



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MATEUS DE OLIVEIRA CAMPOS

INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NO ENSAIO DE ESCLEROMETRIA

RUSSAS
2019

MATEUS DE OLIVEIRA CAMPOS

INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NO ENSAIO DE ESCLEROMETRIA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C214i Campos, Mateus de Oliveira.
Influência da carbonatação no ensaio de esclerometria / Mateus de Oliveira Campos. –
2019. 74 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de
Russas, Curso de Ciência da Computação, Russas, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

1. Estruturas de concreto. 2. Carbonatação. 3. Ensaio de esclerometria. I. Título.

CDD 005

MATEUS DE OLIVEIRA CAMPOS

A INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NOS ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Abrahão Bernardo Rohden
Universidade Regional de Blumenau (FURB)

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais,
Sebastião e Rosenir, e ao meu irmão, Thiago.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me dar saúde e motivação para conseguir buscar meus objetivos.

Aos meus pais, Sebastião e Rosenir, por todo o amor, carinho e apoio nos momentos mais difíceis da minha vida. Vocês são a base mais importante da minha vida.

Ao meu irmão, Thiago, por sempre me incentivar, apoiar e contribuir para meu crescimento pessoal. Agradeço por ter um irmão como você.

Aos meus familiares, por sempre me valorizarem e acreditarem em mim.

Ao meu orientador Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, por todas as suas contribuições essenciais neste trabalho e por todo o auxílio durante a realização do trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção, em especial Allisson e Myckelle, pela atenção e ajuda durante a realização dos procedimentos do trabalho.

Ao pessoal da manutenção do campus, pela ajuda na preparação dos procedimentos do trabalho.

Aos demais professores que tive durante o curso, pelos conhecimentos passados, pela paciência e contribuição para meu crescimento profissional.

A senhora Fabíola e sua família, por me acolherem durante o período de realização do trabalho, pela diversão e por me fazerem sentir em casa durante esse período. Serei eternamente grato pelo que fizeram.

Ao senhor Raimundo e sua família, por toda a ajuda e acolhimento desde o começo do curso.

Aos meus amigos que fiz durante o curso, em especial Gilson, Alane, Thales, Arthur, Kaenna, Jayane, João e Thalyta, pela diversão, trabalho em equipe e pela grande contribuição que me fizeram ter um crescimento pessoal e profissional.

Aos demais amigos, pelo incentivo, diversão e auxílio durante diversos momentos durante o curso.

“Não antecipe os problemas, nem se preocupe com o que talvez nunca aconteça. Aproveite a luz do sol.”

(Benjamin Franklin)

RESUMO

A carbonatação trata-se de um processo físico-químico onde ocorre uma neutralização da solução presente nos poros do concreto. No processo de carbonatação, ocorre a reação dos íons alcalinos presentes no cimento com os gases presentes na atmosfera. Em virtude da redução da alcalinidade do concreto, a reação tem como consequência a degradação da película passivadora que envolve a armadura, podendo fazer com que o processo de formação da corrosão se inicie. Este trabalho tem o objetivo de caracterizar a influência da carbonatação no ensaio de esclerometria por meio da caracterização do índice esclerométrico, da resistência à compressão e da análise da influência da carbonatação no ensaio de esclerometria realizados nos corpos de prova produzidos. Neste trabalho foi realizado um programa experimental, no qual produziu-se doze corpos de provas e estes foram separados em quatro grupos de três amostras. Cada arranjo passou por diferentes períodos de exposição ao CO₂, que foram respectivamente: 0, 15, 30 e 120 minutos. O concreto foi produzido com cimento CP V - ARI e não passou por um processo de cura, sendo o processo de exposição ao CO₂ realizado após a desforma dos corpos de prova. Os resultados obtidos indicam que, conforme a carbonatação vai aumentando, o índice esclerométrico e a resistência à compressão diminuem. Entretanto, a proporção de aumento na carbonatação e redução no índice esclerométrico e resistência à compressão é bem maior nos primeiros trinta minutos da exposição ao CO₂. Para o índice esclerométrico, da redução total que ocorreu, 55,9% ocorreu nos primeiros trinta minutos. Já para a resistência à compressão, 83,8% da redução total ocorreu neste período. Dentre as conclusões presentes neste trabalho, é importante destacar que a maior taxa de redução do índice esclerométrico e a resistência à compressão ocorreu durante o período de maior difusão do CO₂.

Palavras-chave: Estruturas de concreto. Carbonatação. Ensaio de esclerometria.

ABSTRACT

Carbonation is a physicochemical process where there is a neutralization of the solution present in the concrete pores. In the carbonation process, occurs the reaction of alkaline ions present in cement with gases present in the atmosphere. Due to the reduction of the concrete alkalinity, the reaction results in the degradation of the passivating layer that surrounds the reinforcement, which may cause the corrosion formation process to begin. This work aims to characterize the influence of carbonation on the sclerometer test by characterizing the sclerometric index, the compressive strength and the analysis of the influence of carbonation on the sclerometer test performed on the produced specimens. In this work, an experimental program was carried out, in which twelve specimens were produced and divided into four groups of three samples. Each group was exposed to CO₂ for different periods, which were respectively 0, 15, 30 and 120 minutes. The concrete was produced with CP V - ARI cement and did not undergo a curing process, and the CO₂ exposure process was performed after the specimens were deformed. The results indicate that as carbonation increases, the sclerometric index and the compressive strength decrease. However, the proportion of the increase in carbonation and the reduction in the sclerometric index and compressive strength are highest in the first thirty minutes of exposure to CO₂. For the sclerometric index, 55.9% of the total reduction occurred in the first thirty minutes. While for compressive strength, 83.8% of the total reduction occurred in this same period. Among the conclusions presented in this paper, it is important to emphasise that the highest reduction rate of the sclerometric index and the compressive strength occurred during the period of greatest CO₂ diffusion.

Keywords: Concrete structures. Carbonation. Sclerometer test.

LISTA DE FIGOURAS

Figura 3.1	– Uso de fenolftaleína para medição da profundidade de carbonatação.....	20
Figura 3.2	– Fotomicrografia de um concreto obtida em microscópio ótico com polarizador.....	21
Figura 3.3	– Exemplo de termografia de um concreto com cimento CP V - ARI	22
Figura 3.4	– Difração de raios X de concreto produzido com CP V - ARI	23
Figura 3.5	– Difusão do CO ₂ nos poros de concreto	24
Figura 3.6	– Processo de carbonatação do Ca(OH) ₂	25
Figura 3.7	– Leitura do coeficiente de difusão o O ₂ em função do fator água/cimento para cimento Portland	27
Figura 3.8	– Cobrimento do concreto em função do ambiente	29
Figura 3.9	– Aplicação do método de ultrassom em estrutura de concreto	35
Figura 3.10	– Ensaio de pacometria aplicado em uma estrutura de concreto	36
Figura 3.11	– Termografia infravermelha em uma estrutura de concreto	37
Figura 3.12	– Geo Radar Proceq GPR sendo aplicado a uma estrutura de concreto	38
Figura 3.13	– Aplicação do método de penetração de pinos	39
Figura 3.14	– Tomógrafo A1040 - MIRA.....	39
Figura 3.15	– Tomógrafo 3D de uma amostra do estudo de Lorenzi et al (2016)	40
Figura 3.16	– Ensaio de esclerometria aplicado a uma estrutura de concreto	42
Figura 4.1	– Arranjo de peneiras para ensaio de granulometria	44
Figura 4.2	– Peneiramento individual para o ensaio de granulometria	45
Figura 4.3	– Curva de Abrams para obter a relação água/cimento	48
Figura 4.4	– Separação dos materiais para produção do traço	51
Figura 4.5	– Mistura do concreto em betoneira	51
Figura 4.6	– Aparelhagem utilizada no ensaio de <i>slump test</i>	52

Figura 4.7	– Abatimento do concreto produzido	53
Figura 4.8	– Medição do abatimento do concreto produzido	53
Figura 4.9	– Preparação das formas para a moldagem dos corpos de prova	54
Figura 4.10	– Moldagem dos corpos de prova	54
Figura 4.11	– Processo de exposição das amostras ao dióxido de carbono.....	55
Figura 4.12	– Observação de carbonatação no corpo de prova com o uso de indicador de pH	56
Figura 4.13	– Separação dos pontos de aplicação dos impactos	57
Figura 4.14	– Máquina utilizada para realizar a compressão dos corpos de prova	58
Figura 4.15	– Rompimento do corpo de prova a partir de uma aplicação de carga contínua	59
Anexo A.1	– Malha de 4x4 para impactos do esclerômetro	70
Anexo A.2	– Concreto degradando superficialmente após impactos do esclerômetro	70
Anexo A.3	– Posicionamento para execução do impacto com o esclerômetro	71
Anexo A.4	– Aspersão de fenolftaleína para verificar carbonatação após o rompimento dos corpos de prova	71
Anexo A.5	– Rompimento do corpo de prova para avaliar a resistência à compressão	72
Anexo A.6	– Corpos de prova após um período de exposição ao CO ₂	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	46
Gráfico 4.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	47
Gráfico 5.1 – Redução da resistência à compressão x Redução índice esclerométrico	60
Gráfico 5.2 – Comparativo da redução do índice esclerométrico em função do tempo de exposição ao CO ₂	61
Gráfico 5.3 – Comparativo da redução da resistência à compressão em função do tempo de exposição ao CO ₂	62
Gráfico 5.4 – Comparativo da profundidade carbonatada em função do tempo de exposição ao CO ₂	62
Gráfico 5.5 – Redução do índice esclerométrico em função da profundidade de carbonatação	63
Gráfico 5.6 – Redução da resistência à compressão em função da profundidade de carbonatação	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	– Exemplos de indicadores de pH utilizados para medição da frente de carbonatação	20
Tabela 3.2	– Proposta de caracterização do tempo de iniciação por carbonatação	31
Tabela 4.1	– Dados obtidos a partir do ensaio de granulometria do agregado miúdo	45
Tabela 4.2	– Dados obtidos a partir do ensaio de granulometria do agregado graúdo	47
Tabela 4.3	– Determinação do consumo de água da dosagem de concreto	48
Tabela 4.4	– Determinação do volume compactado seco de agregado graúdo	49
Tabela 4.5	– Quantitativo do traço para produzir o volume requerido	50
Tabela 4.6	– Medições da carbonatação dos corpos de prova	56
Tabela 4.7	– Resultados obtidos pelo ensaio de esclerometria	57
Tabela 4.8	– Resistência à compressão dos corpos de prova	59
Tabela 5.1	– Valores médios dos ensaios para cada agrupamento das amostras	60
Tabela 5.2	– Índices esclerométricos antes e depois da exposição ao CO ₂	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Carbonatação	18
3.1.1	<i>Etapas do processo de carbonatação</i>	23
3.1.2	<i>Modelos de carbonatação</i>	26
3.1.2.1	<i>Tuutti (1982)</i>	26
3.1.2.2	<i>Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991)</i>	27
3.1.2.3	<i>Helene (1997)</i>	28
3.1.2.4	<i>Izquierdo (2003)</i>	30
3.1.2.5	<i>Hyvert (2009)</i>	32
3.2	Ensaio não destrutivo	33
3.2.1	<i>Ultrassom</i>	34
3.2.2	<i>Pacometria</i>	36
3.2.3	<i>Termografia infravermelha</i>	36
3.2.4	<i>Radar</i>	37
3.2.5	<i>Penetração de pinos</i>	38
3.2.6	<i>Tomografia ultrassônica</i>	39
3.2.7	<i>Esclerometria</i>	40
3.2.8	<i>Outros métodos de ensaio</i>	42
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
4.1	Produção dos corpos de prova	43
4.1.1	<i>Ensaio de granulometria dos agregados</i>	43
4.1.1.1	<i>Agregado miúdo</i>	44
4.1.1.2	<i>Agregado graúdo</i>	46
4.1.2	<i>Dosagem do concreto</i>	47
4.1.3	<i>Ensaio de abatimento do tronco de cone e produção do concreto</i>	50
4.1.4	<i>Concretagem e moldagem dos corpos de prova</i>	53
4.2	Carbonatação dos corpos de prova	55

4.3	Ensaio de esclerometria	56
4.4	Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova	58
5	RESULTADOS	60
6	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXO A	70

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado, apesar de ser uma associação inteligente de materiais, ser versátil e durável, está sujeito a vários tipos de deterioração, que podem ser causados por um grande número de mecanismos. (CARMONA, 2005). As manifestações patológicas nas estruturas são decorrências dos mecanismos de deterioração do concreto. Os profissionais têm por necessidade compreender e conhecer as manifestações patológicas para que possam entender o desenvolvimento dos mecanismos de deterioração do concreto a partir de uma avaliação de uma estrutura (SAHUINCO, 2011). A NBR 6118 (2014) menciona os diversos mecanismos de degradação do concreto, dentre os quais pode-se citar os ataques de sulfatos, ataques de cloretos, carbonatação do concreto, reação álcali-agregado, corrosão das armaduras, lixiviação do concreto, fissuras, dentre outros.

Dentre os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, a corrosão das armaduras tem se mostrado o de maior incidência e maiores prejuízos econômicos tem trazido aos países (CARMONA, 2005). Dentre os principais agentes agressivos da corrosão em estruturas de concreto, destacam-se os cloretos e o dióxido de carbono. O estudo realizado por Levy e Helene (2000), citado por Carmona (2005), mostrou que a corrosão das estruturas de concreto armado induzida pela carbonatação é um problema frequente nas grandes cidades. Neste estudo foi realizado inspeções detalhadas em 27 escolas públicas na cidade de São Paulo, no qual constatou-se que danos associados com a carbonatação em 96% dessas estruturas.

A carbonatação trata-se de um fenômeno físico-químico entre os íons presentes nos poros do concreto e alguns gases presentes na atmosfera que são difundidos na estrutura (a maior parte das reações ocorrem com o dióxido de carbono presente no ar). A partir daí o concreto, que inicialmente tem pH alcalino, começa a diminuir seu pH em decorrência do processo de formação da carbonatação. Como consequência do processo ocorre a despassivação da armadura, o que acaba deixando o ambiente presente na estrutura propício à formação do processo de corrosão da armadura do concreto. Entre os fatores que influenciam na velocidade do processo de difusão do CO_2 , Pauletti (2009) cita a concentração do CO_2 e sua condição de acesso na estrutura, a distribuição dos poros, assim como a presença de água nos poros.

Ferreira (2013) menciona que as estruturas de concreto podem acabar sofrendo muitos problemas que influenciam na estabilidade global e na extensão dos danos da mesma em virtude da carbonatação, visto que se trata de um processo que ocorre de forma generalizada

no material. Esses problemas ocorrem principalmente devido que o processo de carbonatação acabam favorecendo também ao desenvolvimento continuado da corrosão das armaduras. Por isso, é fundamental garantir que a estrutura tenha uma grande durabilidade na região do cobrimento das armaduras, pois nessa região ocorre as reações formadoras da carbonatação.

Para caracterização da carbonatação e de outras patologias encontradas nas estruturas de concreto podem ser utilizados diversos ensaios, dentre os quais podem ser divididos em ensaios destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos. Como o próprio nome sugere, os ensaios não destrutivos são aqueles em que não ocorre dano algum na amostra (ou tem algum dano irrisório que não afeta a capacidade estrutural do material) utilizada no ensaio.

Os ensaios não destrutivos podem ser empregados na grande maioria das estruturas, seja ela nova ou antiga. Para as estruturas antigas, os ensaios podem ser utilizados, por exemplo, para avaliar a integridade e a capacidade de resistência do elemento. Já para as estruturas novas, pode-se utilizar os ensaios, por exemplo, para monitorar a evolução da capacidade de resistência da estrutura ou para caracterizar o concreto empregado para fins de esclarecimento de dúvidas na execução dessas estruturas (EVANGELISTA, 2002). Diversos ensaios podem ser considerados não destrutivos, dentre os quais pode-se citar os seguintes métodos: ultrassom, esclerometria, penetração de pinos, auscultação, termografia infravermelha, emissão acústica, fibra ótica, torque Stoll, dentre outros.

