas propriedades e características como: seu módulo de elasticidade, densidade, estimativa de resistência à compressão. Segundo Bungey, Millard e Grantham (2006) a velocidade de propagação depende mais das propriedades elásticas do material e quase não depende da sua geometria. Essa relação pode ser notada na equação 1:

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (1)$$

$$\text{para } K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

Onde:

V = Velocidade da onda (km/s)

E<sub>d</sub> = Módulo de elasticidade dinâmico (kN/mm<sup>2</sup>)

$\rho$  = massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )

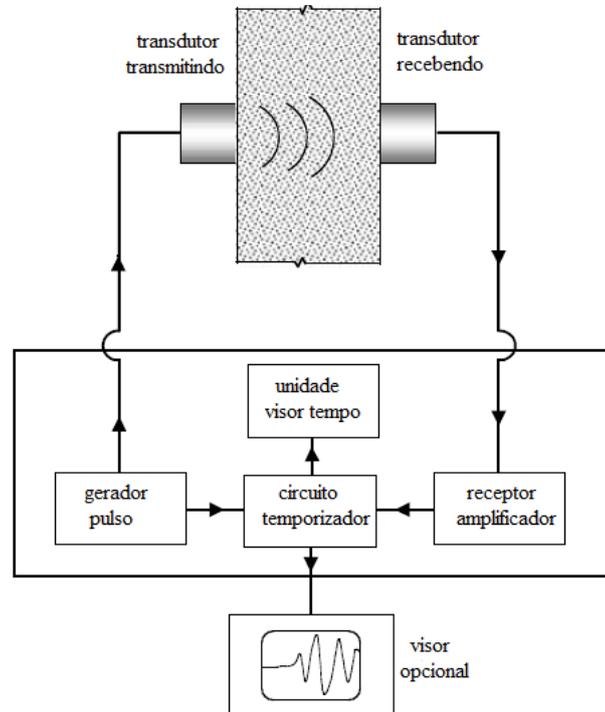
$\nu$  = coeficiente de Poisson dinâmico

O método de ensaio utilizando um equipamento de ultrassom é considerado de simples execução. No Brasil, a NBR 8802:2013 (ABNT) descreve e normaliza o ensaio. Ele mede o tempo de propagação da onda ultrassônica no concreto entre o ponto emissor e o ponto receptor (chamados de transdutores), sendo a medição do tempo feita eletronicamente pelo equipamento.

“Um pulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor eletroacústico que é posto em contato com a superfície do concreto submetido ao ensaio através de um material específico[...]” (CAVALCANTI, 2010, p. 39). Este material será responsável pelo bom acoplamento do transdutor à superfície do concreto e, por consequência, na boa propagação da onda. Pode-se fazer uso de vaselina, creme de barbear, graxa de rolamento ou gel, por exemplo, sendo importante utilizar apenas uma pequena camada para evitar a presença de ar entre o transdutor e a superfície. Quanto ao equipamento de ultrassom, segundo Samaniego (2014, p. 47):

Para concreto são geralmente utilizados os transdutores com frequências de 25 a 100 kHz. Transdutores de alta frequência (acima de 100 kHz) são usados para amostras de tamanho pequeno com comprimento do trajeto relativamente curto, ou para concretos de alta resistência. Enquanto que transdutores de baixa frequência (abaixo de 25 kHz) são usados para amostras maiores cujo comprimento de trajeto é relativamente mais longo, ou concretos com agregados de maior tamanho.

Figura 1: Esquema do circuito de medição de velocidade de onda.



Fonte: Malhotra, 2004 (apud SAMANIEGO, 2014)

O comprimento percorrido ( $l$ ) entre os transdutores dividido pelo tempo ( $t$ ) de propagação, resulta na velocidade média de propagação da onda (MALHOTRA, 1984 apud EVANGELISTA 2002). Isso resulta na relação abaixo:

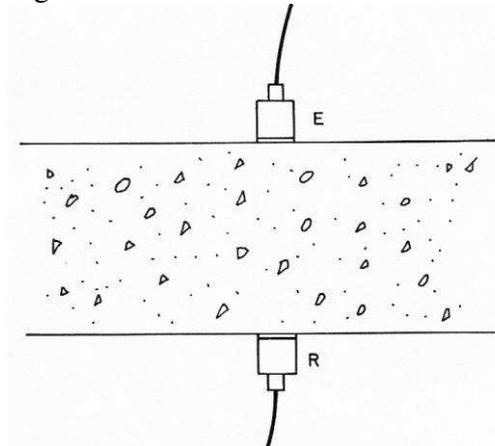
$$V = \frac{l}{t} \quad (2)$$

A norma recomenda que as superfícies onde se posicionarão os transdutores sejam planas, lisas e isentas de sujeira. Caso os corpos de prova ou peças a serem ensaiadas não sejam lisas o suficiente, é permitido uma regularização com pasta de cimento ou através de algum processo mecânico, desde que este não prejudique ou cause danos internos ao concreto.

O tempo de propagação das ondas ultrassônicas pode ser medido de três maneiras distintas dependendo da posição dos transdutores. De acordo com a NBR 8802:2013, a medição pode ser: direta, indireta e semidireta.

A transmissão direta se dá com o posicionamento dos transdutores em faces opostas da peça a ser ensaiada. Este posicionamento é o mais recomendado pois possibilita uma maior intensidade no sinal recebido, reduzindo a inconsistência na leitura.

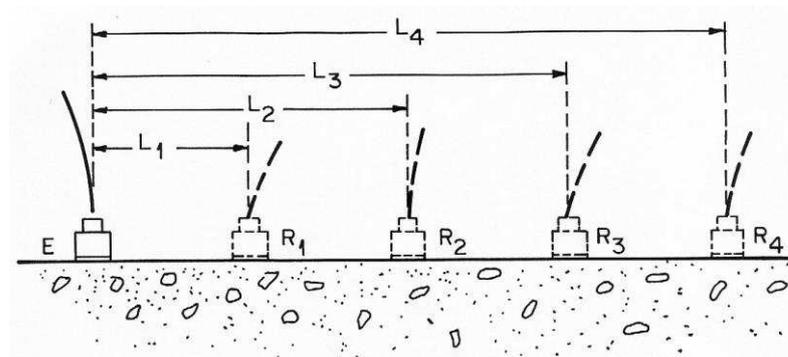
Figura 2: Transmissão direta



Fonte: NBR 8802:2013

A transmissão indireta deve ser feita quando se tiver acesso apenas a uma das faces do componente a ser ensaiado. Para tanto, é necessário que o mesmo possua comprimento suficiente para o deslocamento do transdutor-receptor em relação ao transdutor-emissor, que deverá ficar em um ponto fixo.

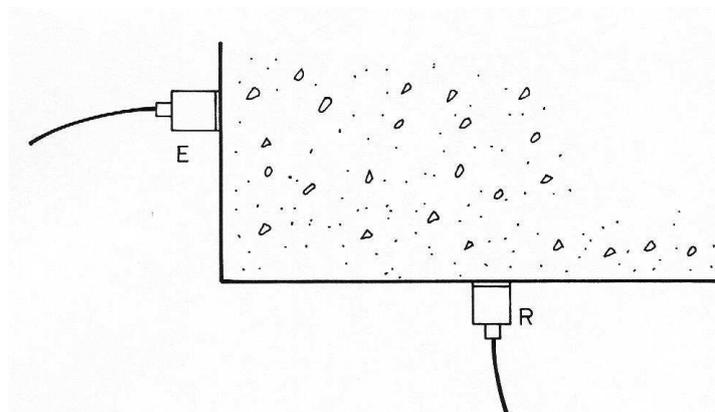
Figura 3: Transmissão indireta



Fonte: NBR 8802:2013

A transmissão semidireta é utilizada quando não há acesso à duas faces opostas do componente e nem comprimento suficiente para a realização da leitura indireta.

Figura 4: Transmissão semidireta



Fonte: NBR 8802:2013

### 3.3.2 Fatores de influência no resultado de leitura

A NBR 8802/2014, em seu anexo, C cita os principais fatores de influência nos resultados obtidos no ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda. São eles:

1. Distância entre a superfície de contato dos transdutores;
2. Presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda;
3. Densidade do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem;
4. Tipo, densidade e outras características do agregado;
5. Tipo de cimento e grau de hidratação;
6. Direção de ensaio da peça;
7. Tipo de adensamento do concreto;
8. Idade do concreto.

Na literatura é possível encontrar uma quantidade significativa de fatores que podem ser considerados como influentes nos resultados. Entretanto, alguns são destacados como principais devido à facilidade com a qual são detectados, ou por serem possíveis de controlar.

### 3.3.2.1 Temperatura e Umidade

De acordo com Bungey, Millard e Grantham (2006) a variação da temperatura não exerce uma importante influência na velocidade do pulso ultrassônico, entretanto, quando se trata de temperaturas extremas (abaixo de 0°C ou acima de 40°C) deve ser feita uma correção. Para temperaturas entre 40°C e 60°C, há redução de velocidade causada pela microfissuração interna do concreto, mas que não corresponde a uma redução na resistência. Caso haja congelamento, a velocidade de propagação aumenta devido a água congelada no interior do concreto (EVANGELISTA, 2002).

