



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ENSINO SUPERIOR DOM BOSCO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ADRIELE RODRIGUES GOMES**

**ANÁLISE DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA NO PROCESSO DE  
CARBONATAÇÃO NO CONCRETO:** Mapeamento do índice de carbonatação  
correlacionado com a localização construtiva

São Luís  
2020

**ADRIELE RODRIGUES GOMES**

**ANÁLISE DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA NO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO:** Mapeamento do índice de carbonatação correlacionado com a localização construtiva

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil no Centro Universitário Dom Bosco – UNDB como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Rafael Carlos Walachinski

São Luís

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Centro Universitário - UNDB / Biblioteca

Gomes, Adriele Rodrigues

Análise da manifestação patológica no processo de carbonatação no concreto: mapeamento do índice de carbonatação correlacionado com a localização construtiva. / Adriele Rodrigues Gomes. \_\_ São Luís, 2020.

91f.

Orientador: Prof. Esp. Rafael Carlos Walachinski.

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

1. Concreto. 2. Manifestação patológica. 3. Carbonatação no concreto. 4. Estrutura de concreto armado. I. Título.

CDU 624.012.45

**ADRIELE RODRIGUES GOMES**

**ANÁLISE DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA NO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO:** Mapeamento do índice de carbonatação correlacionado com a localização construtiva

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil no Centro Universitário Dom Bosco – UNDB como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Rafael Carlos Walachinski

Aprovada em: 00/12/2020

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Esp. Rafael Walachinski (Orientador)

Centro Universitário Unidade De Ensino Superior Dom Bosco – UNDB

---

Dr. Claudemir Gomes Santana

Centro Universitário Unidade De Ensino Superior Dom Bosco – UNDB

---

Dra. Renata Medeiros Lobo Müller

Centro Universitário Unidade De Ensino Superior Dom Bosco – UNDB

## AGRADECIMENTOS

***Porque Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.  
A Ele a glória pelos séculos. Amém.  
Romanos 12:36***

Primeiramente agradeço a Deus por todas as coisas, momentos, pessoas e oportunidades confiadas a mim. Tenho em minha fé que todos os tempos desafiadores pelos quais passei foram de pleno fortalecimento e aprendizado. Tenho em mente e espírito que sempre tive a Sua presença e proteção comigo de maneira extraordinária.

Agradeço também aos meus pais Antônio Odorico Gomes Filho e Dorizete Gomes Rodrigues, que mesmo diante de situações desfavoráveis financeiramente sempre me proporcionaram acesso à educação e conhecimento, além dos princípios de valores repassados a mim da melhor maneira possível dentro de suas realidades com muito carinho e amor. Desse modo faço valer a passagem de Êxodo 20:12 (Honre seu pai e sua mãe). Agradeço também aos meus irmãos pelo grande crescimento pessoal que me proporcionam.

Além dos meus pais houve inúmeras pessoas que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional dos quais também agradeço e para não tornar a descritiva longa escolho pessoas para representar cada uma delas. Para minha família agradeço a todos representados pelas minhas avós Zeferina e Raimunda, e para a família que me acolheu de coração deixo meu agradecimento representado a minha madrastra Marcia Rejane, que permitiu que eu conhecesse pessoas tão maravilhosas (tia Maria dos Anjos, Ana Claudia, Clediane Ferreira, Claudiana Ferreira e Antônia Ferreira)

Dizem que ninguém cresce sozinho, de fato é verdade. Logo tenho muito a agradecer as amizades profissionais e pessoais que eu construí durante o período acadêmico e fora dos muros da faculdade. Agradeço aos meus professores que foram fundamentais, em especial ao professor Napoleão Sobrinho, Lourival Neto, Rogério Belfort, Ricardo Aguado, Ingrid Aires, Renata Muller e de maneira carinhosa e pessoal ao professor Rafael Carlos Walachinski que além de amigo e orientador foi o primeiro a confiar no meu conhecimento profissional. Agradeço também a empresa Azevedo engenharia e ao engenheiro Flávio Azevedo pelo total apoio na pesquisa.

Deixo também destacado o meu agradecimento aos meus amigos Luana Costa (Irmã), Elton James (Irmão), Hiago José, Lucas Allan, Josielma Santos e de

maneira especial e amorosa ao meu futuro marido Wellington Ribeiro que sempre esteve ao meu lado me incentivando, apoiando e sendo um mega parceiro de profissão e vida.

## RESUMO

Na presente pesquisa analisou-se a profundidade do fenômeno de carbonatação no concreto em corpos de prova exposto em locais distintos com um traço de referência para todas as amostras, assim como a realização em conjunto com ensaio de compressão em corpos de prova cilíndrico para obtenção da resistência adquirida ao longo dos 28 dias de idade do concreto usado. A análise tem como um dos objetivos observar o avanço da frente de carbonatação no concreto relacionado com o local de exposição nos 28 dias iniciais, podendo dessa forma classificar o local referente e agressividade apresentada na concentração do CO<sub>2</sub> e a interação dos materiais, para medidas de proteção do aço através do cobrimento da ferragem em estruturas de concreto armado em ambientes distintos. No desenvolvimento foi empregado as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas com auxílio de CPC-18 (1998) da RILEM, para caracterização dos materiais, dosagem, procedimento de realização e execução de ensaio e leitura de profundidade de carbonatação. No qual foram depositadas amostras de corpos de prova cilíndricos em estruturas de concreto armado em ambientes urbanos, ambiente com proximidade da maré e ambiente semiurbano com grau de agressividade leve. Os materiais adotados foram todos usuais da região de São Luís-MA para uma maior aproximação da realidade construtiva local. Os resultados obtidos são analisados de acordo com a profundidade da frente de carbonatação das amostras e correlacionados com os locais e tempo de exposição, concluindo sobre a atuação do CO<sub>2</sub> em cada local de acordo com a frente de carbonatação apresentada.

**Palavras-chaves:** Concreto. Carbonatação. Durabilidade. Estruturas de concreto.

## ABSTRACT

In this research, the depth of the carbonation phenomenon in concrete in specimens exposed in different places was analyzed with a reference trace for all samples, as well as the performance together with compression test in cylindrical specimens to obtain the resistance acquired over the 28 days of used concrete. Analysis has as one of the objectives to observe the advance of the carbonation front in the concrete related to the exposure site in the initial 28 days, being able to classify the referring location and aggressiveness presented in the CO<sub>2</sub> concentration and the interaction of the materials, for protection measures of steel by covering the hardware in reinforced concrete structures in different environments. The development used the technical standards of the Brazilian Association of Technical Standards with the help of CPC-18 (1998) from RILEM, for the characterization of materials, dosage, procedure for carrying out and executing tests and reading of carbonation depth. In which a sample of cylindrical specimens were deposited in reinforced concrete structures in urban environments, an environment close to the tide and a semi-urban environment with a degree of mild aggressiveness. The materials adopted were all usual in the São Luís-MA region to get closer to the real constructive reality. The results obtained are analyzed according to the depth of the carbonation front of the samples and correlated with the locations and time of exposure.

