



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DOM BOSCO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL MENESES SOUZA

**CARBONATAÇÃO EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM AMBIENTES
COM DIFERENTES TAXAS DE GÁS CARBÔNICO (CO₂):** Simulação com câmara de
carbonatação acelerada

São Luís

2020

GABRIEL MENESES SOUZA

**CARBONATAÇÃO EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM AMBIENTES
COM DIFERENTES TAXAS DE GÁS CARBÔNICO (CO₂): Simulação com câmara de
carbonatação acelerada**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Esp. Ricardo Alberto Barros Aguado

São Luís

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Centro Universitário - UNDB / Biblioteca

Souza, Gabriel Meneses

Carbonatação em concreto de alto desempenho em ambientes com diferentes taxas de gás carbônico (CO₂): simulação com câmara de carbonatação acelerada. / Gabriel Meneses Souza. __ São Luís, 2020.

91 f.

Orientador: Prof. Esp. Ricardo Alberto Barros Aguado

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil – Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco – UNDB, 2020.

1. Concreto de alto desempenho. 2. Carbonatação. 3. Taxas de CO₂. I. Título.

CDU 624.012.45

GABRIEL MENESES SOUZA

CARBONATAÇÃO EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM AMBIENTES COM DIFERENTES TAXAS DE GÁS CARBÔNICO (CO₂): Simulação com câmara de carbonatação acelerada

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Esp. Ricardo Alberto Barros Aguado

Aprovado em: 16/12/2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof.Esp. Ricardo Alberto Barros Aguado (Orientador)
Centro Universitário - UNDB

Prof. Esp. Yuri Leandro Abas Frazão (Examinador 1)
1º Membro
Centro Universitário - UNDB

Prof. Esp. Ricardo Corsini de Carvalho (Examinador 2)
2º Membro
Centro Universitário - UNDB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por iluminar minha jornada e me dar discernimento para alcançar meus objetivos e para seguir resiliente em cada dificuldade enfrentada até aqui.

Agradeço aos meus pais José de Ribamar e Natália, por não medirem esforços na busca em me dar a melhor educação possível. Por todo o apoio, todos os conselhos e, principalmente, por toda a confiança depositada em mim, a vocês eu sempre serei extremamente grato. Agradeço também à minha irmã Marília por sempre se mostrar muito companheira e por cada gesto que contribuiu para me manter seguro das minhas escolhas.

Agradeço à minha namorada Clara por todas as palavras de apoio durante o curso. Agradeço ao meu primo Felipe, sempre presente e solícito nos momentos em que precisei. Agradeço também ao meu companheiro de trabalho Silas por cada atitude que contribuiu nesta etapa.

Ao meu orientador, Professor Esp. Ricardo Aguado, por todo o empenho, prestatividade e paciência durante nossa jornada e pelos ensinamentos que colaboraram com minha formação como engenheiro civil. A ele minha gratidão e admiração.

Ao técnico de laboratório da UNDB Carlos Mendes, agradeço por todo o apoio e por estar sempre disposto a ajudar com tanta simpatia, a ele minha gratidão.

Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram com esta etapa da minha vida, se mostrando presentes e dispostos a ajudar, minhas considerações.

RESUMO

Os estudos a respeito da tecnologia do concreto têm sido cada vez mais desenvolvidos em busca de se atender às necessidades de uso específicas dentro da construção civil. Com essa evolução contínua, e com o objetivo de se atender a critérios muito específicos de resistência e durabilidade, o estudo do Concreto de Alto Desempenho (CAD) ganha força, principalmente em função de sobrepor condições de exposição agressivas que muitas vezes grandes obras são expostas. Essa monografia tem como objetivo elaborar corpos de prova de Concreto de Alto Desempenho através de um método específico de dosagem e relacionar seu comportamento em relação ao fenômeno da carbonatação, avaliando os efeitos provocados por meio de simulação em ambiente controlado. Para isso, foi construída uma câmara de carbonatação acelerada de modo a submeter corpos de prova de CAD com teor de sílica ativa fixado em 4%, a exposição de diferentes taxas de gás carbônico (CO₂). A sílica ativa é uma adição mineral que é incorporada na mistura com o objetivo de reduzir a porosidade e auxiliar no ganho de resistência do concreto. As proporções de CO₂ utilizadas neste trabalho foram de 400 ppm e 700 ppm, com os corpos de prova sendo expostos por um período de 7 dias em cada caso. Dessa forma, buscou-se por meio de duas faixas de concentração, evidenciar o avanço da frente de carbonatação no CAD através de um ensaio acelerado. O estudo teve como resultado um concreto com abatimento de 125 mm no seu estado fresco, correspondente à sua consistência e apresentou resistência média a compressão de 49,531 MPa em seu estado endurecido. Além disso, nos ensaios de caracterização da porosidade, o concreto expressou bons resultados, apresentando índice de vazios de 7,95% e absorção de água de 3,44%, se encaixando dentro da faixa limite que o define como durável. Neste trabalho também foram obtidos os valores de 400 ppm e 700 ppm desejados para concentração de CO₂ no interior da câmara de carbonatação, constatando a viabilidade de se desenvolver um ambiente controlado para simulação e análise da frente de carbonatação.

Palavras-chave: Concreto de Alto Desempenho, Carbonatação, Taxas de CO₂.

ABSTRACT

The studies about the concrete technology have been increasingly developed in order to attend the specific needs of use within civil construction. With this continuous evolution, and with the goal to attend very specific criteria of resistance and durability, the study of High Performance Concrete (HPC) gains strength, mainly with the function of overlapping aggressive exposure conditions that many times big constructions are exposed. This work aims to elaborate High Performance Concrete examinations through a specific method of dosage and relate its behavior to the carbonation phenomenon, evaluating the generated effects by the simulation in a controlled environment. For this, an accelerated carbonation chamber was built to expose HPC with active silica percentage fixed at 4% in different types of carbon dioxide (CO₂). The active silica is a mineral additive that is incorporated to the mixture in order to reduce the porosity and assist the concrete's resistance gain. The proportions of carbon dioxide used in this work were of 400 ppm and 700 ppm, with the test bodies being exposed for 7 days in each case. This way, it was sought to demonstrate the advance of the carbonation front in the HPC by two concentration types through an accelerated test. The study had a concrete with a slump of 125mm in its fresh state as a result, relative to its consistency and presented a medium resistance to compression of 49,531 MPa in its rough state. Besides that, the concrete presented good results on the porosity characterization tests, with void indexes of 7,95% and water absorption of 3,44%, staying in the limit line that defines it as durable. In this work were also obtained the desired values of 400 ppm and 700 ppm of CO₂ inside the carbonation chamber, proving that developing a controlled simulation environment and analyzing the carbonation front is viable.

Keywords: High Performance Concrete, Carbonation, CO₂ Rates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma do Método de Aïtcin.	28
Figura 2: Relação entre a relação a/c e a resistência à compressão aos 28 dias.	29
Figura 3: Avanço da frente de carbonatação e redução do pH com o tempo.	33
Figura 4: Efeito da umidade no coeficiente de difusão do CO ₂	34
Figura 5: Fluxograma das etapas do trabalho.	42
Figura 6: Pesagem e saturação do agregado.	46
Figura 7: Espalhamento do material e exposição a uma corrente de ar.	47
Figura 8: Preenchimento do tronco de cone e desmoração do agregado.	48
Figura 9: Pesagem de 500g da amostra e peso do frasco.	48
Figura 10: Peso do conjunto agregado + água.	49
Figura 11: Amostra esfriando no dessecador.	49
Figura 12: Pesagem da amostra seca.	50
Figura 13: Preparação e pesagem da amostra.	52
Figura 14: Submersão da amostra na água.	53
Figura 15: Secagem do material.	54
Figura 16: Amostra saturada superfície seca.	54
Figura 17: Pesagem hidrostática da amostra.	55
Figura 18: Peso seco do agregado graúdo.	55
Figura 19: Total de amostra de agregados a serem utilizados.	57
Figura 20: Massa do recipiente vazio.	57
Figura 21: Adensamento da primeira camada.	58
Figura 22: Adensamento do recipiente cheio.	59
Figura 23: Arrasamento da camada superficial e massa do agregado.	59
Figura 24: (a) Massa da amostra na condição seca; (b) massa da amostra na condição saturada.	70
Figura 25: Massa da amostra imersa em água.	70
Figura 26: Caixa de isopor com volume de 120 litros.	72
Figura 27: Fita autoadesiva para vedação.	72
Figura 28: Interior do recipiente impermeabilizado.	73

Figura 29: Ventiladores tipo cooler posicionados no recipiente.....	73
Figura 30: (a) Sensor DHT11; (b) Sensor MQ-135.....	74
Figura 31: Arduino UNO.....	74
Figura 32: (a) Relé de 5V; (b) Válvula Solenóide.....	75
Figura 33: (a) Cilindro de CO ₂ ; (b) Regulador de pressão.....	75
Figura 34: Sistema de suspiro na tampa da caixa.....	76
Figura 35: (a) Corpos de prova posicionados no interior da câmara; (b) Vedação da caixa com silicone e fita adesiva.....	76
Figura 36: (a) Medição abaixo dos 400 ppm no display; (b) Medição acima dos 700 ppm no display.	78
Figura 37: Medição do abatimento de tronco de cone.....	79
Figura 38: (a) Moldagem dos corpos de prova; (b) Adensamento mecânico em mesa vibradora.....	80
Figura 39: Máquina de ensaio de resistência a compressão.....	81
Figura 40: Corte transversal do corpo de prova.....	83
Figura 41: (a) Medição da profundidade carbonatada com exposição a 400 ppm de CO ₂ ; (b) Medição da profundidade carbonatada com exposição a 700 ppm.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CC – Concreto Convencional

CO₂ – Dióxido de Carbono

CAR – Concreto de Alta Resistência

CP's – Corpos de Prova

Ppm – Partes por milhão

ΔC – Cobrimento Nominal

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites aproximados da composição do Cimento Portland.	23
Tabela 2: Classes de agressividade ambiental.	37
Tabela 3: Correspondência entre cobrimento nominal e classe de agressividade ambiental.	39
Tabela 4: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto...	40
Tabela 5: Série de peneiras.	45
Tabela 6: Massas mínimas de amostra de ensaio.....	52
Tabela 7: Análise granulométrica do agregado miúdo.	61
Tabela 8: Análise granulométrica do agregado graúdo.	63
Tabela 9: Massa específica e teor de sólidos do aditivo.	66
Tabela 10: Distribuição do volume da pasta.....	67
Tabela 11: Relação agregado miúdo : graúdo.....	67
Tabela 12: Planilha de dosagem para 1m ³ de concreto - Mehta-Aïtcin.....	68
Tabela 13: Traço unitário (1: a: p: a/agl) - Método Mehta-Aïtcin.....	68
Tabela 14: Valores de massa para confecção dos corpos de prova cilíndricos.....	68
Tabela 15: Descrição probabilística adotada para cada classes de agressividade.	77
Tabela 16: Resultados da resistência a compressão dos CP's.	81
Tabela 17: Resultados da caracterização da porosidade.	82
Tabela 18: Classificação dos concretos em função da porosidade e absorção de água.	82
Tabela 19: Profundidade média de carbonatação medida na seção transversal dos corpos de prova.	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica do agregado miúdo.	62
Gráfico 2: Curva granulométrica do agregado graúdo.	64
Gráfico 3: Ponto de saturação do aditivo.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema	16
1.2	Hipóteses.....	17
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo Geral.....	17
1.3.2	Objetivo Específico.....	17
1.4	Justificativa	18
1.5	Síntese Metodológica.....	18
2	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	20
2.1	Cenário histórico do Concreto de Alto Desempenho	20
2.2	Definição e Desenvolvimento do CAD	21
2.3	Componentes do CAD	21
2.3.1	Cimento.....	22
2.3.2	Agregados	24
2.3.3	Superplastificante.....	25
2.3.4	Sílica Ativa.....	25
2.4	Dosagem do CAD	26
2.4.1	Método Mehta-Aïtcin (1990b).....	27
2.4.2	Método de Aïtcin (2000).....	28
2.4.3	Método Nawy (1996).....	29
2.4.4	Método de O'Reilly (1998).....	30
3	CARBONATAÇÃO	31
3.1	Condições Gerais	31
3.2	Frente de Carbonatação.....	31
3.3	Mecanismos de Transporte do CO ₂	33
3.4	Umidade Relativa do Ar	34

3.5 Carbonatação Acelerada	35
4 VIDA ÚTIL E DURABILIDADE	35
5 AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	37
5.1 Cobrimento da armadura.....	38
5.2 Qualidade do concreto	39
5.2.1 Relação água/cimento	40
6 METODOLOGIA.....	41
6.1 Tipo de Pesquisa	42
6.2 Coleta de Dados	43
7 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
7.1 Caracterização dos Agregados.....	44
7.2 Concreto.....	60
7.2.1 Cimento Portland	60
7.2.2 Agregados	61
7.2.2.1 Agregado Miúdo	61
7.2.2.2 Agregado Graúdo.....	62
7.2.3 Adição mineral.....	64
7.2.4 Aditivo químico	65
7.2.5 Elaboração do traço do concreto.....	66
7.2.6 Ensaio de absorção de água e índice de vazios.....	69
7.3 Câmara de carbonatação acelerada	71
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
8.1 Caracterização do concreto	78
8.1.1 Concreto no estado fresco.....	78
8.1.2 Concreto no estado endurecido.....	79
8.2 Absorção de água e índice de vazios	82
8.3 Aspersão de fenolftaleína.....	83

9 CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS	87
ANEXO	91

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta em sua essência a influência de diferentes teores de gás carbônico em Concreto de Alto Desempenho (CAD) submetido a condições de exposição controladas numa câmara de carbonatação acelerada. Tanto o uso do CAD quanto o fenômeno da carbonatação são amplamente conhecidos pela comunidade acadêmica. Um estudo acerca do impacto gerado por ambientes agressivos, principalmente com grandes concentrações de CO₂, é de fundamental importância para a evolução tecnológica dos métodos de dosagem de concretos especiais.

O Concreto de Alto Desempenho é um material que apresenta comportamento em patamar mais elevado que os Concretos Convencionais (CC), durante a utilização da construção, atendendo satisfatoriamente as exigências requeridas pelo proprietário ou pelo usuário em conformidade com os projetistas da estrutura de concreto. Entende-se por desempenho não apenas a resistência mecânica, mas também a trabalhabilidade, a estética, o acabamento e, principalmente, a durabilidade (HELENE *et al*, 2011).

Essa mistura especial só é possível graças ao desenvolvimento de dosagens criteriosas com relação à seleção dos materiais e às proporções utilizadas de cada um. Basicamente o CAD se constitui de cimento Portland, adições minerais, aditivos superplastificantes, e agregados com composições granulométricas específicas.

Cada componente selecionado para a produção desse tipo especial de concreto tem um papel muito bem definido. Um CAD se bem dosado proporciona diversas vantagens na sua utilização, tais como: baixa porosidade, elevada resistência, baixa permeabilidade, proporciona a possibilidade de redução de seções de elementos de concreto.

Sabe-se também que além de toda a tecnologia e estudo desenvolvidos em prol da evolução das misturas de concreto, a durabilidade das estruturas também está condicionada a ação dos agentes agressivos que proporcionam reações químicas no interior dos elementos em concreto armado promovendo a exposição do aço estrutural, podendo gerar reações de corrosão.

Um desses agentes agressivos é o CO₂ que, ao penetrar em elementos de concreto armado, pode provocar um processo de carbonatação, alterando seu pH e provocando a despassivação das armaduras, desencadeando o processo de corrosão.

A carbonatação, fenômeno em que o pH de materiais cimentícios é reduzido, ocorre pela reação físico-química entre os compostos hidratados do cimento e o CO₂ da atmosfera. O avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado à facilidade que o CO₂ encontra para difundir-se no interior do concreto, às condições ambientais e às propriedades do concreto (PAULLETTI *et al.*, 2007).

Desse modo, o presente trabalho possui como objeto de estudo as propriedades do Concreto de Alto Desempenho, dosado por um método específico, em função das diferentes concentrações de CO₂ num ambiente controlado, de maneira que seja possível avaliar a influência da variabilidade do avanço da frente de carbonatação com todas as outras variáveis de composição do concreto e de exposição fixados. A partir dessa análise, pode-se determinar a eficiência dessa mistura com base nas propriedades atingidas e correlacioná-las com o fenômeno da carbonatação em relação a profundidade carbonatada.

1.1 Problema

É incontestável o fato de que o concreto é uma das maiores invenções do ser humano. Desde os tempos mais remotos até os dias de hoje, esse material se mostrou de grande utilidade na construção civil, desde a construção dos aquedutos romanos até as edificações modernas da época atual.

Até poucos anos atrás, o concreto foi considerado durável apenas pela sua resistência mecânica. Atualmente, porém, sabe-se que a durabilidade e a eficiência estão atreladas também às condições de exposição desse elemento. Ambientes muito agressivos podem levar à diminuição da vida útil de uma peça de concreto se esta não for dimensionada e produzida adequadamente para aquela situação. Locais como estacionamentos cobertos, galpões industriais, regiões marinhas e até mesmo cidades com elevado índice de poluição, são situações que devem ser levadas em consideração para o projeto e construção da edificação.

Com o advento de novas tecnologias e o aprofundamento no estudo das propriedades físicas e químicas dos seus componentes, este material se mostrou ainda mais importante pela possibilidade de utilizá-lo de maneira controlada e otimizada para

diferentes cenários. É notável que essa opção se torna cada vez mais importante nas estruturas. Os avanços tecnológicos nas concepções e cálculos estruturais através de softwares também permitiram analisar e viabilizar diversas situações na utilização do concreto. Contudo, é fato que muitas vezes o concreto convencional não irá atender às exigências estabelecidas em projeto. É por conta disso que foram desenvolvidas misturas especiais, tornando-o mais resistente e durável, chamadas de concreto de alta resistência (CAR) e concreto de alto desempenho (CAD).

O CAD então surgiu com o intuito de melhor atender as demandas de projetos estruturais e de garantir maior durabilidade nas estruturas por meio dos avanços tecnológicos no estudo das dosagens de concreto, dessa maneira, é possível simular e avaliar a exposição de estruturas de concreto de alto desempenho a diferentes teores de gás carbônico (CO_2)?

1.2 Hipóteses

- É viável avaliar os efeitos de diferentes concentrações de CO_2 na profundidade da frente de carbonatação em corpos de prova de CAD através de simulação em câmara de carbonatação acelerada.
- É possível correlacionar a profundidade de carbonatação com a variação da concentração de gás carbônico (CO_2).
- É possível controlar o teor de CO_2 em uma faixa pré-estabelecida numa câmara de carbonatação acelerada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo acerca do comportamento do Concreto de Alto Desempenho (CAD) frente à ação de carbonatação através da exposição de corpos de prova a diferentes concentrações de CO_2 em câmara de carbonatação acelerada.