Bauer (2000) afirma que há um aumento de 3 a 6% na velocidade do pulso ultrassônico quando se compara concretos úmidos e secos. Isso se deve provavelmente ao fato de que a água presente no concreto preenche seus poros, resultando num aumento da velocidade de propagação (FERREIRA, 2011).

### 3.3.2.2 Tipo, quantidade e dimensão do agregado graúdo

Chung e Law (1983 apud CAVALCANTI, 2010) citam que, em geral, os agregados graúdos têm módulo de elasticidade e velocidade de propagação de onda maior do que o da pasta de cimento, dessa forma, concretos com agregados de massas específicas maiores ou com maiores quantidades de agregado apresentam maior velocidade. Em seus estudos, Evangelista (2002) relatou que para concretos com agregado graúdo de dimensão máxima de 19 mm, observou-se um aumento da velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos de cerca de 2,5% a 11% quando comparados com as velocidades obtidas em amostras de concreto com agregados de diâmetro máximo de 9,5 mm. Bauer (2000) relata que há uma grande variação na velocidade quando se ensaiam concretos cuja diferença de densidade se deve a utilização de agregados diferentes.

### 3.3.2.3 Condições de superfície

A NBR 8802:2013 (ABNT) define que a superfície da peça a ser ensaiada deve ser lisa, plana e isenta de sujeira. Caso seja necessário, é possível realizar a regularização da superfície através de um processo mecânico ou utilizando uma fina camada de pasta de gesso, cimento ou resina epóxi.

#### 3.3.2.4 Densidade do concreto e proporções de mistura

Em geral, verifica-se um aumento na velocidade de propagação do pulso ultrassônico em concretos mais densos. Porém, Bauer (2000) observa que quando o concreto é produzido com os mesmos materiais, variando-se apenas o seu traço, não há uma variação tão significativa na velocidade de propagação do pulso ultrassônico (ao contrário do que ocorre com a resistência do concreto). Ferreira (2011) relata que mantendo os demais parâmetros constantes e aumentando apenas o volume de agregado no concreto, observa-se um aumento na velocidade de propagação. Já a relação água/cimento tem influência considerada insignificante, pois, são as propriedades elásticas do concreto (massa específica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson) que estão relacionados com a velocidade de propagação e não sua resistência (Nogueira e Willian, 2001, Apud Ferreira, 2011)

#### 3.3.2.5 Presença de barras de aço no concreto, fissuras e falhas na concretagem

A presença de armadura no concreto altera a velocidade com que as ondas irão se propagar entres os transdutores. Essa diferença dependerá em função da disposição das barras em relação ao transdutor. Para o caso de barras paralelas ao sentido de propagação das ondas, parte delas podem se propagar pelo concreto e pelas barras de aço, onde a velocidade de propagação das ondas é em torno de 1,2 a 1,9 vezes maior que no concreto, resultando em uma velocidade de propagação maior (EVANGELISTA, 2002). Em concretos com velocidade de propagação superior a 4,0 km/s, barras de até 20 mm, dispostas transversalmente ao sentido de propagação da onda, têm efeito insignificante na medição da velocidade da onda (BUNGEY, MILLARD E GRANTHAM, 2006). Ainda segundo o autor, sempre que possível deve-se evitar zonas com alta densidade de armadura, e, caso isso não seja possível, deve-se buscar corrigir os valores medidos.

A detecção de falhas de concretagem e fissuras no concreto utilizando-se ultrassom é muito usual devido a sensibilidade do aparelho para detecção dessas patologias. Bauer (2000, p. 342) relata que ensaios realizados em várias obras pelo Brasil demonstram que:

1. em regiões nas quais o concreto apresenta falhas de concretagem (ninhos) ou material segregado há uma diminuição sensível na velocidade de propagação;
2. para falhas cujas dimensões possam ser percebidas com a remoção cuidadosa das camadas de concreto bom que as encobrem, a diminuição de velocidade é

de pelo menos 15 a 20%, chegando até a haver a interrupção do recebimento do sinal sonoro quando se trata de falhas de grandes dimensões;

3. é difícil e bastante imprecisa a tentativa de determinação das dimensões dos vazios( e/ou volume de vazios) em função do decréscimo de velocidade.

### 3.3.3 Aplicação, vantagens e limitações do ensaio

Trata-se de um ensaio muito simples de se realizar e que permite a obtenção de uma grande quantidade de dados em pouco tempo. Evangelista (2002) fala que uma boa ligação entre os transdutores e uma boa interpretação dos dados são pontos críticos deste ensaio.

A NBR 8802:1994 descreve que o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas tem como principais aplicações:

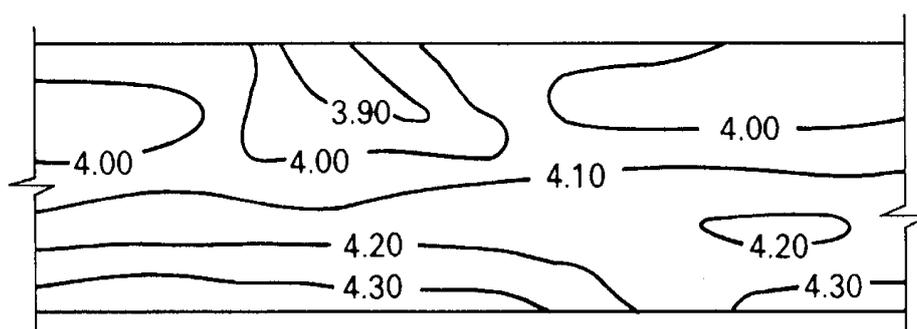
1. Verificação de homogeneidade do concreto;
2. Detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições;
3. Monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes da agressividade do meio (ataque químico) principalmente pela ação de sulfatos.

Conforme já citado, o ensaio também é utilizado para estimar o módulo de elasticidade dinâmica do concreto, bem como sua resistência à compressão. Entretanto, é necessário ter muito cuidado com a utilização de equações de correlação, em função da heterogeneidade do concreto e dos já apresentados fatores de influência sobre os resultados. Segundo Focaoaru (1984, Apud EVANGELISTA, 2002, p. 42), a acurácia da estimativa de resistência do concreto através do ensaio de ultrassom é:

1. De 12 a 16% - quando disponíveis corpos de prova ou testemunhos e se conhece a composição do concreto,
2. 14 a 18% - quando estão disponíveis apenas corpos de prova ou testemunhos,
3. 18 a 25% - quando se conhece apenas a composição do concreto,
4. Acima de 30% - quando não estão disponíveis corpos de prova ou testemunhos e nem se conhece a composição do concreto, dependendo apenas da experiência do profissional e da existência de dados auxiliares.

Bungey, Millard e Grantham (2006) afirma que ao menos que uma curva de correlação adequada seja obtida, é praticamente impossível estimar a resistência de uma peça de concreto *in situ*. Por este motivo, o autor explica que esta é a aplicação menos confiável que este ensaio possui. Entretanto, ressalta que é confiável quando se trata da investigação do interior do concreto. Eles complementam afirmando que uma variação de mais de 2% na velocidade de propagação é necessária para refletir uma variação significativa na propriedade do concreto.

Figura 5: Típico contorno de velocidade de pulso ultrassônico em uma viga

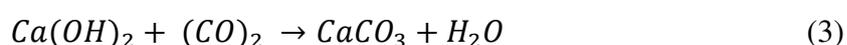


Fonte: Bungey, Millard e Grantham (2006)

### 3.4 Carbonatação do concreto

#### 3.4.1 Conceitos gerais

A carbonatação do concreto é um complexo processo físico-químico que ocorre com a entrada do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente no ambiente para dentro do concreto, onde irá reagir com produtos alcalinos presentes no material. “A alcalinidade do concreto é conferida principalmente pela presença do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e de potássio ( $\text{KOH}$ ), dissolvidos ou precipitados no concreto endurecido” (POSSAN, 2004, p.32). A penetração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no concreto ao longo do tempo pode reduzir sua alcalinidade, de acordo com Pauletti (2004), os compostos do cimento são gradualmente substituídos por carbonatos, por meio de reações com o  $\text{CO}_2$  e outros gases, sendo um processo que ocorre lentamente. As reações ocorrem conforme a seguinte equação simplificada:



Observa-se na equação (3) que os produtos da reação são água ( $H_2O$ ) e carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). A reação de carbonatação resulta, segundo Bakker (1988, apud POSSAN, 2004), na redução do pH do concreto que, em condições normais, é em torno de 12,5, para valores iguais ou inferiores a 9. Isaia (1999, apud PAULETTI, 2004) explica que essa redução ocorre porque, quando o  $Ca(OH)_2$  é transformado em carbonato, ele precipita, levando a uma diminuição de sua concentração na solução dos poros, possibilitando a dissolução de mais  $Ca(OH)_2$  para reestabelecer o equilíbrio, causando uma diminuição da reserva alcalina. Dessa forma, imagina-se que esta reação poderia ocorrer ao longo do tempo em todo o concreto, chegando a uma situação de carbonatação total. Neville (1997), contudo, diz que a carbonatação é um processo lento e que apresenta uma velocidade decrescente. Isso se deve a uma alteração na rede de poros causada pela precipitação de  $CaCO_3$ , que forma uma barreira física, limitando a velocidade de carbonatação do concreto (POSSAN, 2004).