Neste trabalho, o ensaio não destrutivo empregado foi o ensaio de esclerometria, onde trata-se de um método utilizado para medir a dureza superficial do concreto, no qual fornece elementos para a avaliação da qualidade do concreto endurecido. De acordo com Evangelista (2002), o ensaio de esclerometria consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de um martelo com determinada massa e energia que é controlado por uma mola que se movimenta por um pistão. O ricochete do impacto é medido e é conhecido como índice esclerométrico (I.E.).

No Brasil, o ensaio de esclerometria é padronizado pela norma da ABNT NBR 7584 (2012) – Concreto endurecido: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Esta norma de maneira geral define toda a aparelhagem a ser utilizada no ensaio, prescreve como devem ser tomados os devidos cuidados na organização da área de ensaio, mostra as condições em que devem serem feitos os impactos realizados pelo esclerômetro de reflexão, define as condições para que os elementos possam ser utilizados no ensaio e descreve como devem serem feitos os resultados do ensaio.

Apesar de a norma NBR 7584 (2012) mostrar que a carbonatação é um dos fatores que tem influência no ensaio de esclerometria, o tamanho dessa influência não é mensurado,

fazendo com que haja apenas um aspecto qualitativo da relação entre a carbonatação e o ensaio de esclerometria. Este trabalho tem importância, pois além de confirmar a análise qualitativa feita pela NBR 7584 (2012), também nele será quantificado o quanto a carbonatação influencia os ensaios de esclerometria, através do uso de corpos de prova com diferentes tempos de exposição ao CO₂.

O estudo trata-se de um programa experimental que fará uma análise da influência da carbonatação no ensaio de esclerometria. Também serão analisados a sua influência relacionada a resistência à compressão. Para a produção deste programa experimental foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o processo de carbonatação e os ensaios não destrutivos (com ênfase no ensaio de esclerometria). A partir daí foram produzidas as amostras para obtenção dos resultados para caracterização da influência da carbonatação nestes ensaios citados.

Este trabalho está dividido em seis seções. Na seção 1 é apresentado uma introdução do trabalho, no qual aborda de maneira delimitada o tema deste trabalho. Nesta seção também é apresentada a justificativa do tema e a metodologia que foi realizado o trabalho. Na seção 2, é exposto o objetivo geral do trabalho, bem como seus objetivos específicos. Na seção 3 é apresentado o referencial teórico acerca do tema proposto, para que possa dar um embasamento teórico para compreensão do trabalho. Na seção 4 são apresentados os materiais e métodos do trabalho, onde é explicado detalhadamente cada passo realizado da pesquisa. Na seção 5, são apresentados os resultados e discussões acerca dos experimentos realizados. Por fim, na seção 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como a sugestão de trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Caracterizar a influência da carbonatação no índice esclerométrico de concreto.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a resistência à compressão axial do concreto por meio do ensaio de ruptura de corpo de prova;
- Caracterizar o índice esclerométrico através do ensaio de esclerometria;
- Analisar a influência da carbonatação na resistência à compressão do concreto;
- Analisar a influência da carbonatação no índice esclerométrico.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Carbonatação

A carbonatação consiste na transformação de íons alcalinos presentes no cimento, tais como os cátions de sódio, potássio e de cálcio em sais de carbonatos desses elementos, através da ação ácida do dióxido de carbono (CO_2) existente na atmosfera (CASCUDO; CARASEK, 2011). Ou seja, a carbonatação trata-se de um processo físico-químico onde ocorre uma neutralização da solução presente nos poros do concreto. Além do dióxido de carbono, outros principais constituintes presentes na atmosfera que produzem a neutralização dos compostos alcalinos presentes no cimento são o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S) (CADORE et al, 2008).

Ainda de acordo com Cadore et al (2008), o fenômeno recebe o nome de carbonatação devido a reação de neutralização entre o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o dióxido de carbono, que acaba por resultar em carbonato de cálcio (CaCO_3). Em virtude da redução da alcalinidade do concreto, a reação tem como consequência a deterioração da película passivadora que envolve o aço do concreto armado.

A redução da alcalinidade do concreto não é um fator nocivo ao concreto em si. No entanto, no caso do concreto armado, a degradação da película passivadora pode acabar criando um ambiente crítico para a formação corrosão, desde que determinadas condições sejam reunidas, tais como presença de água, diferença de potencial e a presença de oxigênio (PAULETTI, 2009). A carbonatação pode ser um fator para dar início ao processo de corrosão, no entanto a carbonatação e a corrosão não estão inevitavelmente ligadas, visto que a umidade relativa que mais favorece a carbonatação está em torno de 60% e a que mais favorece a corrosão excede 80% (SILVA, 2002).

Conforme cita Fernandes Paris (1973, apud SILVA, 2002, p. 26), a carbonatação que está atuando na superfície do concreto pode alterar suas propriedades, tais como: permeabilidade, durabilidade frente a agentes salinos, porosidade, resistência mecânica, e de maneira indireta a proteção das armaduras em concreto armado e protendido.

De acordo com Saetta *et al.* (1993), a carbonatação também é associada com a mudança de volumes dos poros do concreto, que por consequência acabam causando microfissuras e rachaduras, onde essas alterações podem acabar ocasionando diretamente mudanças na permeabilidade e difusão dos gases presentes no processo de carbonatação. Por isso, nos trabalhos relacionados a carbonatação, bem como a porosidade do concreto, é

necessário sempre levar em consideração esse fenômeno para o desenvolvimento do estudo, uma vez que estes afetam nas equações de difusão dos gases formadores do processo de carbonatação.

Em condições naturais de exposição (0,03% a 1% de CO₂), o processo de formação da carbonatação pode precisar de muitos anos para que se possa ter dados passíveis de análise. Sendo que esse período de tempo é função da relação água/cimento e da composição química do cimento. Para relações água/cimento altas (acima de 0,60), com um período de tempo de aproximadamente um ano de exposição ao CO₂, já pode-se obter dados da profundidade que foi houve carbonatação. Já para concretos com relações água/cimento baixas (inferiores a 0,50), o período demandado para caracterizar a velocidade de carbonatação pode levar até cerca de 20 anos (KOBUKU; NAGATAKI, 1989 apud PAULETTI et al, 2007, p.8).

Com o intuito de reduzir o período de análise da carbonatação, diversas pesquisas são realizadas com teores de CO₂ maiores que as concentrações encontradas nas condições naturais de exposição, o que por sua vez acaba por acelerar o processo de carbonatação. Os resultados alcançados nos ensaios acelerados realizados em laboratório, devido ao controle das condições do ensaio, jamais ocorrerão em circunstâncias reais de degradação, visto que a influência das variáveis é aleatória (PAULETTI, 2007). Um dos fatores que mais tem influência no uso de ensaios acelerados é o fator econômico, visto que estes ensaios reduzem o período de tempo que é necessário para que seja possível obter os resultados da análise, o que conseqüentemente acaba por reduzir os custos das pesquisas.

Para a medição da frente de carbonatação do concreto, geralmente são utilizados métodos colorimétricos, ou seja, a medição é realizada através do emprego de indicadores de pH como a fenolftaleína, vermelho de cresol, azul de nil, dentre outros. Na utilização desse tipo de técnica, o indicador, quando entra em contato com uma solução ácida, a estrutura adquire uma coloração típica que varia de acordo com o tipo de indicador de pH utilizado no processo. No caso da medição da profundidade de carbonatação do concreto, este tipo de técnica acaba sendo muito prático, visto que o concreto, antes de entrar no processo de carbonatação, apresenta um pH alcalino. Conseqüentemente, essa parte do concreto que ainda apresenta alcalinidade acaba adquirindo a coloração típica do indicador de pH utilizado, enquanto que a parte da estrutura que teve uma redução de pH se mantém incolor (ou outra cor característica). A tabela 3.1 mostra as propriedades de alguns indicadores de pH empregados na medição da frente de carbonatação.

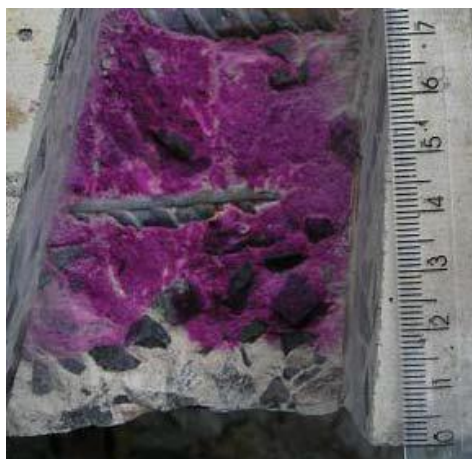
Tabela 3.1: Exemplos de indicadores de pH utilizados para medição da frente de carbonatação.

Indicadores	Cores	Ponto de viragem	Formulação
Vermelho de cresol	Amarelo / Vermelho	7,2 – 8,8	0,1g/100 ml de etanol
Fenolftaleína	Incolor / Rosa	8,0 – 9,9	0,1g/100 ml de etanol
Timolftaleína	Incolor / Azul	9,3 – 10,5	0,1g/100 ml de etanol
Amarelo de alizarina	Amarelo claro / Amarelo escuro	10,0 – 12,1	0,1g/100 ml de etanol
Alizarina	Vermelho / Púrpura	10,1 – 12,1	0,1g/100 ml de etanol
Azul de nil	Azul / Vermelho	10,1 – 11,1	0,1g/100 ml de água

Fonte: Pauletti (2009).

Dentre os indicadores de pH utilizados para a medição da profundidade de carbonatação, o indicador à base de fenolftaleína é bastante conhecido e muito empregado no uso desse tipo de técnica. Trata-se de um tipo de indicador de pH com ponto de viragem entre 8,0 e 9,9, que apresenta coloração vermelha carmim quando entra em contato com pHs iguais ou superiores a sua faixa de viragem. A figura 3.1 mostra um exemplo do uso de fenolftaleína para medição da frente de carbonatação do concreto.

Figura 3.1: Uso de fenolftaleína para medição da profundidade de carbonatação.



Fonte: Silva e Liborio (2005).

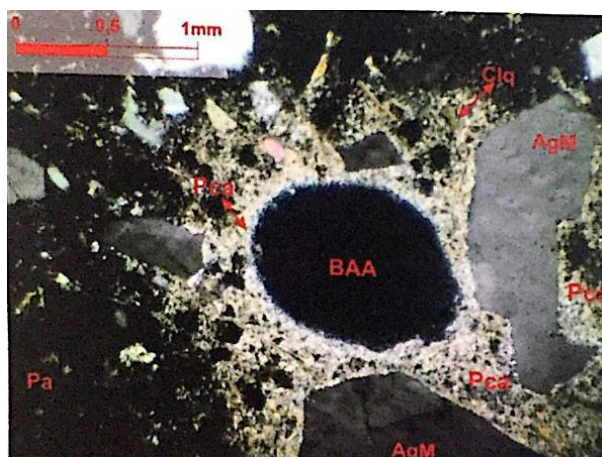
Com relação ao tempo que pode ser realizada a leitura da profundidade de carbonatação depois que ocorre a aspersão do indicador de pH, a RILEM (1988) recomenda, através da CPC-18, que o período de medição da carbonatação seja 24 horas depois da aspersão do indicador de pH, para aumentar a nitidez entre as regiões carbonatadas e não carbonatadas. No entanto, o estudo de Castro (2003), citado por Cascudo e Carasek (2011), apresentou resultados de que não existe uma diferença significativa entre uma medida feita dez minutos depois da aspersão do indicador e uma leitura realizada após as 24 horas recomendadas pela RILEM (1988).

Para uma análise maior da carbonatação é sempre importante observar além da profundidade carbonatada, a espessura de cobrimento do concreto. O ideal é que a espessura que foi carbonatada nunca chegue a espessura de cobrimento do concreto, pois quando a carbonatação chegar nessa espessura, esta já pode ter atingido a armadura e iniciado o processo de despassivação do aço.

Além da técnica de aspersão do indicador de pH, diversas outras técnicas mais elaboradas para avaliar a profundidade de carbonatação do concreto são empregadas, no qual além de quantificarem a frente de carbonatação, ainda podem caracterizar os tipos de carbonatos formados a partir da reação. As técnicas que serão citadas neste trabalho são as seguintes: análise petrográfica, densimetria por radiação gama, termogravimetria e difração de raios X.

As técnicas acima são todas detalhadas no estudo de Cascudo e Carasek (2011). No caso da técnica de análise petrográfica, algumas lâminas delgadas são preparadas com a amostra de concreto e são observadas em um microscópio ótico que está sob um feixe de luz polarizada. Na observação da frente carbonatada através da microscopia, é possível estimar a quantidade de compostos carbonatados na amostra. A figura 3.2 ilustra como a técnica é empregada.

Figura 3.2: Fotomicrografia de um concreto obtida em microscópio ótico com polarizadores paralelos.



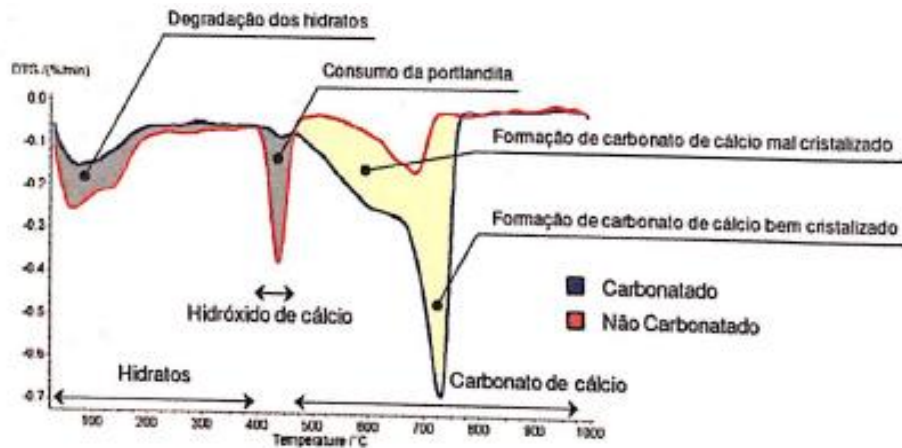
Fonte: Cascudo e Carasek (2011).

No método de densimetria por radiação gama, é observado a absorção dos raios que são emitidos por uma fonte radioativa e a partir daí é possível analisar a evolução da densidade da amostra. Este tipo de técnica é mais utilizado em ensaios acelerados de carbonatação, onde os corpos de prova não passam por uma secagem ao longo do tempo. Assim, a frente de carbonatação é obtida através da diferença densidade da amostra não carbonatada e a amostra carbonatada no instante da análise. Nesse caso é possível fazer essa

análise da densidade, pois a variação de densidade pode ser atribuída ao CO_2 que foi fixado na amostra.

Na análise da carbonatação através da termogravimetria, é detectada pelo uso da técnica a perda de massa da amostra ocorrida a partir de uma variação de temperatura controlada em laboratório. As reações que são provenientes da carbonatação acabam consumindo a portlandita e deterioram os compostos hidratados (C-S-H, aluminatos e compostos de magnésio) na formação do carbonato de cálcio. Neste procedimento de análise da carbonatação, são retiradas amostras de concreto com profundidades conhecidas, nos quais são moídas e são submetidas a um aumento contínuo de temperatura até chegar entre 1000°C e 1100°C em uma termobalança. A figura 3.3 mostra um exemplo do emprego da técnica de termogravimetria para analisar uma amostra carbonatada.