1.3.2 Objetivo Específico

- Caracterizar os materiais para confecção de Concreto de Alto Desempenho.
- Elaborar um traço de CAD com 4% de sílica ativa.
- Avaliar a porosidade dos concretos confeccionados.

- Submeter corpos de prova de CAD com adição de sílica a exposição de diferentes faixas de concentração de CO₂ em câmara de carbonatação acelerada.
- Verificar a influência da variação de taxas de CO₂ na profundidade da carbonatação em Concretos de Alto Desempenho.

1.4 Justificativa

O desenvolvimento de projetos estruturais conta, constantemente, com um estudo de viabilidade técnica acerca da utilização dos materiais específicos para determinada situação. No caso da construção de pontes e viadutos, por exemplo, há uma grande necessidade em se utilizar as misturas especiais de concreto para a construção da infra e superestrutura.

O estudo em questão é de caráter comprobatório, principalmente por se tratar de uma análise de casos reais, em escalas reduzidas, com o intuito de simular os efeitos gerados pela exposição dessas estruturas a ambientes de elevada agressividade.

É de suma importância que os ensaios em laboratório estejam alinhados com situações reais para que possibilite o profissional em questão ter uma antevisão e um prognóstico adequado para os mais variados quadros de patologias em estruturas de concreto armado.

Neste sentido, notou-se a necessidade de uma investigação mais satisfatória no que se diz respeito à simulação dos efeitos de uma das patologias mais comuns nas grandes cidades: a carbonatação; para viabilizar um estudo mais acertado e ratificar as vantagens da utilização do Concreto de Alto Desempenho.

1.5 Síntese Metodológica

A estrutura desta monografia está dividida em seções, das quais contemplam introdução, referencial teórico, metodologia, resultados e discussões, conclusão e referências bibliográficas.

Dessa forma, apresenta-se na primeira seção um apanhado de informações acerca do contexto em que o concreto de alto desempenho (CAD) está inserido, bem como sua utilização, propriedades e controle tecnológico visando aplica-lo em situações de elevada agressividade e a relação que isso tem com o fenômeno da carbonatação. Este tópico também traz aspectos relacionados à relevância do estudo em questão e os objetivos a serem alcançados através da validação das hipóteses estabelecidas.

A segunda seção já faz parte da fundamentação teórica do trabalho e contempla a contextualização do cenário histórico do material estudado, sua definição e como se deu o seu desenvolvimento nas primeiras pesquisas e experimentos na área da tecnologia dos materiais. Este tópico também descreve os principais componentes do CAD, especificando a importância de cada um deles na mistura, e também os métodos de dosagem destes componentes que buscam, por meio de pesquisas e experimentos refinados, fazer o controle tecnológico das características almejadas do concreto.

A seção 3 trabalhará com o estudo do fenômeno da carbonatação, onde serão tratados pontos relativos ao seu desenvolvimento através de mecanismos de transporte naturais e suas implicações nas propriedades físicas do concreto. Neste segmento, esta seção ainda traz esse fenômeno com foco nos ensaios acelerados como recurso para simular os efeitos no concreto e coletar dados mais próximos da realidade.

Na quarta seção deste trabalho são trabalhados conceitos acerca da vida útil e durabilidade das construções de concreto, dos quais se destacam a qualidade dessas construções, os tempos previstos de manutenção, as características físicas do material, entre outros. A seção ainda traz aspectos relativos às normas técnicas NBR 6118:2014 que trata dos requisitos mínimos de projeto de obras em concreto armado e da NBR 15575:2013 que se refere às premissas básicas do desempenho das edificações e seus sistemas construtivos.

Finalizando a parte de referencial teórico, a seção 5 trabalha com o estudo da agressividade ambiental, descrevendo suas classes, os níveis, os graus de risco e os fatores que devem ser levados em consideração ao se projetar elementos de concreto armado. O cobrimento da armadura, a qualidade do concreto e a relação água/cimento são tratados neste tópico com ênfase no desenvolvimento da carbonatação do concreto.

A seção 6 juntamente com suas subdivisões correspondem à metodologia, onde são abordadas todas as etapas do desenvolvimento experimental, descrevendo cada procedimento realizado de modo a deixar claro os meios utilizados para realização da pesquisa, como foi feita a coleta e a análise de dados e também os parâmetros normativos que foram considerados para a realização das atividades.

Na seção 7 deste trabalho, são tratados os materiais e métodos utilizados nos procedimentos em laboratório. São detalhados todos os processos de caracterização, as normas que regulamentam os ensaios, as coletas dos dados e como elas foram utilizadas

para definir os valores requeridos. Além disso, também são descritos onde e como foram adquiridos os materiais e o porquê da utilização dos mesmos.

Na seção 8 é feita a caracterização do concreto de alto desempenho e o ensaio para medir como se deu o avanço da carbonatação. Esse segmento também aborda todos os resultados obtidos a partir dos experimentos, relacionando com parâmetros de classificação, seja do concreto, como também de agressividade ambiental.

Por fim a seção 9, se refere à conclusão do estudo e como é feita a correlação das propriedades físicas de um concreto de alto desempenho frente à ação da carbonatação. São feitas abordagens a respeito da viabilidade da simulação dos efeitos deste fenômeno por meio de um ensaio controlado e de que maneira a porosidade do concreto está relacionada a isso. Ainda nesse capítulo, são constatadas as vantagens da utilização do CAD em ambientes agressivos e a relevância desse estudo para a evolução dos métodos de produção dessa mistura especial.

2 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.1 Cenário histórico do Concreto de Alto Desempenho

O surgimento do CAD se deu por volta da década de 1960 em Chicago, nos EUA. Inicialmente, e até pouco tempo atrás, se pensava na sua produção unicamente para obtenção de maiores valores de resistência à compressão, tanto que era chamado de concreto de alta resistência. Contudo, essa intitulação perdeu força justamente pelo fato de que o CAD contribui com outras propriedades importantíssimas, tais como: baixa porosidade, durabilidade, etc.

Helene *et al* (2011) apontam que a primeira alusão ao termo Concreto de Alto Desempenho foi há mais de 20 anos atrás, feita por Mehta & Aïtcin (1990). A partir daí foram definidas novas diretrizes a respeito da tecnologia desse novo tipo de concreto, o que acabou por divergir das características do chamado Concreto de Alta Resistência (CAR).

Aos poucos, esse novo tipo especial de mistura vem ganhando destaque em eventos da área técnica que o abrange, tais como congressos, seminários e outros encontros com enfoque em materiais da construção civil, tornando-o cada vez mais conhecido e estudado.

2.2 Definição e Desenvolvimento do CAD

O concreto de alto desempenho vem se definindo como um material especial devido ao seu comportamento em utilização, sendo diferenciado do concreto convencional (CC) por conseguir atender exigências de projeto muito específicas. É importante destacar que desempenho não se constitui apenas de resistência mecânica, mas também de durabilidade, integridade e trabalhabilidade.

Ainda assim, Helene *et al* (2011) citam que é bem comum confundir o CAR com o CAD devido ao fato de ambos terem elevada resistência mecânica, entretanto, nem todo CAD é considerado CAR. Por exemplo, uma dosagem de concreto autoadensável com resistência a compressão de 35MPa e relação a/c de 0,40 não se enquadra como CAR, no entanto é considerado um CAD, devido a sua trabalhabilidade. Ainda segundo os autores, dessa mesma forma ocorre com um concreto de 80 MPa com abatimento do tronco de cone de 20mm, o que confere à mistura grande coesão, ou seja, de difícil adensamento, gerando uma estrutura que se classifica como CAR, porém que não será de alto desempenho.

É preciso entender que essa não é uma mistura nova e muito menos uma revolução no mundo da engenharia de materiais. A composição do CAD nada mais é do que um avanço tecnológico no estudo do Concreto Convencional (CC), tal qual se mantém continuamente por meio de sucessivas pesquisas e experimentações, em busca de melhor atender às especificações dos projetos estruturais.

Para Mehta (1994), na dosagem do CAD deve-se buscar atingir baixa relação água/cimento, o que resultará na elevada resistência mecânica da peça. Sabendo disso, é necessário que haja a utilização de adições e aditivos. O concreto de alto desempenho se caracteriza também pela baixa permeabilidade, menor consumo de água, menor consumo de aglomerante e menor consumo de agregados, e tendo isso em vista, é quase impossível determinar uma alta resistência sem a utilização de adições minerais. É fundamental enfatizar também que o procedimento de dosagem exige um controle minucioso das proporções de cada elemento constituinte.

2.3 Componentes do CAD

Para que seja possível obter todas as características desejadas, utiliza-se na composição do CAD: cimento Portland, materiais pozolânicos, agregados comuns e superplastificantes. Para Tutikian *et al* (2011) são necessárias algumas ações para garantir

a diminuição da porosidade do concreto e da modificação de sua microestrutura. Sendo assim, destaca-se a otimização da granulometria dos agregados, a diminuição da relação a/c da mistura e o reforço das ligações químicas entre as partículas por meio da utilização de adições minerais. Essas ações resultam diretamente na diminuição do tamanho dos poros e da permeabilidade, conferindo à mistura maior compacidade, resistência mecânica, durabilidade e, conseqüentemente, melhor desempenho.

2.3.1 Cimento

Para Aïtcin (2000) a seleção do tipo de cimento é a etapa que antecede todas as outras em relação à produção do concreto de alto desempenho. Isso se deve ao fato da sua reologia, fator que influencia bastante no ganho de resistência a compressão do concreto.

O cimento do tipo Portland é o material aglomerante mais utilizado na produção do concreto. Por ser um aglomerante hidráulico, ou seja, um material que endurece através da ação da água, é excelente para a produção de peças moldáveis a diversas formas, assim como cita Helene:

Na mistura do concreto, o Cimento Portland, juntamente com a água, forma uma pasta mais ou menos fluida, dependendo do percentual de água adicionado. Essa pasta envolve as partículas de agregados com diversas dimensões para produzir um material, que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado capaz de ser moldado em fôrmas das mais variadas formas geométricas (HELENE, 2010, p. 09).

De modo complementar ao autor citado anteriormente, Neville (2010) discorre que o processo de fabricação do cimento consiste basicamente na mistura e moagem de suas matérias-primas (calcário e argila) e, posteriormente o aquecimento em altas temperaturas, formando o clínquer. Após isso, o clínquer é resfriado e recebe uma certa fração de gipsita, também chamado de sulfato de cálcio, passando novamente pela moagem até se tornar um pó fino, sendo este o Cimento Portland encontrado em mercado.

Para que se possa ter o conhecimento das propriedades físicas e químicas que o cimento pode conferir ao concreto, é necessário definir como se dá sua composição e quais as proporções em relação ao material. Os limites de proporção de óxidos como (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) que compõem a matéria-prima do Cimento Portland são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1: Limites aproximados da composição do Cimento Portland.

Óxido	Teor (%)
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3,0 - 8,0
Fe ₂ O ₃	0,5 - 6,0
MgO	0,1 - 4,0
Álcalis	0,2 - 1,3
SO ₃	1,0 - 3,0

Fonte: Adaptado de Neville, (2010).

Alguns fatores são importantes para definir o melhor tipo de cimento a ser utilizado na mistura, sendo eles a finura do material, sua composição química e a conformidade de utilização com os aditivos. Esses aspectos são fundamentais para a determinação das suas propriedades mecânicas e da aderência entre a pasta e o agregado.

De acordo com Aïtcin (2000), quando se trata de finura do material, quanto maior a área da superfície específica em contato com a água, mais rápido acontecerá a hidratação do cimento e, conseqüentemente, a elevação da resistência à compressão. Em contrapartida, quanto maior a finura, maior será o consumo de aditivo superplastificante, ou seja, será necessária uma dosagem maior para se obter a trabalhabilidade desejada.

Em se tratando da composição química do Cimento Portland, tem-se como as principais fases os silicatos de cálcio: C₂S (silicato dicálcico) e C₃S (silicato tricálcico), sendo estes os responsáveis pela resistência da pasta; os aluminatos de cálcio: C₃A (aluminato tricálcico) e C₄AF (ferroaluminato tetracálcico); e o sulfato de cálcio hidratado (gipsita) que é adicionado com a função de estender o tempo de pega instantâneo, provocado pela alta reatividade do C₃A.

Os compostos citados acima são oriundos da reação química entre os óxidos presentes na matéria-prima do cimento e nesses compostos formados estão presentes algumas impurezas que acabam criando defeitos em sua estrutura cristalina. Para alguns autores, a presença de uma grande quantidade de aluminatos é pouco desejável na composição de um concreto de alto desempenho, visto que estes pouco contribuem para a resistência final do concreto e, sua elevada reatividade é responsável por grandes vazios estruturais nas suas estruturas complexas. Portanto, Aïtcin (2000) aponta que para o desenvolvimento do CAD é importante seguir alguns requisitos como finura média das

partículas para controlar a quantidade de água na pasta, aumento no teor dos silicatos e, conseqüentemente, redução do C_3A .

2.3.2 Agregados

Para o desenvolvimento do CAD, a seleção dos agregados é particularmente necessária e ainda mais importante do que para concretos convencionais. A obtenção dos agregados graúdo e miúdo é feita diretamente da natureza a partir de jazidas de areia, desmonte de rochas, processos industriais, etc.

Para detalhar mais sobre a influência desse material, (Mehta e Monteiro, 1994) comentam sobre uma fase importante na microestrutura do concreto: “A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto”.

Sendo assim, as principais características a serem avaliadas são: massa específica, textura, granulometria e resistência a abrasão. Para isso, é necessário que haja um controle preciso na seleção dos agregados e que estes tenham dimensão máxima limitada, pois os de maior tamanho apresentam falhas na sua microestrutura.

A massa específica do agregado graúdo é uma das mais importantes características a ser analisada, pois influencia na massa específica do concreto e, conseqüentemente na sua resistência mecânica. Para desenvolver um concreto de alto desempenho, é interessante produzir uma peça com baixa porosidade, portanto, para que o agregado não se torne o elo fraco da mistura, é necessário que ele tenha baixo índice de vazios, o que naturalmente lhe confere maior resistência.

A textura e a granulometria caracterizam a forma do agregado e também influenciam nas propriedades físicas do concreto. Para Neville (1997) as dimensões ideais para agregado graúdo são entre 10 mm e 19 mm, pois com uma menor superfície haverá menos retenção de água durante o processo de exsudação do concreto no estado fresco.

É quase que unanimidade entre os autores que para a produção de CAD é ideal que se utilize areia natural e brita. Segundo Aïtcin (2000), no processamento da brita, algumas partículas são desagregadas fazendo com que se tenha uma concentração mínima de elementos fracos, tornando-o ideal para a mistura.

2.3.3 Superplastificante

Os superplastificantes são aditivos químicos redutores de água que tem como principais funções aumentar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco e melhorar a consistência sem aumentar o consumo de água. Sendo assim, sua utilização traz diversos benefícios principalmente quando se trata de concreto de alto desempenho dentre eles: o aumento da resistência mecânica pelo fato de manter baixos valores da relação a/c, durabilidade e redução da segregação por manter a consistência da mistura, e até mesmo o lançamento e adensamento.

Foi por volta da década de 60 que o superplastificantes começou a ser utilizado em concretos na Alemanha, inicialmente como fluidificante com o intuito de melhorar o preparo, o lançamento e o adensamento, na tentativa de impedir a segregação, e somente cerca de 20 anos depois foi que se atentou para sua aplicação como redutor de água.

Mehta e Monteiro (1994) definem esse aditivo como sendo de alta eficiência, por ser capaz de reduzir o consumo de água de três a quatro vezes em relação aos aditivos redutores de água comuns, o que é excelente quando se refere à produção de um concreto de boa resistência à compressão.

Em complemento a esse raciocínio, Tutikian *et al*, (2011) recomenda que os superplastificantes ideais a serem utilizados em Concretos de Alto Desempenho são os de terceira geração, à base de policarboxilato, e ainda aponta alguns requisitos indispensáveis para a escolha do aditivo, como: a compatibilidade com o cimento utilizado, o tempo de ação e o grau de aumento na trabalhabilidade do concreto.

Dessa forma, o principal efeito causado por esse aditivo na mistura do concreto é a melhora no processo de hidratação da pasta, por meio de uma otimização na distribuição das partículas de cimento resultando na elevação da resistência mecânica, uma vez que se mantém a relação água/cimento.

2.3.4 Sílica Ativa

Para a obtenção de uma microestrutura mais densa do concreto é necessário que haja a integração de partículas extremamente finas, mais até do que o próprio cimento, sendo elas chamadas de adições minerais. Dentre elas, existem as pozolanas naturais, as escórias de alto-forno, cinzas de casca de arroz e também a sílica ativa.

Do Carmo (2008) aponta que a sílica ativa tem origem a partir de um processo industrial da produção de ligas metálicas como ferrosilício e silício-metálico e que esse processo envolve grandes fornos elétricos de fusão onde ocorre a redução do quartzo pelo carbono em elevadas temperaturas. Como resultado tem-se a formação do dióxido de silício (SiO_2) que se apresenta com uma cor cinza.

Assim, a sílica ativa se estabelece como um subproduto formado por rejeitos, composições de gases e poeiras provenientes de produções industriais que contém um alto teor de SiO_2 que é o que determina a reatividade da pozolana e que pode variar de acordo com cada tipo de produção.

Em contrapartida ao aditivo superplastificante, a sílica ativa possui grande área superficial, o que acaba por promover um aumento na demanda de água. Por outro lado, essa característica também faz com que melhore a trabalhabilidade e diminua o número de vazios na mistura, influenciando positivamente principalmente na transformação do CC em CAD.

A sílica e o superplastificante devem ser utilizados de forma conjunta e se bem dosados, podem oferecer excelente resistência mecânica ao concreto. Uma característica interessante dessa adição mineral, semelhante aos aditivos redutores de água é que sua aplicação auxilia no processo de hidratação do cimento, fazendo com que este apresente um ganho de resistência logo nas primeiras idades.

2.4 Dosagem do CAD

A maioria dos métodos de dosagem de concreto de alto desempenho são caracterizados por baixas relações de água/cimento, uso de aditivos (superplastificantes) e adições minerais e alto consumo de cimento. A determinação das proporções dos materiais, tais como cimento, aditivos, adições e água vão influenciar diretamente nas propriedades físicas do concreto, sejam elas: resistência mecânica, trabalhabilidade, tempo de pega, porosidade etc. Além disso, Baccin (1998) cita que a resistência do concreto está intrinsecamente atrelada às características e resistências dos agregados adquiridos na região e das adições minerais adotadas.