Tuutti (apud PAULETTI, 2004) sugere que a carbonatação faça parte do processo de iniciação da corrosão, uma vez que diminui a estabilidade química da capa protetora ou película passivadora do aço. Com isso, dependendo da profundidade de concreto carbonatada, da qualidade do concreto e da espessura de recobrimento, a armadura fica suscetível à corrosão. Silva (1995) indica ainda que o fenômeno provoca retração por carbonatação, o que induziria tensões adicionais de tração, levando a uma tendência de aumento da fissuração.

Araújo (2009), contudo, afirma que apesar do aumento da retração, a carbonatação não prejudica o concreto, e que, inclusive, diminui sua permeabilidade, tornando-o mais impermeável a agentes agressivos do que em concretos não carbonatados. Ainda segundo o autor, o principal problema da carbonatação está relacionado à possibilidade de corrosão da armadura.

Atualmente o Brasil dispõe de uma norma para ensaio de carbonatação. Muitos pesquisadores têm trabalhado com a carbonatação ao longo dos últimos anos, entretanto, seguem métodos diferentes para ensaiar o processo de carbonatação do concreto. Pauletti (2004) afirma que “as pesquisas existentes seguem caminhos diferentes, havendo uma necessidade de padronização para estes ensaios no intuito de poder enriquecer as pesquisas e então poder compará-las entre si”.

### 3.4.2 Forma de ocorrência da carbonatação

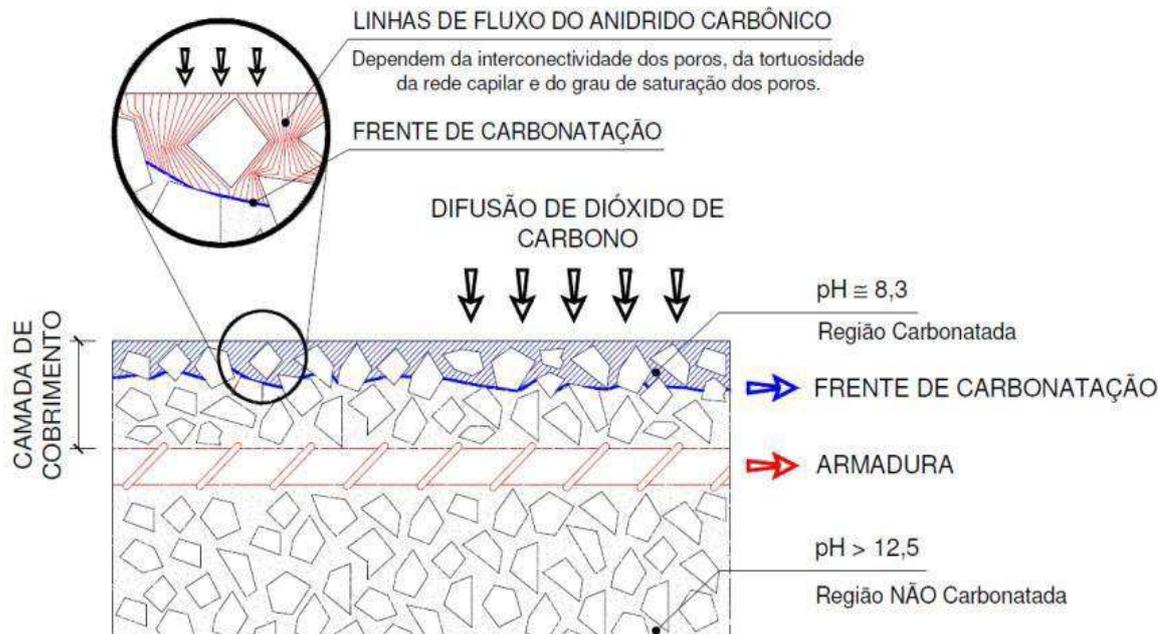
O processo de carbonatação ocorre da superfície para o interior do concreto, ou seja, de fora para dentro. Segundo Possan (2004) forma-se uma “frente de carbonatação”, que seria

uma zona que separa duas camadas de pH distintos, sendo uma carbonatada e a outra não, estando o seu avanço relacionado à facilidade com que o  $\text{CO}_2$  penetra o interior do concreto. Por ser um material poroso, devido à sua característica heterogênea, o concreto pode ficar suscetível à carbonatação, por exemplo, quando indevidamente dosado. Bauer (2000) observa que os vazios existentes no concreto são geralmente interligados, o que o faz permeável a líquidos e gases, tornando sua permeabilidade uma propriedade importante para sua durabilidade.

Segundo Vasconcelos (1997), o principal mecanismo de transporte que favorece a penetração de  $\text{CO}_2$  é a difusão. Devido a diferença de concentração de  $\text{CO}_2$  no exterior e no interior do concreto, ele tende a penetrar lentamente pelos poros do concreto. De acordo com Kazmierczak et al (2009) o mecanismo de carbonatação pode ser simplificado como a seguir:

- 1- Difusão do  $\text{CO}_2$  na fase gasosa nos poros e posterior dissolução na água dos poros;
- 2- Dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na água dos poros e difusão do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissolvido das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade;
- 3- Reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissolvido;
- 4- Reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com C-S-H e compostos não hidratados da pasta de cimento;
- 5- Redução do volume de poros;
- 6- Condensação do vapor de água

Figura 6: Esquema representativo do mecanismo de carbonatação



Fonte: Hoppe Filho, 2008

### 3.4.3 Fatores influenciadores de carbonatação

“O processo da carbonatação é complexo, por tanto, vários fatores atuam em conjunto para sua ocorrência. Em condições naturais de exposição (0,03% a 1% de CO<sub>2</sub>) pode requerer vários anos para apresentar dados passíveis de análise, sendo função da relação água/aglomerante e da composição química do cimento” (PAULETTI, POSSAN, DAL MOLIN, 2006). A seguir são apresentados alguns dos fatores mais relevantes na literatura:

#### 3.4.3.1 Fator água/cimento

Considerando que, segundo Bauer (2000), a impermeabilidade do concreto cresce com a redução da relação água/cimento (*a/c*) e sabendo que a carbonatação ocorre com a difusão do CO<sub>2</sub> pelos poros do concreto, um concreto menos poroso e permeável estará, portanto, menos suscetível a carbonatar. Gomes (2006) afirma que quanto maior for a relação *a/c*, maior será a intensidade de propagação da carbonatação no concreto.

### 3.4.3.2 Tipo de cimento

“Concretos produzidos com cimentos com adição ativas, como escórias do CP III e as pozolanas do CP IV, apresentam profundidade de carbonatação superiores às obtidas em concretos de cimento Portland comum” (POSSAN, 2004). Apesar dessas adições ativas melhorarem algumas propriedades, por exemplo, a permeabilidade do concreto produzido, elas não conseguem torna-lo mais resistente à carbonatação. Gomes (2006, p. 25) explica que isso se deve ao conceito de reserva alcalina:

(...) à medida que aumenta a quantidade de adições ativas ao clínquer Portland na produção dos cimento, a solução intersticial do concreto preparado com esses cimentos terá uma menor quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Assim, o  $\text{CO}_2$  penetrará com maior velocidade, pois ficará mais fácil a etapa inicial desse processo que é primeiro rebaixar o pH, reagindo com todo o  $\text{Ca(OH)}_2$ , penetrando e precipitando o  $\text{CaCO}_3$  mais rapidamente na solução.

### 3.4.3.3 Concentração de $\text{CO}_2$ e umidade relativa

A umidade relativa (UR) do ar e a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente atuam juntas para a ocorrência da carbonatação. “A UR contida no ambiente exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de dissolução e difusão do  $\text{CO}_2$  através dos poros de concreto” (FIGUEIREDO, 1993 apud ARAÚJO, 2009). Segundo Bakker (1988, apud POSSAN, 2010):

(...) quando o concreto não apresenta água nos poros, a difusão do  $\text{CO}_2$  no concreto ocorre normalmente, porém ele permanece na forma de gás, não reagindo com os compostos alcalinos do concreto do cimento hidratado, já em situação de poros completamente saturados a carbonatação não ocorre devido à baixa difusão de  $\text{CO}_2$  na água.

Gomes (2006) afirma que para UR na faixa de 60% a 85% ocorrem os maiores graus de carbonatação.

“A velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de  $\text{CO}_2$ ” (FIGUEIREDO, 1993 apud GOMES, 2006). Neville (1997) diz que a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente pode variar da seguinte maneira: meio rural 0,03%, grandes cidades 0,3 a 1% em volume.