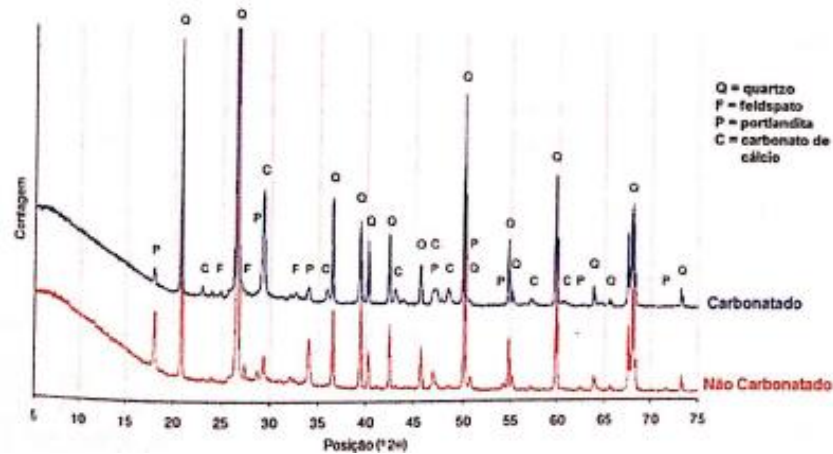
Figura 3.3: Exemplo de termografia de um concreto com cimento CP V - ARI.



Fonte: Hopper Filho (2008, apud Cascudo e Carasek, 2011, p. 876).

A avaliação da frente de carbonatação por meio da difração de raios X é bastante utilizada nas análises em laboratório pois é uma técnica simples, rápida, não requer grandes quantidades de amostra e pode diferenciar as formas alotrópicas do carbonato de cálcio. É uma técnica em que as regiões carbonatadas são distinguidas das regiões não carbonatadas através identificação da presença de carbonato de cálcio. Esta identificação é feita a partir da detecção das fases cristalinas do concreto. A figura 3.4 mostra o emprego da difração de raios X em uma amostra de concreto carbonatada e outra não carbonatada.

Figura 3.4: Difração de raios X de concreto produzido com CP V – ARI.



Fonte: Hopper Filho (2008, apud Cascudo e Carasek, 2011, p. 877).

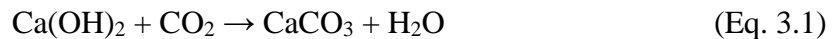
3.1.1 Etapas do processo de carbonatação

O processo de carbonatação envolve gases dissolvidos e reagentes sólidos. Os sólidos que reagem com o CO_2 inclui além do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (C-S-H = silicato de cálcio hidratado), que é o produto da hidratação de dois componentes do cimento Portland: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S = silicato tricálcico) e $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S = silicato dicálcico). Estas duas reações de hidratação também conduzem para a formação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Conseqüentemente, para formar o processo de carbonatação, é preciso também levar em consideração o processo de hidratação, já que este último é a principal fonte da formação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e seus reagentes (C_3S e C_2S) e produtos (CSH) são também suscetíveis para reagir com o CO_2 (PAPADAKIS et al, 1989).

De acordo com Papadakis et al (1989), a água está sempre presente em maior ou menor quantidade nos poros da pasta de cimento endurecida e desempenha um papel fundamental no processo de carbonatação. O papel da água é duplo: primeiro, bloqueia os poros e assim dificulta a difusão do CO_2 através dos poros. Segundo, fornece um meio para a reação entre o CO_2 e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

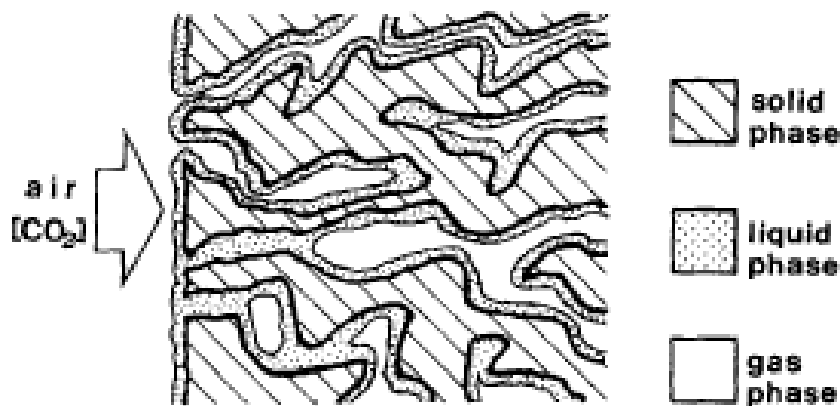
Justamente por isso, quando a umidade relativa do ar apresenta baixos níveis de concentração, a difusão do CO_2 pode ocorrer rapidamente, no entanto a maioria dos poros não tem (ou tem muito pouca) presença de água e por isso a carbonatação da estrutura ocorre lentamente. O contrário também ocorre quando a umidade relativa do ar apresenta níveis altos de concentração: os poros estão preenchidos com água, e conseqüentemente a difusão do CO_2 torna-se muito lenta.

De acordo com Pauletti (2004), a carbonatação trata-se de um processo onde os elementos constituintes do cimento aos poucos vão sendo substituídos pelos carbonatos, por meio de reações com o dióxido de carbono e outros gases. O processo ocorre de maneira lenta de acordo com a seguinte reação principal:



As etapas para a formação do processo de carbonatação ocorrem no meio aquoso presente nas paredes dos poros do concreto. A figura 3.5 mostra o esquema da difusão do CO₂ nas paredes dos poros do concreto.

Figura 3.5: Difusão do CO₂ nos poros do concreto



Fonte: Papadakis et al, 1989.

A descrição do processo geral de formação da carbonatação do hidróxido de cálcio, conforme Thiery et al (2005) e Pauletti (2009) é apresentada nas seguintes etapas:

a) difusão do CO₂, no qual se apresenta na fase gasosa, e a dissolução da solução presente nos poros, onde a partir dessa reação, ocorre a formação ácido carbônico;



b) dissociação do H₂CO₃, no qual ocorre o consumo dos íons OH⁻ e conseqüentemente acaba diminuindo o valor do pH da solução presente nos poros do concreto. O ácido carbônico na água tem um comportamento de um diácido fraco e a dissociação do mesmo ocorre em duas etapas;



c) dissolução do Ca(OH)₂, com o intuito de reestabelecer a alcalinidade do meio provocada pela íons consumidos de OH⁻;

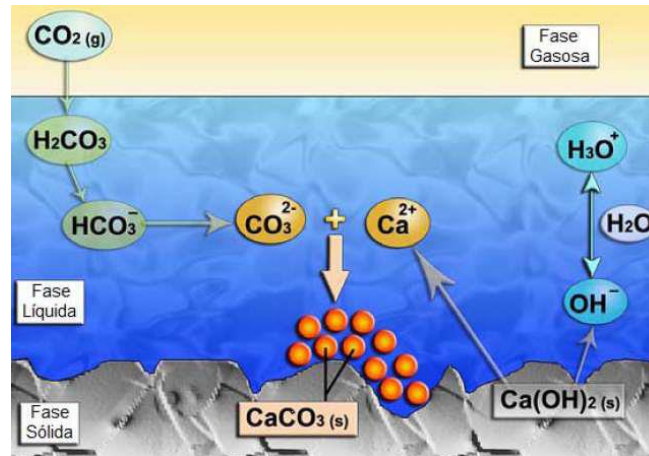


d) os íons de cálcio resultantes da dissolução do Ca(OH)_2 reagem com os íons de carbonato resultantes do CO_2 , onde a partir dessa reação ocorre a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3).



A figura abaixo mostra a representação das etapas do processo de carbonatação do Ca(OH)_2 .

Figura 3.6: Processo de carbonatação do Ca(OH)_2



Fonte: Pauletti (2009), baseado em Thierry (2005).

De acordo com Taylor (1997), citado por Ferreira (2013), além da reação com o hidróxido de cálcio, o CO_2 também pode reagir com o silicato de cálcio hidratado e os aluminatos, conforme as seguintes equações:



No caso da reação de carbonatação dos aluminatos, primeiramente eles se convertem em C_4ACH_x e posteriormente em CaCO_3 e gel de alumina. Enquanto que o monossulfato (AF_m) e a etringita (AF_t), transformam-se em CaCO_3 , gel de alumina e sulfato de cálcio. Com relação ao C-S-H, a carbonatação deste tem origem com a sua descalcificação. Posteriormente, após o decréscimo da relação Ca/Si, ocorre a formação do gel de sílica (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Ainda de acordo com Cascudo e Carasek (2011), os álcalis do cimento (sódio e potássio) também são suscetíveis à formação do processo de carbonatação. Estes álcalis se apresentam na solução dos poros do concreto. O processo de carbonatação dos álcalis está descrito nas equações a seguir.



Peter et al (2008, apud FERREIRA, 2013, p. 29-30), realizaram estudos sobre a influência dos compostos da pasta de cimento no consumo de CO₂, no que diz respeito ao processo de carbonatação do concreto. Os compostos analisados em suas pesquisas foram o Ca(OH)₂, C-S-H, C₂S e C₃S. Conforme os resultados apresentados neste estudo, o Ca(OH)₂ acabou por consumir cerca de três vezes mais CO₂ que o C-S-H, vinte vezes maior que o C₂S e cinquenta vezes maior que o C₃S. Esse consumo muito maior de CO₂ pelo hidróxido de cálcio pode ser explicado pelo fato de que este se faz presente em grande quantidade na pasta de cimento hidratada e também por ser muito mais solúvel.

3.1.2 Modelos de carbonatação

Diversos modelos foram construídos tendo a finalidade de representar o processo de carbonatação, no qual a previsão da profundidade da carbonatação natural é realizada a partir de ensaios acelerados. Para realizar essa previsão, há vários parâmetros que influenciam na definição dos coeficientes de ponderação que são relacionados aos ensaios acelerados. Pode-se citar a umidade, temperatura do ambiente e a concentração de CO₂ como alguns dos parâmetros que podem ter influência na previsão da profundidade da carbonatação natural, onde esses fatores variam dependendo do tipo de modelo de previsão analisado. Os modelos que serão descritos a seguir têm sido empregados a nível mundial e cada um utiliza diferentes metodologias para relacionar os ensaios acelerados com a carbonatação natural.

Os modelos de carbonatação que serão abordados neste trabalho são os seguintes:

- TUUTTI (1982);
- PAPADAKIS, VAYENAS E FARDIS (1989,1991);
- HELENE (1997);
- IZQUIERDO (2003);
- HYVERT (2009).

3.1.2.1 Tuutti (1982)

De acordo com o estudo de Tuutti (1982), a estimativa de profundidade de carbonatação dos concretos pode ser calculada pelo produto do coeficiente de carbonatação pela raiz quadrada do tempo, de acordo com a equação abaixo.

$$X = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Onde:

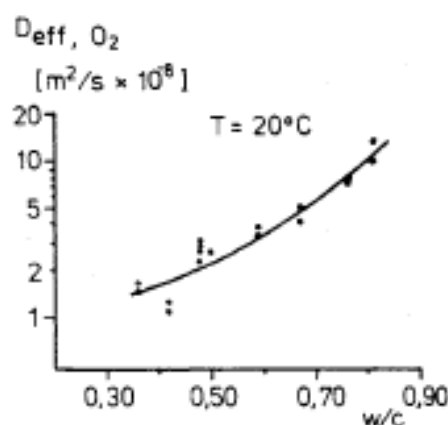
X = profundidade de carbonatação (m);

k_{CO_2} = Coeficiente de carbonatação ($m/s^{0,5}$);

t = período de exposição da estrutura ao CO_2 (s).

Para aplicação desse modelo, é necessário inicialmente saber o coeficiente de difusão do CO_2 , visto que o coeficiente de carbonatação é dependente do coeficiente de difusão do CO_2 . Para facilitar a determinação em laboratório, o autor usa uma simplificação de o coeficiente de difusão do CO_2 ser igual ao coeficiente de difusão do O_2 . Apesar do uso dessa simplificação, o autor ressalta que os dois gases não são equivalentes. O coeficiente de difusão do O_2 pode ser determinado a partir da figura 3.7, no qual este depende da relação água/cimento.

Figura 3.7: Leitura do coeficiente de difusão do O_2 em função do fator água/cimento para cimento Portland.



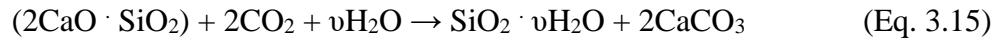
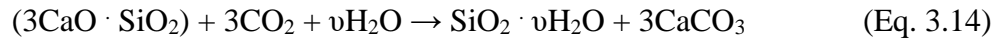
Fonte: TUUTTI (1982).

De acordo com o estudo Carmona (2005) e Ferreira (2013), apesar de o modelo de Tuutti ser bastante completo, este não informa como determinar o coeficiente de difusão (e consequentemente o coeficiente de carbonatação k), o que acaba por dificultar a aplicação prática do modelo. Carmona (2005) também pondera que o uso da simplificação descrita acima levou a conclusões erradas em análise de concreto com adições.

3.1.2.2 Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991)

O modelo de Papadakis et al. parte do princípio de considerar a química da formação da carbonatação, onde a formulação do modelo é baseada nas equações de equilíbrio de massa do CO_2 , $Ca(OH)_2$, C-S-H, C_3S e C_2S . Estas equações estão elencadas abaixo, conforme Pauletti (2009).





A equação para previsão da frente de carbonatação no tempo é dada em função da concentração ambiente de CO_2 , difusividade do CO_2 e a concentração total de CaO , conforme está descrita abaixo.

$$e_c = \sqrt{\frac{2 D_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]^0}{[\text{Ca}(\text{OH})_2]^0 + 2[\text{CSH}]^0 + [\text{C}_3\text{S}]^0 + [\text{C}_2\text{S}]^0} t} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação;

D_{CO_2} = coeficiente de difusão efetivo do CO_2 no material carbonatado;

t = tempo (s);

$[\text{CO}_2]$ = concentração molar do CO_2 ;

$[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ e $[\text{CSH}]$ = concentração molar dos hidratos;

$[\text{C}_3\text{S}]$ e $[\text{C}_2\text{S}]$ = concentração molar dos anidros;

O índice 0 é relativo às concentrações iniciais ($t = 0$).

É importante ressaltar que este modelo foi validado pelos autores para ensaios acelerados. Apesar de ser um modelo de simples aplicação, alguns fatores como a mudança de porosidade causadas pela formação da carbonatação e a umidade relativa são desconsiderados. De acordo com Carmona (2005), o modelo leva em conta o consumo de cimento para o cálculo da reserva alcalina de concreto, o que acaba por ser uma ação errônea. Ainda assim, trata-se de um método bastante completo e contempla a influência de diversos parâmetros. Além disso, o método de cálculo da reserva alcalina por esse modelo também é limitado somente ao cimento Portland comum (CP I).

3.1.2.3 Helene (1997)

No modelo de previsão proposto por Helene (1997), o coeficiente de carbonatação (k_{CO_2}) depende da temperatura ambiente, dos ocasionais ciclos de molhagem e secagem do concreto, da quantidade retida de CO_2 em função da composição, da difusividade do CO_2 , do gradiente de concentração de CO_2 no ambiente, eventuais adições ao cimento, etc.

Neste modelo é proposto a adoção de ábacos que, embora determinem o cobrimento das armaduras em função do ambiente, também é possível realizar a dedução dos valores do coeficiente de carbonatação de diferentes tipos de concreto. Além de ser dependente do

cobrimento indicado pelo ábaco, a dedução do k_{CO_2} também depende da idade da estrutura, que é indicada no projeto. Esta dedução é feita utilizando a equação abaixo.

$$c = k_{CO_2} \cdot t^{0,5} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Onde:

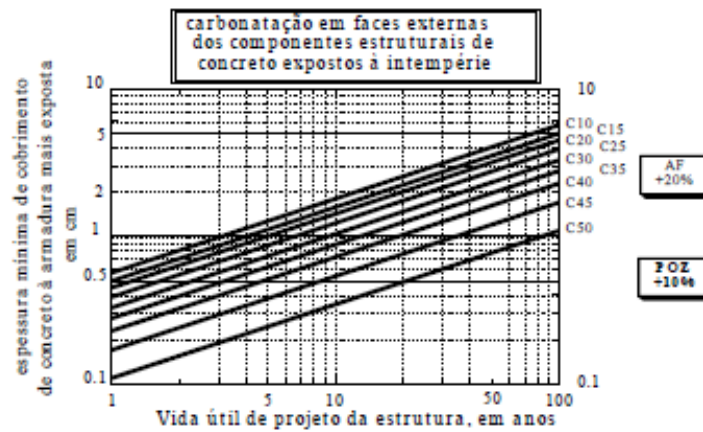
c = extensão percorrida pelo agente agressivo;

k_{CO_2} = coeficiente de carbonatação;

t = vida útil.