De maneira a contribuir com o controle de produção, Baccin (1998) ainda determina as premissas básicas para a obtenção da dosagem de um concreto de alto desempenho:

- O desenvolvimento do CAD deve ser baseado na experimentação dos materiais disponíveis, observando-se suas características relevantes.
- A resistência não possui uma proporção direta em relação ao fator a/c , já que esta pode ser significativamente afetada pela quantidade de adição mineral empregada.
- A maioria das dosagens de CAD são baseadas na grande quantidade de ensaios realizados, sendo que se aplicam exclusivamente aos materiais utilizados nas experimentações.

Atualmente há diversos métodos de dosagem de CAD desenvolvidos por pesquisadores e estudiosos da área da tecnologia do concreto. Conforme citam Tutikian e Helene (2011), os mais utilizados são o Mehta-Aïtcin (1990), o de Aïtcin (2000), Nawy (1996) e o IBRACON. Ainda segundo os autores, o método de Mehta-Aïtcin (1990) é baseado na otimização do esqueleto granular, enquanto que o de Nawy (1996) e de Aïtcin (2000) se apoiam no critério de volume absoluto, isto é, após de definidas as quantidades de agregado graúdo, cimento e água, o que faltar para completar um metro cúbico, se faz com areia. Há ainda métodos como o de De Larrard (1990) e O'Reilly (1998) que, da mesma forma que o de Mehta-Aïtcin (1990), se fundamentam na otimização do esqueleto granular, que se vale do preenchimento dos vazios com cimento ou pasta. Os métodos de Mehta-Aïtcin (1990), Aïtcin (2000), Nawy (1996) e O'Reilly (1998) serão descritos nessa seção.

2.4.1 Método Mehta-Aïtcin (1990b)

O método Mehta-Aïtcin é proposto para resistências acima de 60 MPa, pois a partir desse valor que se obtém concretos de baixa permeabilidade, característica do concreto de alta resistência. Já o limite superior de 120 MPa se deve à produção de concretos com agregados naturais que, dificilmente atingirem resistências acima desta (FOCHS, 2011).

Para o desdobramento dos cálculos desse método, é necessário determinar as massas específicas de todos os componentes a serem utilizados. Essa é considerada uma das vantagens desse método, pois os ensaios preliminares são bem simples e de fácil desenvolvimento.

De acordo com Alves (2000) o método utiliza como base que o material granular ocupa 65% da composição da mistura, sendo o restante composto pela pasta e

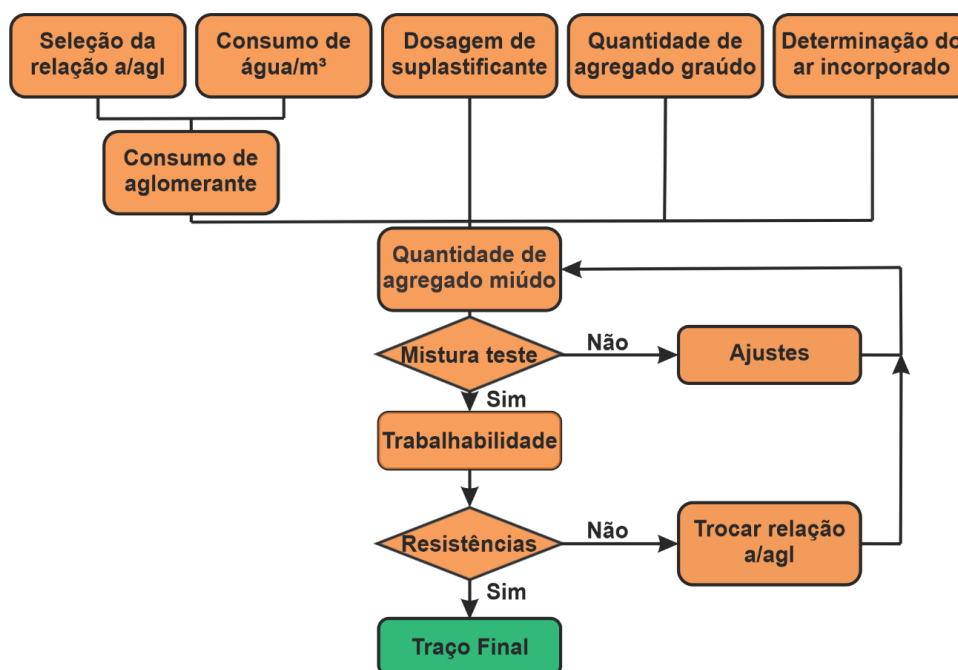
ainda considera 2% de ar incorporado de modo que se possa garantir, já no processo de dosagem, uma baixa porosidade, contribuindo para as características de resistência do concreto.

2.4.2 Método de Aïtcin (2000)

É um método que consiste na combinação de resultados empíricos com cálculos matemáticos baseados no método do volume absoluto, para aplicação em concretos de 40 a 160 MPa. A metodologia de dosagem utiliza características do traço e proporções dos materiais, sendo estas, a relação a/c, o teor de água, a dosagem de superplastificante, o teor de agregado graúdo e o teor de ar incorporado (AÏTCIN, 2000).

O fluxograma do método está representado na Figura 1.

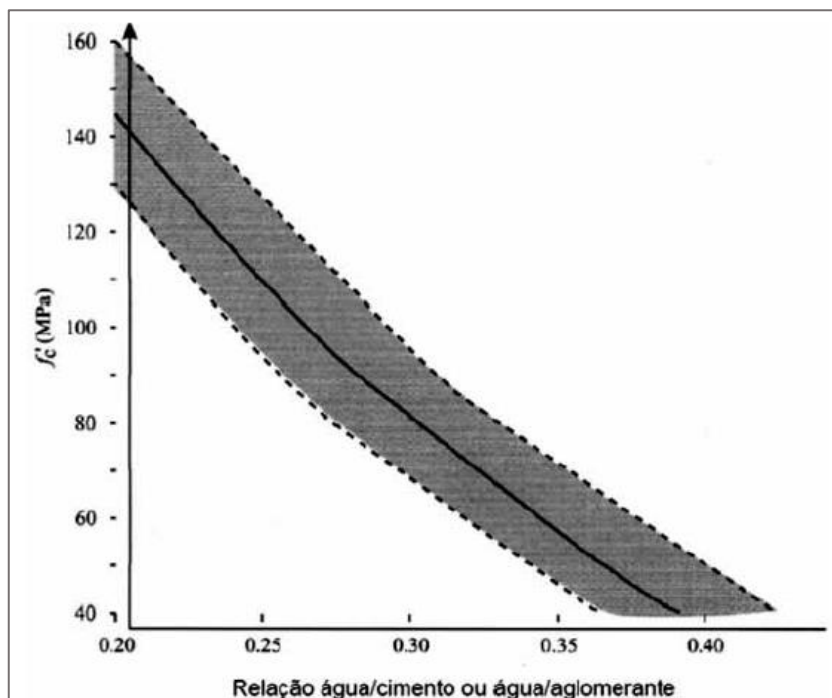
Figura 1: Fluxograma do Método de Aïtcin.



Fonte: Adaptado de Aïtcin, (2000).

De acordo com as análises de Helene *et al* (2011) é preciso determinar, inicialmente, a relação água/cimento para se obter a resistência desejada. A partir da curva teórica representada por Aïtcin (2000), mostrada na Figura 2, é possível estimar o fator a/c e correlacionar com a resistência requerida.

Figura 2: Relação entre a relação a/c e a resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Aïtcin, (2000).

Além disso, para Alves (2000), é preciso definir também alguns outros fatores como o ponto de saturação, a massa específica e a quantidade de sólidos do aditivo, a forma do agregado graúdo e o teor de ar incorporado. Por fim, o autor ainda destaca as vantagens e desvantagens do método: ele permite que seja levado em consideração as características dos materiais e a utilização de uma tabela que serve de roteiro de cálculo conforme é preenchida; já como desvantagem, Alves (2000) relata que devem sempre ser feitos ajustes quando há alteração das características dos materiais empregados.

2.4.3 Método Nawy (1996)

Assim como o método de Aïtcin (2000), o método Nawy (1996) é fundamentado no critério de volume absoluto, ou seja, o volume de agregado miúdo é definido como sendo a subtração dos volumes de todos os materiais do volume total da mistura. O método prevê a aplicação para concretos com resistência a compressão aos 28 dias, de 48 a 83 MPa. O método ainda considera a dimensão máxima característica do agregado, o valor do abatimento e a resistência à compressão que se deseja alcançar (ALVES, 2000).

Para Alves (2000) é necessário que haja a definição do tipo e da classe do cimento, além do módulo de finura, teor de umidade e massa unitária e específica dos

agregados para a aplicação desse método. Assim como no método de Aïtçn (2000), o autor também traz as vantagens e desvantagens deste método, sendo a principal vantagem a facilidade da obtenção do traço desejado e a maior desvantagem o alto consumo de cimento, o que pode gerar problemas em decorrência do calor de hidratação.

2.4.4 Método de O'Reilly (1998)

Assim como em todos os outros métodos baseados na otimização do esqueleto granular, o Método de O'Reilly busca a redução do índice de vazios por meio da busca de uma relação ideal entre os agregados miúdos e graúdos, para encontrar o esqueleto ótimo. Neste método, Helene *et al* (2011) descrevem que o procedimento de dosagem é dividido em duas partes, sendo a primeira para determinar a proporção dos agregados experimentalmente, e a segunda calcula os demais componentes da mistura do concreto, a partir de tabelas e aproximações.

A primeira parte do método apresenta uma forma experimental de determinar-se a melhor composição entre os agregados do concreto, dois em dois, do de maior granulometria para o de menor (HELENE *et al*, 2011).

Na segunda parte, o consumo de água e cimento é determinado com base na experiência do executante do traço. Com isso, se mistura um traço experimental, e com os valores de resistência à compressão média do concreto, do cimento utilizado e de constantes tabeladas pelo autor, se encontra a característica 'A' do agregado. A partir daí, a etapa do método passa a ser empírica (HELENE *et al*, 2011).

Pode-se observar que este é um método com forte base experimental e que está focado na economia do cimento, no entanto, Helene e Tutikian (2011) apontam que não é um método de fácil aplicação, já que depende de um vasto roteiro experimental que, através de testes e etapas específicas se adquire a mistura mais compacta. Os autores ainda constatam que a determinação do esqueleto granular ótimo é por meio do clássico modo de realizar a combinação dos agregados de maneira que reduza a porosidade da mistura, e assim, diminua o consumo de pasta.

3 CARBONATAÇÃO

3.1 Condições Gerais

A carbonatação é um fenômeno no qual ocorre uma alteração no pH de misturas cimentícias por meio de reações químicas entre os compostos do cimento com o gás carbônico presente na atmosfera. Este é um dos principais fatores que podem afetar a vida útil de uma estrutura de concreto armado devido à abundância do dióxido de carbono, especialmente em ambientes urbanos.

Entre os componentes da pasta de cimento, tem-se os chamados álcalis, dentre eles o hidróxido de cálcio, que confere ao concreto sua alcalinidade característica, com pH em volta de 12,5 e 13,5, que é o que promove a proteção das barras de aço por meio de uma película de óxido. Esta película, ou capa, é chamada de camada passivadora. Através da exposição ao CO_2 , ocorre uma reação com o Ca(OH)_2 que diminui o pH para valores em torno de 8,5.

Essa redução é prejudicial não ao concreto em si, mas para a estrutura como um todo, isso porque essa nova alcalinidade da mistura faz com que a proteção da armadura seja destruída, abrindo portas para a entrada de agentes agressores e dando início ao processo de corrosão.

A vida útil de uma estrutura de concreto armado via carbonatação pode ser dividida em duas fases: iniciação e propagação. A iniciação se trata do avanço da frente de carbonatação até chegar na armadura havendo assim a despassivação da proteção das barras de aço. Já a propagação vai desde o início da corrosão se estendendo ao limite de deterioração das propriedades físicas do material, passando pelo processo de fissuração do concreto até chegar, por fim, no deslocamento do mesmo.

3.2 Frente de Carbonatação

De acordo com o que relatam autores como Possan (2010), Mehta e Monteiro (2008) e Helene (1993), a frente de carbonatação tem início nos poros do concreto, onde há a presença de água (H_2O) e de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Já no meio atmosférico tem-se a presença de CO_2 (dióxido de carbono). A redução do pH do concreto ocorre a partir da reação do CO_2 com a água, que forma o H_2CO_3 (ácido carbônico), a qual é expressa pela equação (1.1), que por sua vez possui um baixo pH. Em seguida, há a reação do ácido carbônico com o hidróxido de cálcio, formando o chamado carbonato de cálcio

(CaCO₃), cujo pH é definido em aproximadamente 9,4 (Equação 1.2). É a formação desse composto que caracteriza a consolidação do desenvolvimento da carbonatação.

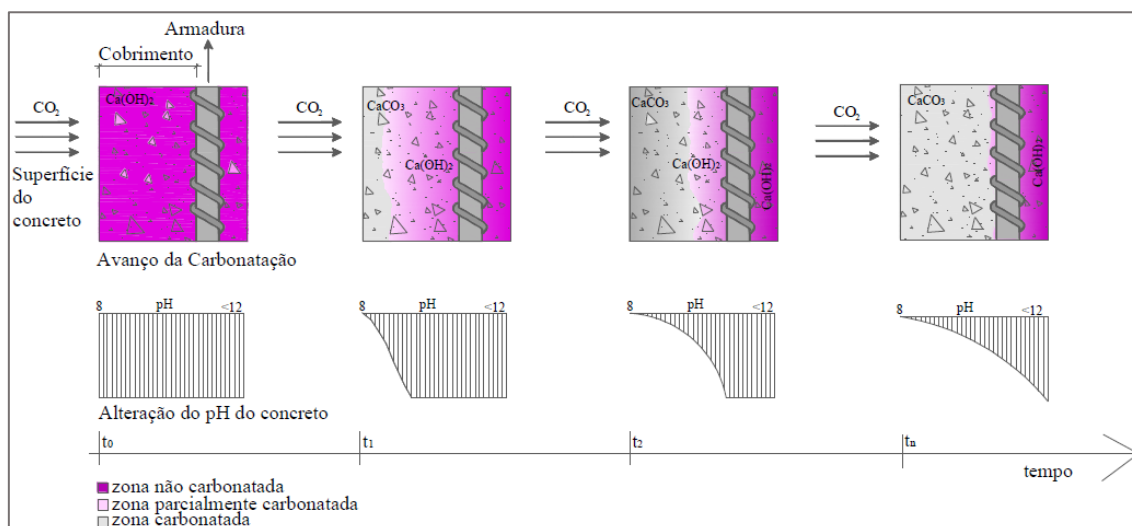
Esse processo de reação química entre os elementos pode ser melhor observado a partir do que é expresso pelas Equações (1.1) e (1.2):



É importante salientar que a carbonatação é imperceptível a olho nu, sendo necessário, portanto, a realização de ensaios para avaliar a profundidade da área afetada. Esse ensaio pode ser feito de maneira simples, como por meio da aspersão de fenolftaleína, um indicador de pH em solução alcoólica, no qual define a profundidade da carbonatação. Este ensaio nos traz informações através da coloração que o material cimentício apresenta. Se este manifestar uma cor magenta forte, significa que esta região está com pH básico; em contrapartida, se apresenta uma coloração mais enfraquecida, pode ser um forte indício de um pH mais neutro; já se o resultado for um material incolor, essa indicação, traduz ao leitor um pH ácido.

A Figura 3 representa como ocorre o avanço da frente de carbonatação no interior do concreto, possibilitando a uma visão mais clara das etapas e das zonas afetadas a partir do tempo de exposição.

Figura 3: Avanço da frente de carbonatação e redução do pH com o tempo.



Fonte: Possan, (2010).

Na representação da Figura 3, observa-se, no avanço da frente de carbonatação a delimitação de três zonas distintas: uma carbonatada; outra parcialmente carbonatada; e uma não carbonatada, com pH de 8,3, 10 e >12,5, respectivamente (POSSAN, 2010). De forma paralela é possível observar a relação de proporcionalidade indireta entre a difusão do CO_2 ao longo do tempo e a alteração da alcalinidade, uma vez que em t_0 o pH do concreto se mostra incólume e em t_1 , t_2 e t_n o pH do concreto diminui progressivamente, devido ao avanço do dióxido de carbono provocando as reações químicas descritas anteriormente.

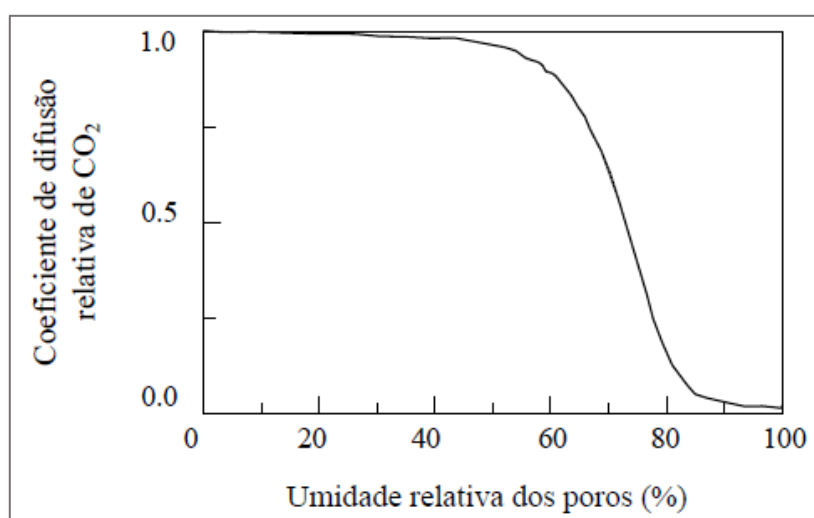
3.3 Mecanismos de Transporte do CO_2

De acordo com o que estabelece Possan (2010), a porosidade da matriz cimentante do concreto é a principal porta de entrada para agentes agressores, tais como o dióxido de carbono e íons cloreto, por exemplo. O princípio que rege a entrada desses agentes é chamado de mecanismo de transporte, e se estabelece a partir da difusão de gases, migração de íons, e absorção por capilaridade. Além disso a autora também cita que esses mecanismos podem agir de maneira combinada. Fatores climáticos e ambientais como umidade do ar, temperatura e condicionantes de projeto e execução, como cura do concreto, relação água/cimento, teor de cimento, cargas atuantes, entre outros, podem se tornar agravantes ou podem inibir o avanço destes agentes para o interior do concreto.