#### 3.4.3.4 Temperatura e ambiente de exposição

As reações químicas sofrem, muitas vezes, influência direta da temperatura. No caso da reação da carbonatação, entretanto, a velocidade das reações está ligada, essencialmente, pelo grau de saturação dos poros, os quais controlam a difusão do CO<sub>2</sub> nos poros capilares do concreto (HOUST; WITTMANN, 2002 Apud MARTINS, 2011). Para temperaturas usuais, a influência da temperatura na carbonatação é considerada como não expressiva. Entretanto, ela exerce influência na umidade do concreto, ou seja, na saturação dos poros, o que leva, conseqüentemente, a uma influência na velocidade de carbonatação (POSSAN, 2004).

O ambiente onde se encontra o concreto também exerce influência na velocidade com que o concreto irá carbonatar. Possan (2010) afirma que concretos em ambientes internos carbonatam mais profundamente do que concretos em ambiente externo protegido da chuva, que por sua vez, carbonata mais do que um concreto em ambiente externo exposto à chuva. Essa diferença está relacionada a condição de saturação dos poros, já que concretos expostos a chuva tendem a ter um grau de saturação interno mais elevado, o que reduz a difusão do CO<sub>2</sub>.

A NBR 6118:2014 apresenta, em seu sexto capítulo, diretrizes para a durabilidade das estruturas. Os ambientes de exposição do concreto foram classificados em quatro grupos, para cada qual há uma recomendação mínima de resistência, fator água/aglomerante e cobrimento mínimo da armadura. Esta classificação busca garantir a durabilidade e proteção da estrutura diante dos mecanismos de deterioração da estrutura, dentre eles a carbonatação.

Figura 7: Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de Projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1)2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1)2)</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>1)3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um micro-clima com classe de agressividade um nível mais branda para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade um nível mais branda em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118:14

#### 3.4.4 Medição da profundidade da carbonatação

O método mais difundido para a medição da frente de carbonatação é a utilização de um indicador químico de pH, por se tratar de um procedimento prático e de baixo custo. Vasconcelos (1997) cita outros métodos como difratometria de Raio X, microscopia eletrônica, termogravimetria e variação de massa.

A medição utilizando indicadores de pH é feita com a pulverização do indicador sobre o concreto recém fraturado. A fenolftaleína é uma das soluções indicadoras de pH que pode ser utilizada na medição. Ela possui coloração vermelho carmim caso o pH seja superior a 9 e permanece incolor se a superfície estiver carbonatada (VASCONCELOS, 1997). Outro exemplo de substância que pode ser utilizada é a timolftaleína, que apresenta coloração azul para pH acima de 10,3 e é incolor para pH inferior a 9,3. Pauletti (2004) observa, entretanto, que não há consenso entre pesquisadores quanto à faixa de pH na qual há a troca de coloração do indicador.

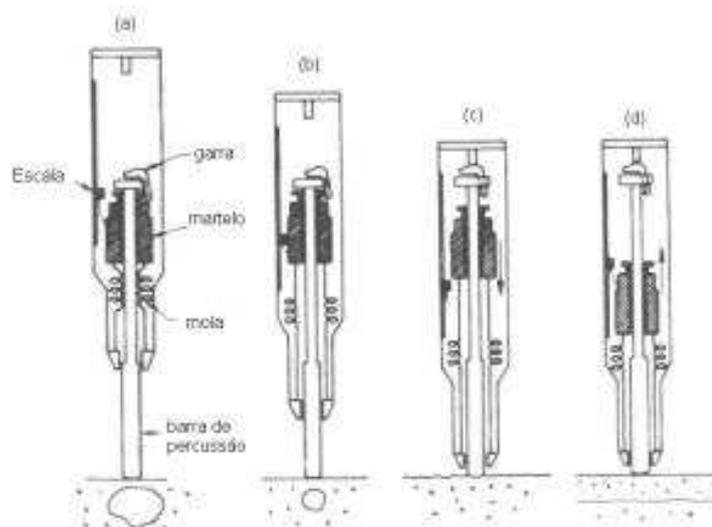
### 3.5 Ensaio de Esclerometria

#### 3.5.1 Descrição do método

O ensaio de esclerometria é um método de avaliação de dureza superficial do concreto utilizando um equipamento apropriado para tal fim. “O método consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de uma forma padronizada, usando-se uma determinada massa com uma dada energia, medindo-se o valor do rechicote, ou seja, o índice esclerométrico (I.E.)” (EVANGELISTA, 2002). O equipamento utilizado para este ensaio chama-se “Martelo de Schimidt” ou “esclerômetro de reflexão de Schimidt” e trata-se de um martelo controlado por mola que transmite uma carga a um êmbolo.

Parte de energia de impacto proveniente do martelo é absorvida pela superfície do concreto por meio de deformação plástica permanente e outra parte refletida elasticamente proporcionando o retorno do martelo (SAMANIEGO, 2014). Quanto mais dura for a superfície do concreto, maior será o recuo do martelo após o impacto, já que uma menor quantidade de energia terá sido absorvida no momento do impacto, conseqüentemente, maior será o I.E. do concreto. No Brasil, o ensaio de esclerometria é normalizado pela NBR 7584:2012.

Figura 8: Esquema do ensaio de esclerometria e do martelo de Schimidt



Fonte: Evangelista, 2002

### 3.5.2 Aplicação, vantagens e limitações

O ensaio de esclerometria é um processo simples, de baixo custo e rápido de avaliar *in loco* a uniformidade do concreto endurecido (METHA e MONTEIRO, 2008). Segundo Evangelista (2002), os danos que podem ser causados na estrutura são praticamente nulos. A principal utilização é para avaliação da dureza superficial do concreto. Devido sua praticidade, pode-se avaliar de forma rápida diversos pontos da estrutura sem necessidade de realizar qualquer reparo após os ensaios.

Assim como em outros ensaios não destrutivos, os resultados do ensaio de esclerometria podem ser correlacionados com a resistência à compressão do concreto. Os fabricantes geralmente fornecem curvas de correlação entre o I.E. e a resistência à compressão, entretanto, diversos estudiosos recomendam que elas não sejam tomadas como parâmetro, pois vários fatores podem diferenciar o concreto usado na elaboração das curvas do que está sendo ensaiado, resultando em estimativas erradas. Malhotra e Carino (2004, Apud FERREIRA, 2011) afirmam que a precisão para estimativa da resistência de um concreto com um esclerometro devidamente calibrado é de  $\pm 15\%$  para ensaios em laboratório e de  $\pm 25\%$  em estruturas de concreto.

Evangelista (2002) aponta que uma das limitações do ensaio é que ele está relacionado a uma zona superficial do concreto de aproximadamente 30 mm.

### 3.5.3 Recomendações normativas para execução do ensaio

A seguir serão expostas condições de ensaio, procedimentos e avaliação dos resultados de acordo com a NBR 7584:2012.

#### 3.5.3.1 Execução e recomendações para o ensaio

Inicialmente, deve-se escolher uma superfície plana, limpa e seca, uma vez que superfícies irregulares, curvas, talhadas ou ásperas produzem resultados heterogêneos, e, portanto, devem ser evitados. É recomendável polir a superfície do local de ensaio com um disco ou prisma de carborundum.

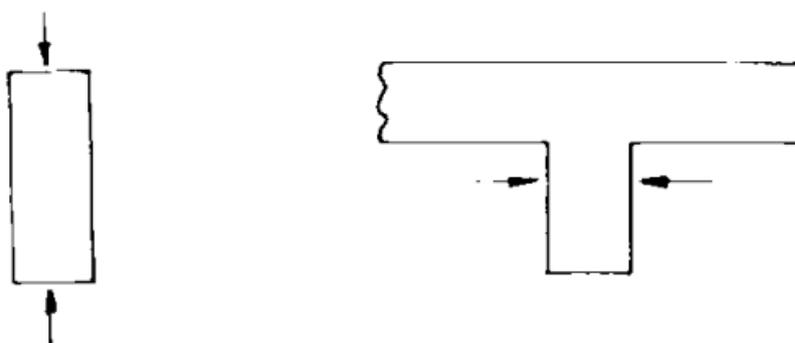
Aconselha-se pelo menos uma área de ensaio por elemento de concreto. Para o caso de elementos muito grandes, pelo menos duas áreas devem ser analisadas. Se houver muita discrepância entre as mesmas, outras áreas devem ser analisadas. A área de ensaio deve

distanciar-se em, no mínimo, 5 cm de cantos e arestas da peça. A mesma deve possuir entre 80 cm<sup>2</sup> e 400 cm<sup>2</sup>, o que resulta em quadrados de lados iguais a 9 cm e 20 cm, respectivamente.

Em cada área deve-se realizar no mínimo 9 e no máximo 16 impactos, não sendo permitido realizar dois impactos sobre o mesmo ponto. Caso isto ocorra, o segundo resultado deve ser descartado. Os pontos impactos devem estar distribuídos pela área, sendo que uma distância mínima de 3 cm entre os pontos de impacto deve ser respeitada. Para facilitar o ensaio, é recomendado traçar um reticulado definindo limites. Deve-se evitar impactos em pontos sobre armaduras, bolhas e agregados.