Keywords: Concrete. Carbonation. Durability. Concrete structures.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do concreto modificada devido a carbonatação .....	30
Tabela 2: Teor de dióxido de carbono de acordo com o ambiente. ....	33
Tabela 3: Indicadores de pH. ....	35
Tabela 4: Massa mínima de acordo com a dimensão máxima nominal. ....	49
Tabela 5: Conjunto de peneira da série norma e intermediária. ....	50
Tabela 6: Dosagem ABCP/ACI do traço. ....	57
Tabela 7: Grau de agressividade relacionado com A/C. ....	58
Tabela 8: Composição da Granulometria da Areia.....	61
Tabela 9: Modulo de Finura e Dimensão máxima Característica da areia.....	62
Tabela 10: Composição Granulométrica da Brita. ....	64
Tabela 11: Modulo de Finura e Dimensão Máxima Característica da Brita. ....	64
Tabela 12: Massa Unitária da Areia e Brita. ....	66
Tabela 13: Dados do procedimento de massa unitária. ....	67
Tabela 14: Dados para dosagem do traço. ....	67
Tabela 15: Consumo de água x slump test. ....	69
Tabela 16: Traço produzido .....	70
Tabela 17: Tolerância permitida para execução do ensaio de compressão. ....	77

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

Figura 1: Corrosão da armadura no concreto.....	21
Figura 2: Frente de carbonatação e alteração do pH do concreto .....	23
Figura 3: Esquema do processo de carbonatação .....	30
Figura 4: Corrosão de armadura por cloreto e carbonatação. ....	39
Figura 5: Despassivação da camada de proteção do aço. ....	40
Figura 6 : Concentração de CO <sub>2</sub> de acordo com a localidade .....	41
Figura 7: Vista superior do viaduto da COHAMA. ....	44
Figura 8: Pontos de exposição no viaduto da COHAMA. ....	45
Figura 9: Vista superior do viaduto do café. ....	45
Figura 10: Pontos de exposição no viaduto do café. ....	46
Figura 11: Vista superior do espigão costeiro. ....	46
Figura 12: Vista superior do cinturão verde.....	47
Figura 13: Material para secagem.....	49
Figura 14: Peneiramento da areia.....	51
Figura 15: Peneiras para ensaio de composição granulométrica. ....	52
Figura 16: Peneiramento da amostra de maneira manual.....	52
Figura 17: Areia para ensaio de massa específica.....	53
Figura 18: Retirada do material pulverulento da brita 0.....	54
Figura 19: Materiais para determinação de massa específica.....	56
Figura 20: Ensaio de Massa específica do cimento.....	57
Figura 21: Retirada do abatimento do concreto. ....	58
Figura 22: Corpo de prova moldados. ....	59
Figura 23: Materiais para solução de fenolftaleína. ....	60
Figura 24: Curva de Abrams. ....	68
Figura 25: Amostra viaduto da COHAMA – Espaço aberto.....	71
Figura 26: Amostra do Viaduto da COHAMA – Espaço confinado. ....	72
Figura 27: Amostra do Viaduto do café – Ponto 1.....	73
Figura 28: Amostra do Viaduto do café – Ponto 2.....	74

Figura 29: Amostra litorânea – Areia.....	75
Figura 30: Local Semi-Urbano. ....	76

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Causas intrínsecas proveniente a falhas humanas durante a construção. ...	25
Quadro 2: Causas intrínsecas relacionadas a falhas humanas durante a utilização .....	26
Quadro 3: Indicadores de nível de carbonatação.....	35
Quadro 4: Classe de agressividade ambiental .....	42

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Projeção da concentração Atmosférica de CO <sub>2</sub> . .....	32
Gráfico 2: Curva granulométrica da Areia. ....	62
Gráfico 3: Curva granulométrica da Areia. ....	63
Gráfico 4: Todas as amostras de acordo com profundidade. ....	76
Gráfico 5: Resultados da resistência a compressão.....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de Carbono

**CaCO<sub>3</sub>** – Carbonato de Calcio

**Ca (HO)<sub>2</sub>** – Hidróxido de Cálcio

**CP** – Corpo de prova

**CP's** – Corpos de prova

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Óxido de Ferro

**γFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** - Maghemita

**H<sub>2</sub>S** – Ácido Sulfídrico

**m** – Metro

**μm** – Micrómetro

**NBR** – Norma Brasileira de Regulamentação

**pH** – Potencial Hidrogeniônico

**PPM** – Partes por milhão

**RILEM** – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	Problema .....	17
1.2	Hipóteses.....	17
1.3	Objetivos.....	18
1.3.1	Geral.....	18
1.3.2	Específicos .....	18
1.4	Justificativa.....	18
1.5	Síntese metodológica .....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	21
2.1	Manifestações Patológicas em estruturas de Concreto Armado .....	21
2.1.1	Conceitos e Definições .....	21
2.1.2	Origens e causas de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado	
2.1.2.1	Manifestações patológicas na etapa de concepção da estrutura .....	26
2.1.2.2	Manifestações patológicas na etapa de execução .....	27
2.1.2.3	Manifestações patológicas durante vida útil .....	27
2.2	Estudo sobre Carbonatação.....	29
2.2.1	Fatores influentes no processo de carbonatação .....	30
2.2.1.1	<i>Tipo de cimento e adições</i> .....	31
2.2.1.2	<i>Relação água/cimento</i> .....	31
2.2.1.3	<i>Concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente</i> .....	32
2.2.1.4	<i>Cura</i> .....	33
2.3	Método e medidas de Carbonatação.....	34
2.4	Mecanismo de Carbonatação .....	36
2.4.1	Carbonatação acelerada e natural .....	36
2.4.2	Influência na profundidade da frente carbonada .....	37
2.5	Corrosão em armadura no Concreto .....	38
2.5.1	Camada de passivação.....	39
2.5.2	Influência do meio ambiente .....	40
3	METODOLOGIA.....	43
3.1	Tipo de pesquisa .....	43
3.2	Coleta de dados .....	43

3.3	Local de estudo .....	44
3.4	Materiais e Métodos .....	47
3.4.1	Agregados .....	47
3.3.1.1	<i>Composição Granulométrica</i> .....	48
3.1.1.2	<i>Massa específica</i> .....	53
3.1.1.3	<i>Massa Unitária</i> .....	55
3.1.1.4	<i>Cimento</i> .....	56
3.5	Resultados e Discussões .....	61
3.5.1	Composição granulométrica .....	61
3.5.2	Massa Especifica.....	65
3.5.3	Massa Unitária .....	66
3.5.4	Dosagem .....	67
3.5.5	Ensaio de Carbonatação.....	71
3.4.6	Ensaio de Resistencia a compressão .....	77
4	CONCLUSÃO .....	79
	REFERÊNCIAS .....	81
	APÊNDICES .....	85
	ANEXOS.....	88

## 1 INTRODUÇÃO

Os meios de deterioração no concreto são ocasionados em sua grande maioria devido ao aumento de ocorrência de manifestações patológicas, levando a perda da durabilidade e resistência, sendo assim atualmente existe uma maior necessidade de conhecimentos relacionados a origem e prevenções de degradação em estruturas de concreto. Em avaliações gerais as manifestações patológicas não somente comprometem a vida útil de uma estrutura, mas também geram custos em reparos, manutenções e recuperações, logo entender os mecanismos de deterioração evita não somente danos sociais. como a redução de gastos (GOMES,2006).

Atualmente as manifestações patológicas estão associadas a várias etapas construtivas e ao uso, tais como falhas de projeto, erros de execução ou até mesmo uso inadequado de materiais ou métodos construtivos. Contudo é válido ressaltar que grande maioria das construções são edificadas em concreto armado, voltando assim a atenção para o processo de degradação das armaduras presentes, sabendo que muitas vezes somente o fator de segurança é o suficiente para evitar o colapso de uma estrutura.

Logo, é de suma importância entender a origem do mecanismo que provoca a corrosão do aço em estruturas de concreto armado e como é possível prevenir que tal mecanismo ocorra. Sendo assim é possível enfatizar que o processo de deterioração do aço no concreto está relacionado aos ataques de cloretos e o fenômeno de carbonatação, que leva a despassivação da película protetora do aço, possibilitando assim o início da corrosão.