3.4 Umidade Relativa do Ar

De acordo com o que estabelece Bakker (1988), quando o concreto não apresenta água nos poros a difusão do CO_2 pode ocorrer normalmente, no entanto, ele se manterá somente na condição de gás, sem reagir com os compostos hidratados do cimento. De maneira similar, com os poros totalmente saturados, também não ocorre a reação, visto que não haverá espaço para o CO_2 se difundir. Já com o concreto parcialmente saturado, se tem as condições mais favoráveis para o desenvolvimento da reação de carbonatação, pois haverá espaço para a difusão do CO_2 e água suficiente para promover a reação com os compostos hidratados, sendo essa a condição de maior risco para o comprometimento da camada passivante do aço. A Figura 4 ilustra bem como esse processo ocorre.

Figura 4: Efeito da umidade no coeficiente de difusão do CO_2 .



Fonte: Steffens, Dinkler e Ahrens, (2020).

Observa-se pelo gráfico que há uma tendência de decréscimo considerável quando a umidade relativa excede os 60%. Quando a umidade ultrapassa os 80% o coeficiente de difusão do CO_2 cai para 10% em relação ao concreto seco. Desse modo, a molhagem das partes de uma estrutura pela água da chuva afeta significativamente o tempo necessário para o desenvolvimento da frente de carbonatação (STEFFENS, DINKLER E AHRENS, 2002).

3.5 Carbonatação Acelerada

De acordo com o que apontam Pauletti, Possan e Dal Molin (2007), em condições normais de exposição, o avanço da frente de carbonatação pode levar vários anos para manifestar dados possíveis de serem estudados, a depender do valor da relação água/cimento. Para valores maiores é possível levantar dados com cerca de um ano de exposição, já com valores mais baixos (como é o caso do CAD), esse processo pode levar até vinte anos.

Ainda segundo as autoras, com o intuito de acelerar essa análise de dados, muitos pesquisadores vêm tentando reduzir o tempo desse processo. Se em condições normais de exposição há uma concentração de cerca de 0,03% a 1% de CO₂, em laboratórios onde essa concentração pode ser controlada, esses valores podem variar de 1% até 100% acelerando bastante a obtenção de resultados.

A aceleração do fenômeno da carbonatação pode ser feita em câmaras onde o controle do ambiente de exposição dos corpos de prova é bem preciso devido a possibilidade de monitoramento e de utilização de equipamentos modernos. Por outro lado, é fato que os resultados obtidos a partir dessa experimentação jamais ocorrerão na prática uma vez que as situações reais envolvem muitas outras variáveis e processos aleatórios.

Dessa forma, os ensaios acelerados têm como principal objetivo a análise de situações que ainda não possuem um histórico de comportamento, ou seja, para novos testes com materiais e/ou misturas novas. Assim sendo, os dados obtidos podem servir de base para muitos projetistas ao prescreverem execuções de reparo para preservar a vida útil de uma estrutura.

4 VIDA ÚTIL E DURABILIDADE

De acordo com a NBR 6118: 2014, a vida útil de projeto se estabelece através de um período de tempo em que a estrutura de concreto permanece com suas características sem interferências consideráveis desde que sejam atendidos os quesitos de uso e manutenções conforme determina o projetista.

Nessa linha, tendo em vista melhorar a qualidade das construções como um todo, criou-se a “Norma de Desempenho” (NBR 15575, 2013) que estipula os critérios

mínimos de desempenho das edificações, incluindo seus sistemas construtivos, de modo a atender as necessidades de usabilidade do imóvel.

Sendo assim, a definição da vida útil de uma construção tem relação direta com o que cita Dal Molin *et al*:

A degradação das edificações ou suas partes e a conseqüente redução de seu desempenho, deve-se especialmente à agressividade do ambiente de exposição e ao surgimento de manifestações patológicas (trincas, fissuras, corrosão, entre outras) (DAL MOLIN *et al*, 2016, p. 230).

Portanto existem vários fatores que influenciam na vida útil de uma estrutura de concreto e que se relacionam diretamente com o que a autora citou anteriormente. Dentre eles estão: o tipo de cimento utilizado, o revestimento, a relação água/cimento, o processo de adensamento e cura, o teor de adições minerais e a resistência mecânica.

Falando da relação água/cimento, é importante destacar que essa é uma das condições determinantes para a durabilidade de uma estrutura de concreto, Cascudo (1997) explica:

A relação água/cimento (a/c) é um dos parâmetros mais importantes, quando se diz respeito à corrosão da armadura, pois é ela que determina a qualidade do concreto, ou seja, define as características de compactação ou porosidade da pasta de cimento endurecida responsável pela proteção da armadura, ou seja, o revestimento (CASCUDO, 1997, n.p.).

Paralelamente a esses pontos, é importante definir que uma estrutura é considerada durável se ela possui a capacidade de atender as funções das quais foi projetada e construída acima de determinado tempo. Além disso, Mehta (1994) também entende por durabilidade como sendo a característica da estrutura de concreto de resistir a processos de deterioração, seja intemperismo físico ou químico, durante o período de vida útil para o qual foi projetado.

Atualmente a maior preocupação quando se trata de se desenvolver estruturas duráveis, é de se produzir peças capazes de resistir a agentes agressores que possam desencadear um processo de degradação. Para isso, estudos acerca do comportamento do CAD estão sendo cada vez mais intensificados, devido a algumas de suas características como baixa porosidade, baixa permeabilidade e elevada resistência mecânica.

Ainda não existe nenhuma convenção nem método específico a respeito da determinação da durabilidade de estruturas de concreto. Portanto quando se refere a

concreto de alto desempenho, Aitcin (2000) afirma que o que falta é exatamente um histórico acerca da sua aplicação com a discriminação dos pontos de falhas e de sucesso.

5 AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Conforme estabelece a NBR 6118:2014, um dos principais fatores que influenciam na perda da qualidade e durabilidade das estruturas é a agressividade do meio ambiente, na qual está relacionada diretamente às ações físicas e químicas, independentemente das ações associadas às propriedades do concreto e das previstas em projeto. A norma divide a agressividade ambiental em quatro classes como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Classes de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118, (2014).

A classe I trata-se de ambiente rural ou submerso, possui risco de deterioração insignificante, portanto apresenta agressividade fraca. A classe II estabelece que em zonas urbanas o risco de deterioração é pequeno, logo apresenta agressividade moderada. Já as classes III e IV são de risco grande e elevado, respectivamente, por se tratarem de regiões industriais e marinhas, então apresentam agressividade forte e muito forte.

5.1 Cobrimento da armadura

Dentre os fatores que contribuem para a durabilidade de uma estrutura de concreto armado, é fundamental citar a qualidade da espessura de cobrimento de concreto das armaduras. Isso porque este cobrimento serve como proteção para o aço contra os agentes agressores, e quando se trata de carbonatação, um fenômeno que ocorre em decorrência da presença de CO₂, fica mais evidente ainda a importância dessa proteção.

Como descreve Helene (1993), a proteção contra a corrosão da armadura é garantida pelo cobrimento de concreto e se baseia no impedimento do progresso de corrosão por meio de uma barreira física e de proteção de natureza química, e é isto que confere ao concreto armado uma grande vantagem em relação aos outros materiais de construção.

Ainda segundo o autor, a película passivante da armadura formada através das reações de hidratação dos silicatos de cálcio promovem a alcalinidade do ambiente, devido à liberação de certa quantidade de hidróxido de cálcio. Sendo assim, o papel do cobrimento é então a proteção dessa capa da armadura contra danos físicos e mecânicos, para conseqüentemente, manter sua estabilidade química.

Para garantir essa proteção, a NBR 6118:2014 estabelece que o cobrimento mínimo é definido como a menor distância entre a face da peça e a camada mais próxima da barra, sendo essencial assegurar esse espaço ao longo de toda a peça. O cobrimento mínimo é garantido a partir de um acréscimo de uma tolerância de execução (ΔC), sendo assim chamado de cobrimento nominal.

O valor do cobrimento está diretamente ligado à durabilidade e qualidade da estrutura que por sua vez está atrelada à classe de agressividade ambiental. Sendo assim, observa-se na Tabela 3 esta correlação de acordo com os elementos estruturais.

Tabela 3: Correspondência entre cobrimento nominal e classe de agressividade ambiental.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118, (2014).

Na representação da Figura 6 nota-se as condições e requisitos mínimos de projeto relacionados à vida útil e qualidade de uma peça de concreto armado. Ademais, é fundamental pontuar também a qualidade dos materiais que serão empregados na produção dessas peças, pois estes são componentes indispensáveis quando se fala em controle das propriedades físicas. São essas propriedades que vão definir, por exemplo, o quão poroso é o concreto e qual a sua capacidade de resistir a agentes agressores externos.

5.2 Qualidade do concreto

A NBR 6118:2014 também possui requisitos quanto à correspondência entre a qualidade do concreto e as classes de agressividade ambiental. São analisados fatores relacionados ao controle de qualidade da execução, detalhamento de projeto, qualidade dos materiais e relação água/cimento.

Nessa questão, a NBR 6118:2014 se baseia nas informações estabelecidas pela NBR 12655 (Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação) que aborda de maneira mais completa as condições para garantir a qualidade do concreto. Dentre elas, destaca-se que a relação a/c deve ser definida conforme a classe de agressividade do ambiente.

5.2.1 Relação água/cimento

O conceito de relação água/cimento é definido por Bauer (2000):

É a relação entre a quantidade de água utilizada na mistura do concreto com a massa de cimento. A resistência a compressão do concreto depende do fator a/c que, por sua vez, depende da distribuição granulométrica do agregado. A distribuição granulométrica deverá ser tal que permita uma mistura e máxima compacidade, compatível com a peça a concretar (BAUER, 2000, n.p.).

Sequencialmente, Cascudo (1997) estabelece que a relação água/cimento é um dos principais parâmetros de definição da qualidade do concreto. Dela há uma determinação direta de características físicas importantes do concreto, tais como porosidade e compacidade da pasta de cimento, responsável pela proteção da armadura

De maneira a complementar o raciocínio do autor citado acima, Helene (1993) cita que a relação a/c controla todas as propriedades associadas a microestrutura do concreto endurecido. Sendo assim, se estabelece uma correlação com o fenômeno da carbonatação, pois quanto menor a relação a/c, menor a dimensão dos poros e, desta forma, mais difícil a difusão do CO₂ no concreto.

Tendo como base essas explicações, é possível quantificar esse parâmetro e relacionar com o avanço da carbonatação: Quando aumentamos a relação a/c de 0,4 para 0,8, podemos observar aumento no volume dos poros em até 5 vezes e o coeficiente de difusão do CO₂ tem aumento de mais de 10 vezes (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A Tabela 4 apresenta além da relação a/c, a classe do concreto a ser utilizada de acordo com a classe de agressividade ambiental.

Tabela 4: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto.

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Nota-se que para cada classe de agressividade que a norma trata, são considerados diferentes valores de relação água/cimento, justamente pela necessidade da diminuição do índice de vazios em zonas de maior impacto ambiental, seja por ataques de cloretos, no caso de zonas marítimas, ou mesmo pela grande concentração de dióxido de carbono, no caso de áreas de tráfego urbano intenso.

6 METODOLOGIA

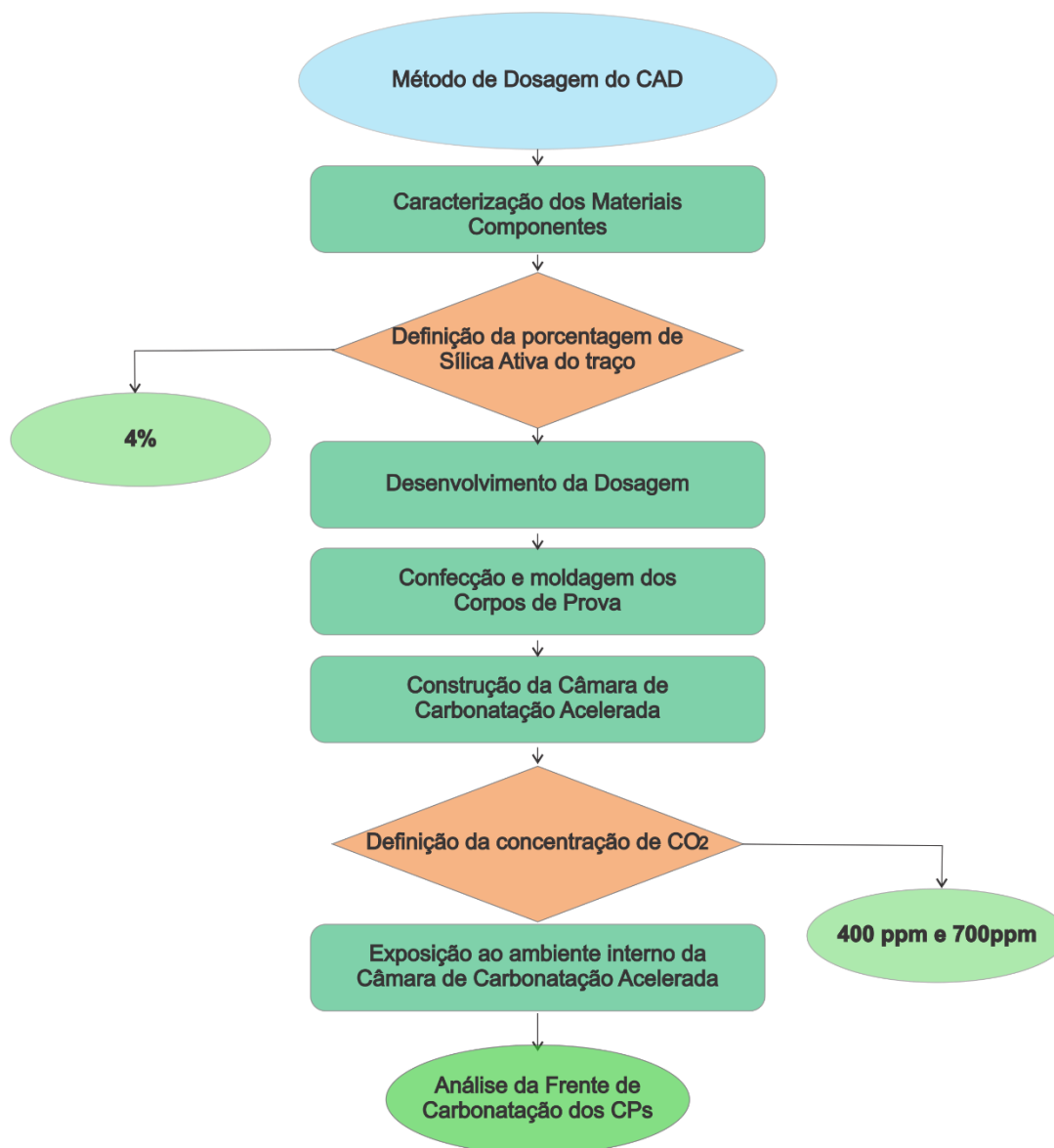
Este trabalho consiste em confeccionar corpos de prova de concreto de alto desempenho (CAD) dosados por um método específico e expô-los a diferentes concentrações de CO₂ em uma câmara de carbonatação acelerada para avaliar o avanço da frente de carbonatação.

Para os procedimentos de produção do concreto, foi selecionado o método de dosagem de Mehta-Aïtcin (1990b) para resistência à compressão esperada aos 28 dias de 60 MPa. Realizou-se em laboratório os ensaios de caracterização dos materiais que o método exige, como massa específica e massa unitária dos elementos. Definidos os resultados da caracterização dos materiais constituintes do concreto, foi possível determinar o traço inicial para se obter o consumo do material aglomerante e dos outros materiais para a resistência desejada. A partir do traço definido foi realizada a dosagem, onde se obteve os valores definitivos de consumo dos materiais e a relação água/aglomerante para definir o traço final. Feito isso, a etapa final desse procedimento foi a confecção e moldagem dos corpos de prova os quais foram divididos para exposição a diferentes concentrações de CO₂.

Para a exposição dos corpos de prova a gás carbônico (CO₂), foi construída uma câmara de carbonatação seguindo alguns passos e critérios de outros estudos nessa área. Para esse procedimento foi feito o levantamento de todos os materiais necessários definidos por artigos e trabalhos de monografia nessa linha de pesquisa. Além disso, também foi necessário buscar parâmetros das concentrações de gás carbônico em teses e dissertações das quais já contemplaram estudos aprofundados acerca das proporções do CO₂ nos ambientes. Assim, definidos os materiais, pôde-se partir para a construção da câmara para dar início à exposição dos corpos de prova. Foram feitas duas simulações com concentrações diferentes em um mesmo traço afim observar uma possível diferença no avanço da frente de carbonatação em concreto de alto desempenho. Com base nos resultados obtidos, foram comparados os dados das simulações com o intuito de constatar

hipóteses acerca do comportamento do CAD frente à ação do fenômeno da carbonatação. A Figura 5 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas no estudo e procedimentos descritos.

Figura 5: Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

6.1 Tipo de Pesquisa

De modo a contribuir com o estudo do comportamento do concreto de alto desempenho, este projeto foi desenvolvido a partir de uma pesquisa descritiva e explicativa, onde foram utilizados métodos experimentais para identificar e analisar o fenômeno da carbonatação e os efeitos provocados pelo mesmo. Com relação ao método

de abordagem, foi utilizado o qualitativo, observando-se o caráter representativo do fenômeno, bem como a aferição dos seus efeitos no material em estudo para analisar o avanço da frente de carbonatação.

6.2 Coleta de Dados

Os dados dessa pesquisa foram obtidos por meio dos ensaios realizados no laboratório das Engenharias do Centro Universitário - UNDB, com o intuito de analisar e identificar o comportamento do concreto de alto desempenho frente à ação da carbonatação acelerada.

Os ensaios realizados neste estudo foram: Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, conforme a NBR 67:1998; Ensaio de teor de umidade do agregado graúdo, segundo a NBR 9939:2011; Ensaio para analisar a resistência à compressão do concreto, segundo a NBR 5739:2018; Ensaio para determinação de Massa Específica, Massa Aparente e Absorção de Água, conforme a NBR NM 53:2009; Ensaio para determinação de Massa Unitária e do Volume de Vazios, com base na NBR NM 45:2006, procedimentos para moldagem dos corpos de prova orientados pela NBR 5738:2016; e ensaio de carbonatação acelerada, que não possui norma orientativa.