A peça ensaiada deve ter dimensão mínima de 10 cm na direção do impacto do martelo para evitar interferências relativas a vibração, ressonância e dissipação de energia. Caso seja necessário realizar o ensaio em peças com dimensões inferiores à mínima, deve-se utilizar um apoio na face oposta ao ponto de impacto para garantir a rigidez da peça. O esclerometro deve sempre ser posicionado na posição de maior inércia da peça ou do componente estrutural.

Figura 9: Locais recomendados para utilização do esclerômetro em seções retangulares e T



Fonte: NBR 7584:2012

### 3.5.3.2 Análise dos resultados

Para a análise dos resultados, a NBR 7584:2012 recomenda que seja feita uma média aritmética dos  $n$  (9 ou 16) índices esclerométricos correspondentes a área ensaiada. Então despreza-se todos os valores que divergirem em mais de 10% da média calculada e uma nova média é feita. O processo se repete até que os valores individuais fiquem dentro da faixa de 10% da média calculada. O índice deve ser calculado com pelo menos 5 valores individuais, caso não seja possível, o índice esclerométrico do local deve ser desconsiderado.

O índice final deve ser corrigido de acordo com a posição de impacto: vertical para cima, vertical para baixo ou horizontal. O fabricante é responsável por fornecer este coeficiente

de correção do equipamento. Deve-se também multiplicar pelo coeficiente de correção obtido durante a aferição do esclerômetro (k). O valor final obtido é chamado de índice esclerométrico médio da área ensaiada e deve ser indicado pela sigla I.E.

#### 3.5.4 Fatores de influência do índice esclerométrico

Bungey, Millard e Grantham (2006) afirmam que os resultados do ensaio são significativamente influenciados pelos fatores abaixo listados, os quais ele divide entre características da mistura e características do concreto:

##### 1) Características da mistura:

- Tipo de Cimento
- Teor de Cimento
- Agregado graúdo

##### 2) Características do concreto:

- Massa
- Compactação
- Tipo de superfície
- Idade, taxa de dureza e tipo de cura
- Carbonatação da superfície
- Condição de umidade
- Estado de tensão e temperatura

##### 3.5.4.1 Teor e tipo de cimento

A NBR 7584:2012 recomenda que sejam feitas novas correlações todas as vezes que se mudar ao tipo de cimento, já que, segundo a norma, há uma influência expressiva do tipo de cimento sobre o I.E.. Cimentos com alta concentração de óxido de alumínio, por exemplo, podem apresentar uma resistência estimada até 100% maior que um cimento Portland comum (BUNGEY, MILLARD E GRANTHAM, 2006). Ainda segundo o autor, o teor de cimento não exerce influência na dureza superficial do concreto e, por isso, os erros na resistência estimada não superam 10% para a maioria das misturas.

#### 3.5.4.2 Agregado graúdo

O tipo e a quantidade do agregado exercem muita influência no índice esclerométrico (METHA E MONTEIRO, 2008). Bungey, Millard e Grantham (2006) falam que isto ocorre porque a resistência do concreto está ligada à pasta de cimento e às características do agregado, porém, ressaltam que é a dureza da pasta que influenciará mais. Embora não altere tanto a avaliação da uniformidade do concreto, o tipo de agregado é fator importante na obtenção de correlação entre índice esclerométrico e resistência (FERREIRA, 2011).

#### 3.5.4.3 Tipo de superfície, condição de umidade e carbonatação

A NBR 7584:2012 recomenda que o ensaio seja realizado em superfície plana, secas e limpas. Sugere ainda que a superfície seja polida antes do ensaio com um disco ou prisma de carborundum. Quanto a umidade, Bungey, Millard e Grantham (2006) afirmam que superfícies úmidas ou molhadas tem uma dureza menor do que quando secas. A diferença entre I.E. indicativos de resistência de concretos úmidos e secos pode chegar até 20% (FERREIRA, 2011).

A carbonatação altera a dureza superficial do concreto, portanto sua influência deve ser considerada na avaliação do concreto quando se utiliza o método da esclerometria de reflexão. Para concretos de mais idade, onde a carbonatação tende a ser de vários milímetros, o número de rebote pode ser até 50% mais elevado do que os obtidos em uma superfície não carbonatada (SAMANIEGO, 2014).

#### 3.5.4.4 Massa e compactação

A massa da peça de concreto a ser ensaiada deve ser suficiente para prevenir vibrações ou movimentos causados pelo impacto do martelo, qualquer movimento irá resultar em uma redução no número de rebote (BUNGEY, MILLARD E GRANTHAM, 2006). A NBR 7584/2012 fala que a peça a ser ensaiada deve ter pelo menos 10 cm na direção do impacto do martelo para evitar vibrações, ressonância e dissipação de energia.

Como o ensaio requer uma superfície homogênea e bem compactada, variações de resistência devido a falhas de compactação interna não são detectadas, por tanto deve-se

assumir que sempre há uma inteira compactação (BUNGEY, MILLARD E GRANTHAM, 2006)

#### 3.5.4.5 Idade, taxa de dureza e tipo de cura

A NBR 7584/2012 fala que a influência da dureza superficial do concreto em relação à obtida nas condições normalizadas aos 28 dias provem do processo de cura e da carbonatação do concreto. Sendo assim, as correlações não são automaticamente válidas para concretos com idades inferiores a 14 dias e superiores a 60 dias.

## **4 METODOLOGIA**

Com o intuito de tentar atingir os objetivos da pesquisa, optou-se pela seguinte estratégia: Revisão bibliográfica sobre o assunto, atividades laboratoriais e análise dos resultados obtidos. Desta forma, a metodologia adotada para a realização dos trabalhos é a seguinte:

### **4.1 Pesquisas Bibliográficas**

Nesta etapa foi feito um levantamento e análise bibliográfica nos acervos da Universidade Estadual do Maranhão, dissertações, teses, periódicos, revistas, normas a respeito dos seguintes assuntos: Carbonatação do concreto; Ensaio não destrutivo; Índice Esclerométrico; Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no concreto; Ensaio de esclerometria; Ensaio de propagação de onda ultrassônica.

Com base no material pesquisado e analisado, definiu-se as etapas seguintes do trabalho.

### **4.2 Atividades Laboratoriais**

As atividades laboratoriais foram desenvolvidas no Laboratório de Concreto e Materiais – LABCOM, da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Os materiais utilizados para confecção e processo de cura dos corpos de prova e blocos de concreto, foram todos providos pela Universidade e pelo Laboratório.

#### **4.2.1 Confecção e cura dos corpos de prova e blocos de concreto**

Para a execução do ensaio de ultrassom, optou-se pela confecção de 48 corpos de prova, cada um com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, divididos em 3 grupos de 16. Os 16 corpos de prova de cada grupo foram então divididos em dois subgrupos de 8 para que metade pudesse ser colocada na câmara de carbonatação e a outra metade permanecesse como forma de controle. Cada grupo possuía um traço diferente. Para os dois primeiros grupos variou-se empiricamente o fator água/cimento, sendo o segundo o de maior consumo de água. Já para o terceiro grupo, aumentou-se o consumo de cimento em relação ao primeiro traço. Essa

estratégia fora adotada para tentar variar a penetração da frente de carbonatação nos corpos de prova de acordo com cada traço.

Para a realização do ensaio de esclerometria foram confeccionados 4 blocos cúbicos de concreto, com arestas medindo 20 cm. O traço utilizado para este concreto foi totalmente empírico. O cimento utilizado na confecção de todos os corpos de prova e blocos fora o cimento CP II – E 32 – RS da marca “Bravo”. Areia utilizada era do tipo média e a brita era do tipo 1.

#### 4.2.1.1 Moldagem

A moldagem dos corpos de prova descrita a seguir seguiu os procedimentos recomendados na NBR 5738:2015.

Os moldes utilizados para a confecção dos corpos de prova eram cilíndricos e feitos de metal, tendo 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura cada. Para os blocos de concreto utilizou-se um molde cúbico feito de maderite com lados iguais a 20 cm. Antes de serem preenchidos com concreto, cada molde era devidamente limpo e recebia a aplicação de óleo desmoldante, com o intuito de facilitar a remoção do concreto endurecido do molde. A aplicação do concreto fora feita em duas camadas de alturas iguais, conforme recomenda a norma. Após ser colocada a quantidade referente a primeira camada, a mesma fora adensada manualmente com auxílio de uma haste metálica cilíndrica, com a qual foram desferidos 12 golpes para correto adensamento do concreto. O processo de adensamento se repetiu após a colocação da segunda camada, ressaltando-se que a penetração da haste metálica se limitou a altura da segunda camada

Figura 10: Corpos de prova recém moldados.



Fonte: do Autor, 2016.

conforme recomenda a NBR 5738:2015. Após passarem pelo processo preenchimento de concreto, os moldes foram colocados em local plano e à sombra nas primeiras 24 horas.

#### 4.2.1.2 Desmoldagem e processo de cura

O desmolde dos corpos de prova foram feitos após o período de 24 horas. Todos os corpos de prova foram identificados e cuidadosamente submetidos ao processo de cura submersa no tanque de água do LABCOM.