O foco da pesquisa é voltado para o fenômeno de carbonatação no concreto e as influências causadas, correlacionando a atuação do  $\text{CO}_2$  com os locais construtivos. Ressaltando que o processo de avanço da frente de carbonatação é lento e influenciável por fatores externos e internos, tais como o ataque de agentes agressivos e a interação com os materiais empregados, de tal modo ser necessário o estudo sobre os efeitos do processo de carbonatação no concreto.

O parâmetros utilizados para o desenvolvimento da pesquisa são todos embasados em normas técnicas usuais no país, bem como a norma internacional de carbonatação da RILEM - *International Union of Laboratories and Experts in*

*Construction Materials, Systems and Structures* ( União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção) para leitura e análise de profundidade do avanço da frente de carbonatação.

## 1.1 Problema

O estudo sobre o grau de agressividade presente no ambiente é de suma importância para o entendimento de como ocorrem as manifestações patológicas em estruturas e sua provável deterioração. Partindo dessa premissa é possível estabelecer uma conexão direta entre a agressividade do local da construção com o desenvolvimento e o surgimento de manifestações patológicas quer sejam a curto, médio ou longo prazo.

A agressividade presente no ambiente tem origem diversificada, e os agentes responsáveis pelas principais anomalias das estruturas podem ser tanto químicos quanto físicos e por exemplo, pode-se fazer menção aos armazéns de fertilizantes, agredidos por sulfato, presente em seus produtos, assim como estações de tratamento de esgoto, que além do sulfato possui também contato com ácidos agressivos. O processo de deterioração do concreto apresenta como principal ação os ataques decorrentes da carbonatação e de cloretos, levando à corrosão da armadura (CORSINI, 2013).

Com isso, pode-se perceber a importância sobre conhecer o grau de agressividade do ambiente ao qual a estrutura será submetida, de modo a garantir a vida útil e durabilidade da peça. Sabendo disso, e que o concreto tem como os principais agressores o fenômeno de carbonatação e ataque de cloretos, quais os fatores que influenciam no processo de carbonatação e qual a relação construtiva do elemento estrutural com o processo e o local?

## 1.2 Hipóteses

- O processo de carbonatação no concreto está relacionado de maneira direta e intrínseca com a zona de construção local;
- A carbonatação é o principal fenômeno relacionado a corrosão em estrutura de concreto armado;
- É possível evitar o processo de carbonatação de modo geral do concreto.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Geral

Estudar o processo de carbonatação no concreto através de ensaio natural com exposição de amostras, no intuito de realizar comparativo entre a localidade de exposição e atuação sobre as amostras produzidas em traço padrão para pesquisa.

### 1.3.2 Específicos

- Observar o processo de carbonatação nas amostras expostas de acordo com a localidade;
- Registrar a atuação da manifestação patológica de carbonatação de forma comparativa entre as amostras estudadas e os locais de exposição;
- Pontuar de forma explicativa o maior grau de atuação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) nos pontos específicos da pesquisa;
- Identificar a maior concentração do dióxido de carbono dentre os locais estudados.

## 1.4 Justificativa

O grau de agressividade ambiental apresentado pela ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, especifica que de acordo com a classificação e exposição da estrutura, a agressão do meio pode ser desde fraca até muito forte, oferecendo risco de deterioração baixo a risco elevado. Logo é possível estabelecer a relação do processo de deterioração da estrutura de concreto com ações físicas e químicas que agem através do meio atual ou são causadas por esforços não considerados.

Pode-se ressaltar, conforme contexto apresentado anteriormente, que fatores externos e internos contribuem no processo de deterioração da peça estrutural, comprometendo a sua vida útil e estado de serviço. Sendo assim, Pollito (2006) discorre sobre o processo que leva a deterioração do aço presente no elemento estrutural, os principais agentes e seus efeitos conforme descrito no trecho apresentado a seguir.

Normalmente o concreto apresenta boas condições de proteção ao aço contra a corrosão. Entretanto, esta condição é perdida à medida que o concreto é atacado por substâncias agressivas existentes no meio ambiente. As principais são o CO<sub>2</sub>, que causa a carbonatação do concreto e conseqüentemente queda do seu pH e quebra da película passivante, e os cloretos, que aumentam a condutividade do concreto e atacam a camada passivante (POLLITO, 2016, p.15).

Na premissa anterior é válido ressaltar que existem áreas de localidades construtivas que favorecem as manifestações patológicas seguindo o grau de agressividade, geradas quando não há consideração do meio na elaboração do projeto, como também pela falta de manutenção. Assim é possível exemplificar o processo de carbonatação em estrutura de concreto já citado anteriormente em que o aumento de liberação de emissão de dióxido de carbono em zona com grandes movimentações reflete diretamente em manifestações patológicas em peças estruturais no local, de modo a representar fatores que influenciam nos aspectos relacionados a durabilidade, funcionalidade e utilização do elemento estrutural.

Portanto, o estudo e análise do processo da manifestação patológica de carbonatação em elementos construídos em zonas de grande concentração de CO<sub>2</sub>, torna-se relevante de modo que contribua significativamente para a elaboração de mapa de atuação de reparos e cuidados, como também possibilita uma maior exploração de fatores e agentes que influenciam no processo de carbonatação. De acordo com o pensamento de Pollito (2006, p.16) “O vício de construção, assim denominado na linguagem jurídica problemas patológicos, ocorre através de um mecanismo. No caso da corrosão de armadura os mecanismos principais são a carbonatação e a contaminação por cloretos.” O autor salienta ainda a importância do estudo das causas de manifestações patológicas e a interação com meio em que se encontra conforme trecho apresentado em seguida

Entender a interação entre as estruturas e o meio ambiente, do ponto de vista físico –químico, bem como modelar os fenômenos nela presentes, é de grande importância para municiar os projetistas para que possam adequar seus projetos aos aspectos de durabilidade. Para a corrosão de armadura é de primordial importância a compressão do caráter eletroquímico que envolve o processo (POLLITO, 2006. p.17).

Em concordância com o trecho acima Lapa (2008) destaca as manifestações patológicas como enfermidades de tal modo associada aos termos da medicina, assim elas podem ser congênitas, ou seja, nascem com a estruturas ou adquiridas ao longo da vida útil devido a interação com os agentes externos e internos. Ainda na fala do

autor tais enfermidades (manifestações patológicas), assim como na medicina devem ser averiguadas as causas e origem, no que se estende ao concreto armado deve-se evitar as tais enfermidades (profilaxia) ou tratar as mesmas (terapia) buscando assim evitar a perda da estrutura (morte).

### 1.5 Síntese metodológica

O trabalho a seguir está estruturado em 4 capítulos. No primeiro capítulo é apresentado todas a informações contemplando o objetivo do estudo, a problemática, a justificativa e os objetivos específicos, para seguir abordando as principais patologias encontradas em estruturas de concreto armado, descritas de forma sucinta e objetiva. Sendo assim abordado exemplos práticos e pesquisas realizada seguindo a mesma temática.

No segundo capítulo é abordado o estudo relacionado a carbonatação, onde descreve-se todo o processo da manifestação patológica em concreto, como também a sua atuação, além de outras pesquisas relacionada ao tema abordado. Assim como os métodos e materiais empregado para realização dos ensaios e procedimentos para obter os resultados necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

No terceiro capítulo é descrito o mecanismo de carbonatação referente às amostras ensaiadas através abordagens técnicas, bem como os dados encontrados nos materiais empregados, seu comportamento e a relação com a corrosão em armadura no concreto como consequência do efeito da manifestação patológica carbonatação.