A figura 3.8 mostra o ábaco para a obtenção da espessura de cobrimento às armaduras em função do ambiente.

Figura 3.8: Cobrimento do concreto em função do ambiente.



Fonte: Helene (1997)

Helene (1997) cita também que no caso de serem usados cimentos Portland com escórias de alto forno, o cobrimento deve ser aumentado em pelo menos 20%, pois a profundidade carbonatada também aumenta nessa ordem. Já para os cimentos Portland com uso de pozolanas, deve-se aumentar em 10%.

Conforme o estudo de Carmona (2005), a previsão de k_{CO_2} do modelo de previsão de Helene (1997) pode ser feita de acordo com as seguintes equações:

$$k_{CO_2} = (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$k_{CO_2 AF} = 1,2 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

$$k_{CO_2 POZ} = 1,1 \cdot (6,7882 - 0,1131 \cdot f_{ck}) \cdot \frac{\sqrt{C_s}}{\sqrt{0,1}} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

Onde:

k_{CO_2} = coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0,5});

$k_{CO_2 AF}$ = coeficiente de carbonatação para cimentos com uso de escória de alto forno;

$k_{CO_2 POZ}$ = coeficiente de carbonatação para cimentos com uso de pozolanas;

f_{ck} = Resistência característica do concreto (MPa);

C_s = Concentração ambiente de CO₂ (% volume).

3.1.2.4 Izquierdo (2003)

No trabalho de Izquierdo (2003), foi proposto um modelo matemático de ingresso dos agentes agressivos (CO₂ e cloretos) no concreto. O modelo foi feito a partir de uma extensa base de ensaios, no qual se propôs a eliminar as variáveis que afetam o problema e a caracterização estatística.

De acordo com Izquierdo (2003), todos os modelos apresentados em seu estudo, que estão baseados no fenômeno de difusão, têm a mesma formulação matemática, que é corrigida empiricamente para ajustar o modelo teórico aos resultados experimentais encontrados por cada autor. De maneira geral se trata de empregar a raiz quadrada do tempo com três parâmetros básicos que regem o comportamento da difusão e basicamente se tratam das concentrações de cada espécie difusiva: Concentração de CO₂ no exterior (C_s), reserva alcalina do concreto (a) e coeficiente de difusão do concreto (D_{CO_2}).

A partir dos modelos apresentados em seu estudo, Izquierdo (2003) formulou uma equação que englobou todos os modelos de forma aproximada.

$$X_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} \cdot C_s}{a}} \cdot \sqrt{t} = V_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

A partir da equação 3.21, Izquierdo (2003) inseriu alguns fatores para calibração do seu modelo de carbonatação e a equação para o modelo de carbonatação ficou da seguinte maneira.

$$X = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2} \cdot C_s \cdot K_t \cdot K_e \cdot K_p}{a}} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \cdot \sqrt{t} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$D_{CO_2} = 10^{\varepsilon + A + B \cdot \log(a/c)} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

Onde:

A = coeficiente de regressão;

B = coeficiente de regressão;

ε = termo de erro;

K_t = coeficiente da raiz do tempo;

K_e = fator de umidade relativa do ambiente na velocidade de carbonatação;

K_p = fator geral de ajuste do modelo;

n = fator de idade do concreto;

C_s = concentração superficial de CO_2 (kg/m^3);

a/c = fator água/cimento;

a = reserva alcalina do concreto (kg/m^3);

t_0 = tempo de cura (s);

t = tempo (s);

Para o cálculo da reserva alcalina do concreto (a), conforme Carmona (2005), o autor formulou uma equação baseada no modelo de Tuutti (1982), diferindo apenas o fato de que Izquierdo (2003) propôs uma equação linear de interpolação do grau de hidratação do cimento (GH).

$$a = C \cdot \frac{\%CaO}{100} \cdot \frac{50 \cdot (a/c) + 40}{100} \cdot \frac{MCO_2}{M_{CaO}} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

Onde:

C = consumo de cimento (kg/m^3);

$\%CaO$ = teor de CaO no cimento (%);

a/c = relação água/cimento;

MCO_2 = massa molar do CO_2 (kg);

M_{CaO} = massa molar do CaO (kg);

No estudo do modelo, também foi proposta uma caracterização estatística das variáveis do modelo, conforme consta na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Proposta de caracterização do tempo de iniciação por carbonatação.

Variável	Descrição	Unidade	Distribuição	Média	Coefficiente de variação (%)
A	Primeiro coeficiente de regressão	-	Normal	-15,156	5
B	Segundo coeficiente de regressão	-	Normal	4,7213	24
E	Termo de erro	-	Normal	1	70,10
K_t	Modelo da raiz do tempo	-	Normal	1	15
K_e	Fator de Umidade relativa (70%)	-	Beta	0,85	14
	Fator de Umidade relativa (80%)	-	Beta	0,52	40
K_p	Fator de ajuste geral do modelo	-	Normal	1	30
n	Fator de idade do	-	Log normal	0,13	80

	concreto		truncada		
C _s	Concentração de CO ₂ no ar	kg CO ₂ /m ³	Normal	0,00066	15
a/c	Fator água/cimento	-	Normal	Nominal	5
C	Consumo de cimento	kg/m ³	Normal	Nominal	5

Fonte: Izquierdo (2003).

De acordo com Carmona (2005), a caracterização das variáveis do modelo de Izquierdo (2003) é uma importante contribuição para o avanço das aplicações dos modelos de previsão da carbonatação. No entanto, por ser um modelo extremamente complexo, só pode ser utilizado com auxílio de programas computacionais específicos para análises de confiabilidade.

3.1.2.5 Hyvert (2009)

O modelo de Hyvert (2009) tem uma formulação simplificada, devido a não levar em considerações as movimentações de água na estrutura que está sofrendo processo de carbonatação. Ferreira (2013) cita que o modelo de Hyvert (2009) parte do princípio que o processo de carbonatação progride como uma frente e que na região carbonatada, os aluminatos, a etringita e a portlandita são totalmente consumidos em baixas pressões (0,03%) e altas (50%) de CO₂. A equação formulada pelo modelo é apresentada a seguir.

$$e_c = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2}^0 \cdot P_0 \cdot t}{R \cdot T \left(1 + \alpha \cdot c_2 \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n\right) \cdot \left(\frac{c_2}{n+1} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n + Q_1\right)}} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Onde:

e_c = profundidade carbonatada;

P_0 = pressão parcial de CO₂ na superfície do material;

P_{atm} = pressão atmosférica;

t = tempo (t);

R = constante dos gases perfeitos;

T = temperatura;

$D_{CO_2}^0$ = coeficiente de difusão do CO₂ na zona carbonatada para uma exposição em pressão natural de CO₂;

Q_1 = número de moles de cálcio contidos nos três tipos de hidratos (a portlandita, a etringita e os aluminatos);

α = parâmetro em função do tipo de cimento. Reflete a influência sobre a difusão do CO₂, na diminuição da porosidade devida à carbonatação do C-S-H.

n = parâmetro em função do tipo de cimento. Afinidade química dos compostos C-S-H com vistas à pressão de CO₂;

De acordo com Pauletti (2009), trata-se de um modelo simples de se utilizar, devido permitir prever a carbonatação natural a partir de um ensaio acelerado. Apesar a principal característica do modelo ser a desconsideração das transferências termo-hídricas, acaba por ser uma limitação ao modelo para a predição da carbonatação *in situ*. Ainda assim, o modelo pode classificar os materiais cimentícios quanto à sua durabilidade frente à carbonatação. Possan (2010), citado por Ferreira (2013), ponderou que apesar das simplificações, o modelo tem resultados positivos em suas simulações.

3.2 Ensaaios não destrutivos

Ensaaios não destrutivos, como o próprio nome sugere, são aqueles ensaios realizados que não causam danos (ou tem um dano muito pequeno) no material a ser ensaiado e que não provocam diminuição da resistência da estrutura. Podem ser empregados em estruturas novas ou antigas. Para estruturas novas, os ensaios não destrutivos podem ser adequados no monitoramento da resistência ou na análise da qualidade do concreto. Já para as estruturas mais antigas, os ensaios permitem avaliar o estado que se encontra a estrutura e a capacidade de resistências aos esforços solicitantes da estrutura (EVANGELISTA, 2002).

De acordo com Helal et al. (2015), os ensaios não destrutivos têm a finalidade de designar a qualidade e integridade dos materiais, sem que a capacidade de resistência da estrutura analisada seja comprometida. É importante ressaltar que, apesar de os ensaios não destrutivos causarem dano irrisório na estrutura, eles não devem ser confundidos com ensaios não invasivos. Os ensaios não destrutivos podem, por exemplo, serem invasivos, desde que não degradem os elementos estruturais, a ponto de afetar a utilidade dos mesmos.

Dentre as propriedades do concreto que tem a possibilidade de serem analisadas através dos ensaios não destrutivos, pode-se citar a resistência, módulo de elasticidade, massa específica, dureza superficial, condições de umidade, absorção, permeabilidade, etc. (EVANGELISTA, 2002).

Os ensaios não destrutivos foram criados para que fosse possível ser realizada a identificação e prevenção dos danos estruturais. Tratam-se de métodos que têm utilizações bastante viáveis, devido que estes são ensaios baratos e não tem comprometimento na

segurança do operador. Os ensaios não destrutivos permitem diagnosticar a estrutura em todo o período de sua vida útil, que vai desde a fase construtiva até o período de operação e manutenção dessa estrutura. Sendo assim, tratam-se de técnicas que tentam prever e erradicar os problemas que estão relacionados com a durabilidade da estrutura (HELAL et al., 2015).

Os ensaios não destrutivos são empregados para a obtenção de informações que possam colaborar para o processo de tomada de decisão quando não se nota a presença de degradação aparente na estrutura, quando não há a deterioração extrema da estrutura ou quando o desempenho estrutural seja insatisfatório (SAHUINCO, 2011).

A aplicação dos ensaios não destrutivos na monitoração de estruturas de concreto armado tem se constituído como uma estratégia interessante, devido ser um tipo de análise que evita que a investigação provoque danos que podem acabar tendo um grande custo para realizar a correção, ou ainda que o reparo resulte em um ambiente mais vulnerável à deterioração do elemento, ocasionando assim, uma redução da vida de serviço da estrutura (LORENZI et al, 2016).

Os ensaios não destrutivos são apropriados para realizar a localização e determinação da extensão de fissuras, determinar a uniformidade do concreto, avaliar o potencial de durabilidade do concreto, monitorar a mudança das propriedades do concreto ao longo do tempo, realizar o controle tecnológico em pré-moldados, esclarecer dúvidas envolvidas na mistura, lançamento, compactação, cura e transporte do concreto, verificar a degradação do concreto resultante de ataque do meio ambiente, sobrecarga, incêndio e fadiga, dentre outros. (EVANGELISTA 2002).

De acordo com Carino (1992, apud CÂMARA, 2006, p. 7), os ensaios não destrutivos podem ser divididos em dois grupos, dentre os quais pode-se citar os seguintes ensaios:

- Para avaliação da resistência do concreto: ultrassom, ensaio de torque *Stoll*, método da maturidade, esclerometria, ensaio de penetração de pinos, ensaio de aderência, etc.
- Para avaliação de estruturas: termografia infravermelha, auscultação, métodos magnéticos e elétricos, emissão acústica, inspeção visual, fibras óticas, etc.

A seguir são descritos alguns tipos de ensaios não destrutivos.

3.2.1 Ultrassom

O ensaio de ultrassom, um dos ensaios não destrutivos mais utilizados na engenharia civil ao lado do ensaio de esclerometria, trata-se de um ensaio não destrutivo que utiliza a propagação de ondas ultrassônicas em estruturas de concreto, no qual é medido o período de

tempo necessário para que a onda saia do ponto inicial até chegar ao ponto final definido pelo operador do equipamento. Lorenzi et al. (2016) cita que a velocidade de propagação da onda depende de diversos fatores, tais como a porosidade, natureza do material e a presença de água nos poros da estrutura.

A partir das características da propagação das ondas, é possível, por exemplo, detectar falhas na estrutura de concreto analisada, bem como determinar o tamanho do dano causado por essas falhas. Com o uso do ensaio de ultrassom, também é possível, por exemplo, caracterizar a estrutura, no qual pode-se determinar, a partir de correlações, modelos conhecidos e relações matemáticas, a sua composição, densidade, geometria e propriedades. (HELAL et al., 2015).

Lorenzi et al. (2016) cita que os resultados obtidos na análise do ensaio podem ser utilizados para corrigir o processo tecnológico e dar um prognóstico da qualidade do concreto analisado. Como vantagem do ensaio, por se tratar de um processo rápido e não destrutivo, pode-se fazer um controle total da estrutura ao longo do tempo. Naik et al. (2004), citado por SPÍNDOLA (2017, p. 7), menciona que os tipos de agregados, o tipo de cimento, fator água/cimento, adições e a idade do concreto interferem na velocidade de propagação da onda em estruturas de concreto.

No Brasil, o método de utilização do ultrassom é normatizado pela ABNT NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (2013). O método se aplica à realização de ensaios de ensaios em corpos de prova e testemunhos de estruturas, além de verificação da homogeneidade do concreto de elementos estruturais (NBR 8802, 2013). A figura 3.9 mostra uma aplicação do ensaio de ultrassom em estruturas de concreto.

Figura 3.9: Aplicação do método de ultrassom em estrutura de concreto.



Fonte: www.cimentoitambe.com.br/ensaios-nao-destrutivos-penetram-concreto-a-dentro. Acesso: 07/10/19.

3.1.2 Pacometria

De acordo com Santos (2008), citado por Sahuinco (2011), trata-se de um ensaio não destrutivo que tem base na leitura da interação entre as armaduras e a baixa frequência de um campo eletromagnético criado pelo pacômetro. Com os dados obtidos de intensidade e frequência, pode-se detectar a localização das armaduras de aço presentes no concreto armado. Além disso, é possível estimar a espessura das barras de aço presente na armadura e o cobrimento das mesmas. O método do ensaio é descrito em ACI 228 2R-98.

Depois de realizada a calibração do pacômetro, é necessário marcar com uma sonda os pontos que serão percorridos. A partir daí as armaduras são identificadas, caso estejam presentes na estrutura, por meio de um sinal sonoro e é realizada a leitura do cobrimento, bem como o espaçamento da armadura. (SAHUINCO, 2011).

SPÍNDOLA (2017) cita que o ensaio de pacometria deve ser feito antes de todos os outros ensaios não destrutivos utilizados em uma análise de uma estrutura de concreto armado, para que possa ser realizada a marcação da armadura que está presente na estrutura, fazendo com que os resultados encontrados não fiquem fora da realidade. A figura 3.10 apresenta um ensaio de pacometria em uma estrutura de concreto.

Figura 3.10: Ensaio de pacometria aplicado em uma estrutura de concreto.



Fonte: www.solucao.eng.br/novo/ensaios-nao-destrutivos-em-concreto.html. Acesso: 07/10/19.

3.1.3 Termografia infravermelha

Lorenzi et al. (2016) menciona que a termografia infravermelha baseia-se no pressuposto de que o fluxo de calor que percorre por algum material é afetado por alguma anormalidade que está abaixo da superfície desse material. Daí, é possível que sejam localizadas diferenças de temperatura da superfície. A localização dessas anormalidades pode

ser feita medindo-se o fluxo de calor presente na superfície. Uma área que apresenta anomalias na estrutura, possui condutividade térmica distinta e esta região é mostrada nos termógrafos infravermelhos como sendo uma área resfriada ou com manchas quentes, dependendo da superfície que está sendo analisada.