A cura submersa é um processo previsto em norma e que busca garantir 100% da hidratação do concreto durante o processo de cura. O tanque existente no LABCOM possui dimensões suficiente para acomodar todos os corpos de prova e os blocos de concreto de forma adequada. A água do tanque é tratada com uma solução de hidróxido de cálcio para evitar a proliferação de algas. Vale ressaltar que a água do tanque é constantemente renovada.

Todos os corpos de prova e os blocos permaneceram dentro do tanque até a idade de 28 dias, quando então foram retirados e deixados em temperatura ambiente para reduzir seu nível de saturação.

Figura 11: Corpos de prova em processo de cura submersa.



Fonte: do Autor, 2016.

#### 4.2.2 Câmara de carbonatação

Com base nas informações obtidas no processo de levantamento e revisão bibliográfica, uma câmara de carbonatação foi elaborada para expor parte dos corpos de prova e dos blocos moldados a um ambiente que induzisse uma aceleração no processo de carbonatação. A câmara utilizada consistia apenas de uma caixa de poliestireno expandido (EPS) vedada, na qual se injetou quantidades variáveis de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) com o intuito de se criar um ambiente com uma alta concentração de  $\text{CO}_2$ . O gás era injetado de duas a três vezes ao dia utilizando-se um cilindro de extintor de incêndio com 6 Kg de  $\text{CO}_2$ . Fatores como temperatura, pressão e concentração de  $\text{CO}_2$  não puderam ser medidos devido à limitação de recursos financeiros do projeto. Vale ressaltar que a câmara utilizada não pode ser considerada 100% vedada, uma vez que o próprio material da caixa não aguentaria a pressão gerada na liberação do gás através do cilindro, portanto, toda vez que era injetado o gás, notava-se um vazamento de ar de dentro para fora da câmara.

Para melhor organizar a disposição dos corpos de prova dentro da câmara de carbonatação, utilizou-se de prateleiras feitas com barras de aço. Criou-se dois níveis diferentes para permitir que o ar circulasse em volta de toda a superfície dos corpos de prova, isto pode ser visualizado conforme a figura 12.

Figura 12: Câmara de carbonatação com os corpos de prova para ensaio de ultrassom.



Fonte: do Autor, 2016.

A cada semana, 6 corpos de prova (sendo 2 de cada um dos 3 traços) eram retirados para serem ensaiados com o equipamento de ultrassom, testados à compressão e verificado o avanço da carbonatação. Portanto, 6 corpos de prova permaneceram um período total de, pelo menos, 28 dias dentro da câmara de carbonatação. A câmara só era aberta uma vez por semana para a retirada dos corpos de prova. Nos demais dias permanecia fechada. Na terceira semana, quando a quantidade de espaço disponível dentro da câmara se tornou maior, foram então colocados 2 dos 4 blocos de concreto que seriam utilizados no ensaio de esclerometria. Os blocos permaneceram por 20 dias dentro da câmara.

Figura 13: Blocos de concreto na câmara de carbonatação.



Fonte: do Autor, 2016.

#### 4.2.3 Capeamento

O capeamento dos corpos de prova, de acordo com a NBR 5738:2015 consiste no revestimento do topo dos corpos de prova com o intuito de planificar e nivelar sua superfície. Para tanto, deve ser utilizado um material aderente e quimicamente compatível com o concreto. Para este trabalho, utilizou-se uma argamassa de gesso para realizar o capeamento dos corpos de prova a serem ensaiados.

Para realizar o capeamento, utilizou-se um equipamento chamado de capeador, que consiste de uma base metálica circular, perfeitamente perpendicular a um elemento vertical, onde posiciona-se e alinha-se o corpo de prova para verificar suas imperfeições. A argamassa

é então aplicada e todos os ajustes necessários para se obter uma superfície lisa e plana são feitos. De acordo com a norma, a camada de regularização não deve ter mais do que 3 mm em cada topo. Para este trabalho, fora necessário o capeamento de apenas um dos topos do corpo de prova, já que o outro era plano e liso. Desta forma obedeceu-se também a recomendação da NBR 8802:2013 que fala que o ensaio de ultrassom deve ser realizado em superfícies lisas e planas. Todos os corpos de prova foram capeados após o período de permanência na câmara de carbonatação.

Figura 14: Capeador



Fonte: do Autor, 2016

Figura 15: Corpos de prova capeados.



Fonte: do Autor, 2016

#### 4.2.4 Ensaio de ultrassom

O equipamento de ultrassom utilizado para a realização dos ensaios é do modelo Pundit Lab, da fabricante “Proceq”, dotado de transdutores que emitem pulsos a uma frequência de 54 Hz, pertencente ao LABCOM. Trata-se de um equipamento portátil, leve, e de fácil manuseio. O equipamento fora conectado a um computador e as leituras foram feitas com auxílio do software fornecido pelo fabricante, através do qual é possível além de medir o tempo e velocidade de propagação da onda, obter-se gráficos e monitorar a peça em tempo real, dentre outras possibilidades. Para a correta medição da velocidade propagação do pulso ultrassônico duas etapas são necessárias: correta calibragem do equipamento e medição do comprimento do corpo de prova.

##### 4.2.4.1 Calibragem do equipamento

A calibragem do dispositivo deve ser feita conforme consta no manual fornecido pelo fabricante. O equipamento vem acompanhado de um pequeno cilindro de acrílico cujas características são padronizadas e, portanto, possui um tempo de propagação específico, no caso, de 25,4  $\mu$ s. Para calibrar o equipamento, deve-se medir o tempo de propagação do pulso ultrassônico no cilindro de acrílico utilizando o equipamento e verificar se o tempo medido está de acordo com o esperado. A figura 15 ilustra o processo.

Figura 16: Calibragem do equipamento.

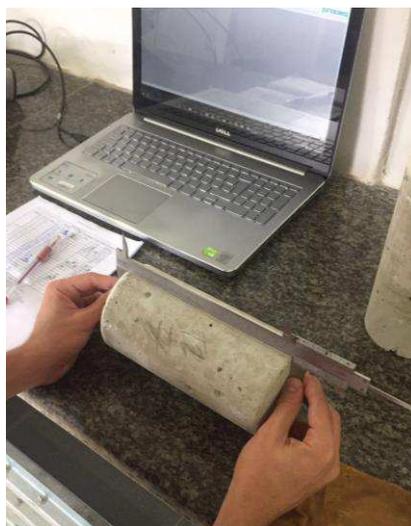


Fonte: do Autor, 2016

#### 4.2.4.2 Medição do corpo de prova

A medição do comprimento longitudinal dos corpos de prova foi realizada após o capeamento utilizando-se um paquímetro calibrado. Como o equipamento de ultrassom mede o tempo que o pulso emitido leva para se deslocar de um transdutor ao outro, para se obter a velocidade com que a onda se propagou, é necessário que a medida seja a mais precisa possível. Para garantir a precisão da medição feita, foram realizadas leituras de medidas em três pontos distintos no perímetro do corpo de prova (sempre com o paquímetro paralelo ao eixo longitudinal da peça). Calculou-se uma média das leituras e adotou-se como sendo o comprimento do corpo de prova. Esta medida era então inserida no software do equipamento.

Figura 17: Medição do corpo de prova.



Fonte: do Autor, 2016.

#### 4.2.4.3 Aferição da velocidade de propagação nos corpos de prova

O ensaio de ultrassom nos corpos de prova seguiu as recomendações da NBR 8802:2013. A cada semana um total de 12 corpos de prova eram ensaiados. Destes, 6 eram provenientes da câmara de carbonatação (sendo 2 corpos de prova de cada traço), e os outros 6 dos que permaneceram no ambiente do laboratório, (também 2 corpos de prova de cada traço). O ensaio dos corpos de prova que estavam na câmara de carbonatação eram realizados sempre 24 horas após sua retirada da câmara. Optou-se por esse procedimento por dois motivos: primeiro para que ficassem na mesma temperatura e condição de umidade dos que estavam fora

da câmara e, segundo, para que houvesse tempo para o capeamento ser feito e secar de forma adequada.

Primeiramente, já com o aparelho devidamente ligado, aplicou-se uma quantidade satisfatória de gel nos transdutores. A aplicação do gel é necessária para garantir uma boa ligação entre a superfície do concreto e do transdutor, evitando assim a existência de ar entre eles. Em seguida, acopla-se os transdutores à peça ensaiada, com cuidado, para que eles permaneçam alinhados em relação ao eixo longitudinal da peça, garantindo uma boa qualidade na leitura. Realizaram-se cinco leituras em cada corpo de prova. A pressão aplicada nos transdutores foi controlada para que as leituras consecutivas não divergissem em  $\pm 1\%$ . Calculando-se a média das velocidades, obteve-se então a velocidade média de propagação do pulso ultrassônico nos corpos de prova. Vale ressaltar que o transdutor emissor sempre foi posicionado no lado capeado do corpo de prova para se criar um padrão nas leituras.

Figura 18: Equipamento utilizado na realização do ensaio.