Por fim o quarto capítulo apresenta a conclusão do estudo em questão. De forma a discorrer sobre os resultados obtidos nas localidade, bem como apresentas os comparativos entre os índices de concentração do CO<sub>2</sub> nos ambientes estudados e as ocorrências em cada amostra ensaiada.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Manifestações Patológicas em estruturas de Concreto Armado

#### 2.1.1 Conceitos e Definições

Por definição Helene *et al* (2011) descrevem todo o campo de patologia no âmbito da construção civil compreendido como o estudo de anomalias ou problemas e as alterações anatômicas e funcionais, sendo estas adquiridas de maneira congênita, ou seja, durante a execução da obra ou ao longo da vida útil. O autor afirma também que há um equívoco recorrente ao termo patologia e manifestações patológicas, tanto para os leigos quanto para o meio técnico, “ouve-se repetidamente a palavra patologia sendo empregada para definir o que na verdade pode ser chamado de manifestação patológica.” Na Figura 1 logo abaixo é possível exemplificar bem a distinção dos termos que geralmente são bem associados, onde encontra-se uma manifestação patológica (corrosão).

Figura 1: Corrosão da armadura no concreto.



Fonte: Helene *et al*, (2011).

Na Figura 1 observa-se de forma clara a manifestação patológica de corrosão no concreto, sendo está uma das mais frequentes, que chega a ser aproximadamente 30% das recorrência das anomalias existentes em estruturas de concreto armado, onde um dos fatores que mais contribuem para o processo é a

carbonatação, com a redução do pH do concreto e desp passivação da armadura que na presença de umidade inicia a corrosão, o que leva o comprometimento da estrutura em termos de durabilidade e segurança (SILVA,2007).

Helene *et al* (2011) descreve de maneira clara sobre a diferença de manifestações patológica e patologia de modo que “manifestação patológica é a expressão resultante de um mecanismo de degradação e a patologia é uma ciência formada por um conjunto de teorias que serve para explicar o mecanismo e a causa da ocorrência de determinada manifestação patológica.” Sendo assim compreendido que a patologia se trata de um termo com maior abrangência por ser uma ciência de estudo nas ocorrências de degradação.

Dessa forma, Ripper e Souza (1998) contribuem para o tema também destacando a patologia em estruturas um campo de estudo novo, do qual se ocupa de estudo relacionados às origens de manifestações patológicas, suas formas, bem como suas “consequências e mecanismo de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação”. Contudo o avanço da utilização e o grande crescimento da construção civil, bem como novas técnicas e tecnologias na área de projeto, planejamento, concepção e a utilização de novos materiais construtivos, favorece uma maior ramificação na área de estudo de patologias (TRINDADE, 2015).

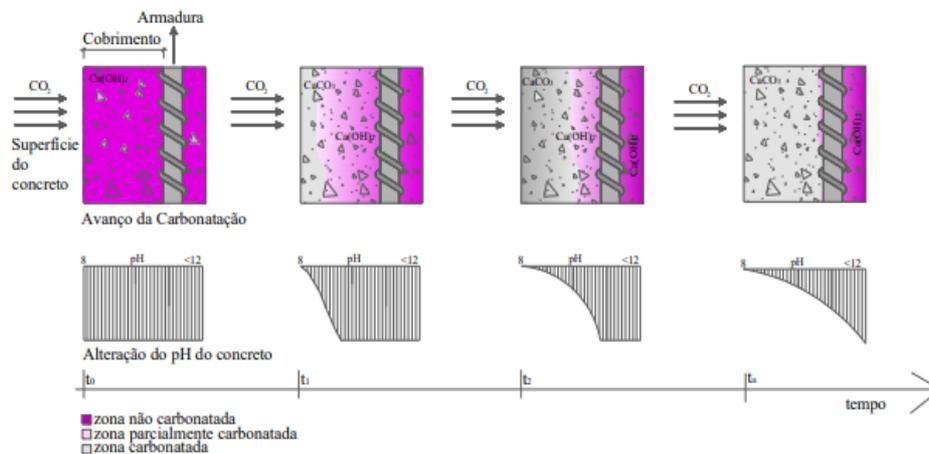
Diante da afirmação e ainda seguindo a linha de raciocínio do referido autor, é certo ressaltar os efeitos e danos provenientes das manifestações patológicas em estruturas de concreto e as causas de origem. O que afeta de maneira direta na durabilidade e resistência do elemento estrutural, evidenciando a importância do estudo e conhecimento em patologias no concreto, de modo a promover a restauração e reforços nas estruturas de concreto necessárias e conveniente ao caso, como também evitar a evolução da causa das manifestações patológicas local e medidas preventivas.

Lapa (2008), destaca que o processo de deterioração ligado as causas físicas no concreto estão associadas a duas categorias, sendo estas o desgaste superficial, devido a perdas de massa provido pelo processo de abrasão, erosão ou cavitação, e a fissuração, devido a dilatação, carregamento estrutural ou pressões. O autor também destaca as causas ligadas ao processo químico, como a hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura, trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta do cimento e reações químicas que levam a expansão (sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão da armadura).

É válido elencar também que com o aparecimento de manifestações patológicas em estruturas de concreto, os fatores mais afetados de maneira significativa é a resistência e a durabilidade do elemento estrutural, ou seja, o concreto e posteriormente a armadura sofrem de maneira direta quando atacados, levando ao comprometimento do elemento (VALENÇA, 2016). Lembrando que o concreto tem como um dos seus objetivos proteger a armadura da ação de agentes externos que provocam a degradação devido ao alto pH do concreto que pode ser apresentado entre 12,5 e 13,5 (CARNOMA, 2005)

Na Figura 2, ilustrada abaixo, é possível observar como o cobrimento da armadura e o processo de carbonatação no concreto acontece de maneira mais ilustrativa e como a alteração de pH contribui para aceleração da carbonatação.

Figura 2: Frente de carbonatação e alteração do pH do concreto



Fonte: Possan, (2010).

Como observado na Figura 2 há uma mudança de coloração de acordo com o avanço da frente de carbonatação, onde na área em que não ocorreu o processo de redução de pH apresenta coloração e ao ocorrer o avanço e redução do pH com aplicação do indicador não apresenta cor sobre a área aplicada.

As manifestações patológicas de acordo com Trindade (2015) podem ser provenientes de ações físicas e químicas no elemento estrutural. Pode-se, portanto, destacar algumas dessas formas físicas como a variações de temperatura, incidência direta do sol, bem como a ação da água. Além dessas, vale também destacar as ações químicas, como por exemplo o ar, ação de gases, águas agressivas e reações com ácidos e sais. Ações essas que em muitas vezes contribuem para a formação de patologias de forma conjuntas, dado como exemplo ações físicas que causam fissuras e permitem a entrada de agentes químicos.

### 2.1.2 Origens e causas de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado

De acordo com o processo evolutivo da civilização é notável o empenho do homem para criação e aperfeiçoamento em construções de estruturas, que sejam apropriadas às necessidades de todos os modos, desde moradias, trabalhistas ou até mesmo de infraestruturas, desta forma desenvolvendo técnicas, tecnologias e métodos construtivos, sejam eles no âmbito de planejamento, concepção, execução ou análise e detalhamento (RIPPER; SOUZA,1998). O autor destaca ainda sobre a utilização da tecnologia no que se refere a questões de manifestações patológicas conforme apresentado no trecho abaixo;

A progressão do desenvolvimento tecnológico aconteceu naturalmente, e, com ela, o aumento do conhecimento sobre estruturas e materiais, em particular através do estudo e análise de erros, que têm resultado em deterioração precoce ou em acidentes” dos quais são produtos do crescimento acelerado da construção civil que junto as inovações (RIPPER; SOUZA,1998).