Assim sendo, após a realização dos ensaios, os resultados obtidos foram analisados para verificar se houve conformidade ou não com o objeto de estudo. Estes dados foram expostos para atestar a competência da pesquisa de modo a especificar os pontos de sucesso e também os aspectos a serem ajustados para pesquisas futuras.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como principais objetivos estudar as propriedades do Concreto de Alto Desempenho, a tecnologia envolvida no seu processo de produção e a utilização de uma câmara de carbonatação acelerada. Para isso serão confeccionados corpos de prova cilíndricos para realização de ensaios objetivando avaliar suas características físicas e a construção da câmara de ensaio acelerado para simular o fenômeno da carbonatação em um curto período.

Para tanto, a caracterização dos materiais a serem utilizados na mistura de concreto foi a primeira etapa a ser desenvolvida, seguindo as normas orientativas de cada ensaio, em seguida passou-se para o desenvolvimento da dosagem a partir do método específico selecionado. Após isso, foram confeccionados e moldados os corpos de prova cilíndricos.

Assim seguiu-se para a construção da câmara de carbonatação acelerada para submeter os corpos de prova de CAD à exposição de gás carbônico dentro da câmara.

7.1 Caracterização dos Agregados

7.1.1 Determinação da granulometria dos agregados

Para a realização do ensaio de granulometria foram obedecidos os requisitos da norma NM 248:2003 (Agregados – Determinação da Composição Granulométrica). De acordo com a norma, foram necessários os seguintes materiais para o desenvolvimento do ensaio:

- Fundo avulso de peneira;
- Balança com incerteza de pelo menos 0,10% da massa da amostra;
- Bandejas
- Estufa capaz de manter temperatura de 100° C;
- Peneiras das séries normal e intermediárias que atendam à norma NM-ISSO 3310-1 ou 2;
- Agitador mecânico de peneiras.

Após o levantamento dos materiais a serem utilizados no ensaio, foram definidas as quantidades das amostras seguindo os requisitos de massa mínima exigidos pela norma de acordo com a dimensão máxima do agregado.

Para o agregado miúdo foram utilizados 3,0 kg de areia para a realização do ensaio, já para o agregado graúdo, foram utilizados 3,5 kg de brita 0. Após isso, os materiais foram levados para a estufa a uma temperatura constante de 100° C durante um período de 24 horas, afim de eliminar toda a umidade presente no mesmo.

Após a secagem completa das amostras, seguiu-se para o procedimento de peneiramento do material, realizado com as peneiras específicas para cada tipo de agregado. As peneiras são dispostas em ordem crescente de abertura das malhas da base até o topo, contendo um fundo para receber todo o material passante nas peneiras.

Feita a montagem das peneiras, posiciona-se sobre o agitador mecânico para que seja possível analisar as quantidades de material passante e retido. Após essa verificação é que se determina a composição granulométrica dos agregados de acordo com a NBR NM 248:2003, como mostra a Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Série de peneiras.

<i>Serie Normal / Série Normal</i>	<i>Serie Intermedia / Série Intermediária</i>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: NBR NM 248, (2003).

Em seguida é feita a pesagem de todo o material retido nas peneiras, registrando-se a massa em cada uma para que seja feita a distribuição granulométrica. Essa etapa é importante para a caracterização dos materiais utilizados no concreto, afim de fazer o controle de produção de modo a definir características específicas do mesmo nos estados fresco e endurecido.

7.1.2 Determinação da massa específica do agregado miúdo

Para a realização do ensaio de massa específica da areia, foi preciso seguir as recomendações de procedimentos estabelecidos na norma NBR NM 52:2009 a qual determina os materiais necessários para o experimento:

- Bandeja;
- Balança com capacidade mínima de 1,0 kg e incerteza instrumental de 0,10g;
- Frasco do tipo Erlenmeyer com capacidade de 500 ml e erro inferior a 0,15 ml;
- Espátula de aço;

- Molde tronco-cônico metálico com diâmetro superior de (40 ± 3) mm e inferior de (90 ± 3) mm e (75 ± 3) mm de altura, com espessura mínima de 1 mm.
- Haste de compactação metálica com (340 ± 15) g de massa, tendo superfície de compactação circular plana de (25 ± 3) mm de diâmetro;
- Estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de (105 ± 5) ° C;
- Circulador de ar regulável;
- Dessecador.

Inicialmente se faz a preparação da amostra do agregado em uma bandeja, utilizando 1,0 kg de material obtido do quarteamento. Em seguida, coloca-se a amostra em um recipiente onde será coberta de água como mostra a Figura 6 e deixa em repouso por 24 horas.

Figura 6: Pesagem e saturação do agregado.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Após essa etapa, retirou-se a amostra da água e espalhou-se o material sobre uma superfície plana submetendo-a a ação de uma corrente de ar como mostra a Figura 7, revolvendo o material para garantir uma secagem uniforme. Esse procedimento foi realizado até que os grãos do agregado miúdo não ficassem fortemente aderidos entre si.

Figura 7: Espalhamento do material e exposição a uma corrente de ar.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Em seguida, colocou-se o agregado miúdo no molde de tronco-cônico sem comprimi-lo, como ilustra a Figura 8. Afim de verificar a umidade superficial do material, utilizou-se a haste de socamento para compactar a superfície suavemente com 25 golpes e então levantou-se o molde verticalmente. Observou-se o desmoronamento do agregado para constatação da condição saturada superfície seca, como está representado na Figura 8.

Figura 8: Preenchimento do tronco de cone e desmoronamento do agregado.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Com a preparação da amostra, foi feita a pesagem de 500 g do material (m_s) representada na Figura 9 e depois foi colocada no frasco Erlenmeyer para registrar a massa do conjunto (m_1). A etapa seguinte consiste em encher o frasco com água até próximo da marca de 500 ml movendo-o para eliminar as bolhas de ar e depois colocá-lo em um banho mantido a temperatura constante de $(21 \pm 2)^\circ \text{C}$.

Figura 9: Pesagem de 500g da amostra e peso do frasco.



Fonte: Acervo do autor, (2020).

Após aproximadamente uma hora, completou-se com água até a marca de 500 ml para determinar a massa total com precisão de 0,10 g (m_2) como mostra a Figura 10.

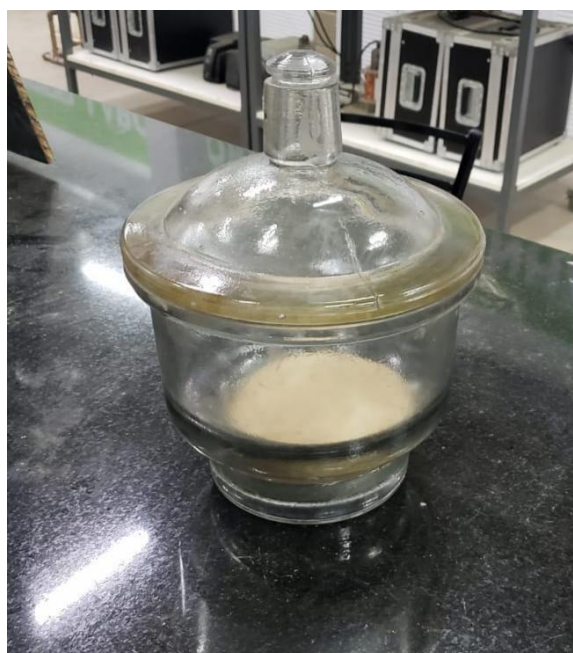
Figura 10: Peso do conjunto agregado + água.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

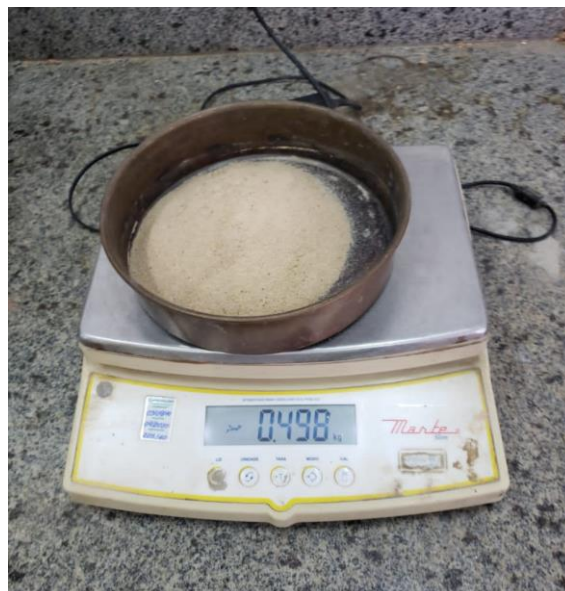
O material foi retirado do frasco e colocado para secar na estufa a uma temperatura de 105°C até se obter massa constante ($\pm 0,10\text{ g}$). Em seguida foi posto para esfriar à temperatura ambiente em um dessecador como mostra a Figura 11 para depois ser pesado (Figura 12) determinando assim a massa (m).

Figura 11: Amostra esfriando no dessecador.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Figura 12: Pesagem da amostra seca.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Para determinar a massa específica (d_3) do agregado miúdo, é preciso aplicar a fórmula (2.1) segundo a NBR NM 52:2009:

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (2.1)$$

Onde:

m = massa da amostra seca, em gramas;

d_3 = massa específica do agregado, em gramas por centímetros quadrados;

V = volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a = volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos;

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

ρ_a = massa específica da água, em gramas por centímetros cúbicos.

Para calcular o volume de água adicionado ao frasco (V_a) aplica-se a fórmula (2.2):

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (2.2)$$

Onde:

m_1 = massa do conjunto (agregado + frasco), em gramas;

m_2 = massa total (agregado + frasco + água), em gramas;

ρ_a = massa específica da água, em gramas por centímetros cúbicos.

7.1.3 Determinação da massa específica do agregado graúdo

Para definir os valores de massa específica e massa específica aparente da brita 0 utilizada no traço do concreto de alto desempenho foram obedecidos os requisitos da NBR NM 53:2009. Para os procedimentos em laboratório foram necessários os seguintes materiais:

- Balança com capacidade mínima de 10 kg e resolução de 1g;
- Recipiente de arame com capacidade para 4 dm³ a 7 dm³;
- Tanque de água;
- Peneira de ensaio com abertura de 4,75 mm.

Inicialmente se faz a coleta da amostra seguindo os procedimentos descritos na NM 26 e reduzi-la de acordo com a NM 27, em seguida elimina-se todo o material passante na peneira de 4,75 mm.

Após isso, foi preciso lavar completamente o agregado para remover o pó ou outro material da superfície para então secar a amostra em estufa a uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ \text{C}$ até se obter massa constante. Deixa-se esfriar à temperatura ambiente por até 3 horas aproximadamente por se tratar de agregados com dimensão máxima característica de 37,5 mm.

O passo seguinte foi definir a quantidade da amostra de acordo com a Tabela 6 que consta na norma NM 53 e que define a massa mínima da amostra de acordo com a dimensão máxima do agregado.

Tabela 6: Massas mínimas de amostra de ensaio.

Dimensão máxima característica	Massa mínima da amostra de ensaio
mm	kg
12,5	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125

Fonte: NBR NM 53, (2009).

De acordo com a tabela e sabendo que a brita 0 possui dimensão máxima de 9,5 mm, admite-se a utilização da quantidade mínima que seria de 2,0 kg, no entanto optou-se por se utilizar 4,20 kg como mostra a Figura 13, com o intuito de se obter maior precisão no ensaio.

Figura 13: Preparação e pesagem da amostra.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Feita a preparação da amostra, seguiu-se para o procedimento de submersão do material na água (Figura 14) à temperatura ambiente por um período de 24 horas.

Figura 14: Submersão da amostra na água.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Após esse tempo, a amostra foi retirada da água e envolvida em um pano absorvente até que toda a água visível fosse eliminada, conforme mostra a Figura 15. Os fragmentos maiores foram limpos individualmente atentando-se para que a água presente nos poros do agregado não fosse evaporada durante o procedimento.

Figura 15: Secagem do material.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Nesse processo constata-se que o agregado se encontra na condição saturada superfície seca, dessa forma a amostra é pesada para o registro da massa (m_s) conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16: Amostra saturada superfície seca.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Logo em seguida, a amostra foi colocada num recipiente vazado para submergi-la em água para a pesagem hidrostática, afim de se obter a massa da água (m_a) como mostra a Figura 17.

Figura 17: Pesagem hidrostática da amostra.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Após esse procedimento, a amostra foi levada para a estufa para secagem a uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ \text{C}$ até massa constante e colocada para esfriar a temperatura ambiente por aproximadamente 3 horas até que o agregado estivesse em uma temperatura que permitisse sua manipulação. Em seguida a amostra foi novamente pesada para determinar o peso do agregado seco (m) (Figura 18).

Figura 18: Peso seco do agregado gráúdo.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Com os valores de massa registrados, utilizou-se a fórmula 2.3 presente na norma NBR NM 53:2009 para determinação da massa específica do agregado graúdo.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (2.3)$$

Onde:

d = massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m = massa ao ar da amostra seca, em gramas;

m_a = massa em água da amostra, em gramas.

7.1.4 Determinação da massa unitária compactada do agregado graúdo

Para os procedimentos desse ensaio segue-se os requisitos estabelecidos na NBR NM 45:2006 que descrevem os métodos utilizados para a determinação da massa unitária e do volume de vazios dos agregados no estado compactado e solto. De acordo com a norma, foram necessários os seguintes materiais para a realização do ensaio:

- Balança com resolução de 50 g;
- Haste de adensamento de aço, com 16 mm de diâmetro e 60 cm de comprimento, tendo um de seus extremos com forma semi-esférica, de diâmetro igual ao da haste;
- Recipiente cilíndrico de material resistente a umidade, rígido e provido de alças.
- Pá ou concha;
- Estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Para a realização deste ensaio, a amostragem de material coletada constitui de aproximadamente 150% da quantidade de material requerido para encher o recipiente conforme ilustra a Figura 19 e foi manipulada de maneira a evitar sua segregação.

Figura 19: Total de amostra de agregados a serem utilizados.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Após a preparação, a amostra do material foi secada em estufa a temperatura de 105°C até obtenção de massa constante. Após a devida calibração do recipiente, foi escolhido o “método A” descrito na norma para a determinação da massa unitária compactada com agregados de dimensão máxima característica menor que 37,5 mm. Para isso, primeiro buscou-se registrar o peso do recipiente vazio (Figura 20).

Figura 20: Massa do recipiente vazio.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Em seguida, foi preciso encher o recipiente com o material em três camadas efetuando o adensamento a cada um terço. Na primeira camada foi despejado o material no recipiente fazendo o nivelamento da superfície com os dedos, após isso foi feito o adensamento mediante 25 golpes com a haste de adensamento, distribuindo uniformemente por toda a superfície, como mostra a Figura 21.

Figura 21: Adensamento da primeira camada.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Logo depois foi despejado mais uma quantidade de material até atingir os dois terços do volume do recipiente e repetiu-se os procedimentos realizados com a primeira camada, atentando-se desta vez para que a haste alcançasse somente o material que compõe a segunda camada. Finalmente terminou-se de encher o recipiente com os agregados e procedeu-se com o adensamento (Figura 22) conforme os procedimentos das camadas anteriores.

Figura 22: Adensamento do recipiente cheio.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Finalmente foi realizado o arrasamento da camada superficial do material de modo a nivelar com a borda superior do recipiente para que se pudesse registrar a massa do conjunto recipiente + agregado graúdo compactado, como ilustra a Figura 23.

Figura 23: Arrasamento da camada superficial e massa do agregado.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

De acordo com a NBR NM45:2006, o cálculo da massa unitária do agregado graúdo segue a fórmula 2.4 definida a seguir:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (2.4)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado graúdo, em quilogramas por metro cúbico;

m_{ar} = massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r = massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V = volume do recipiente, em metros cúbicos.

7.2 Concreto

7.2.1 Cimento Portland

De acordo com as necessidades de se atingir determinadas condições específicas do concreto de alto desempenho (CAD) em função das adições e das condições de exposição, o aglomerante escolhido foi o Cimento Portland composto com Fíller (CP II-F). De acordo com Moraes (2010), o Fíller é um material pulverulento, de dimensão menor do que o do cimento, o que auxilia na composição granulométrica, influenciando na diminuição da porosidade e no ganho de resistência à compressão do concreto.

A escolha do tipo do cimento baseou-se no fato de que Veiga, Bittencourt e Andrade (1998) descrevem que o Fíller não possui bom desempenho químico, servindo apenas para ocupar os poros da mistura. Isso implica diretamente na qualidade das avaliações feitas pelo avanço da frente de carbonatação pela simulação com a câmara, uma vez que a mistura já possui outros componentes que contribuem para uma microestrutura densa do concreto. Ademais, buscou-se aliar a disponibilidade dos tipos de cimento no mercado da região com os atributos desejados. Os tipos encontrados na região de São Luís possuem, em sua maioria, uma certa quantidade de material pozolânico em suas composições, o que não é interessante para este estudo, visto que na dosagem final já é previsto um teor sílica ativa fixado e este incremento poderia alterar as propriedades físicas esperadas.

Definiu-se a massa específica do cimento Portland pela Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ – Revisão nº00 06/01/2020 da Votorantim Cimentos, sendo 3,0 g/cm³.

7.2.2 Agregados

Para a mistura de concreto foram utilizados agregados do mesmo lote adquiridos comercialmente na região de São Luís – MA.

7.2.2.1 Agregado Miúdo

As principais propriedades a serem consideradas quando se avalia o agregado miúdo são as dimensões dos grãos, de modo que para a mistura do CAD seja ideal a mais grossa possível dentro da distribuição granulométrica ideal, sendo adquirida comercialmente a areia natural média.

A partir do ensaio de granulometria se extraem esses dois dados importantes para garantir a produção do concreto de alto desempenho com qualidade. Nele é feita a separação do material em frações por meio de uma série de peneiras com aberturas de malha definidas e dispostas de modo a se determinar o percentual de material retido e passante em cada uma.

A composição granulométrica, a dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado foram determinados através deste ensaio em conformidade com as prescrições da NBR NM 248:2003. A Tabela 7 apresenta as massas retidas, as porcentagens retidas e acumuladas em cada peneira. Dessa forma, foram definidos a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF) do agregado.

Tabela 7: Análise granulométrica do agregado miúdo.