Fonte: do Autor, 2016

#### 4.2.5 Ensaio de Esclerometria

O ensaio de esclerometria fora realizado conforme o recomendado pela NBR 7584:2012. O equipamento utilizado para o ensaio foi esclerômetro da marca Proceq, tipo Original Schmidt, modelo N, cuja energia de impacto é de 2,207 N.m. Cada um dos quatro blocos, teve uma de suas faces laterais ensaiadas, sendo coletado o valor de rebote do martelo

em 16 pontos distintos em cada face, marcados conforme recomenda a norma. Após tomar nota desses valores, calculou-se então o índice esclerométrico final de cada bloco. A calibragem do equipamento não fora necessária uma vez que o mesmo já estava devidamente calibrado.

Em cada bloco foi escolhida uma face que fosse plana e não apresentasse defeitos causados por bolhas de ar ou mau adensamento. O ensaio foi realizado com o esclerômetro na posição horizontal e com o bloco devidamente apoiado para evitar que o mesmo se mexesse no momento do impacto do martelo. A figura a seguir ilustra o procedimento de execução do ensaio.

Figura 19: Execução do ensaio de esclerometria



Fonte: do Autor, 2016

#### 4.2.6 Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova foram feitos após realização dos ensaios de ultrassom. O equipamento utilizado fora uma prensa eletrohidráulica de propriedade do LABCOM. Os procedimentos de ensaio seguiram o prescrito na NBR 5739:2007. Os corpos de prova foram posicionados de forma centrada aos eixos dos pratos dos pratos da prensa eletrohidráulica e então submetidos a uma carga de compressão de taxa constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s.

Após o rompimento do corpo de prova, lê-se a carga no indicador digital e toma-se nota. O equipamento possui uma equação de correção para a carga lida que é obtido durante a calibragem da prensa. A equação é apresentada abaixo:

$$y = 0,995748025 \cdot x + 0,09048117943 \quad (4)$$

A carga lida deve ser introduzida na equação no lugar de  $x$ , sendo  $y$  a carga corrigida. O valor lido no indicador digital está na unidade de tonelada-força (tf), o valor

Figura 20: Corpo de prova posicionado para ensaio.



Fonte: do Autor, 2016

encontrado para  $y$  também está em tf. Para calcular a tensão de ruptura do corpo de prova em MPa, deve-se então multiplicar a carga corrigida por 0,00981 e dividir o valor obtido pela área (em  $m^2$ ) da seção transversal do corpo de prova.

#### 4.2.7 Medição da carbonatação

A medição da carbonatação, tanto dos corpos de prova utilizados no ensaio de carbonatação, quanto nos blocos do ensaio de esclerometria, foi realizada com a aspersão de uma solução de fenolftaleína. Para isso, fez-se uso de um borrifador, de forma que a solução fosse devidamente espalhada na área sob análise. Os corpos de prova foram analisados após serem rompidos à compressão, o que facilitou a quebra do concreto para extração de pedaços para serem analisados. Já para os blocos, utilizou-se uma pequena marreta e juntamente com um ponteiro de aço para facilitar a quebra do bloco. A medição da carbonatação, quando possível, foi realizada utilizando-se uma régua.

Figura 21: Medição da carbonatação em um corpo de prova



Fonte: do Autor, 2016

Figura 22: Aspersão da solução de fenolftaleína sobre o bloco



Fonte: do Autor, 2016

## 4.3 Resultados

Após a coleta de dados dos ensaios, os mesmos então foram tabelados de forma a facilitar a análise e comparação dos resultados obtidos.

### 4.3.1 Carbonatação

Todos os corpos de prova que permaneceram em ambiente de laboratório até o dia de serem ensaiados não apresentaram nenhuma carbonatação que pudesse ser medida. A profundidade da carbonatação medida na direção transversal à de propagação do pulso ultrassônico estão expostas na tabela 1. Em relação aos blocos de concreto, a carbonatação obtida nos que permaneceram na câmara de carbonatação por 20 dias não foi superior a 5 mm.

O avanço da frente de carbonatação na lateral dos corpos de prova se mostraram superiores aos do topo e da base, em alguns casos chegando a 10 mm, porém, não são considerados relevantes para este estudo.

#### 4.3.2 Ensaio de Ultrassom

Os resultados do ensaio de ultrassom foram divididos entre os corpos de prova que passaram pelo processo de indução da carbonatação e os que não foram carbonatados nas tabelas 1 e 2, respectivamente. Os corpos de prova de cada traço foram divididos em 4 grupos que possuem idades distintas, dessa forma, os grupos de mesma numeração em cada tabela indicam os valores que devem ser analisados e comparados entre si.

Tabela 1: Ensaio de ultrassom corpos de prova carbonatados

Traço	Grupo	Idade	Vel. Média (m/s)	Carbonatação (mm)	Resistência Corrigida (MPa)	
1	1	49	4779	2	25.24	
			4818	1.5	28.10	
	2	56	4716	5	24.70	
			4633	3	25.20	
	3	65	4917	2.5	24.67	
			4817	4.5	20.82	
	4	75	4811	4	24.06	
			4780	4	27.13	
	2	1	41	4772	0	22.74
				4668	1	21.79
		2	49	4782	2	22.75
				4856	1	21.95
3		58	4876	3	18.28	
			4935	5	24.30	
4		68	4925	2	24.48	
			4980	7	22.14	
3		1	39	4624	0	28.69
				4812	1.5	28.05
		2	47	4933	1	28.36
				4945	1	27.54
	3	56	4835	2	29.09	
			4956	2	28.16	
	4	66	4851	1	32.19	
			4858	1	*	

\* Corpo de prova danificado por queda

Fonte: do Autor: 2016

Tabela 2: Ensaio Ultrassom Corpos de Prova Não Carbonatados

Traço	Grupo	Idade	Vel. Média (m/s)	Resistencia Corrigida (MPa)
1	1	48	4806	23.02
			4875	24.67
	2	55	4822	20.56
			4802	23.35
	3	63	4846	24.07
			4878	25.21
	4	71	4785	20.86
			4848	23.51
2	1	41	4839	19.52
			4724	19.75
	2	48	4802	19.60
			4826	19.07
	3	56	4883	17.34
			4834	20.55
	4	64	4857	22.90
			4848	20.36
3	1	39	4776	26.16
			4849	*
	2	46	4874	28.45
			4869	27.90
	3	54	4880	26.83
			4712	27.00
	4	62	4908	27.03
			4807	31.75

\* Corpo de prova danificado por queda

Fonte: do Autor, 2016

#### 4.3.3 Ensaio de Esclerometria

A tabela 3 apresenta os dados coletados na face ensaiada de cada bloco. O processo de cálculo do valor médio final está de acordo com a recomendação normativa.

Tabela 3: Resultados dos Ensaio de Esclerometria

Ensaio de Esclerometria				
Ponto	Bloco			
	Não Carb. 1	Não Carb. 2	Carbonatado 1	Carbonatado 2
1	26.00	24.00	34.00	32.00
2	27.00	22.00	26.00	26.00
3	24.00	19.00	28.00	30.00
4	23.00	20.00	24.00	25.00
5	29.00	22.00	33.00	31.00
6	32.00	24.00	30.00	25.00
7	27.00	21.00	27.00	25.00
8	24.00	20.00	26.00	26.00
9	32.00	26.00	26.00	25.00
10	28.00	28.00	32.00	28.00
11	25.00	20.00	26.00	26.00
12	31.00	20.00	26.00	24.00
13	26.00	27.00	27.00	24.00
14	27.00	20.00	25.00	24.00
15	24.00	18.00	25.00	25.00
16	24.00	20.00	26.00	25.00
Média 1	26.81	21.94	27.56	26.31
>10%	29.49	24.13	30.32	28.94
<10%	24.13	19.74	24.81	23.68
Média Real	26.88	21.18	26.50	25.23
>10%	29.56	23.30	29.15	27.75
<10%	24.19	19.06	23.85	22.71
Média Real	26.88	20.56	26.18	25.00
>10%	29.57	22.61	28.80	27.50
<10%	24.19	18.50	23.56	22.50
Média Final	26.88	20.56	26.18	25.00

Obs.:

Média= Media aritmética dos 16 pontos

&gt;10% = Valor da média calculada multiplicada por 1.10

&lt;10% = Valor da média calculada multiplicada por 0.9

Média Real = Nova média calculada com valores que se enquadram na faixa de  $\pm 10\%$ 

Média final = Valor do Índice Esclerométrico

Profundidade de carbonatação dos blocos carbonatados 1 e 2  $\leq 5\text{mm}$ 

Idade dos blocos = 57 dias

Fonte: do Autor, 2016

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Carbonatação

A indução da carbonatação com o modelo de câmara utilizado obteve resultados pouco satisfatórios. Isso pode estar relacionado a uma série de fatores que vão desde a qualidade a câmara, à fatores relativos ao concreto. No caso dos corpos de prova, o topo e a base, por exemplo, podem ter tido um melhor adensamento que a superfície lateral dos corpos de prova, o que dificultou a frente de carbonatação. O fato de todas as peças de concreto terem passado pelo processo de cura úmida, pode ter contribuído para a redução e dificuldade da difusão da frente de carbonatação, uma vez que todos os traços apresentaram pouca carbonatação (por volta de 5 mm) na direção analisada. Outro fator que pode ter contribuído para uma baixa carbonatação, foi a falta de circulação do ar dentro da câmara de carbonatação, fazendo com que o CO<sub>2</sub> não circulasse por toda a superfície do corpo de prova e dos blocos.