De acordo com Souza e Ripper (1998, p.20), de maneira genérica, pode-se caracterizar a patologia das estruturas como “a área de estudo da engenharia das construções que ocupa pelo estudo das origens, formas de manifestações, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas.” Em ressalva é válido destacar que patologias de estruturas não devem ser considerado somente dentro do contexto de identificação e conhecimento de anomalias, deve-se também considerar no que se refere a parte de concepções e projetos das estruturas, podendo ser ampliada até a formação do engenheiro civil.

Em concordância com o pensamento exposto anteriormente, Souza e Ripper (1998) destacam sobre a importância da não restrição do conhecimento quando se faz referência a manifestações patológicas conforme descrito a seguir.

Ao se analisar uma estrutura de concreto “doente” é absolutamente necessário entender-se o porquê do surgimento e do desenvolvimento da doença, buscando esclarecer as causas, antes da prescrição e conseqüente aplicação do remédio necessário. O conhecimento das origens da deterioração é indispensável, não apenas para que se possa proceder aos reparos exigidos, mas também para se garantir que, após reparada, a estrutura não volte a se deteriorar (SOUZA E RIPPER, 1998. p.78).

Em patologias das estruturas, os referidos autores consideram que o processo de deterioração das estruturas pode ser classificado por causas intrínsecas, ou seja, que são particulares à própria estrutura, tendo suas origens nos materiais e peças estruturais. No Quadro 1 abaixo, são descritas as causas intrínsecas proveniente das falhas humanas no processo de construção, já no Quadro 2 são apresentadas as causas intrínsecas relacionadas a manutenção e uso do elemento estrutural, sendo apresentado em classificação sequente a origem e os agentes causadores de tais manifestações patológicas.

Quadro 1: Causas intrínsecas proveniente a falhas humanas durante a construção.

<b>FALHAS HUMANA DURANTE A CONSTRUÇÃO</b>	<b>DEFICIÊNCIAS DE CONCRETAGEM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>transporte</li> <li>lançamento</li> <li>juntas de concretagem</li> <li>adensamento</li> <li>cura</li> </ul>
	<b>INADEQUAÇÃO DE ESCORAMENTOS E FÔRMAS</b>	
	<b>DEFICIÊNCIAS NAS ARMADURAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>má interpretação dos projetos</li> <li>insuficiência de armaduras</li> <li>mau posicionamento das armaduras</li> <li>cobrimento de concreto insuficiente</li> <li>dobramento inadequado das barras</li> <li>deficiências nas ancoragens</li> <li>deficiências nas emendas</li> <li>má utilização de anticorrosivos</li> </ul>
	<b>UTILIZAÇÃO INCORRETA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>f_{ck}</math> inferior ao especificado</li> <li>aço diferente do especificado</li> <li>solo com características diferentes</li> <li>utilização de agregados reativos</li> <li>utilização inadequada de aditivos</li> <li>dosagem inadequada do concreto</li> </ul>
	<b>INEXISTÊNCIA DE CONTROLE DE QUALIDADE</b>	

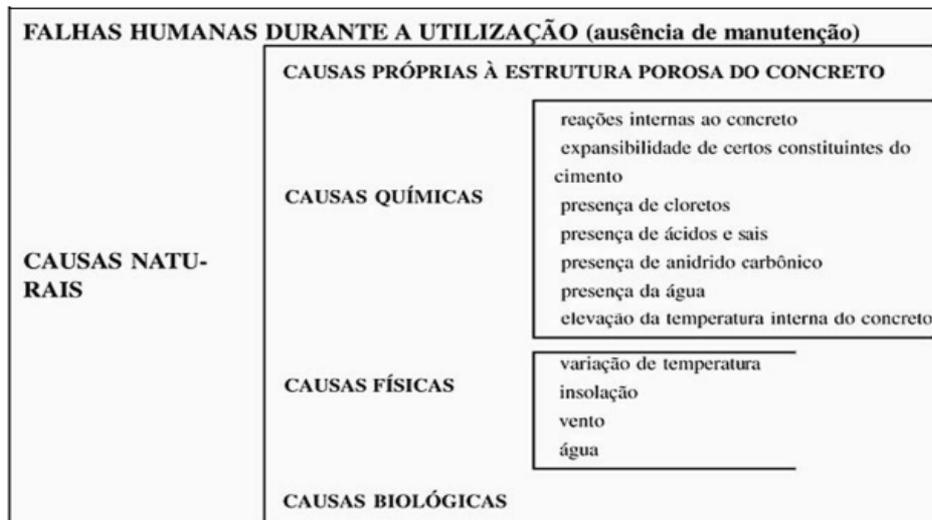
Fonte: Souza e Ripper, (1998).

Como observado no Quadro 1 as falhas humanas envolvem diversos fatores que são executados durante a obra e até a entrega da mesma pronta para uso. Essas falhas podem ser cometidas de modo irresponsável pelo profissional com o conhecimento das suas consequências, porém motivado pelo descuido e prazo de entrega final, como também podem ser de maneira inconsciente por falta de conhecimento e experiência.

Destacando que as causas apresentadas no Quadro 2 são consequentes de efeitos químicos e físicos na utilização do elemento de concreto. Tais falhas devem ser

prevista nos estudos dos materiais empregados na construção, como também no detalhamento do projeto construtivo.

Quadro 2: Causas intrínsecas relacionadas a falhas humanas durante a utilização



Fonte: Souza e Ripper, (1998).

Como demonstrado nos quadros acima citados, as falhas humanas e naturais são bem variantes e podem apresentar diversas origens. O que ressalta a importância do nível de atenção que deve ser prestado em todas as etapas construtivas, bem como a execução de cada uma delas e os seus detalhamentos.

#### 2.1.2.1 Manifestações patológicas na etapa de concepção da estrutura

Durante a fase de concepção há uma diversa variedade de falhas, que muitas vezes podem ser oriundas no estágio de estudo preliminares, de tal maneira a elevar o custo da obra ou provocar desconforto no uso. Outras falhas que são geradas nas etapas seguintes podem ser mais agravantes que a mencionada anteriormente, e até mesmo serem mais significativas relacionadas a problemas patológicos, como por exemplo incompatibilidade de projetos, materiais impróprios, erro no detalhamento e dimensionamento (RIPPER; SOUZA, 1998).

Muitas dessas falhas ocasionam patologias que comprometem a vida útil da estrutura de concreto, como fissuras provocadas por erro no detalhamento de cálculo estrutural de forças atuantes. As patologias na estrutura provocadas nessa fase que posteriormente venha a necessitar de reparos ou recuperação que na sua grande maioria elevam o custo e dificultam as etapas seguintes (TRINDADE, 2015).

### 2.1.2.2 Manifestações patológicas na etapa de execução

Na etapa de execução inúmeros fatores são responsáveis pelo desenvolvimento de patologias, tais como as condições e planejamento do canteiro de obra, com cronogramas e atividades. Juntamente com o canteiro de obra é fundamental que haja responsáveis técnicos trabalhando em harmonia com os metros de obras, havendo a necessidade duplicada de atenção e cuidados de ambas as partes em questões relacionadas a detalhamento de projeto e execução de serviços dentro das especificações do mesmo.

De acordo com Souza e Ripper (1998) nessa etapa construtiva as falhas são associadas a diversas origens, tais como mão de obra não qualificada, condições de trabalho ruins, materiais de baixa qualidade, irresponsabilidade técnica ou sabotagem simultânea dentro da obra. Muitas vezes devido a não fiscalização e falta de capacitação do profissional à frente da equipe, erros como escoramento de fôrmas, detalhamento, posicionamento e quantidade de armadura, assim como a concretagem são gerados, de tal maneira que encaminham à ocorrência de patologias, com um reflexo na diminuição da durabilidade do elemento estrutural ou a presença de agentes incorporados.