Os resultados obtidos pelos termógrafos são representados em forma de termogramas, que resumidamente são imagens que medem a intensidade de calor emitida por alguma estrutura e estas são convertidas pelos termógrafos. Na construção civil, o ensaio é utilizado para destacar anomalias presentes nas estruturas de concreto. A figura 3.11 mostra um exemplo de aplicação do ensaio em uma estrutura de concreto.

Figura 3.11: Termografia infravermelha em uma estrutura de concreto.



Fonte: www.acesopercon.com.br/percon/termografia-com-infravermelho. Acesso: 07/10/19.

3.1.4 Radar

De acordo com Evangelista (2002), o uso do radar na construção civil se baseia no princípio da reflexão de ondas eletromagnéticas pelas estruturas de concreto. Esse ensaio pode detectar vazios na estrutura, assim como medir a espessura de pavimentos. O uso dessa técnica tem como grande desvantagem o fato de o equipamento de radar ser muito oneroso. Além disso, é necessário realizar um ótimo planejamento de ensaio e prática para análise dos resultados.

DA SILVA FILHO et al. (2011) diz que para o uso desta técnica, é utilizado uma antena alocada na superfície da estrutura que vai ser analisada, no qual irradia energia para captação do sinal por uma antena receptora. A partir daí é realizada a caracterização geométrica do trecho analisado. Alguns estudos estão sendo feitos com o intuito de relacionar os resultados obtidos pelo radar com algumas condições próprias do concreto, para que seja

possível estimar riscos de patologias na estrutura. A figura 3.12 mostra uma aplicação do ensaio.

Figura 3.12: Geo Radar Proceq GPR sendo aplicado a uma estrutura de concreto



Fonte: www.proceq.com/pt/compare/proceq-gpr-live. Acesso: 07/10/19.

3.1.5 Penetração de pinos

O método de penetração de pinos consiste em uma técnica que utiliza uma pistola que dispara pinos (figura 3.13) e estes penetram no concreto até que a energia cinética do disparo seja dissipada. Através de curvas de correlação, a resistência do concreto pode ser estimada a partir da profundidade que os pinos penetraram. Além disso, pode-se estimar a compressão, a uniformidade do concreto e analisar o desenvolvimento da resistência do concreto nas primeiras idades. (CÂMARA, 2006).

O método apresenta como vantagens o fato de o equipamento ser simples de operar, que necessita de pouca manutenção, é durável, além de possuir dispositivo de proteção contra disparos acidentais. Deve-se evitar a utilização em zonas que tenham a presença de barras de aço, o que acaba dificultando o uso desta técnica em estruturas antigas (CÂMARA, 2006).

Figura 3.13: Aplicação do método de penetração de pinos.



Fonte: www.solucao.eng.br/novo/ensaios-nao-destrutivos-em-concreto.html. Acesso: 08/10/19.

3.1.6 Tomografia ultrassônica

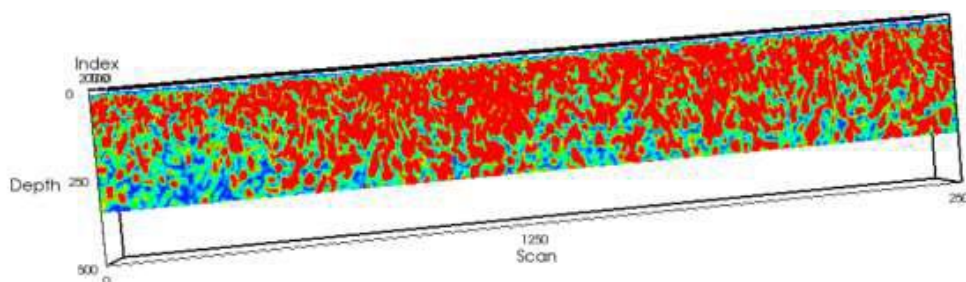
De acordo com Lorenzi et al. (2016), este método permite ser feita uma avaliação do concreto que pode aprimorar o controle de qualidade e auxiliar na reabilitação de estruturas de concreto. Para fazer o diagnóstico do concreto, são utilizados tomógrafos que permitem uma representação em 3D dos defeitos que se encontram no interior da estrutura. A partir daí, é possível, por exemplo, detectar fissuras, heterogeneidades e falhas de concretagem na estrutura. A tomografia ultrassônica também pode ser utilizada para determinar a integridade da estrutura. Apesar disso, o uso deste método requer que o operador tenha bastante experiência com o aparelho para detectar os defeitos nas estruturas. A figura 3.14 mostra um exemplo de tomógrafo e a figura 3.15 sua aplicação no estudo de Lorenzi et al. (2016).

Figura 3.14: Tomógrafo A1040 – MIRA.



Fonte: Lorenzi et al. (2016).

Figura 3.15: Tomografia 3D de uma amostra do estudo de Lorenzi et al. (2016).



Fonte: Lorenzi et al. (2016).

3.1.7 Esclerometria

Dentre os ensaios não destrutivos citados, um dos mais difundidos dentre todos é o ensaio de esclerometria, que é um método utilizado para medir a dureza superficial do concreto, no qual fornece elementos para a avaliação da qualidade do concreto endurecido. O ensaio de esclerometria foi desenvolvido em 1948 pelo engenheiro suíço Ernst Schmidt e também é conhecido como Schmidt Rebound Hammer (KOLEK, 1969 apud SPÍNDOLA 2017, p. 7). De acordo com Evangelista (2002), o ensaio de esclerometria consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de uma forma padronizada, no qual tem-se uma determinada massa e uma determinada energia. A partir desse impacto, o ricochete do mesmo é medido. Essa medição é conhecida como índice esclerométrico (I.E.).

A NBR 7584 (2012), que se trata da norma que estabelece o método para o ensaio de esclerometria, define o índice esclerométrico como sendo o valor obtido por meio de um impacto do esclerômetro de reflexão sobre uma determinada área de ensaio, fornecido pelo aparelho, que corresponde ao número de recuo do martelo.

A resistência do concreto pode ser estimada a partir de curvas de calibração presente no aparelho utilizado no ensaio. Focaoaru (1984, apud EVANGELISTA, 2002, p. 61) diz que não há uma correlação única entre o valor do índice esclerométrico e a resistência à compressão, devido a influência de vários fatores, tais como a natureza do agregado, a maturidade e teor de umidade do concreto, o tipo e a quantidade de cimento.

Conforme diz Evangelista (2002), o ensaio de esclerometria tem grandes vantagens quando comparado aos outros ensaios, dentre os quais pode-se citar o equipamento barato, de operação simples e leve, além dos danos ocasionados na superfície serem praticamente inexistentes. Vale ressaltar também que, quando comparado com os outros ensaios não destrutivos, o ensaio de esclerometria é o que requer menor habilidade mecânica do operador.

Apesar dessas vantagens, o ensaio apresenta com limitação o fato de que os resultados estão relacionados somente a uma zona de cerca de 30mm de profundidade.

Conforme a NBR 7584 (2012) mostra, os seguintes itens são os principais fatores que têm influência nos resultados do ensaio:

- Tipo de cimento: a influência do tipo de cimento tem grande relevância na obtenção do índice esclerométrico, onde quando houver alteração do tipo de cimento, faz-se necessário proceder a novas correlações;
- Tipo de agregado: diferentes tipos de agregados podem fornecer concretos com a mesma qualidade, porém com diferentes índices esclerométricos. Quando se empregam agregados leves ou pesados, esta variação é ainda mais acentuada;
- Tipo de superfície: o estado da superfície onde o ensaio é realizado normalmente é o que mais ocasiona a variabilidade dos resultados;
- Condições de umidade da superfície: superfícies úmidas podem acabar provocando uma estimativa abaixo do esperado da qualidade do concreto;
- Carbonatação: a influência da carbonatação na dureza da superfície do concreto é significativa e promove a superestimação da resistência. Devem ser definidos coeficientes corretivos, a fim de minimizar o efeito da carbonatação;
- Idade: ocorre devido a fatores, como a diferença de cura, carbonatação e outros. Fatores específicos devem ser considerados para cada concreto em questão, corrigindo-os quando necessário;
- Operação do esclerômetro: deve ser operado por indivíduo qualificado para o procedimento, onde deve transmitir, durante a operação, pressões que sejam uniformes sobre a superfície de ensaio.

A NBR 7584 (2012) recomenda que para que o ensaio seja realizado, deve-se fazer inicialmente os preparos para que a área de ensaio apresente o mínimo possível de rugosidades. Além disso, a área de ensaio deve estar afastada de regiões afetadas por segregações, exsudação, concentração excessiva de armadura, juntas de concretagem, cantos, arestas, etc. Por isso, é apropriado que se evitem regiões próximas a bases e topos dos pilares, regiões inferiores de vigas, quando no meio do vão e regiões próximas dos apoios.

A NBR 7584 (2012) também recomenda que as peças de concreto utilizadas no ensaio devem ter dimensões maiores que dez centímetros na direção do impacto, para que sejam suficientemente rígidos, afim de que se evite fenômenos como vibração e ressonância, fazendo com que não haja interferência nos resultados. Para as peças que tiverem dimensões

inferiores a dez centímetros, deve-se colocar apoios no encontro da face oposta à área de ensaio.

Apesar de poder estimar a resistência à compressão do concreto por meio de correlações empíricas fornecidas por curvas de conversão presentes no aparelho, a NBR 7584 (2012) recomenda que este método não seja um ensaio que substitua os ensaios de resistência à compressão, devendo ser apenas um ensaio adicional ou complementar para fins de comparação dos resultados. A figura 3.16 mostra o ensaio de esclerometria sendo aplicado a uma estrutura de concreto.

Figura 3.16: Ensaio de esclerometria aplicado a uma estrutura de concreto.



Fonte: www.solucao.eng.br/novo/ensaios-nao-destrutivos-em-concreto.html. Acesso: 07/10/19.

3.1.8 Outros métodos de ensaios

Além dos ensaios não destrutivos citados, ainda existem diversos métodos utilizados para caracterizar as estruturas de concreto. Vale citar neste trabalho os *métodos eletrônicos* que têm sido utilizados, por exemplo, para investigar a corrosão das armaduras. Os *métodos radioativos* podem ser empregados para avaliar as condições das armaduras, segregações dos materiais e as fissuras presentes no concreto. Os *métodos nucleares* são utilizados, por exemplo, quando se necessita estimar os teores de cimento de uma estrutura de concreto endurecida. Também merece destaque os *ensaios de permeabilidade*, que são muito importantes em estruturas que devem impedir a passagem de água.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Produção dos corpos de prova

Para realizar os objetivos desse estudo, foi necessário a confecção de 12 corpos de prova cúbicos com dimensão de 10 cm. Para a moldagem dos mesmos, foram confeccionadas 4 conjuntos de formas com madeira compensada, onde cada uma possui 3 espaços para a moldagem dos corpos de prova. Essa separação foi feita em conjunto para fins de facilitar a moldagem, visto que a cada 3 corpos de prova, as condições de ensaio dos mesmos serão diferentes.

Para a produção dos corpos de prova utilizados no presente estudo, foi necessário realizar o ensaio de granulometria para a caracterização dos agregados, a dosagem do concreto, o ensaio de *slump test* para caracterizar a trabalhabilidade do concreto produzido e a concretagem dos corpos de prova.

4.1.1 Ensaio de granulometria dos agregados

O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a distribuição granulométrica dos agregados utilizados na concretagem dos corpos de prova. Ou seja, determina a distribuição da porcentagem em massa de cada faixa específica de tamanho de grãos. No Brasil, o ensaio é realizado de acordo com a NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Para a determinação granulométrica dos agregados, foi realizada a análise de 2 amostras de material para a caracterização de cada agregado. O método de peneiramento utilizado no estudo foi o manual.

Para o ensaio realizado, foram utilizados os seguintes materiais:

- Bateria de peneiras (19,0/9,5/4,8/2,4/1,2/0,6/0,3/0,15/ Fundo)
- Balança com precisão de 0,1g;
- Escova de aço;

Para que a determinação granulométrica seja satisfatória, as amostras analisadas devem atender os seguintes critérios que a NBR NM 248 exige que sejam satisfeitos:

- O somatório de todas as massas retidas nas peneiras e no fundo não pode diferir mais que 0,3% da massa inicial da amostra;

- A porcentagem retida em cada peneira, por amostra, deve ser apresentada com aproximação de 0,1%;
- As amostras devem apresentar necessariamente a mesma dimensão máxima característica;
- Para uma mesma peneira, os valores da porcentagem retida não devem diferir mais de quatro unidades entre as amostras;
- As porcentagens médias retida e acumulada devem ser apresentadas com aproximação de 1%.

4.1.1.1 Agregado miúdo

Para a determinação granulométrica do agregado miúdo foi determinada inicialmente a quantidade mínima a ser coletada de amostra, de acordo com a NBR NM 248. Para o estudo em questão, decidiu-se ter uma amostra mínima de 1000g. Inicialmente realizou-se a pesagem da primeira amostra e foi notado o peso da amostra. Após, todas as peneiras foram colocadas umas sobre as outras, na ordem da maior para a menor abertura das malhas, colocando o fundo posterior a peneira menor. A figura 4.1 mostra como ficou o arranjo inicial das peneiras.

Figura 4.1: Arranjo de peneiras para ensaio de granulometria.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao organizar as peneiras, foi acrescentado a massa pesada da primeira amostra no topo das peneiras e foi realizada uma pequena vibração com todas as peneiras para a passagem das partículas menores. Como o peneiramento realizado foi o manual, separou-se cada peneira com um outro fundo para realizar o peneiramento individual de cada malha. O tempo de peneiramento foi em torno de 1 minuto ou até se perceber visualmente que as menores partículas conseguiram passar para o fundo.

O material que ficou retido na peneira foi separado para pesagem e anotado para realizar a análise granulométrica da amostra. O material que passou para o fundo, foi adicionado para a peneira seguinte e repetido o mesmo processo até que chegasse a última peneira. A figura 4.2 mostra o processo descrito. O mesmo processo foi realizado para a segunda amostra.

Figura 4.2: Peneiramento individual para o ensaio de granulometria.



Fonte: Elaborado pelo autor.

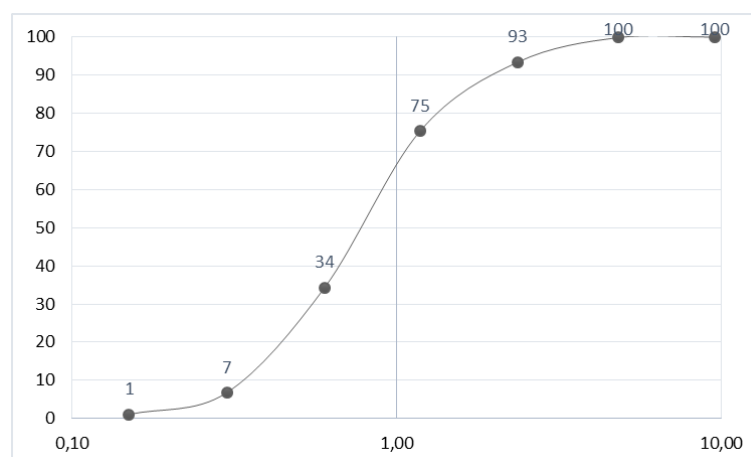
Depois foi observado se as amostras atendiam as exigências da NBR NM 248. Os resultados da análise estão na tabela e no gráfico abaixo.

Tabela 4.1: Dados obtidos a partir do ensaio de granulometria do agregado miúdo.