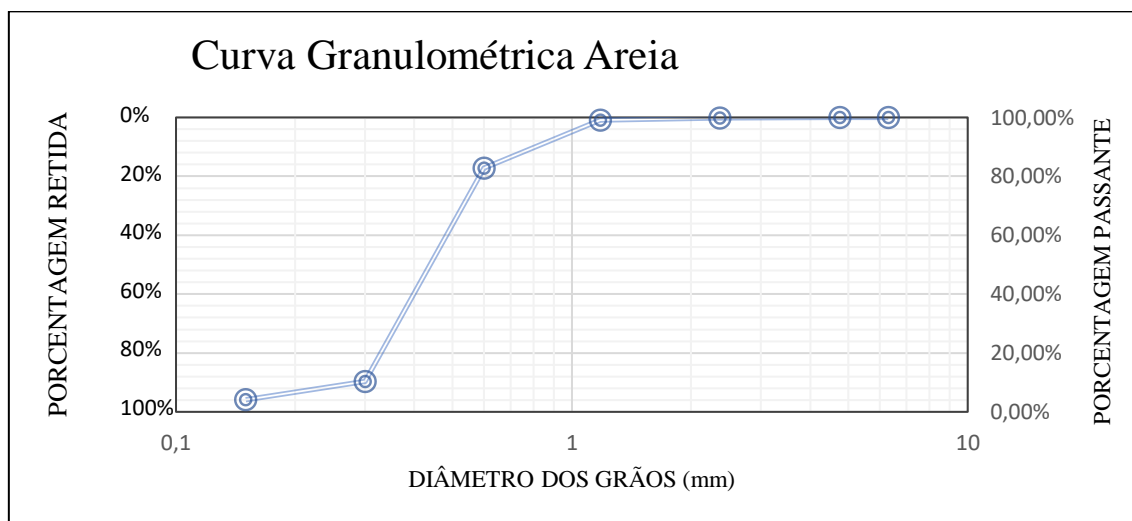
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa Retida Acumulada (g)	% Retida	% Acumulada
6,3	0	0	0,00%	0,00%
4,75	1,00	1,00	0,04%	0,04%
2,36	5,00	6,00	0,18%	0,21%
1,18	18,00	24,00	0,64%	0,85%
0,6	461,00	485,00	16,35%	17,20%
0,3	2.041,00	2.526,00	72,38%	89,57%
0,15	178,00	2.704,00	6,31%	95,89%
Fundo	116,00	2820,00	4,11%	100,00%
Total	2820,00		100,00%	
DMC (mm)			1,18	
MF			2,04	

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

Conforme a classificação granulométrica, um agregado é considerado bem graduado se sua distribuição granulométrica compreende uma variedade de diâmetros diferentes misturados, isso contribui para o rolamento entre as partículas resultando num menor consumo de água.

Para facilitar a compreensão da Tabela 7 e analisar a composição granulométrica do agregado miúdo, os dados obtidos em ensaio foram representados no Gráfico 1.

Gráfico 1: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

O Gráfico 1 apresenta, de forma clara, a graduação dos grãos da areia, e a partir disso foi possível constatar que esta não é a composição ideal para a produção de um concreto de alto desempenho, no entanto é razoável admitir a aceitabilidade da utilização do mesmo, visto que o material é adquirido de acordo com a disponibilidade da região e que esta é uma variável a ser fixada, sem que comprometa a análise dos dados em função do objetivo central do trabalho.

Determinou-se a massa específica do agregado miúdo conforme os procedimentos descritos na caracterização dos agregados de acordo com a NBR NM 52:2009, obtendo o valor de 2,72 g/cm³.

7.2.2.2 Agregado Graúdo

As principais características a serem avaliadas no agregado graúdo são seu tamanho, forma, rugosidade superficial a necessidade de se ter um formato mais próximo

possível da forma cúbica. Dessa forma, evita-se misturas desarmônicas e ajuda na redução do atrito e da área superficial. Sendo assim, foi escolhida a brita nº 0, adquirida comercialmente na região.

Por meio do ensaio de granulometria, foi registrada a composição granulométrica do lote adquirido, de modo a definir sua dimensão máxima característica (DMC), módulo de finura (MF) e traçar uma curva de distribuição para análise. Assim como o procedimento feito com o agregado miúdo, foi feita a separação do material em frações com uma série de peneiras, porém com aberturas das malhas diferentes.

A distribuição granulométrica, a dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado graúdo foram definidos com base nas fórmulas e prescrições da NBR NM 248:2003. A Tabela 8 representa os dados obtidos do ensaio das massas e porcentagens retidas e acumuladas de cada peneira. Assim foi possível definir a DMC e o MF do material.

Tabela 8: Análise granulométrica do agregado graúdo.

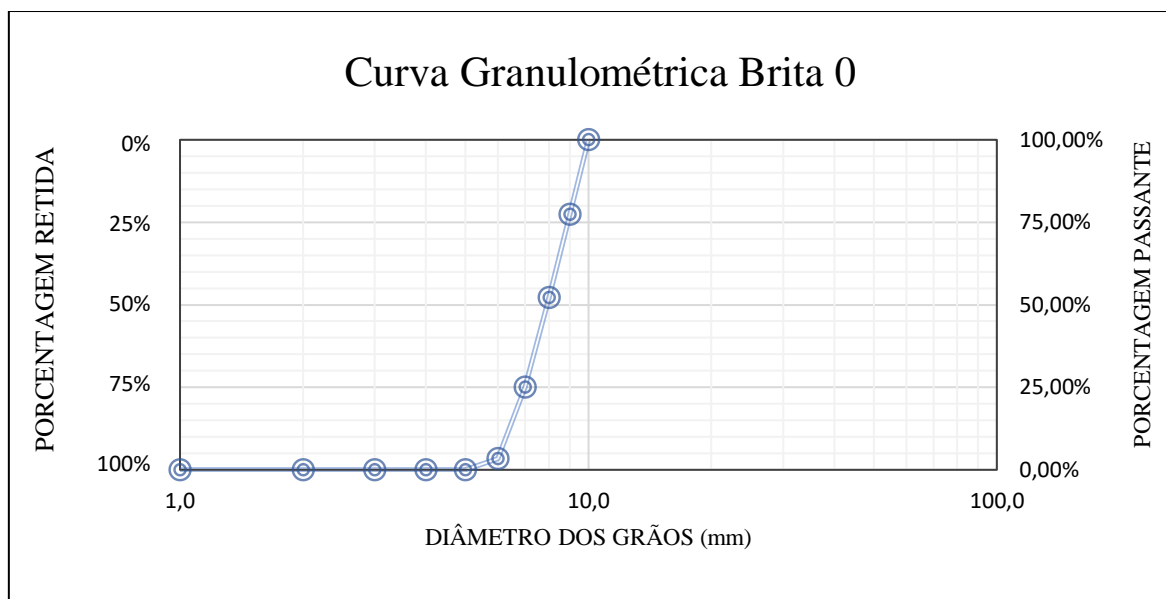
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	Massa Retida Acumulada (g)	% Retida	% Acumulada
63	0,00	0,00	0,00%	0,00%
31,5	0,00	0,00	0,00%	0,00%
25	0,00	0,00	0,00%	0,00%
19	0,00	0,00	0,00%	0,00%
16	0,00	0,00	0,00%	0,00%
12,5	101,00	101,00	3,37%	3,37%
9,5	652,00	753,00	21,73%	25,10%
6,3	813,00	1566,00	27,10%	52,20%
4,75	754,00	2320,00	25,13%	77,33%
Fundo	680,00	3000,00	22,67%	100,00%
Total	3000,00		100,00%	
DMC (mm)			12,5	
MF			1,58	

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

De modo similar ao agregado miúdo, na composição granulométrica da brita, o ideal é que haja uma certa harmonia na graduação dos grãos, de forma que se compreenda uma variedade de diâmetros misturados. Tendo isso em vista, o Gráfico 2

apresenta de maneira mais palpável os dados obtidos do ensaio demonstrando a distribuição granulométrica do lote de brita adquirido.

Gráfico 2: Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

O Gráfico 2 apresenta que a partir da peneira 12,5 mm foi possível observar uma crescente e nas peneiras 63,0, 31,5, 19,0 e 16,0 mm não ficou retido nenhuma fração do material. Após essa marca é possível observar que a maior parte do material ensaiado ficou retido nas peneiras finais, sendo considerado um agregado dentro do limite de utilização de acordo com os requisitos impostos pela NBR 7211:2009 para as dimensões do agregado graúdo.

Determinou-se a massa específica do agregado graúdo conforme os procedimentos descritos na caracterização dos agregados de acordo com a NBR NM 53:2009, obtendo o valor de $2,81 \text{ g/cm}^3$.

7.2.3 Adição mineral

Como já fundamentado neste trabalho, utiliza-se a substituição de uma fração da quantidade total de aglomerante por adição mineral com o objetivo de aprimorar as propriedades do concreto por meio da ação física e química que ela promove. Em conformidade com as determinações do método de dosagem, utilizou-se a sílica ativa como adição mineral adquirida por meio de doação de uma concreteira da cidade de São

Luís. Determinou-se a massa específica da sílica ativa por meio das recomendações da NBR 16605:2017, obtendo-se o valor de 2,22 g/cm³.

Em relação à quantidade utilizada, é importante pontuar que pesquisas feitas sobre a eficiência deste componente ressaltam um limite para a sua aplicação: em estudo realizado por Kadri *et al* (2009), foi constatado que ao substituir uma quantidade acima de 10% de sílica ativa no aglomerante, não foram obtidos resultados de ganho na resistência a compressão. E ainda, misturas com 20% e 30% de substituição no aglomerante tiveram menor desempenho em comparação com misturas contendo 10% de sílica ativa incorporada.

Dessa forma, definiu-se a taxa de sílica ativa em relação ao total de aglomerante em 4%, sendo fixada para todas as exposições dos corpos de prova a gás carbônico (CO₂) para se obter uma análise coerente.

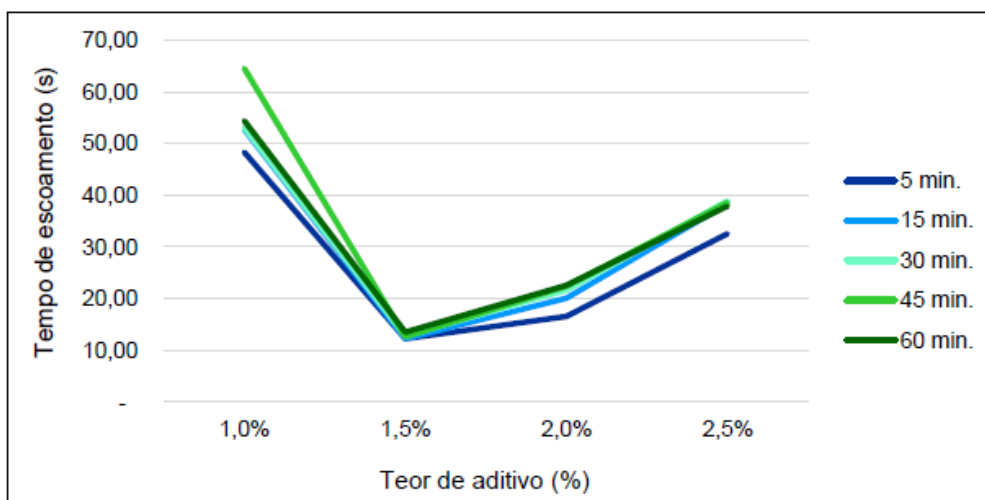
7.2.4 Aditivo químico

Para as misturas de concreto de alto desempenho produzidas no experimento, foi utilizado um superplastificante como aditivo químico. O produto selecionado foi o Glenium 51, que é um superplastificante líquido de terceira geração com base química de éter policarboxílico modificado.

A determinação do limite de utilização do aditivo foi feita com base nos estudos realizados por Kehl (2017), que utilizou o mesmo aditivo e definiu seu ponto de saturação a partir do ensaio indicado na NBR 7681-2:2013. O ponto de saturação do aditivo representa a quantidade limite de utilização do mesmo na mistura de concreto, na qual se for ultrapassada, não haverá melhoria na trabalhabilidade ou na redução de água, perdendo sua eficiência.

Nos ensaios feitos por Kehl (2017) foram produzidas cinco misturas, nas quais as quantidades de cimento e água foram fixadas, variando apenas a proporção do aditivo. As misturas foram ensaiadas aos 5, 15, 30, 45 e 60 minutos, com teores de aditivo variando em 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% da massa de cimento. O Gráfico 3 mostra como ocorreu o andamento deste ensaio e onde se definiu o limite de utilização do aditivo.

Gráfico 3: Ponto de saturação do aditivo.



Fonte: Kehl, (2017).

A partir do Gráfico 3 foi possível definir o ponto de saturação do superplastificante em 1,5%, que é definido a partir da mudança de direção da tendência dos traçados relativos às misturas. Observou-se que para as dosagens que ultrapassam esse valor limite, o aditivo não mais desempenha o mesmo efeito e o tempo de escoamento tende a aumentar, fazendo com que as dosagens a partir desse limite não tenham mais vantagens técnicas e econômicas.

A determinação da massa específica e do teor de sólidos do aditivo superplastificante, foram feitas com base nos dados fornecidos pelo fabricante e são considerados dentro do limite. Para a realização deste trabalho foram consideradas as médias aritméticas dos intervalos de cada parâmetro. Os dados de especificação contidos na ficha técnica do fabricante estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9: Massa específica e teor de sólidos do aditivo.

	Massa específica (g/cm ³)	Teor de sólidos (%)
Fabricante	1,067 - 1,107	28,5 - 31,5
Considerado	1,087	30

Fonte: Adaptado de Kehl, (2017).

7.2.5 Elaboração do traço do concreto

Inicialmente, para se elaborar o traço do concreto de alto desempenho (CAD) foi selecionado um método de dosagem específico: o Método Mehta-Aïtcin (1990b). A

primeira etapa é a definição do nível de resistência desejada e o consumo de água que é obtido através de uma tabela que relaciona esses parâmetros (KEHL, 2017).

Neste método, considera-se que o percentual de pasta compõe 35% do volume total, que é de 1m^3 de concreto e o restante é composto por material granular. Além disso, o método ainda considera nos cálculos 2,0% de ar incorporado na mistura. Sendo assim, tem-se a distribuição volumétrica dos componentes da pasta representada pela Tabela 10.

Tabela 10: Distribuição do volume da pasta.

Resistência	Água (m^3)	Ar (m^3)	Volume total de Material aglomerante (m^3)
Nível A	0,180	0,2	0,150
Nível B	0,144	0,2	0,175
Nível C	0,140	0,2	0,190

Fonte: Adaptado de Kehl, (2017).

Para o trabalho em questão foi selecionado o Nível A de resistência, de modo a considerar as proporções admitidas pelo método para a composição da pasta de acordo com a Tabela 10.

Com as frações dos componentes da pasta definidos, parte-se para a definição do esqueleto granular, que compreende 65% da mistura. Sendo assim, o método estabelece que para o nível de resistência selecionado as proporções dos agregados miúdo e graúdo que compõe essa porção do volume do concreto são definidas de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11: Relação agregado miúdo : graúdo.

Resistência	Relação volumétrica dos agregados miúdos : graúdos
Nível A	2,00 : 3,00
Nível B	1,95 : 3,05
Nível C	1,90 : 3,10

Fonte: Adaptado de Kehl, (2017).

Definidas as proporções dos componentes de cada fração estabelecida pelo método, parte-se para o cálculo do volume do concreto. Antes disso, é necessário assinalar

que na mistura será utilizado como adição mineral a sílica ativa, que fará parte da composição volumétrica do aglomerante.

Sendo assim, fixou-se a taxa da sílica em 4% do volume total do aglomerante. Para o estudo em questão, foi fixada a relação água/aglomerante assim como todas as outras variáveis da produção do concreto, de modo que fosse possível realizar uma análise da variação das taxas de CO₂. Dessa forma, as proporções determinadas para a execução de 1m³ de concreto estão dispostas na Tabela 12.

Tabela 12: Planilha de dosagem para 1m³ de concreto - Mehta-Aïtcin.

Resistência	Material aglomerante (kg)		Água (kg)	Agregados (kg)		Total (kg)	Relação água/agl
	Cimento Portland	Sílica Ativa		Graúdo	Miúdo		
Nível A	446,4	18,6	175	1686	1064	3390	0,376

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

Foi possível obter o desenvolvimento do traço unitário (1: a: p: a/agl), para essa taxa de adição fixada, para a quantidade que se deseja dosar, sendo material aglomerante: agregado miúdo: agregado graúdo: relação água/aglomerante, conforma mostra a Tabela 13.

Tabela 13: Traço unitário (1: a: p: a/agl) - Método Mehta-Aïtcin.

Resistência	Traço Unitário
Nível A	1: 2,34: 3,63: 0,376

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

Com a definição da quantidade de corpos de prova necessários para os procedimentos experimentais, foram definidos os valores mínimos de massa para o desenvolvimento do traço, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14: Valores de massa para confecção dos corpos de prova cilíndricos.

Material Necessário para CPs Cilíndricos							
Resistência	a/agl	Nº CPs	Cimento (kg)	Sílica (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
Nível A	0,376	6	4,21	0,175	6,665	10,33	1,65

Fonte: Acervo do Autor, (2020).

As quantidades de corpos de prova foram definidas de modo que fossem destinados dois para a exposição da primeira concentração de CO₂ (400 ppm), dois para a segunda exposição (700 ppm) e mais dois para ensaio de resistência à compressão e ensaio de absorção de água, este último regulado pela NBR 9778:2009.

7.2.6 Ensaio de absorção de água e índice de vazios

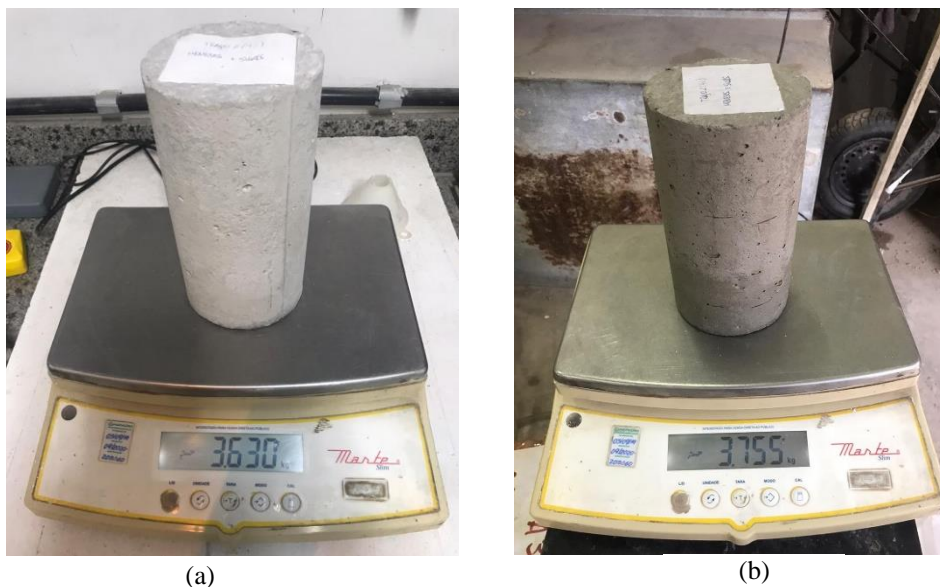
De acordo com a NBR 9778:2009, a absorção de água é o processo no qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis do concreto, e para efeitos de cálculo, a norma considera que o incremento de massa no corpo de prova é devido à penetração da água nos seus poros permeáveis, em relação à sua massa no estado seco. Já o índice de vazios é tido como a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Para a realização dos procedimentos deste ensaio, foram necessários os seguintes materiais:

- Balança hidrostática com resolução de pelo menos 0,05% da massa a ser determinada;
- Recipiente adequado para imersão das amostras em água;
- Estufa capaz de manter a temperatura em $(105 \pm 5)^\circ \text{C}$.