### 2.1.2.3 Manifestações patológicas durante vida útil

Segundo NBR 6118 (2014), entende-se por vida útil todo “o período de tempo durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção”. Logo é possível afirmar que a degradação que afeta a vida útil de estrutura de concreto está relacionada a manifestações patológicas geradas na etapa de utilização, são provenientes de manutenção inadequada ou até mesmo pela falta da mesma, tendo sua origem na ausência de conhecimento técnico por parte dos profissionais ou incompetência em alguns casos. Patologias apresentadas na estrutura de concreto durante a sua vida útil são ocasionadas muitas vezes pelo uso incorreto da qual foi projetada ou pela devida presença de elementos ou materiais agressivos ao elemento estrutural, todavia o planejamento de manutenção no devido período deve observar a maior utilização da peça estrutural e o modo como a estrutura está trabalhando os

esforços para evitar o desgaste e patologias mais grave que possa levar à ruína da estrutura (CARMONA, 2005).

Como citado na NBR 6118, (2014) existem mecanismo de envelhecimento e deterioração ligados a eventos patológicos, tais como lixiviação, expansão por sulfato, reação álcali-agregado, sendo também exemplificado mecanismo de deterioração relativos à armadura, como despassivação por carbonatação e ação de cloretos e agressividade do ambiente. Assim como também problemas relacionados a mecânica dos esforços solicitantes já mencionados acima, bem como patologias geradas ainda na fase de execução como exemplo, o tempo de cura após concretagem.

## 2.2 Estudo sobre Carbonatação

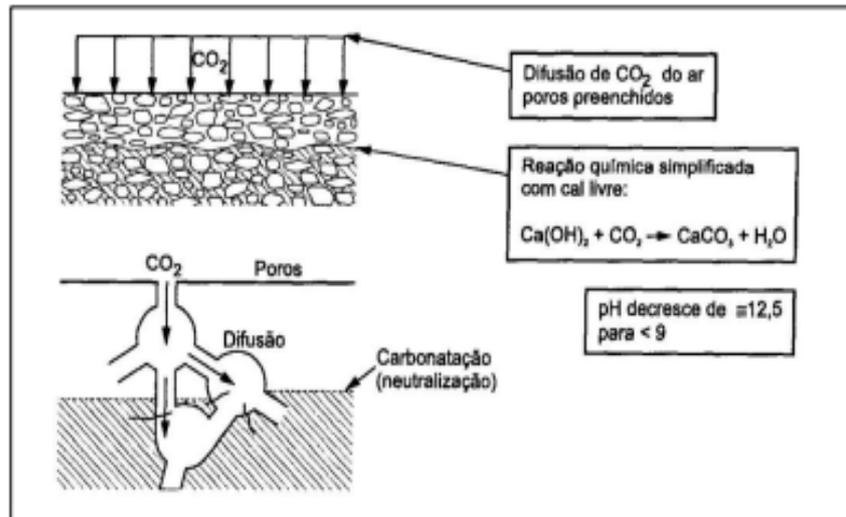
Cordeiro (2018) afirma que o fenômeno conhecido atualmente como carbonatação foi inicialmente chamado por Hamada em 1969 de neutralização, e Silva (2007) descreve a neutralização através de Rilem *et al* (1988) descrito no trecho a seguir;

A carbonatação é definida como a neutralização da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio e de outros compostos alcalinos hidratados, contidos na pasta de cimento do concreto, pelo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que para uma faixa de umidade precipitam como carbonato de cálcio. A carbonatação acontece naturalmente em estruturas de concreto expostas à ação do dióxido de carbono, este difunde na superfície do concreto e, em presença da umidade dos poros, forma a frente de carbonatação (RILEM *et al* 1988 citado por SILVA, 2007).

Cadore (2008), complementa ainda discorrendo de maneira mais simplificada a carbonatação como um processo físico-químico onde acontece a neutralização da fase líquida presente nos poros do concreto, levando a saturação do hidróxido de cálcio e outros compostos alcalinos hidratados, que antes com o pH do concreto elevado e no presente processo reduzido até a neutralização. Essa neutralização é proveniente de constituintes da atmosfera que são o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Denominado de carbonatação pelo processo de neutralização do hidróxido de cálcio pelo gás carbônico, obtendo um resultado de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) que por fim resulta em um sal de baixa solubilidade.

O processo de carbonatação além de provoca a diminuição do pH, também ajuda a gerar microfissuras devido a entrada e reações de outros agentes agressivos que promovem a deformação estrutural com o aumento de volume, que relaciona diretamente o evento com a questão da porosidade da estrutura e a umidade relativa presente. (FERREIRA, 2013). Ele não somente provoca a diminuição do pH, mas também gera microfissuras devido a entrada e reações de outros agentes agressivos que promovem a deformação estrutural com o aumento de volume, que relaciona diretamente o evento com a questão da porosidade das estruturas e a umidade relativa presente, na Figura 3 é possível descrever de modo simplificado o processo de carbonatação, com a entrada do  $\text{CO}_2$  pelos poros no concreto e as seguintes reações até a frente de carbonatação.

Figura 3: Esquema do processo de carbonatação



Fonte: Cascudo, (1997) apud Comim, et al, (2017).

Assim como a Figura 3 descreve o processo de carbonatação no concreto com a entrada do CO<sub>2</sub> Silva (2007) Apud Bertos *et al* (2004) descreve de acordo com a Tabela 01 as características do concreto alteradas devidos à carbonatação, onde é possível afirmar baseado nas amostras do estudo de Bertos *et al* (2004) que 26% do volume dos poros podem ser reduzidos na microestrutura do concreto.

Tabela 1: Características do concreto modificada devido a carbonatação

Características	Consequências
Permeabilidade	Alterada com o volume e a densidade
Porosidade	Tende a baixar porque, nos poros previamente grandes precipita-se o carbonato de cálcio que tem volume molar maior que do hidróxido de cálcio inicial.
Poros	O carbonato de cálcio precipitado tem baixa solubilidade, o que tampona os poros. Portanto devido à expansão volumétrica envolvida na reação, irão surgir microfissuras na região carbonatada.

Fonte: Adaptado de Bertos, (2004) *et al* citado por Silva, (2007).

### 2.2.1 Fatores influentes no processo de carbonatação

Ferreira (2013), afirma que a porosidade e o pH do concreto estão ligados a fatores que influenciam a velocidade e a profundidade de carbonatação, principalmente quando associados a alterações a composição e execução da estrutura de concreto, de tal maneira que é possível afirmar também que o processo de carbonatação depende de agentes externos e internos.

Tasca (2012), fala que o processo de carbonatação pode ser influenciado por diversas formas, sendo enfatizado as características dos materiais, composição química, tipo de aglomerante, como também a relação água/cimento e a qualidade da execução. Além dos fatores ambientais externos, tais como a concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura, e umidade relativa do ar, bem como as condições de exposição, ou seja, o ambiente é externo ou interno, ação da chuva ou desproteção sobre tal. A seguir é apresentado os tópicos que apresentam uma influência direta sobre a frente de carbonatação.

#### *2.2.1.1 Tipo de cimento e adições*

A composição química do cimento é facilmente associada a um fator determinante para a velocidade da frente de carbonatação, levando em consideração que a reserva alcalina disponível na pasta de cimento favorece o avanço, juntamente com os compostos hidratados e teores de álcalis. Fazendo com que a composição do cimento determine a quantidade de álcalis para que aconteça as reações de neutralização (ISAIA, 1999) *apud* (PAULETTI, 2009).