Agregado miúdo											
Massa da amostra 1 (g)						1002,7					
Massa da amostra 2 (g)						1002,7					
Peneira (mm)	Massa retida (g)		Amostra 1			Amostra 2			Média		
	Amostra 1	Amostra 2	% Retida	% Acumulada	% Que passa	% Retida	% Acumulada	% Que passa	% Retida	% Acumulada	% Que passa
19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0	0	100
9,50	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0	0	100
4,80	1,4	0,9	0,1	0,1	99,9	0,1	0,1	99,9	0	0	100
2,40	67,3	61,4	6,7	6,8	93,2	6,1	6,2	93,8	6	7	93
1,20	172,3	190,6	17,2	24,0	76,0	19,0	25,2	74,8	18	25	75
0,60	393,5	429,6	39,2	63,3	36,7	42,8	68,1	31,9	41	66	34
0,30	292,0	260,7	29,1	92,4	7,6	26,0	94,1	5,9	28	93	7
0,15	63,4	51,1	6,3	98,7	1,3	5,1	99,2	0,8	6	99	1
Fundo	10,0	6,2	1,0	99,7	0,3	0,6	99,8	0,2	1	100	0
Total	999,8	1000,6									
Dimensão máxima característica (DMC)						4,8					
Módulo de finura (MF)						2,89					

Fonte: elaborada pelo autor.

Gráfico 4.1: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.2 Agregado graúdo

Para a determinação granulométrica do agregado graúdo, de maneira semelhante ao procedimento realizado para o agregado miúdo, foi determinada inicialmente a quantidade mínima a ser coletada de amostra, de acordo com a NBR NM 248. Para o estudo em questão, decidiu-se ter uma amostra mínima de 2000g. Inicialmente realizou-se a pesagem da primeira amostra e foi notado o peso da amostra. Após, todas as peneiras foram colocadas umas sobre as outras, na ordem da maior para a menor abertura das malhas, colocando o fundo posterior a peneira menor.

Ao organizar as peneiras, foi acrescentado uma parte da massa pesada da primeira amostra no topo das peneiras e foi realizada uma pequena vibração com todas as peneiras para a passagem das partículas menores. Nas peneiras de maior abertura de malha, além do peneiramento manual, após separou-se individualmente os agregados que conseguiam passar na peneira, desde que não fosse forçado. Do mesmo modo, o tempo de peneiramento foi em torno de 1 minuto ou até se perceber visualmente que as menores partículas conseguiram passar para o fundo.

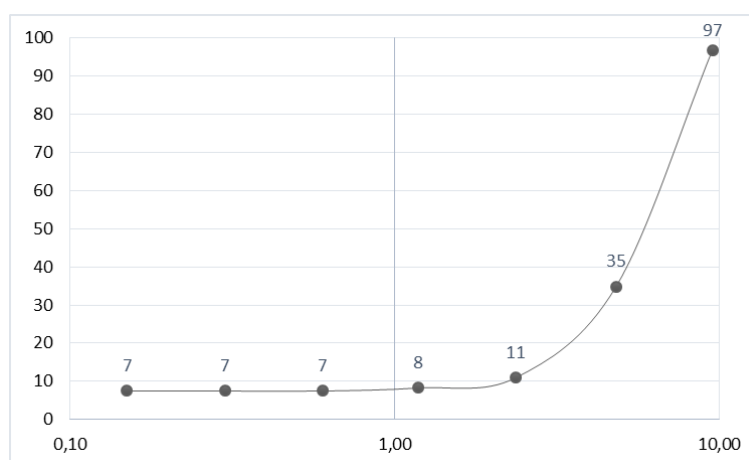
Repetiu-se o processo para o restante da amostra pesada inicialmente e o material que ficou retido na peneira foi separado para pesagem e anotado para realizar a análise granulométrica da amostra. O material que passou para o fundo, foi adicionado para a peneira seguinte e repetido o mesmo processo até que chegasse a última peneira. O mesmo processo foi realizado para a segunda amostra. Depois foi observado se as amostras atendiam as exigências da NBR NM 248. Os resultados da análise estão na tabela e no gráfico abaixo.

Tabela 4.2: Dados obtidos a partir do ensaio de granulometria do agregado graúdo.

Agregado graúdo											
Massa da amostra 1 (g)						2001,6					
Massa da amostra 2 (g)						2001,0					
Peneira (mm)	Massa retida (g)		Amostra 1			Amostra 2			Média		
	Amostra 1	Amostra 2	% Retida	% Acumulada	% Que passa	% Retida	% Acumulada	% Que passa	% Retida	% Acumulada	% Que passa
19,0	101,2	100,5	5,1	5,1	94,9	5,0	5,0	95,0	5	5	95
9,50	73,4	54,0	3,7	3,7	96,3	2,7	2,7	97,3	3	3	97
4,80	1240,3	1242,1	62,0	65,6	34,4	62,1	64,8	35,2	62	65	35
2,40	487,8	466,3	24,4	90,0	10,0	23,3	88,1	11,9	24	89	11
1,20	47,9	60,5	2,4	92,4	7,6	3,0	91,1	8,9	3	92	8
0,60	13,4	18,0	0,7	93,1	6,9	0,9	92,0	8,0	1	93	7
0,30	0,0	0,0	0,0	93,1	6,9	0,0	92,0	8,0	0	93	7
0,15	0,0	0,0	0,0	93,1	6,9	0,0	92,0	8,0	0	93	7
Fundo	36,1	60,1	1,8	94,9	5,1	3,0	95,0	5,0	2	95	5
Total	2000,1	2001,4									
Dimensão máxima característica (DMC)						25,0					
Módulo de finura (MF)						5,32					

Fonte: elaborada pelo autor.

Gráfico 4.2: Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Dosagem do concreto

Tendo em vista as particularidades dos materiais utilizados neste trabalho, procurou-se definir uma melhor proporção entre os materiais utilizados para produzir o concreto. O método para realizar a devida constituição foi o método da Associação Brasileira de Cimento Portland, também conhecido como método de dosagem ABCP. Este método é uma adaptação do método da *American Concrete Institute* (ACI) para os agregados utilizados no Brasil.

Para que os resultados do método fossem satisfatórios, algumas características dos materiais constituintes do concreto (bem como alguns parâmetros desejados no concreto produzido) foram elencadas:

- Cimento: tipo, massa específica, resistência à compressão em 28 dias;
- Agregados: granulometria, módulo de finura, dimensão máxima característica, massa unitária, massa específica, composição mineralógica, inchamento e umidade;
- Concreto: consistência desejada no estado fresco, resistência à compressão desejada.

Para o procedimento de cálculo do traço do concreto, inicialmente calculou-se a resistência de dosagem na idade de 28 dias. A resistência à compressão desejada foi de 25 MPa e o desvio padrão de dosagem utilizado nos cálculos foi de 4,0 MPa. Logo,

$$f_{c28} = f_{ck} + 1,65 \times S_d = 25 + 1,65 \times 4,0 = 31,60 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

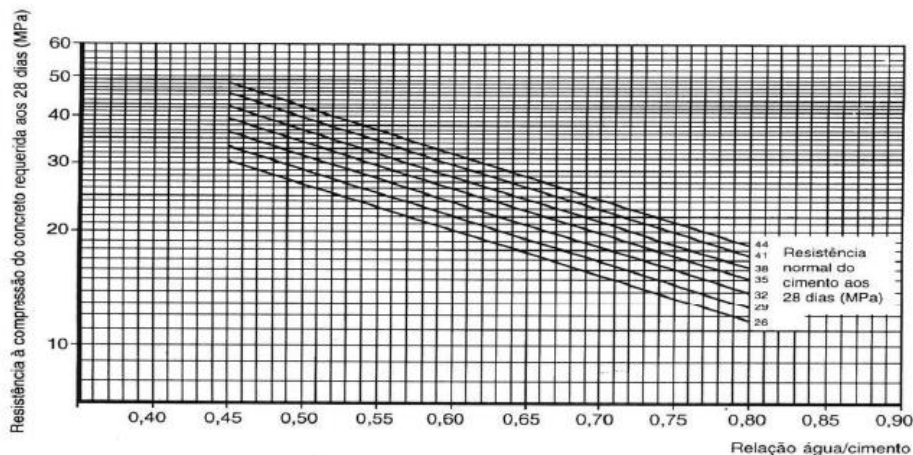
f_{c28} = Resistência de dosagem na idade de 28 dias;

f_{ck} = Resistência à compressão característica do concreto;

S_d = Desvio padrão da dosagem.

Após o cálculo da resistência à compressão da dosagem, o fator de água/cimento foi obtido, onde a escolha do fator é em função da curva de Abrams do cimento (figura 4.3).

Figura 4.3: Curva de Abrams para obter a relação água/cimento



Fonte: Método ABCP.

Com o fator de água/cimento fixado, foi determinado o consumo aproximado de água a partir da seguinte tabela.

Tabela 4.3: Determinação do consumo de água da dosagem de concreto.

Consumo aproximado de água (l/m ³)					
Abatimento (mm)	D _{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180

60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Método ABCP.

O abatimento requerido para o concreto produzido foi de 70 mm. Ao analisar a dimensão máxima característica do agregado graúdo, que foi de 25 mm, percebeu-se que o consumo de água (C_a) foi de 195 l/m³.

Com o consumo de água aproximado, foi realizada a determinação do consumo de cimento a partir da seguinte equação.

$$C_c = C_a / (a/c) = 325 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

C_c = Consumo de cimento por metro cúbico de concreto;

(a/c) = Fator de água/cimento.

Após realizar os cálculos do consumo de cimento, foi calculado o consumo de agregado graúdo, onde determinou-se primeiramente o volume compactado de agregado seco por m³ de concreto. A determinação foi feita a partir da tabela 4.4, onde o módulo de finura utilizado foi definido na seção 4.1.1.1.

Tabela 4.4: Determinação do volume compactado seco de agregado graúdo.

Módulo de finura (MF)	$D_{\text{máx}}$ agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Método ABCP.

Foi necessário realizar uma interpolação para encontrar o volume compactado de agregado seco por m³ de concreto (V_b). Assim, tem-se que: $V_b = 0,685$.

Ao encontrar esse volume, procedeu-se para encontrar o consumo em massa de agregado graúdo (C_b). Esse cálculo é realizado a partir do produto entre o volume compactado de agregado seco por m³ de concreto e a massa unitária compactada do agregado graúdo (M_b).

$$C_b = V_b \times M_b \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1027,5 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

A partir dos cálculos realizados anteriormente, determinou-se o consumo de agregado miúdo a partir do cálculo de seu volume. Para esse cálculo foi necessário determinar a massa específica do cimento, brita e água.

$$V_m = 1 - [(C_c/\gamma_c) + (C_b/\gamma_b) + (C_a/\gamma_a)] = 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Daí, foi feito o cálculo do consumo de agregado miúdo (C_m) através do produto da massa específica da areia utilizada e o volume de agregado miúdo encontrado na equação 4.4.

$$C_b = V_m \times \gamma_m = 847,0 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Com todos os cálculos realizados, a apresentação do traço foi realizada, no qual a ordem foi a seguinte: cimento, areia, brita, a/c. A apresentação do traço deve ser feita em função do cimento: Traço calculado \rightarrow 1,00: 2,61: 3,16: 0,60.

Por fim, foram feitos os cálculos da quantidade de material consumido para realizar o ensaio de *slump test* e o material consumido para a confecção de todos os corpos de prova. Foi utilizado um volume total de 30 litros de concreto. A partir desse volume calculou-se a quantidade de cimento a ser consumido. O valor calculado foi de 9,49 kg.

Com a quantidade de cimento calculada, a partir do traço apresentado, multiplicou-se o valor de cada material pela quantidade de cimento a ser utilizado. Todos os quantitativos estão apresentados na tabela 4.5. Vale ressaltar que todos os materiais foram quantificados em massa.

Tabela 4.5: Quantitativo do traço para produzir o volume requerido.

Material	Traço	Consumo de cimento (kg)	Consumo de materiais (kg)
Cimento	1,00	9,49	9,49
Areia	2,61		24,73
Brita	3,16		30,01
Água	0,60		5,69

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3 Ensaio de abatimento do tronco de cone e produção do concreto

O ensaio de *slump test*, também conhecido como abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67, é um tipo de método utilizado para determinar a consistência do concreto fresco por meio da medição do seu assentamento. Trata-se de um ensaio que tem grande importância nas diversas obras, pois é um tipo de ensaio que pode trazer uma maior segurança na produção do concreto que a obra requer.

O concreto produzido para ser utilizado no ensaio foi dosado previamente, conforme a seção 4.1.2. Inicialmente foi realizado a pesagem dos materiais e separados em alguns recipientes conforme a figura 4.4.

Figura 4.4: Separação dos materiais para produção do traço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a pesagem dos materiais feitas, prosseguiu-se para produção do concreto em betoneira. Nesta etapa, a adição dos materiais na betoneira para fabricação do concreto foi realizada na seguinte ordem:

- Agregado graúdo;
- Cerca de 50% da água;
- Cimento;
- Agregado miúdo;
- Restante da água.

A medida que os materiais foram sendo adicionados, o tempo de mistura deles eram de 2 a 3 minutos. A figura 4.5 mostra o concreto produzido após a mistura dos materiais.

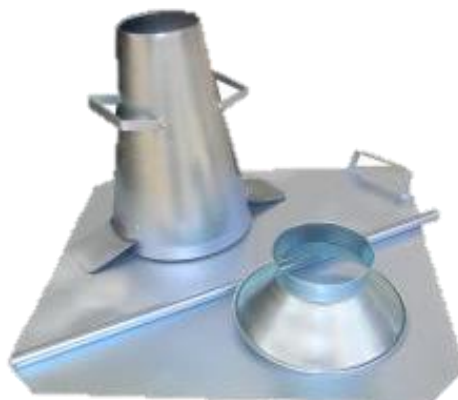
Figura 4.5: Mistura do concreto em betoneira.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o concreto produzido, antes de moldar os corpos de prova, foi realizado o ensaio de *slump test* para verificar se seria necessária alguma alteração na composição para que o concreto tivesse o abatimento requerido inicialmente. A produção do concreto e o ensaio foi realizado no dia 17 de setembro de 2019. A aparelhagem utilizada no ensaio, conforme a NBR NM 67, estão mostrados na figura 4.6.

Figura 4.6: Aparelhagem utilizada no ensaio de *slump test*.



Fonte: www.didaticasp.com.br/conjunto-slump-test

Seguindo as recomendações da NBR NM 67, a respeito do procedimento do ensaio, antes de iniciar o ensaio, o molde e a placa da base foram umedecidos. Para realizar o preenchimento do molde com o concreto produzido, foi posicionado os pés sobre as aletas do molde para que ele estivesse estável. O molde foi enchido em três camadas com cerca de um terço da altura da forma. Cada camada foi compactada com 25 golpes (distribuídos uniformemente) da haste de socamento.

Depois de compactado todo o material, foi feito o rasamento da superfície do concreto para que ele fica moldado conforme a forma. Posteriormente foi retirado o molde do concreto, no qual foi levantado na direção vertical com muito cuidado. Após a retirada do molde, o abatimento do concreto foi medido. A figura 4.7 mostra o abatimento do concreto produzido.

Figura 4.7: Abatimento do concreto produzido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ensaio em questão, a medição do abatimento deu um valor de 70 mm. Como o valor medido foi igual ao requerido, não houve a necessidade de uma repetição do ensaio com novas composições e o concreto produzido poderia ser utilizado na moldagem dos corpos de prova. A figura 4.8 mostra a medição do abatimento realizado.

Figura 4.8: Medição do abatimento do concreto produzido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Concretagem e moldagem dos corpos de prova

Observando que o concreto utilizado no ensaio de *slump test* apresentava resultados dentro do limite de tolerância, quando comparado o abatimento realizado em ensaio e o requerido, preferiu-se não realizar mais nenhuma alteração na composição do traço que estava rodando na betoneira. Assim, prosseguiu-se para realizar a moldagem dos corpos de prova. Inicialmente passou-se uma fina camada de óleo em todas as formas (Figura 4.9). Esse óleo foi utilizado para facilitar a retirada das formas dos corpos de prova.