Inicialmente, realizou-se a secagem da amostra na estufa mantendo à temperatura de 105° C por um período de 72 horas para determinar sua massa na condição seca (m_s). Em seguida, imergiu-se a amostra num recipiente com água, mantendo-a durante 72 horas nessa condição, para determinar a massa na condição saturada (m_{sat}). Após esse processo, determinou-se a massa da amostra saturada imersa em água (m_i) com o auxílio da balança hidrostática. Para a massa saturada, foi necessário enxugar a amostra com um pano úmido para definir sua condição saturada com superfície seca.

Realizou-se a determinação das massas nas condições seca (Figura 24a e saturada superfície seca (Figura 24b).

Figura 24: (a) Massa da amostra na condição seca; (b) massa da amostra na condição saturada.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Registrou-se os valores das massas e em seguida, foi feita a pesagem hidrostática da amostra, para registrar a massa da amostra saturada imersa em água, conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25: Massa da amostra imersa em água.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

O cálculo da absorção de água foi feito seguindo a Equação 3.1, de acordo com a NBR 9778:2009.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (3.1)$$

Sendo:

m_{sat} = massa da amostra saturada em água;

m_s = massa da amostra na condição seca.

Para a determinação do índice de vazios foi aplicada a Equação 3.2 também definida na norma.

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (2.2)$$

Onde:

m_i = massa da amostra saturada imersa em água.

7.3 Câmara de carbonatação acelerada

Para a exposição dos corpos de prova cilíndricos a diferentes concentrações de CO₂ e para fazer a verificação do avanço de frente de carbonatação, foi construída uma Câmara de Carbonatação Acelerada, baseada em trabalhos feitos por Lucena (2016) e Salomão e Silva (2008). Além disso, foram utilizadas normas internacionais como RILEM TC (1999) e a RILEM CPC-18 (1988) que contém as preconizações a respeito dos procedimentos realizados no preparo de corpos de prova e os critérios necessários para uma câmara de carbonatação acelerada.

A câmara foi feita a partir de um recipiente fechado e termicamente isolado do ambiente externo. Optou-se como recipiente uma caixa de isopor de 120 litros (Figura 26) por levar em consideração a versatilidade de praticidade no manuseio e por já ser considerada uma caixa com características de estanqueidade e isolamento térmico.

Figura 26: Caixa de isopor com volume de 120 litros.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

A caixa de isopor escolhida foi submetida a testes de estanqueidade para validação da sua utilização, de modo a garantir que durante os procedimentos não houvesse perdas de grandes quantidades de CO₂ para o ambiente externo.

Buscando assegurar a vedação do recipiente foi utilizado uma fita autoadesiva, conforme mostra a Figura 27, na qual foi adquirida comercialmente.

Figura 27: Fita autoadesiva para vedação.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Essa fita foi selecionada por possuir propriedades de impermeabilização e vedação, de acordo com o que atesta o fabricante. Sendo assim, a fita autoadesiva foi

instalada em todo o interior da caixa, atentando-se sempre em não deixar brechas entre um pedaço e outro (Figura 28).

Figura 28: Interior do recipiente impermeabilizado.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

De modo a garantir a uniformidade da concentração de CO_2 no interior do recipiente, foram instalados dois ventiladores tipo cooler, como ilustra a Figura 29, posicionados estrategicamente a uma altura de 20 cm do fundo da caixa em sentidos opostos para a circulação do gás.

Figura 29: Ventiladores tipo cooler posicionados no recipiente.

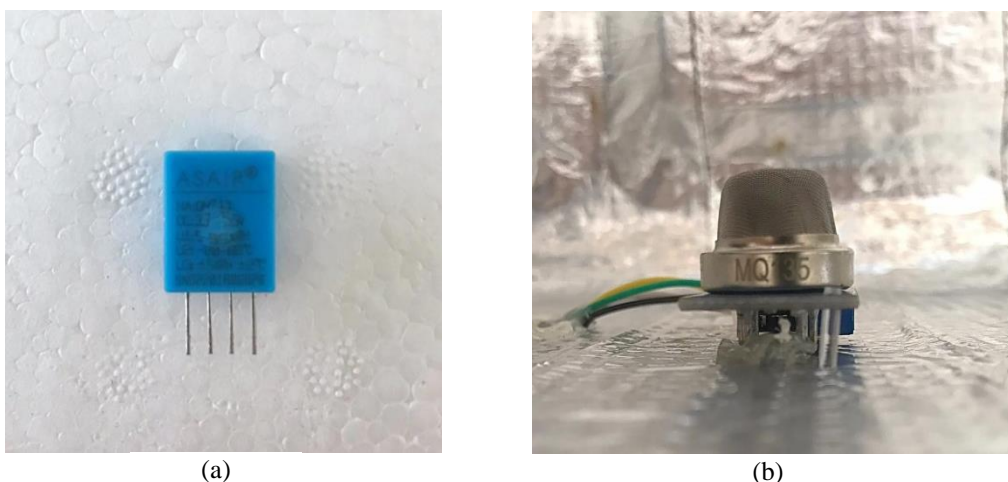


Fonte: Acervo do Autor, (2020).

A altura dos coolers foi pensada para não interferir na captação dos sensores, que estão posicionados a uma cota de 15 cm do fundo da caixa, e de modo a garantir a circulação do gás no interior da câmara.

O sensor selecionado para a medição da temperatura e da umidade interna foi o DHT11 (Figura 30a), já o sensor responsável pela medição da concentração de CO₂ dentro do ambiente controlado da câmara foi o MQ-135 (Figura 30b).

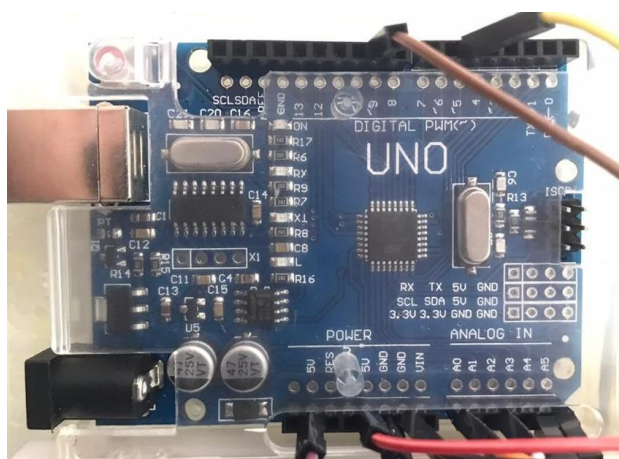
Figura 30: (a) Sensor DHT11; (b) Sensor MQ-135.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Para controlar as condições necessárias da câmara de carbonatação acelerada, foi utilizado para este trabalho um microcontrolador Arduino UNO (Figura 31), carregado com um algoritmo para fazer o controle e as medições das condições internas da caixa.

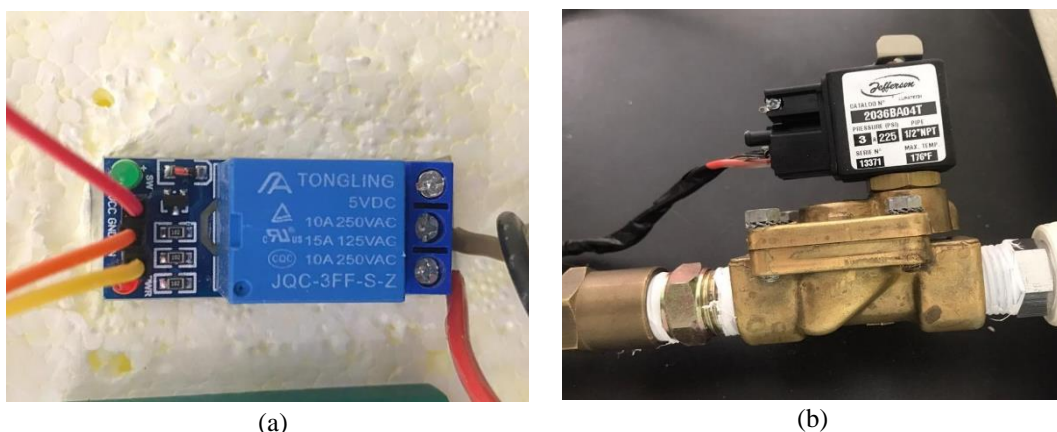
Figura 31: Arduino UNO.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

O Arduino UNO é responsável pelo controle da leitura dos sensores DHT11 e MQ-135 e pelo acionamento do Relé de 5V (Figura 32a). O Relé por sua vez envia um sinal para a Válvula Solenóide (Figura 32b) que libera ou corta a entrada de CO₂ para o interior da câmara, fazendo dessa forma o controle da concentração dentro da faixa estabelecida pela programação.

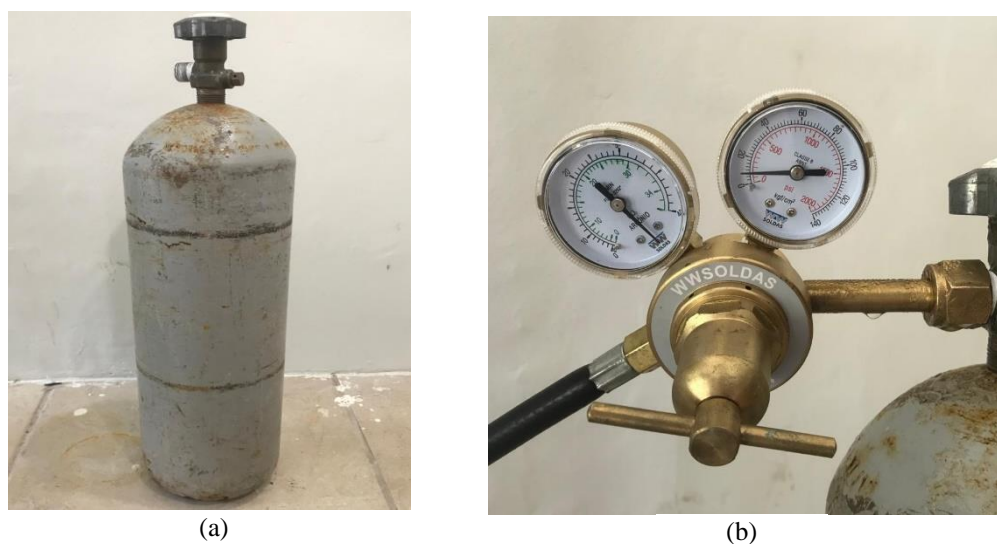
Figura 32: (a) Relé de 5V; (b) Válvula Solenóide.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

O CO_2 utilizado na simulação da câmara de carbonatação acelerada fica armazenado num cilindro de 16 kg, como ilustra a Figura 33a. A partir do acionamento da Válvula Solenóide, o gás que está armazenado no cilindro é liberado para dentro da câmara, tendo sua vazão e pressão controladas por um regulador de pressão (Figura 33b) na saída do cilindro.

Figura 33: (a) Cilindro de CO_2 ; (b) Regulador de pressão.



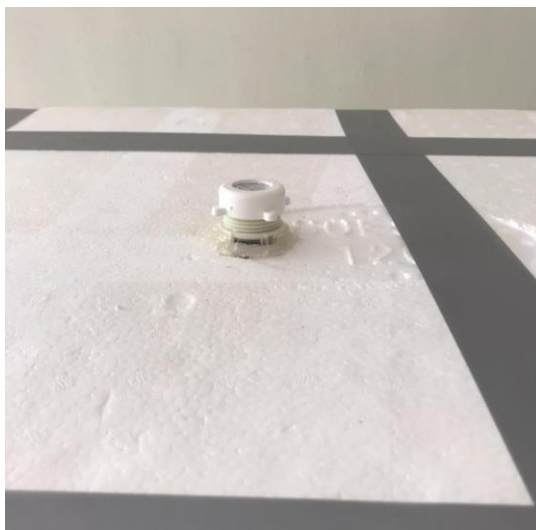
Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Para garantir uma concentração adequada do gás carbônico dentro do recipiente e de modo que o volume incrementado não aumente muito a pressão interna, foi executado um furo na tampa da caixa de isopor para servir de suspiro.

Além de servir no equilíbrio da pressão interna com a pressão atmosférica, o suspiro foi idealizado nessa posição para facilitar a expulsão do oxigênio enquanto o CO_2 é injetado. Isso ocorre devido ao fato de que o CO_2 é um gás mais denso e naturalmente

vai se repousar na parte mais baixa do recipiente e conforme aumenta sua concentração, o oxigênio vai sendo liberado por cima. A Figura 34 mostra a posição do suspiro na caixa.

Figura 34: Sistema de suspiro na tampa da caixa.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Após a construção de toda a câmara, foram devidamente posicionados no seu interior os primeiros corpos de prova (Figura 35a). Em seguida, foi executada toda a vedação pela tampa com silicone e fita de alta resistência do tipo *Silver Tape* (Figura 35b).

Figura 35: (a) Corpos de prova posicionados no interior da câmara; (b) Vedação da caixa com silicone e fita adesiva.



(a)



(b)

Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Para realizar a medição dos valores de concentração de CO₂, de temperatura e umidade, foi utilizado um algoritmo instalado no microcontrolador Arduino UNO, de forma que se regule a liberação ou interrupção da alimentação do gás vindo do cilindro.

Desta forma, o algoritmo instalado no Arduino UNO interpreta os dados obtidos pelos sensores e converte em dados que são mostrados no display. Uma vez que se atinge o teor de CO₂ pré-estabelecido no código, o microcontrolador envia um sinal ao Relé, que por sua vez aciona a Válvula Solenóide, interrompendo a passagem do gás. No caso de a concentração cair para abaixo do nível requerido, essa válvula é acionada para liberar a entrada do CO₂.

Para condicionar as exposições dos corpos de prova em diferentes concentrações de gás carbônico, foram definidas duas faixas de acordo com o que determina Couto (2017) para as classes de agressividade (Tabela 15).

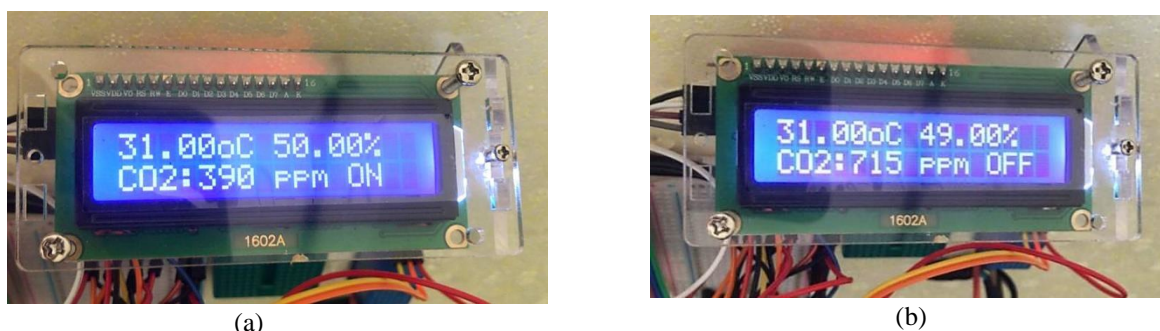
Tabela 15: Descrição probabilística adotada para cada classes de agressividade.

Classe de agressividade ambiental	Variável	Média	Coefficiente de Variação	Tipo de Distribuição
Classe de Agressividade I	Relação <i>a/c</i>	0,65	10%	Lognormal
	Cobrimento	25 mm	15%	Normal
	Resistência à compressão	23,95 MPa	10%	Normal
	Concentração de CO ₂	0,05%	15%	Normal
	Umidade Relativa	-	-	-
Classe de Agressividade II	Relação <i>a/c</i>	0,6	10%	Lognormal
	Cobrimento	30 mm	15%	Normal
	Resistência à compressão	29,94 MPa	10%	Normal
	Concentração de CO ₂	0,1%	15%	Normal
	Umidade Relativa	70%	5%	Normal
Classe de Agressividade III	Relação <i>a/c</i>	0,55	10%	Lognormal
	Cobrimento	40 mm	15%	Normal
	Resistência à compressão	35,93 MPa	10%	Normal
	Concentração de CO ₂	0,3%	15%	Normal
	Umidade Relativa	-	-	-
Classe de Agressividade IV	Relação <i>a/c</i>	0,45	10%	Lognormal
	Cobrimento	50 mm	15%	Normal
	Resistência à compressão	44,39 MPa	6%* 10%	Normal
	Concentração de CO ₂	1%	15%	Normal
	Umidade Relativa	-	-	-

Fonte: Couto, (2017).

Foram selecionadas as classes 1 e 2, definindo uma concentração mínima de 400 ppm (Figura 36a) e 700 ppm (Figura 36b), respectivamente, obedecendo os limites estabelecidos.

Figura 36: (a) Medição abaixo dos 400 ppm no display; (b) Medição acima dos 700 ppm no display.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Na marcação do display, observa-se que no interior da câmara os sensores marcam 31° C em ambas as situações e umidades muito próximas, sendo de 50% na Figura 36a e de 49% na Figura 36b, o que configura uma umidade ótima para a ocorrência do fenômeno da carbonatação. É possível observar também que o display marca a situação em que a Válvula Solenóide se encontra, sendo ON para a válvula aberta e OFF quando a válvula se encontra fechada.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1 Caracterização do concreto

Para a caracterização do concreto produzido, foram realizados ensaios no seu estado fresco e endurecido. Para o estado fresco foram seguidas as recomendações da NBR NM 67:1998, cujo método é aplicável a concretos plásticos e coesivos que apresentem um abatimento igual ou superior a 10 mm. Já para caracterizá-lo no seu estado endurecido, seguiu-se as recomendações da NBR 5738:2015, para a moldagem e cura dos corpos de prova.

Para ambos, foram seguidos os critérios de amostragem estabelecidos pela NBR NM 33:1998, que orienta a elaboração de uma amostra mínima de 30 litros para os ensaios de resistência a compressão, devendo ser iniciada até no máximo 15 minutos após a obtenção da amostra.