Segundo Tasca (2012), em estudo comparativo o cimento Portland comum com cimento com adições minerais no qual possui reserva alcalina maior, fazendo com que a difusão do CO<sub>2</sub> seja mais lenta, devido ao processo que o gás carbônico deve ser submetido, pois para consumir o hidróxido de cálcio necessita rebaixar o pH e reagir com o hidróxido de cálcio presente em maior quantidade. Ainda é afirmado que em relação a composição química e adições pozolânicas existem dois mecanismos que influem na estrutura de concreto, sendo o efeito fíler classificado como ações físicas e o efeito pozolânico no caso ações químicas (FERREIRA, 2013).

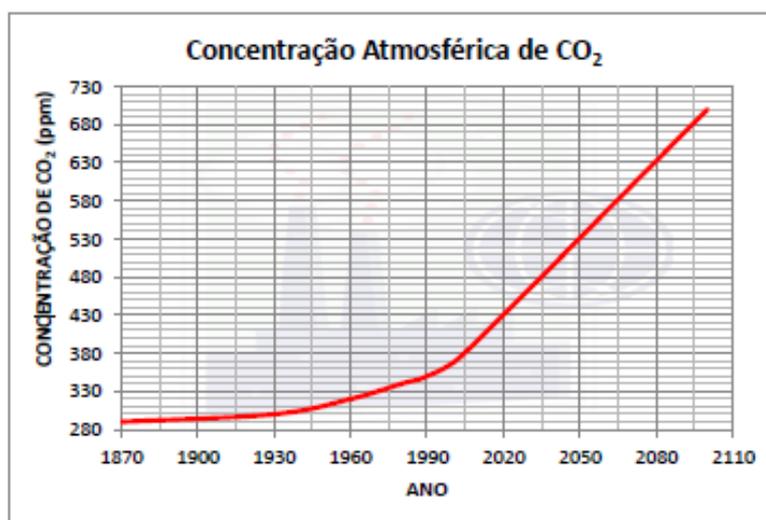
#### *2.2.1.2 Relação água/cimento*

De acordo com Ferreira (2013) a relação água/cimento apresenta uma ligação grande com a profundidade de carbonatação em estruturas de concreto, sendo que essa relação afeta de maneira direta no que se estende as propriedades microestruturais do concreto, porosidade, propriedade mecânica do concreto endurecido e sobretudo na espessura do cobrimento.

### 2.2.1.3 Concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente

Tasca, (2012) cita em sua pesquisa que houve um aumento na concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente devido a Revolução Industrial e com isso um grande desenvolvimento técnico-científico avançou no mesmo período. Afirma assim de acordo com projeção que em 2050 a concentração pode chegar a valores entre 450 a 500 ppm (partes por milhão), sendo apresentado no Gráfico 01 a estimativa do crescimento exponencial de tal concentração. Possan (2010) fazendo menção a Saetta e Vitaliani (2004), que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera pode apresentar um 0,015% do gás em ambientes abertos, 0,036% para centros urbanos e 0,045% para centros industriais.

Gráfico 1: Projeção da concentração Atmosférica de CO<sub>2</sub>.



Fonte: Adaptado de Tasco, (2012).

Como demonstrado no Gráfico 01 é notável que o crescimento da concentração de dióxido de carbono no ambiente apresenta uma tendência ao aumento com o passar dos anos, o que implica diretamente no processo de carbonatação em estruturas de concreto já que o CO<sub>2</sub> é parâmetro para evolução da manifestação patológica.

Possan (2010) exemplifica em uma revisão bibliográfica uma gama de autores que apresentam estudos relacionados a carbonatação, onde é evidenciado o demonstrativo entre os valores de concentração de CO<sub>2</sub> com os ambientes de exposição em diversas pesquisas em períodos diferentes. É observado pela autora que há uma variação de 0,03 a 1% a concentração média considerada pelos autores estudados de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Teor de dióxido de carbono de acordo com o ambiente.

Local	Teor médio (%)	Pesquisador
Ambiente normal*	0,033	Da Silva (1998)
Ambiente normal*	0,030 a 0,050	Papadakis et al. (1989)
Campo Aberto	0,015	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo	0,075	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo ventilado	0,046	Saetta e Vitaliani (2004)
Laboratório não ventilado	> 0,100	Neville (1997)
Laboratório (sala climatizada)	0,088	Pauletti (2009)
Túneis	0,100 a 0,300	Parrot (1987)
Zona industrial	0,045	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona rural	0,030 a 0,050	Helene (1993)
Zona rural	0,035%	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona rural	0,030	Neville (1997)
Zona rural	0,0325	Schiessl (1976)
Zona rural	0,03	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona rural	0,033	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,036	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona urbana	0,100	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,08	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona urbana	0,006	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona urbana, grandes centros	0,100	Schiessl (1976)
Zona urbana, grandes cidades	0,300	Neville (1997)
Zona urbana, Madrid, Espanha	0,033 a 0,058	Da Silva (1998)
Zona urbana, margens do rio Rin, Alemanha	0,0434 a 0,0542	Schiessl (1976)
Zona urbana, região de Munich, Alemanha	0,0325 a 0,0434	Schiessl (1976)
Zona urbana, tráfego intenso	0,1 a 1,20	Helene (1993)
Zona Urbana, Grande Porto Alegre, RS	0,063	Pauletti (2009)
Zonas agressivas	1,000	Tuutti (1982)

\* pode ser considerado um ambiente rural ou uma cidade com baixa taxa de poluição atmosférica.

Fonte: Possan, (2010).

É importante entender o teor de concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente de exposição tendo em vista a influência dele no processo de carbonatação, porém é válido ressaltar que tal fator não é unicamente responsável e sim diversos fatores externos e internos associados a difusão do dióxido de carbono (Tasca, 2012).

#### 2.2.1.4 Cura

Uma maior proteção contra a penetração do CO<sub>2</sub> na estrutura de concreto é realizada no processo de cura da concretagem do elemento estrutural, pois quando a cura úmida é feita de maneira prolongada fazendo com que o cimento tenha uma boa hidratação, de modo que reduza a porosidade e aumente a compacidade, logo promovendo uma maior proteção (FERREIRA, 2013).

Segundo Pauletti (2009), as propriedades de hidratação do cimento Portland resultam de maneira significativa no processo de cura, dependendo do tipo de cura empregado, existe uma variação na profundidade da camada carbonatada, motivada

pela microestrutura do concreto e a relação com a difusão do gás carbônico, auxiliado pela porosidade. Desta maneira é notável a influência do processo de cura na reação de carbonatação.

### **2.3 Método e medidas de Carbonatação**

Para estudo é possível destacar dois métodos de exploração de processo de carbonatação, sendo estes ensaios realizados através de modo natural, onde a estrutura é analisada em condições normais de exposição aos agentes agressivos do meio. Na análise do processo de carbonatação acelerado é criado um ambiente com base na aceleração do processo de neutralização (FERREIRA, 2013).

Valença (2016) faz menção ao pensamento de Possan, (2010) onde ele discorre de maneira breve sobre os estudos e análises relacionados ao método natural de carbonatação, de modo a justificar a utilização do método acelerado conforme destacado no trecho apresentado em seguida.

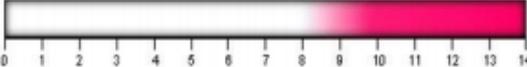
Os estudos da carbonatação através do método natural são ainda pouco utilizados em pesquisas, já que as reações decorrentes da difusão do CO<sub>2</sub> nos poros com os compostos alcalinos dos produtos de hidratação são relativamente lentas nas estruturas de concreto em dado ambiente. Isso ocorre, porque a sua concentração no ar é baixa (aproximadamente 0,04% em atmosferas normais), resultando num processo que, muitas vezes, torna inviável o tempo de espera para a determinação da velocidade de carbonatação, que pode levar até 20 anos (POSSAN, 2010. p.43).