Figura 4.9: Preparação das formas para a moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após, foi realizado o lançamento do concreto nas formas através de um recipiente. Procurou-se realizar o lançamento de maneira mais homogênea possível em todos os moldes. Para realizar o adensamento do concreto, foi utilizado uma haste de cerca de 60 cm. Como os corpos de prova tinham apenas 10 cm de profundidade, o adensamento foi feito em apenas uma camada, com 25 golpes para cada corpo de prova. Os golpes foram executados de modo que fossem distribuídos uniformemente sobre toda a camada.

Após o adensamento, nos moldes que tinham ficado espaços vazios, adicionou-se mais concreto até completar as dimensões do corpo de prova. Também foi realizado uma raspagem dos excessos de concreto nos moldes, para que o corpo de prova ficasse com as mesmas dimensões da forma. A figura 4.10 mostra como ficaram os corpos de prova após o fim da moldagem. Ao fim desse processo, os corpos de prova foram colocados em local apropriado, para que eles adquirissem rigidez e fosse possível realizar a retirada das formas.

Figura 4.10: Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aproximadamente 24 horas depois, foi realizada a retirada das formas dos corpos de prova. Para facilitar o procedimento, foram utilizados um martelo e uma talhadeira. Em virtude do pouco tempo disponível, não foi possível realizar o processo de cura de 28 dias submerso em tanque. Assim, após a retirada das formas, as amostras já foram preparadas para

realização dos ensaios, visto que o concreto foi produzido com cimento CP V – ARI, sendo possível realizar os ensaios com uma resistência razoável para suportar os impactos.

4.2 Carbonatação dos corpos de prova

Nesta etapa do trabalho, os corpos de provas foram separados em quatro arranjos de três corpos de prova, no qual cada arranjo foi parametrizado em períodos diferentes de exposição ao dióxido de carbono. Para que o processo de carbonatação dos corpos de prova fosse mais acelerado, alguns arranjos foram expostos a concentrações de dióxido de carbono maiores que as concentrações presentes na atmosfera.

O processo de indução à carbonatação foi realizado por meio de uma fogueira, no qual constantemente era alimentada com madeira e papelões para que as amostras ficassem expostas a maiores quantidades de dióxido de carbono. Essas amostras ficaram suspensas em uma grelha e o processo foi realizado de acordo com o tempo de cada agrupamento. A figura 4.11 mostra como o processo foi realizado.

Figura 4.11: Processo de exposição das amostras ao dióxido de carbono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada arranjo foi exposto aos seguintes períodos de exposição ao CO_2 , respectivamente: 0, 15, 30 e 120 minutos. Depois da exposição prosseguiu-se para os ensaios de esclerometria e de resistência à compressão. Depois de realizados os ensaios, foi verificado se o arranjo apresentava carbonatação através da aspensão de fenolftaleína e foi medido a profundidade da carbonatação com o uso do paquímetro com precisão de 0,05cm. A figura 4.12 mostra um exemplo de um dos corpos de prova que apresentou carbonatação após a aspensão do indicador de pH.

Figura 4.12: Observação de carbonatação no corpo de prova com o uso de indicador de pH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 4.6 mostra as medições da profundidade de carbonatação em todos os corpos de prova.

Tabela 4.6: Medições da carbonatação dos corpos de prova.

Numeração dos arranjos	Numeração dos corpos de prova	Profundidade carbonatada (cm)	Profundidade média do arranjo
Arranjo 1	Corpo de prova 1	0,00	0,00
	Corpo de prova 2	0,00	
	Corpo de prova 3	0,00	
Arranjo 2	Corpo de prova 4	0,05	0,07
	Corpo de prova 5	0,05	
	Corpo de prova 6	0,10	
Arranjo 3	Corpo de prova 7	0,25	0,22
	Corpo de prova 8	0,20	
	Corpo de prova 9	0,20	
Arranjo 4	Corpo de prova 10	0,80	0,73
	Corpo de prova 11	0,75	
	Corpo de prova 12	0,65	

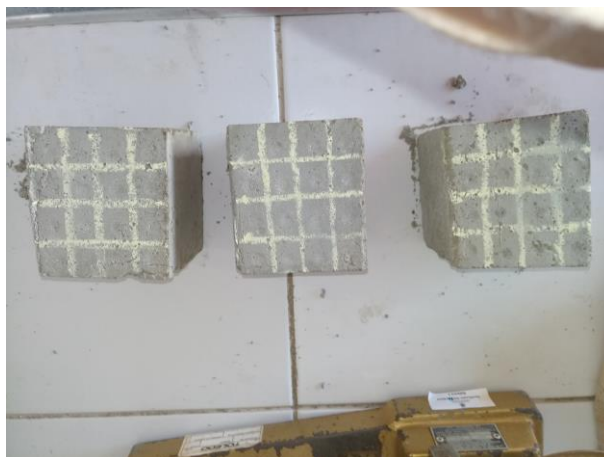
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Ensaio de esclerometria

Para proceder ao ensaio, foi realizado inicialmente o procedimento de limpeza e retirada das imperfeições da superfície, para que os corpos de prova estivessem conforme a NBR 7584 (2012) preconiza.

A área de ensaio foi executada na face vertical dos corpos de prova e foi desenhado um reticulado no qual dividiu-se a área de ensaio em 16 regiões, de 2,5 centímetros cada, conforme mostra a figura 4.13. Os impactos do aparelho para a medição do índice esclerométrico foi realizado na posição vertical. A distribuição dos impactos foi realizada uniformemente e limitada por cada região. A aplicação do esclerômetro foi feita de acordo com o anexo B da NBR 7584 (2012).

Figura 4.13: Separação dos pontos de aplicação dos impactos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que pudesse ser feita uma análise dos resultados, foi realizado uma média aritmética dos 16 valores de índices esclerométrico de cada corpo de prova. Depois foi desprezado os índices esclerométricos que estivessem 10% acima da média calculada inicialmente. Após a retirada dos valores fora do limite de tolerância de 10%, foi recalculada a média dos índices esclerométricos aceitos. O procedimento para determinação do índice esclerométrico foi repetido para todos os corpos de prova. A tabela 4.7 mostra os índices esclerométricos de cada área de ensaio, ou seja, o índice esclerométrico de cada corpo de prova.

Tabela 4.7: Resultados obtidos pelo ensaio.

Numeração dos arranjos	Numeração dos corpos de prova	Índice esclerométrico médio	Índice esclerométrico médio do arranjo
Arranjo 1	Corpo de prova 1	16,88	16,60
	Corpo de prova 2	16,60	
	Corpo de prova 3	16,33	
Arranjo 2	Corpo de prova 4	17,25	15,97
	Corpo de prova 5	16,67	
	Corpo de prova 6	14,00	
Arranjo 3	Corpo de prova 7	14,50	14,99
	Corpo de prova 8	14,67	

	Corpo de prova 9	15,80	
Arranjo 4	Corpo de prova 10	12,00	13,72
	Corpo de prova 11	14,25	
	Corpo de prova 12	14,90	

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova

O ensaio de resistência à compressão foi realizado depois que os arranjos foram submetidos às condições de cada um. Todos os corpos de prova foram também previamente nivelados tanto para utilizar no ensaio de resistência à compressão, como no ensaio de esclerometria. Para o ensaio, necessitou-se de uma máquina de ensaio à compressão (figura 4.14), onde os corpos de prova foram arrumados de tal maneira que o seu eixo coincidiu com o eixo da máquina, para que as forças aplicadas passassem pelo centro dos corpos de prova.

Figura 4.14: Máquina utilizada para realizar a compressão dos corpos de prova.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme os corpos de prova foram submetidos ao ensaio, a prensa utilizada ia aplicando uma carga continuamente até que os corpos de prova rompessem (figura 4.15) e o procedimento do trabalho prosseguia para a medição da profundidade de carbonatação destas amostras.

Figura 4.15: Rompimento do corpo de prova a partir de uma aplicação de carga contínua.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para calcular a resistência à compressão destes corpos de prova, foi necessário também saber a área em que a carga estava atuando. No caso dos corpos de prova confeccionados, que foram moldados em um formato cúbico de dez centímetros de dimensão, a área de atuação da carga era de 100 cm². Posteriormente, foi calculado a tensão de compressão dos corpos de prova, que corresponde ao quociente da força aplicada até o rompimento do corpo de prova pela área de atuação dessa força, conforme demonstra a equação a seguir.

$$\tau = F / A_c \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Foi necessário ficar atento também se as unidades de força e área estavam se compatibilizando. A tabela 4.8 mostra os valores de resistência de cada corpo de prova.

Tabela 4.8: Resistência à compressão dos corpos de prova.

Numeração dos arranjos	Numeração dos corpos de prova	Carga aplicada (kgf)	Área de atuação da carga (cm ²)	Resistência à compressão (MPa)
Arranjo 1	Corpo de prova 1	125,28	100	12,53
	Corpo de prova 2	140,64		14,06
	Corpo de prova 3	147,26		14,73
Arranjo 2	Corpo de prova 4	130,80	100	13,08
	Corpo de prova 5	139,59		13,96
	Corpo de prova 6	96,06		9,61
Arranjo 3	Corpo de prova 7	109,40	100	10,94
	Corpo de prova 8	122,87		12,29
	Corpo de prova 9	118,71		11,87
Arranjo 4	Corpo de prova 10	99,87	100	9,99
	Corpo de prova 11	110,33		11,03
	Corpo de prova 12	128,69		12,87

Fonte: Elaborado pelo autor.

5. RESULTADOS

Através dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão e o ensaio de esclerometria, verifica-se que à medida que as amostras passavam mais tempo expostas ao CO₂, tanto o índice esclerométrico como a resistência à compressão da amostra reduziram. A tabela 5.1 mostra os valores médios obtidos pelos ensaios realizados neste trabalho.

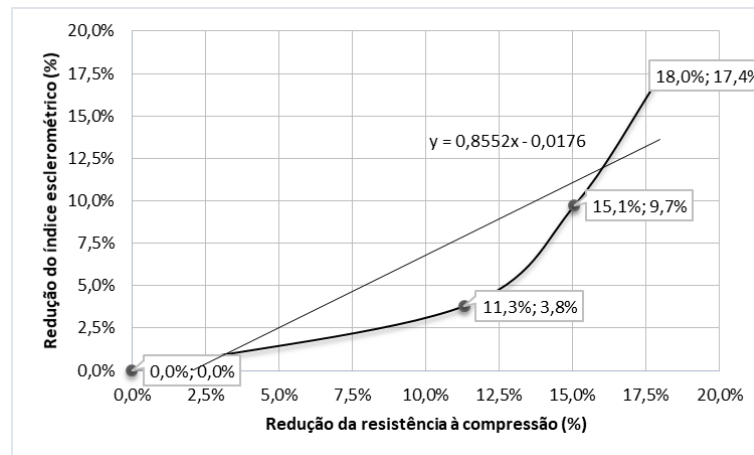
Tabela 5.1: Valores médios dos ensaios para cada agrupamento das amostras.

Numeração dos arranjos	Tempo de exposição ao CO ₂ (min)	Índice esclerométrico	Redução índice esclerométrico (%)	Resistência à compressão (MPa)	Redução resistência à compressão (%)	Profundidade carbonatada (cm)
Arranjo 1	0	16,60	0,0%	13,77	0,0%	0,00
Arranjo 2	15	15,97	3,8%	12,22	11,3%	0,07
Arranjo 3	30	14,99	9,7%	11,70	15,1%	0,23
Arranjo 4	120	13,72	17,4%	11,30	18,0%	0,73

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da tabela 5.1, pode-se criar um gráfico (gráfico 5.1) para verificar o comportamento das amostras a medida que passavam mais tempo expostas ao CO₂.

Gráfico 5.1: Redução da resistência à compressão x Redução índice esclerométrico.



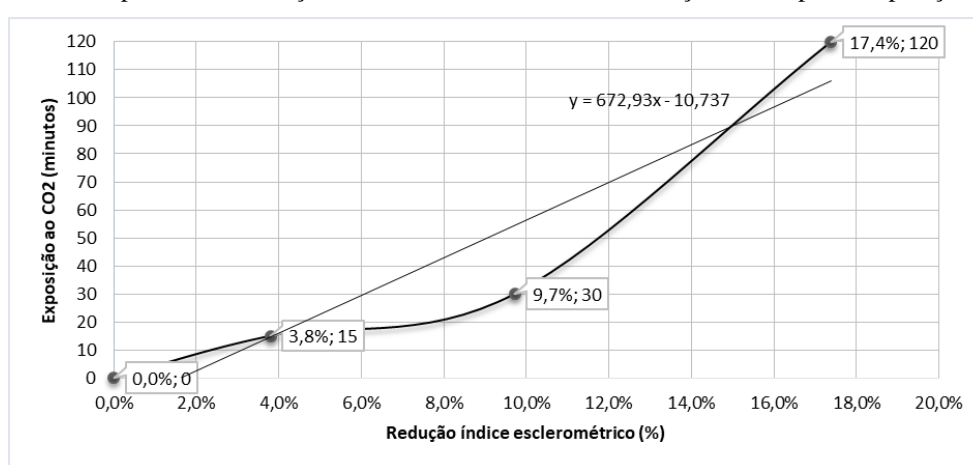
Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante verificar por meio do gráfico 5.1 que durante os primeiros quinze minutos de exposição ao CO₂, ocorreu uma redução significativa na resistência, sendo essa queda de quase 63% da redução total da resistência após as exposições ao CO₂. Já com relação ao índice esclerométrico, embora haja uma redução de cerca de 4% nos valores obtidos nos primeiros quinze minutos iniciais, a maior parte da redução ocorre após este

período, principalmente nos quinze minutos posteriores, que corresponde a aproximadamente 34% da redução total após todo o período de exposição.

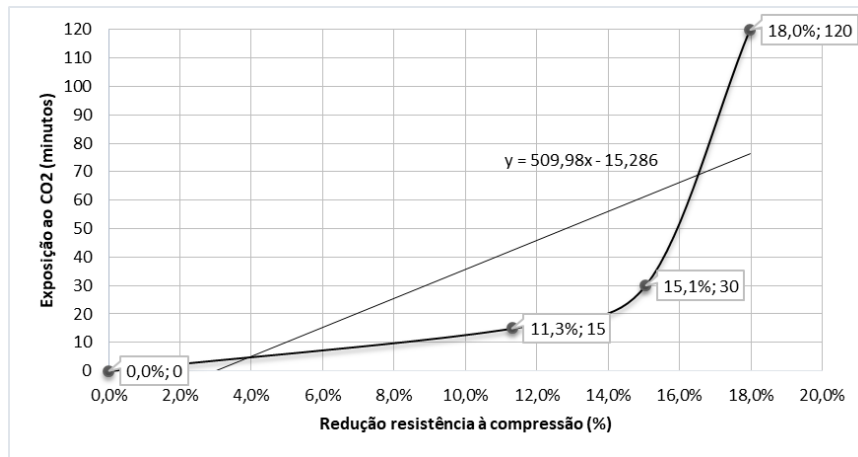
O gráfico 5.2 mostra a redução do índice esclerométrico à medida que o tempo de exposição ao CO₂ aumentava. É importante observar através da tabela 5.1 que o índice esclerométrico reduziu 2,88 unidades durante todo o período de exposição ao CO₂. Ou seja, houve uma redução do índice esclerométrico de pouco mais que 17%. Dessa redução mencionada, aproximadamente 55,9% ocorreu nos primeiros 30 minutos de exposição ao CO₂.

Gráfico 5.2: Comparativo da redução do índice esclerométrico em função do tempo de exposição ao CO₂.