8.1.1 Concreto no estado fresco

Para definir as características do concreto no estado fresco foi realizado um ensaio de consistência por meio do abatimento de tronco de cone, também conhecido como *slump test*, regulado pela NBR NM 67:1998. Foi definido previamente um

abatimento de 120 ± 20 mm para a mistura, seguindo a faixa determinada por Alves (2000) para concretos de alto desempenho.

Para a mistura, dosou-se a quantidade de superplastificante conforme a necessidade de se obter o abatimento na faixa desejada, sem que fosse ultrapassado o ponto de saturação limite do aditivo. A Figura 37 mostra a medição do abatimento de tronco de cone realizada.

Figura 37: Medição do abatimento de tronco de cone.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Na Figura 37 observa-se que foi obtido um abatimento de 125 mm, sendo este o valor final registrado após os ajustes com o aditivo superplastificante. Portanto, nota-se que o abatimento configura que a consistência está na faixa definida para um concreto de alto desempenho.

8.1.2 Concreto no estado endurecido

Para a caracterização do concreto no seu estado endurecido, foi realizado a moldagem e cura dos corpos de prova (CP's) de acordo com as preconizações da NBR 5738:2015. Para o rompimento, a norma indica que as idades mais utilizadas são 24 horas, 3, 7, 28, 63 e 91 dias. Neste estudo, foi realizado o rompimento com 28 dias de idade.

Os corpos de prova moldados são em formato cilíndrico cuja dimensão básica (diâmetro) é de 100 mm e 200mm de altura. A partir das dimensões do corpo de prova e com base no que determina a NBR 5738:2015, selecionou-se o método de adensamento mecânico, sendo executado conforme mostra a Figura 38.

Figura 38: (a) Moldagem dos corpos de prova; (b) Adensamento mecânico em mesa vibradora.



(a)



(b)

Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Realizou-se a moldagem e a cura dos CP's no mesmo local, onde ficaram armazenados no início da cura durante 24 horas, para que fossem desmoldados e posteriormente alocados em um recipiente com água para realizar a cura úmida até que atingissem a idade de 28 dias para o prosseguimento dos ensaios subsequentes.

Após esses 28 dias, os CP's foram retirados do recipiente com água para serem preparados pelo processo de retificação por meio da utilização de borracha tipo Neoprene, de modo a garantir uma superfície plana para que haja a distribuição de carga uniforme no ensaio de resistência a compressão. Foi realizado o ensaio por meio de uma máquina de resistência a compressão conforme mostra a Figura 39.

Figura 39: Máquina de ensaio de resistência a compressão.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Na execução do ensaio de compressão axial dos corpos de prova, foram obedecidas as recomendações da norma NBR 5739:2007. Os resultados obtidos deste ensaio estão expressos na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados da resistência a compressão dos CP's.

Idade	Corpo de prova	Resistência a compressão (MPa)
28 dias	1	50,047
	2	49,015

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

Analisando os resultados de resistência do concreto, constata-se que, apesar de não se atingir a resistência de 60 MPa prevista pelo Método Mehta-Aïtcin, observou-se um bom desempenho do concreto, principalmente quando se avaliam as propriedades da mistura utilizando o cimento CP II-F 32 definidas na NBR 11578:1991. Nota-se que a resistência obtida ultrapassa o limite superior (49 MPa) definida na Tabela 5 da norma, que trata sobre a resistência a compressão do cimento Portland composto aos 28 dias de idade.

8.2 Absorção de água e índice de vazios

Para a verificação da porosidade do concreto no estado endurecido, foi realizado um ensaio para a determinação da absorção de água e do índice de vazios, conforme as recomendações da NBR 9778:2009. De acordo com Silva (1991), a porosidade é uma propriedade que um corpo sólido tem de não ser contínuo, havendo espaço entre as massas. Para que uma amostra seja considerada porosa, deve ter entre 15% e 35% do seu volume ocupado por vazios (ACI 522, 2010). Pode se observar na Tabela 17 os resultados obtidos com a realização do ensaio de absorção de água e índice de vazios.

Tabela 17: Resultados da caracterização da porosidade.

Nível de Resistência	Índice de Vazios (%)	Absorção de água (%)	Resistência característica (MPa)
Nível A	7,95	3,44	49,531

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

A partir desses dados é possível caracterizar a porosidade do concreto no seu estado endurecido a partir de parâmetros pré-estabelecidos. Na Tabela 18 são mostrados esses parâmetros que foram definidos por Helene (1993) para concretos de Alto Desempenho, Convencionais e Deficientes.

Tabela 18: Classificação dos concretos em função da porosidade e absorção de água.

Concreto	Porosidade	Absorção de água por imersão	Resistência característica
Durável - Alto Desempenho	$\leq 10\%$	$< 4,2\%$	$f_{ck} > 35 \text{ MPa}$
Convencional	Entre 10 e 15%	Entre 4,2 e 6,3%	$20 \leq f_{ck} \leq 35 \text{ MPa}$
Deficiente	$\geq 15\%$	$> 6,3\%$	$f_{ck} < 20 \text{ MPa}$

Fonte: Adaptado de Helene, (1993).

Observa-se que de acordo com os critérios definidos por Helene (1993), a amostra ensaiada encontra-se abaixo do limite máximo da absorção de água que define um concreto durável, da mesma forma se percebe em relação à porosidade, que é representada na Tabela 17 como sendo o índice de vazios, que é o percentual que define a relação entre o volume dos poros e o volume total da amostra. Dessa forma, é possível

classificar o concreto produzido como sendo de Alto Desempenho de acordo com a caracterização da sua porosidade definida pelos parâmetros calculados.

8.3 Aspersão de fenolftaleína

A fenolftaleína é um indicador de pH que quando entra em contato com uma região mais alcalina, apresenta uma coloração rosada, e quando em contato com uma região mais ácida, essa coloração tende a ficar mais fraca ou até mesmo incolor, no caso de uma superfície com pH muito baixo.

Para a medição da profundidade da carbonatação nos corpos de prova cilíndricos, foi necessário cortá-los com o auxílio de uma serra circular para que em seguida fosse realizado o ensaio com fenolftaleína. A Figura 40 mostra o corte em um plano transversal do corpo de prova.

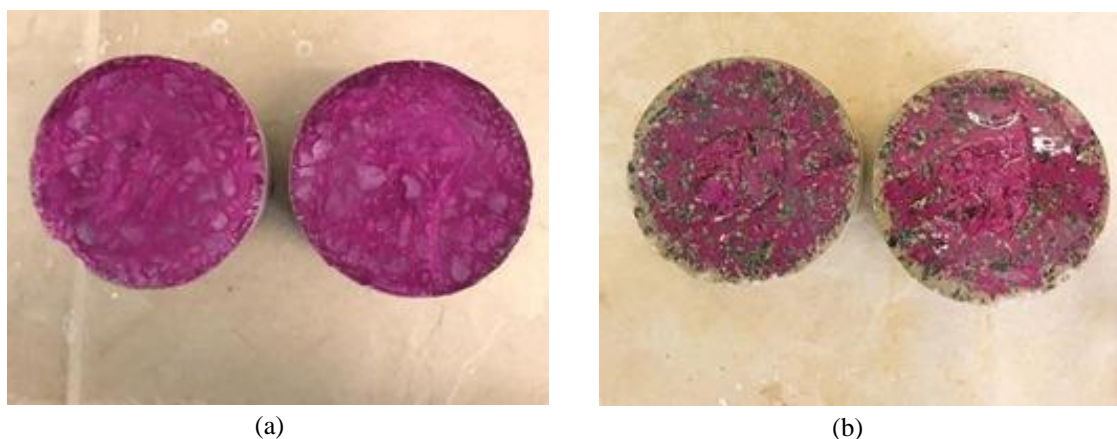
Figura 40: Corte transversal do corpo de prova.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Foram feitas as verificações da profundidade carbonatada por meio da aspersão de fenolftaleína. Observa-se na Figura 41 a variabilidade do efeito de diferentes concentrações de CO₂ nos corpos de prova ensaiados.

Figura 41: (a) Medição da profundidade carbonatada com exposição a 400 ppm de CO₂; (b) Medição da profundidade carbonatada com exposição a 700 ppm.



Fonte: Acervo do Autor, (2020).

Visualmente já é possível notar uma diferença nas profundidades carbonatadas em função da variação do teor de CO₂. O primeiro corpo de prova apresentou quase nenhuma profundidade de carbonatação por ter sido exposto apenas a 7 dias de exposição a um baixo teor de gás carbônico, enquanto que no segundo foi possível notar com mais clareza esse avanço da frente de carbonatação.

A partir das medições feitas in loco com um escalímetro e posteriormente confirmadas com o uso de ferramenta computacional, foram dispostos na Tabela 19, os dados coletados para análise dos aspectos de cada corpo de prova.

Tabela 19: Profundidade média de carbonatação medida na seção transversal dos corpos de prova.

CP	Idade	Tempo de exposição	Teor de CO ₂	Profundidade média carbonatada
1	28 dias	7 dias	400 ppm	< 1* mm
2	28 dias	7 dias	700 ppm	5 mm

* Não foi possível expressar um valor exato para essa profundidade pela precisão do método de medição.

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2020).

A partir da Tabela 19 verificou-se um avanço de aproximadamente 10% na profundidade carbonatada em apenas 7 dias de exposição.

Como já estabelecido previamente neste trabalho, sabe-se que a carbonatação do concreto depende de vários fatores que condicionam o avanço na profundidade carbonatada. Analisando os resultados deste ensaio, constata-se que o avanço da frente

de carbonatação foi determinado exclusivamente pela variação na concentração do dióxido de carbono no interior da câmara, visto que todas as outras variáveis foram fixadas justamente para avaliar essa tendência.

Aliado a esses resultados, é importante pontuar também que essa variação está intrinsecamente ligada à definição das classes de agressividade ambiental, conforme aborda a NBR 6118:2014. Os resultados obtidos são relacionados às classes I e II, logo se percebe que maiores concentrações de CO₂ e maiores tempos de exposição podem configurar um ambiente ainda mais agressivo, podendo ser definido em classe III ou IV, a depender das condições citadas. Portanto, evidencia-se o fato da importância do cobrimento para elementos em concreto armado, já que quanto mais agressivo é o ambiente, maior é a tendência de avanço da profundidade de carbonatação.

9 CONCLUSÃO

Muitas pesquisas na área da tecnologia do concreto buscam embasar de diversas formas as vantagens técnicas na utilização do Concreto de Alto Desempenho. Diversos pesquisadores abordam ensaios de caracterização para atestar essas vantagens em relação aos concretos convencionais. No entanto, poucos são os estudos que tratam de relacionar fenômenos patológicos conhecidos com esse tipo de mistura especial.

Este trabalho, além de relacionar o CAD com um fenômeno patológico (carbonatação), teve como objetivo principal simular os efeitos provocados por esse fenômeno por meio de uma simulação em ensaio controlado, de modo a evidenciar sua variabilidade de acordo com os teores de gás carbônico (CO₂). Para isso, foram analisadas as propriedades físicas do CAD em função da porosidade e da profundidade carbonatada.

Os resultados obtidos pelos ensaios e pela exposição na câmara foram correlacionados de forma que fosse possível estabelecer uma relação entre as diferentes condições em que foram submetidos os corpos de prova de concreto de alto desempenho em função das análises feitas.

Por meio da caracterização dos materiais foi possível determinar os critérios necessários para a aplicação do método de dosagem escolhido. O método de dosagem e o nível de resistência foram selecionados e assim pôde-se definir o traço inicial e a quantidade dos materiais necessários para a elaboração da mistura.

Verificou-se a conformidade do concreto por meio da sua caracterização nos seus estados fresco e endurecido, através de ensaios do abatimento de tronco de cone, resistência a compressão e de porosidade.

Através do ensaio de compressão axial, constatou-se que os valores de resistência esperados aos 28 dias não foram alcançados, entretanto ressalta-se que o Concreto de Alto Desempenho não está atrelado, exclusivamente, a resistência mecânica, como também pelas propriedades que o definem como durável. Neste aspecto foi possível obter um resultado bastante expressivo, uma vez que os valores que definem sua porosidade se encontram abaixo do limite máximo definido por Helene (1993). Estes resultados estão expressos na seção 8.2.

Foram escolhidas duas concentrações de CO₂ para que pudesse haver a comparação da profundidade de carbonatação nos corpos de prova, com todas as outras variáveis fixadas. As medições foram feitas manualmente e confirmadas posteriormente com auxílio de ferramenta computacional. Com isso, constatou-se um avanço maior da frente de carbonatação dos CP's que foram expostos a um teor de CO₂ mais elevado, em relação aos expostos a uma concentração mais baixa.

Os resultados obtidos em apenas 7 dias de exposição com variação apenas do teor de gás carbônico realçam ainda mais a relevância do estudo das propriedades físicas do concreto, haja vista que houve um avanço de aproximadamente 10% da profundidade carbonatada.

É evidente que se poderia obter valores de resistência maiores no concreto produzido, se feita uma seleção mais criteriosa dos materiais utilizados. Da mesma forma, se entende que os resultados de profundidade carbonatada do concreto podem ser melhor avaliados se os CP's forem expostos taxas de gás carbônico maiores e por mais tempo.

Entretanto, tendo em vista todos os pontos instituídos neste trabalho, é possível evidenciar a importância da utilização do CAD em ambientes mais agressivos, principalmente por possuírem como característica central a baixa porosidade e permeabilidade, contribuindo para conter o avanço da consolidação de fenômenos patológicos como a carbonatação. Além disso, é possível também se obter resultados quanto a análise da carbonatação através de simulações em ambientes controlados com auxílio de câmara de carbonatação acelerada.

REFERÊNCIAS

ACI – 522 – **Cartilha da Associação Brasileira de Cimento Portland. Specification for Previus Concrete Pavement.** American Concrete Institute, 2010.

AITCIN, Pierre-Claude. **Concreto de Alto Desempenho.** Trad. Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Composto:** NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Desempenho das edificações habitacionais:** NBR 15575. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – procedimento:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica:** NBR 9778. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente:** NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto - Especificação:** NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica:** NBR 16605. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água:** NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

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

BACCIN, A. G. C. **Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete.** Chapman and Hall, cap. 3, p. 22-55. London, 1998.

BAUER, L. A. **Materiais de Construção.** Vol. 1, 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: inspeções e técnicas eletroquímicas.** 237 p. Goiânia, Editora UFG, 1997.

COUTO, R. A. **Avaliação probabilística da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à carbonatação.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

DAL MOLIN, D. C. C., ANDRADE, J. J. O., MASUERO, A. B., POSSAN, E. **Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto.** Cap. 8. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

DO CARMO, J. B. M. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto.** Curitiba. LACTEC/DPTM, 2008.

FOCHS, R. G. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos autoadensáveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

KADRI, E.; Duval, R.; Aggoun, S.; Kenai, S. **Sílica fume effect on hydration heat and compressive strength of high-performance concrete.** *Ací materials Journal*, v. 106, n. 02, p. 107-113, abr. 2009.

KULAKOWISKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Porto Alegre, 2002.

KEHL, L. K. **Avaliação dos Custos de Concretos de Alta Resistência (CAR) Utilizando Diferentes Métodos de Dosagem.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. Lajeado, 2017.

LUCENA, C. M. **Avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada projetada e montada em laboratório.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** IBRACON, 3. Ed. 674p. São Paulo, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Trad. Salvador E. Giamusso. Ed. Pini, São Paulo, 1997.

O'REILLY, V. D. **Método de dosagem de concreto de Elevado desempenho.** São Paulo: Editora PINI, 1998.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2010.

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

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. TC 116-PCD: **Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas**

permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). *Materials and Structures*, v. 32, p. 174-179, Apr 1999.

SABET, F. A., LIBRE, A. N., SHEKARCHI, M. **Mechanical and durability properties of self-consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash.** *Construction and Building Materials*, v. 44, n. 1, p. 175–184, abr. 2013.

SALOMÃO, F. M. C.; SILVA, J. T. **Ensaio acelerado de carbonatação do concreto.** XII Seminário de Iniciação Científica – Universidade Federal de Uberlândia – Campus S. Mônica. Uberlândia, 2008.

SILVA, P. L. S. T. **Análise Estrutural e Econômica do Uso de Concreto de Alto Desempenho em Pilares de Edifícios.** 114 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida.** (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2007.

STEFFENS, A.; DINKLER, D.; AHRENS, H. **Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures.** *Cement and Concrete Research*, v. 32, p. 935 – 941, 2002.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland.** *Concreto: Ciência e Tecnologia - IBRACON*. São Paulo, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho.** *Concreto: Ciência e Tecnologia - IBRACON*. São Paulo, 2011.

VEDACIT. **Catálogo de revenda.** 2º edição. 84 f. Disponível em: <<https://www.vedacit.com.br/content/dam/vedacit/pdfs/catalogos/Cat%C3%A1logo-B2C.pdf>> coredownload.inline.pdf> acesso em novembro de 2020.

ANEXO



Resultado da análise

Page 1 of 55

Resultado da análise

Arquivo: TCC_2_GABRIEL MENESES (1).docx

Estatísticas

Suspeitas na Internet: 11,7%Percentual do texto com expressões localizadas na Internet  .**Suspeitas confirmadas: 6,93%**Percentual do texto onde foi possível verificar a existência de trechos iguais nos endereços encontrados  .**Texto analisado: 87,74%**

Percentual do texto efetivamente analisado (Imagens, frases curtas, caracteres especiais, texto quebrado não são analisados).

Sucesso da análise: 100%

Percentual das pesquisas com sucesso, indica a qualidade da análise, quanto maior, melhor.

Endereços mais relevantes encontrados:

Endereço (URL)	Ocorrências	Semelhança
https://alumnius.net/pontifcia_universida-584-year-2007-2013	135	1,05 %
https://www.univates.br/bitstream/10737/1926/6/2017LauraKehl.pdf.txt	34	19,12 %
https://www.researchgate.net/publication/304628423_Concreto_de_Alto_e_Ulta-Alto_Desempenho	16	15,02 %
https://pt.scribd.com/document/385268516/TCC-pdf	12	12,22 %
https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2440/000319558.pdf?sequence=1	10	12,56 %
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212011000200015	10	12,95 %

Texto analisado

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DOM BOSCO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL MENESES SOUZA

CARBONATAÇÃO EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM AMBIENTES COM DIFERENTES
TAXAS DE GÁS CARBÔNICO (CO₂): Simulação com câmara de carbonatação aceleradaSão Luis
2020
GABRIEL MENESES SOUZACARBONATAÇÃO EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM AMBIENTES COM DIFERENTES
TAXAS DE GÁS CARBÔNICO (CO₂): Simulação com câmara de carbonatação aceleradaMonografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário Unidade de
Ensino Superior Dom Bosco como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.