### 5.2 Ensaio de Ultrassom

Em seus estudos, Bungey, Millard e Grantham (2006) apresentam em seu trabalho, conforme já citado, que é necessária uma variação de mais de 2% na velocidade de propagação do pulso ultrassônico para caracterizar uma variação na propriedade, por esta razão, foram elaboradas as tabelas 4, 5 e 6 abaixo comparando a velocidade média dos 4 grupos de cada traço não carbonatado com a velocidade de propagação obtida nos corpos de prova carbonatados dos respectivos grupos.

Tabela 4: Variação de velocidade - Traço 1

Grupo	Velocidade Média Controle (m/s)	Velocidade Média Carb. (m/s)	Variação (%)
1	4840.50	4779	-1.27%
		4818	-0.46%
2	4848.50	4716	-2.73%
		4633	-4.44%
3	4812.00	4917	2.18%
		4817	0.10%
4	4824.00	4811	-0.27%
		4780	-0.91%

Fonte: do Autor, 2016

Tabela 6: Variação de velocidade - Traço 2

Grupo	Velocidade Média Controle (m/s)	Velocidade Média Carb. (m/s)	Variação (%)
1	4862.00	4772	-1.85%
		4668	-3.99%
2	4831.50	4782	-1.02%
		4856	0.51%
3	4816.70	4876	1.23%
		4935	2.46%
4	4843.70	4925	1.68%
		4980	2.81%

Fonte: do Autor, 2016

Tabela 5: Variação de velocidade - Traço 3

Grupo	Velocidade Média Controle (m/s)	Velocidade Média Carb. (m/s)	Variação (%)
1	4781.50	4624	-3.29%
		4812	0.64%
2	4763.00	4933	3.57%
		4945	3.82%
3	4814.00	4835	0.44%
		4956	2.95%
4	4854.50	4851	-0.07%
		4858	0.07%

Fonte: do Autor, 2016

Analisando a variação da velocidade de propagação nos corpos de prova carbonatados em relação à velocidade média dos corpos de prova de controle, observa-se que não há uma padronização na variação, nem homogeneidade. A carbonatação tende a aumentar a densidade do concreto, portanto, era esperado uma variação positiva para todos os casos, o que acabou não se confirmando. Para os corpos de prova carbonatados do traço 1, por exemplo, apenas 3 tiveram variação de superior a 2%, sendo que os 2 corpos de prova do grupo 2 tiveram variação negativa.

Dos 24 corpos de prova que passaram por indução da carbonatação, apenas 10 tiveram variação superior a  $\pm 2\%$ , sendo 4 de variação negativa e 6 de variação positiva. Considerando que a profundidade carbonatada em geral fora muito insignificante no topo e

fundo dos corpos de prova, é improvável que estas variações estejam ligadas à carbonatação em si. A qualidade da ligação entre o capeamento e o concreto, por exemplo, pode vir a ser um fator responsável por tal variação.

Desta forma, podemos assumir que para concretos com carbonatação inferior aos níveis alcançados nesse trabalho, sua influência pode ser desconsiderada para ensaios de ultrassom

### **5.3 Ensaio de Esclerometria**

Dos 4 blocos analisados por ensaio de esclerometria, em 3 obteve-se um índice esclerométrico praticamente igual, com variação inferior a 10% para menos em relação ao maior índice. Destes 3, dois passaram pelo processo de indução da carbonatação, mas o maior índice geral fora obtido em um dos blocos que não estavam carbonatados. Desta forma, estão dentro da faixa de 10% prescrita pela NBR 7584:2004, portanto não houve influência significativa para superfícies com até 5mm de carbonatação.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O concreto é o material mais utilizado na construção civil do nosso país, por isso, a avaliação da qualidade do concreto, principalmente quanto à sua resistência, é de grande importância. Em construções de idade elevada, a carbonatação do concreto é algo comum e, em certos casos, de grande incidência. A carbonatação é uma reação que ocorre no concreto ao longo do tempo, tendo considerável influência na durabilidade das estruturas de concreto.

Nos últimos anos alguns métodos de ensaio não destrutivo têm ganhado cada vez mais espaço e uso. Esses métodos têm se mostrado muito práticos e de fácil aplicação, porém, sua interpretação deve ser feita com muito cuidado, uma vez que uma série de fatores exercem influência sobre seus resultados.

Na avaliação de estruturas antigas com métodos não destrutivos, a carbonatação certamente passara a ser um fator presente no meio de ensaio, porém sua consideração, ou não, nos resultados precisa ser bem estudada. Em relação aos métodos de ensaio não destrutivos utilizados neste trabalho, ensaio de ultrassom e esclerometria, o estudo bibliográfico realizado mostrou que a carbonatação é, comprovadamente, um fator de influência no ensaio de esclerometria, já em relação ao ultrassom, diversos autores a desconsideraram como um fator de influência.

Neste trabalho buscou-se induzir a carbonatação nas peças de concreto e então ensaiá-las com ensaios não destrutivos e comparar seus resultados com o de outras, feitas com o mesmo concreto, mas que não tivessem incidência da carbonatação. A indução da carbonatação, entretanto, mostrou-se um processo muito complicado uma vez que a frente de carbonatação não penetra o concreto de forma homogênea, dificultando sua análise e nem sempre ocorrendo conforme o esperado. A boa cura e adensamento do concreto também se mostraram importantes fatores inibidores de ocorrência da carbonatação.

Para as condições de realização deste trabalho e para as profundidades de carbonatação observadas, não se notou uma influência relevante tanto para o ensaio de ultrassom quanto para o ensaio de esclerometria. Todavia, ressalta-se que a incidência da carbonatação foi ínfima tanto para o ensaio de ultrassom quanto o de esclerometria.

Sugestões para estudos futuros:

- Desenvolver uma câmara de carbonatação mais eficiente, com pressão, temperatura controladas e circulação de ar no ambiente interno;
- Realizar este estudo a longo prazo em uma iniciação científica;

- Não realizar a cura úmida dos corpos de prova e blocos de concreto, deixando-os curar no ambiente, de forma a buscar uma maior penetração da frente de carbonatação.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F. W. C. de. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- 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, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584 Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802. Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33. Concreto – Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro, 1998.
- BAKKER, R. F. M. Initiation on period. In.: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of Steel in Concrete: report of technical committee 60CSC RILEM**. London: Chapman & Hall Ltda, 1988, p. 22-55.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. v.1, 5 ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G; GRANTHAM, M. G. **Testing of concrete in structures**. 4 ed. London: Taylor & Francis e-Library, 2006.
- CARVALHO, R. C. e FIGEUIREDO FILHO, J. R de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**.
- CAVALCANTI, R. de S. **Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2010.
- CHUNG, H. W.; LAW, K.S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. **Concrete International**, October, pp.42-49, 1983.

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

FERREIRA, G. **Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Fatores determinantes para a iniciação e propagação da corrosão das armaduras do concreto**. São Paulo EPUSP-BT/PCC/121.

FOCAOARU, I. Romanian Achievements in Nondestructive Strength of Concrete. In Situ/Nondestructive Testing of Concrete. **American Concrete Institute SP-82**, Detroit, 1984, pp.35-36.

GOMES, N. DE A. **Estruturas de concreto armado interrompidas em ambiente urbano: avaliação de carbonatação à luz das recomendações da NBR 6118:2003**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2006.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

HOUST, Yves F.; WITTMANN, Folker H. depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v.2151, p. 1 – 8, 2002.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

KAZMIERCZAK, C. DE S. et al. Degradação do concreto por carbonatação: execução do ensaio. **REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES**. São Paulo, SP: IBRACON, Ano XXXVII, n. 53, Jan./Fev./Mar. 2009. p. 35-42.

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

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. United States of America: CRC Press LLC, 2004.

MARTINS, C. A. C. **Estimativa da profundidade de carbonatação do concreto com o uso de redes neurais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2011.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, Estrutura, Propriedades e Materiais**, 3 ed. São Paulo: Editora Pini, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. Trad.: Salvador E. Giamusso. São Paulo: Editora Pini, 1997.

NOGUEIRA, C. L.; WILLAN, K. J. Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression. **ACI Materials Journal**. May-June, 2001, pp.265-275.

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. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil.** ISSN 1678-8621, 2006.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

SAMANIEGO, Y. T. M. **Ensaio Não Destrutivos para Avaliação da Resistência do Concreto: Estudo de Aplicação em Obras.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2014.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** São Paulo: Pini, 1995.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** 469f. Tese (Doutorado). Swedich Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

VASCONCELOS, K. L. DE. **Avaliação comparativa da eficiência de inibidores de corrosão em armaduras de estruturas de concreto.** Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 014A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1997.