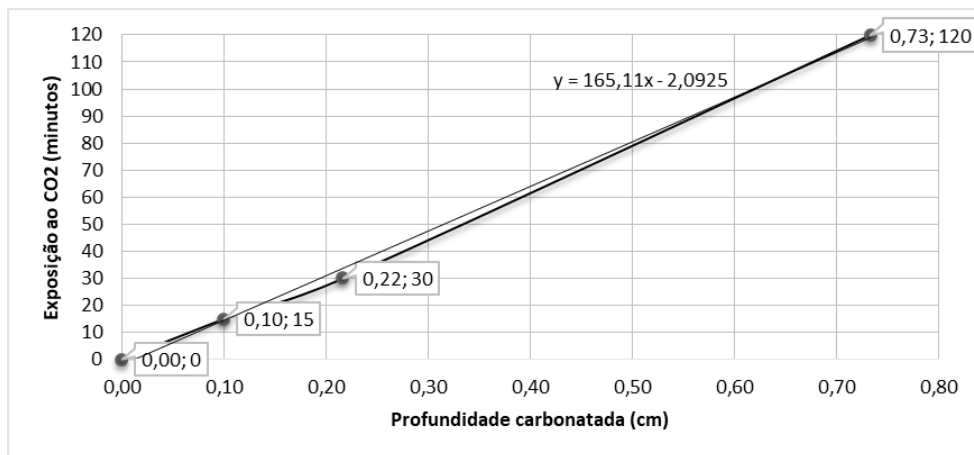
Fonte: Elaborado pelo autor.

Do mesmo modo, o gráfico 5.3 mostra a redução da resistência à compressão no decorrer do tempo de exposição ao CO₂. As amostras do arranjo 1, que são aquelas nas quais não foram expostas a carbonatação acelerada, tiveram resistência média de 13,77 MPa, enquanto que as amostras expostas durante 120 minutos, apresentaram uma resistência média de 11,30. O que quer dizer que houve uma redução de quase 18% da resistência à compressão em cerca de duas horas de exposição à carbonatação acelerada. Desta redução ocorrida, cerca de 83,8% ocorreu nos primeiros 30 minutos. O gráfico 5.3 ilustra de maneira clara o comportamento dos resultados obtidos descritos acima.

Gráfico 5.3: Comparativo da redução da resistência à compressão em função do tempo de exposição ao CO₂.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição ao CO₂, nos primeiros trinta minutos ocorreu uma carbonatação de cerca de 30% da profundidade carbonatada após os 120 minutos de exposição ao CO₂. Essa carbonatação maior no período inicial pode ser explicado devido que o ambiente apresentava uma umidade relativa nos poros maior, fazendo com que o processo de difusão do CO₂ fosse mais acelerado. O gráfico 5.4 ilustra o comportamento da frente de carbonatação obtidas nas amostras.

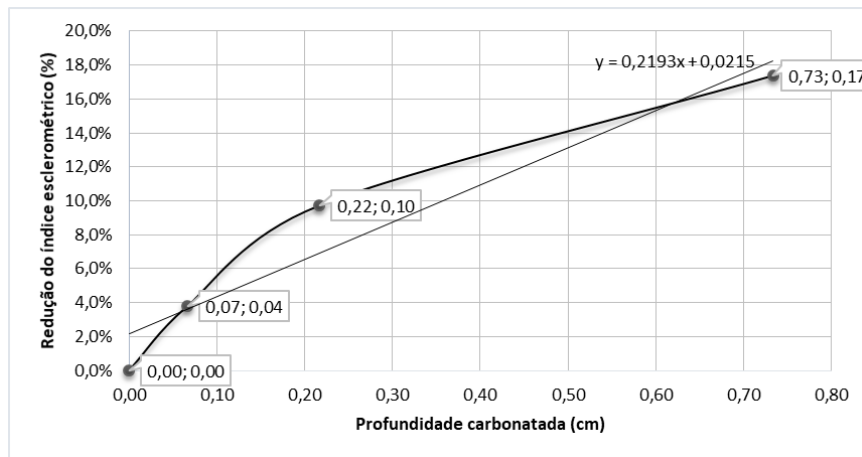
Gráfico 5.4: Comparativo da profundidade carbonatada em função do tempo de exposição ao CO₂.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 5.5 mostra um comparativo do aumento da profundidade de carbonatação com a redução do índice esclerométrico. Embora que os resultados obtidos mostrem que a medida que a frente de carbonatação aumenta, o índice esclerométrico diminui, é importante observar que a redução ocorre em sua maioria nos primeiros trinta minutos. Após esse período a carbonatação aumenta cada vez mais e o índice esclerométrico reduz quase que de uma maneira linear. Essa redução inicial pode ser explicada pelo fato de que o processo de

carbonatação trata-se de um processo físico-químico que inicialmente altera a estrutura interna dos poros presentes na superfície do concreto, causando microfissuras que além de propiciarem a difusão dos gases mais rapidamente, ainda acaba diminuindo a dureza superficial do concreto. Além disso, foi observado durante o programa experimental que os corpos de prova que passavam pela exposição ao CO₂ durante trinta minutos se degradavam mais com os impactos do ensaio de esclerometria, quando comparados com as outras amostras.

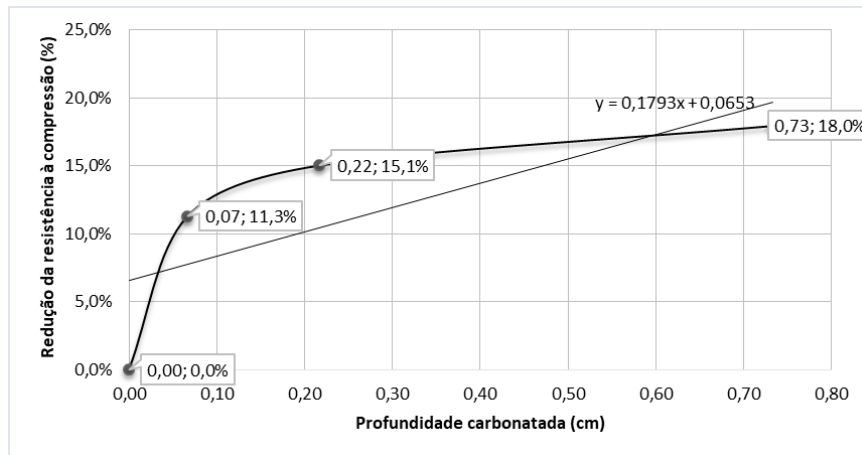
Gráfico 5.5: Redução do índice esclerométrico em função da profundidade de carbonatação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira semelhante à análise da influência da carbonatação no ensaio de esclerometria, a resistência à compressão vai sendo reduzida conforme a carbonatação vai aumentando. No entanto, a redução nos primeiros trinta minutos ocorre de maneira muito mais expressiva, enquanto que nos noventa minutos restantes, a redução não chega nem a 20% do total reduzido. O gráfico 5.6 pode sugerir que se o estudo fosse realizado em um período de carbonatação acelerada muito maior, a proporção da redução da resistência à compressão e a profundidade de carbonatação seria significativamente menor, provavelmente chegando a valores quase que irrisórios, quando comparado aos períodos iniciais de grande redução na resistência, que foram citados acima. Essa redução seria cada vez menor, enquanto que a frente de carbonatação teria uma profundidade muito maior.

Gráfico 5.6: Redução da resistência à compressão em função da profundidade de carbonatação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da análise entre os períodos de exposição ao CO₂, foi verificado o índice esclerométrico antes e depois da exposição ao CO₂. A tabela 5.2 mostra os valores obtidos e comprova o que foi mencionado acima. Esta tabela mostra que no período de exposição de quinze minutos, ocorreu uma variação na leitura de quase 15%, enquanto que nos outros períodos ocorreu uma variação de aproximadamente 10%.

Tabela 5.2: Índices esclerométricos antes e depois da exposição ao CO₂.

Numeração do arranjo	Período de exposição (min.)	Índice esclerométrico	
		Antes da exposição ao CO ₂	Depois da exposição ao CO ₂
Arranjo 2	15	13,93	15,97
Arranjo 3	30	13,66	14,99
Arranjo 4	120	12,50	13,72

Fonte: Elaborada pelo autor.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho possibilitou o estudo através de uma análise quantitativa da influência da carbonatação no ensaio de esclerometria. No trabalho também foi possível analisar a influência da carbonatação na resistência à compressão do objeto de estudo. O programa experimental realizado nesse estudo evidenciou importantes comportamentos do concreto frente ao andamento do processo de carbonatação, nos quais pode-se estabelecer as seguintes conclusões:

- O processo de carbonatação dos corpos de prova influenciou no índice esclerométrico de cerca de 17% em um período de duas horas em exposição ao CO₂, demonstrando que a carbonatação (e também o processo de exposição ao CO₂) influencia na redução da dureza superficial do concreto.
- A resistência à compressão possui um pico de redução nos primeiros quinze minutos do processo de indução à carbonatação, enquanto o índice esclerométrico possui sua maior redução no intervalo entre quinze e trinta minutos após o início do processo;
- Os corpos de prova não sofreram um processo de cura de 28 dias submerso em tanque para atingir próximo a resistência calculada na dosagem e por isso o concreto não apresentou uma rigidez suficiente para suportar os impactos do esclerômetro em alguns pontos específicos da área de ensaio de algumas amostras;
- O comportamento da redução da resistência à compressão e do índice esclerométrico, em que a maior parte reduziu nos primeiros trinta minutos do experimento, é condizente com o período de maior difusão do CO₂ nos interstícios presentes no concreto. Além disso, ocorre o início das reações que ocorrem no processo de carbonatação, sendo grande parte dos íons alcalinos sendo consumidos pelos gases difundidos nos poros do concreto. Assim, também pode-se concluir que o consumo dos íons afeta diretamente na redução da dureza superficial do concreto.

Vale ressaltar que o estudo atingiu de forma satisfatória os objetivos deste trabalho, fazendo com que assim, fosse possível caracterizar o índice esclerométrico, a resistência à compressão e analisar quantitativamente a influência da carbonatação e da resistência à compressão conforme o período de exposição ao dióxido de carbono ia aumentando.

Com o programa experimental realizado neste trabalho, foi possível observar quantitativamente a influência da carbonatação no ensaio de esclerometria. Entretanto,

algumas questões ainda podem ser mais estudadas e conseqüentemente abordadas em trabalhos futuros, dentre os quais pode-se citar os seguintes pontos:

- Utilizar amostras com dimensões maiores para que todas as recomendações da NBR 7584 (2012) sejam respeitadas;
- Realizar o estudo com concentrações de CO₂ controladas, para analisar mais detalhadamente a faixa de concentração de CO₂ que favorecem uma maior redução no índice esclerométrico e na resistência à compressão;
- Caracterizar e comparar a carbonatação (e a conseqüente influência no índice esclerométrico e resistência à compressão) dos corpos de prova produzidos com e sem adensamento;
- Analisar quantitativamente a influência da carbonatação no ensaio de esclerometria com a utilização de amostras com diferentes períodos de cura;
- Caracterizar e comparar a influência da carbonatação no ensaio de esclerometria com diferentes dosagens de concreto, analisando principalmente a porosidade do concreto.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** ABNT: Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** ABNT: Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7584: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Procedimentos.** ABNT: Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** ABNT: Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** ABNT: Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** ABNT: Rio de Janeiro, 1998.
- CADORE, William Widmar. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- CÂMARA, Everlei. **Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos.** 2006. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- CARMONA, Thomas Garcia. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação.** 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto.** In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 849-887, 2011.
- DA SILVA FILHO, L. C. P. et al. Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos. **Revista de La Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de La Construcción**, Mérida, México. v. 1, n. 3, p.196-208, enero-abril, 2011.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 239 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FERREIRA, Murillo Batista. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

HELAL, J.; SOFI, M.; MENDIS, P.. Non-Destructive testing of concrete: A review of methods. **Electronic Journal Of Structural Engineering**. p. 97-105. Jan, 2015.

HELENE, P.R.L. **Vida útil das Estruturas de Concreto**. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. Anais. Porto Alegre, RS. 1997.

HYVERT, Nicolas. **Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton**. 2009. 228 f. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009.

IZQUIERDO, D.. **Bases de diseño para un tratamiento probabilista de los procesos de corrosión de la armadura en el hormigón**. 2003. 617 p. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, Spain 2003.

LORENZI, Alexandre et al. Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 3, n. 1, p. 3-13, 2016.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, n. 88, p. 363-373, 1991.

PAPADAKIS, Vagelis G.; VAYENAS, Costas G.; FARDIS, M. N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**, v. 35, n. 10, p. 1639-1650, Oct. 1989.

PAULETTI, Cristiane. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

PAULETTI, Cristiane. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PAULETTI, Cristiane; POSSAN, Edna; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente construído: revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Porto Alegre. vol. 7, n. 4 (Out/Dez. 2007), p. 7-20, 2007.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM RECOMMENDATIONS CPC-18). **Materials and Structures**. v.21, n.6, p. 453-455, 1988.

SAETTA, Anna V.; SCHREFLER, Bernhard A.; VITALIANI, Renato V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. **Cement and Concrete Research**, v.23, n.4, p.761-772, 1993.

SAHUINCO, Melquiades Hermógenes Choquepuma. **Utilização de métodos não destrutivos e semi destrutivos na avaliação de pontes de concreto**. 2011. 170 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-graduação em Engenharia. Universidade de São Paulo. 2011.

SILVA, V. M.; LIBORIO, J.B.L.. **Comportamento da carbonatação em vigas pré-moldadas de concreto**. In: I ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, São Carlos, 2005.

SILVA, Valdirene Maria. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. 2002. 187 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo, 2002.

SPÍNDOLA, Guilherme Morais. **Avaliação do concreto estrutural de pilares utilizando ensaios não destrutivos em comparação com resultados do controle tecnológico**. 2017. 28 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

THIERY, M.; DANGLA, P.; VILLAIN, G.; PLATRET, G. **A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO₂-H₂O-ions transfers and chemical reactions**. TT1-58. Lyon, 2005.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Thèse, Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, 1982.

ANEXO A

Anexo A.1: Malha de 4x4 para impactos do esclerômetro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo A.2: Concreto degradando superficialmente após impactos do esclerômetro.



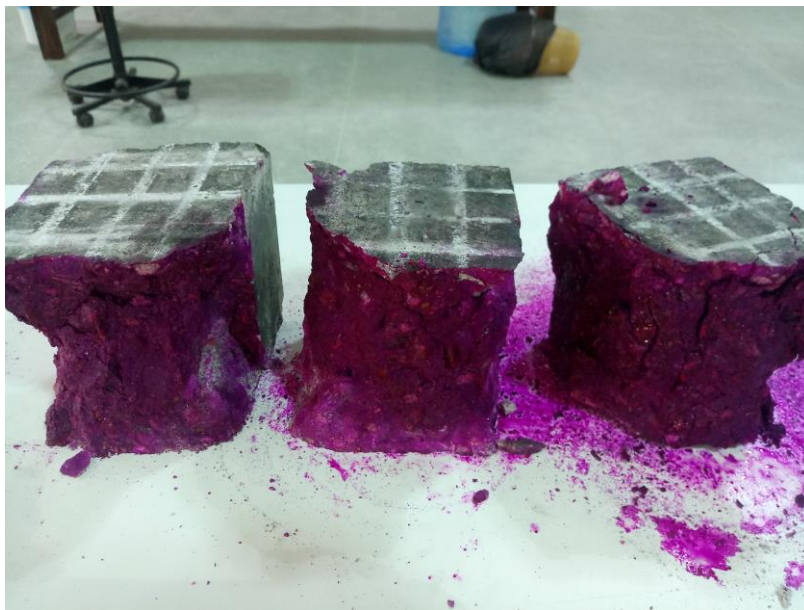
Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo A.3: Posicionamento para execução do impacto com o esclerômetro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo A.4: Aspersão de fenolftaleína para verificar carbonatação após o rompimento dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo A.5: Rompimento do corpo de prova para avaliar a resistência à compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo A.6: Corpos de prova após um período de exposição ao CO₂.



Fonte: Elaborado pelo autor.