Para Valença (2016) é válido ressaltar que fatores como o teor de dióxido de carbono no ambiente, agentes externos como a umidade relativa e a temperatura, são determinantes no processo de exposição para análise patológica realizada no processo de neutralização natural, tendo desse modo grande influência na determinação da frente de carbonatação. Ainda sobre a visão do autor é possível relacionar os dois métodos de ensaios em termos comparativos na obtenção de resultados com variação de análise, considerando que a carbonatação acelerada possui temperatura e umidade relativas constante, assim como a utilização de gás carbônico. De maneira contrária os ensaios realizados com métodos de neutralização natural, a exposição das estruturas é feita em condições ambientais variáveis e cíclicas.

Ressalta-se que há variantes no processo de carbonatação acelerada e exposição natural, a análise visual no momento da realização do ensaio com fenolftaleína devido a mudança de coloração imediata, indicando a diminuição do pH apresenta também variação, seguindo o intervalo na mudança de cor, sendo ativada

dada coloração devido ação da fenolftaleína como ilustrado no Quadro 03. Que na presença de pH abaixo de 8,3 permanece incolor e maior que 8,3 mostra uma cor vermelho carmin (RAISDORFER et al, 2015).

Quadro 3: Indicadores de nível de carbonatação.

Indicador de pH	Intervalo de mudança de cor	Preparo de Solução
Fenolftaleína	 <p>Incolor/vermelho carmim Faixa de pH 8,3 – 10,0</p>	Dissolver 10g de reagente em 700ml de etanol e depois diluir em 300 ml de água destilada

Fonte: Castro, (2003) *apud* Raisdorfer et al, (2015).

Também é especificado no Quadro 3 o preparo da solução empregada para identificar a mudança do pH no concreto. Ressaltando que a área carbonatada não apresenta coloração quando a solução é colocada em contato com a superfície interna de análise.

Segundo Tasca (2012) além do indicador de pH através do uso de fenolftaleína como ilustrado no Quadro 03 indicado acima, existem outros métodos de medidas para determinar a profundidade, tais como difração de raios-X, análise térmica diferencial, espectroscopia por infravermelho, termogravimetria e microscopia eletrônicas de varredura. Dentre os métodos mencionados o mais utilizado para análise de profundidade de carbonatação no concreto é o indicador de pH através de fenolftaleína, devido ao baixo custo e facilidade de execução. Na Tabela 3 é evidenciado outros indicadores de pH para identificar a profundidade da frente de carbonatação no concreto.

Tabela 3: Indicadores de pH.

Indicadores de pH	Intervalo de mudança de cor
Fenolftaleína	Incolor – Vermelho carmim pH 8,0 – 9,8
Timolftaleína	Incolor – Azul pH 9,3 – 10,5
Amarelo de alizarina GG	Amarelo claro – Amarelo escuro pH 10,0 – 12,0
Amarelo de alizarina R	Amarelo – vermelho alaranjado pH 10,1 – 12,0

Fonte: Adaptado de <http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/acidbase/indicators.shtml>. Acesso em 10 out 2020.

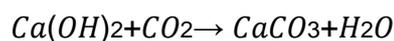
De acordo com a Tabela 3 é possível observar também que a fenolftaleína é o indicador de pH que pode identificar valores mais baixos comparados aos outros indicadores, sendo assim o mais utilizado não somente devido ao seu baixo custo e facilidade de aplicação como já mencionado mas também devido a sua precisão considerada boa por alguns estudos.

## 2.4 Mecanismo de Carbonatação

A carbonatação é apresentada por Pollito (2006), como o fenômeno que conduz ao processo de corrosão da armadura na parte interna do concreto, promovida pela alcalinidade do concreto na presença de hidróxido de cálcio. O mecanismo de ocorrência do fenômeno é constituído pela sequência de ações, tais como a atuação de concentração do gás carbônico, dióxido de enxofre e gás sulfídrico, sendo o gás carbônico de maior atuação e levando à diminuição do pH.

Para que o processo de carbonatação ocorra é necessário que haja inicialmente um processo físico-químico de difusão e dissolução do dióxido de carbono através dos poros do concreto. Em seguida acontece a ionização do meio e formação do bicarbonato e do carbonato, ressaltando que apenas o carbonato é ativo no processo de carbonatação. Há diversas interações químicas que levam a diminuição do pH do concreto para que posteriormente haja a reação entre carbonato e a precipitação do composto  $\text{CaCO}_3$ , de modo que a reação entre o  $\text{Ca(OH)}_2$  e o  $\text{CO}_2$  considerada a reação principal da carbonatação, como observado na Equação 1 (VALENÇA, 2016).

**Equação 1:** reação química principal da carbonatação



### 2.4.1 Carbonatação acelerada e natural

A análise do processo de carbonatação de maneira natural, ou seja, em condições naturais de exposição, precisa de anos para apresentar dados necessários a análise, de modo que tal duração de ações pode diminuir ou aumentar, dependendo das relações estabelecidas na constituição do concreto. Dentre essas relações é possível citar a relação água/aglomerante, que quando varia altera o tempo de

exposição ao CO<sub>2</sub> para apresentar uma profundidade de carbonatação (PAULETTI *et al*, 2006).

Para obtenção de resultados com a finalidade de estudo e controle do ambiente de exposição é necessário a aceleração do processo de carbonatação, onde há a possibilidade de monitoramento. Porém como afirma Pauletti, (2006) *et al* em sua pesquisa sobre carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil, há variações no processo de carbonatação acelerada que não podem qualificar o ensaio como padrão na obtenção de resultados, onde segundo a mesma;

Os resultados obtidos nos ensaios acelerados em laboratórios, com todos as condições de entorno controladas, jamais ocorrerão na prática, ou seja, em situações reais de degradação, em que a influência das variáveis é aleatória. Entretanto, os materiais de construção, em especial o cimento, estão em constante evolução, exigindo que suas propriedades sejam conhecidas em curtos períodos, o que é possível com o emprego de ensaios acelerados (PAULETTI *et al*, 2006, p.8).

Em outro trecho Pauletti (2006) destaca que o estudo do processo de carbonatação possui uma larga escala de tempo de pesquisas, de modo que ainda não há uma padronização na análise de ensaios;

Há cerca de 40 anos a carbonatação e seus fatores intervenientes vêm sendo estudados, com grande ênfase em várias partes do mundo; entanto, até o momento, não existe um ensaio padronizado que uniformize os fatores envolvidos. Verifica-se que existem recomendações ou normas locais, as quais ainda são poucos difundidas. (...). Essa falta de padronização desrespeita, principalmente aos fatores ambientais e aos procedimentos de ensaio, enquanto os materiais constituintes, geralmente, são as variáveis objeto de estudo. Os fatores ambientais estão relacionados à umidade, temperatura e concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os procedimentos de ensaio referem-se ao tipo e tempo de cura, ao tipo e tempo de sazonalidade, ao tipo, tamanho e forma das amostras, entre outros (PAULETTI *et al*, 2006, p.8).

#### 2.4.2 Influência na profundidade da frente carbonada

De acordo com Silva (2002) é necessário além de analisar os efeitos da carbonatação ressaltar os conhecimentos sobre os fatores que influenciam o fenômeno. É possível afirmar que um dos fatores que influencia é a idade do concreto, onde há várias teorias relacionando a idade do concreto com a profundidade da frente de carbonatação. Uma delas foi elaborada por Liborio em 1990 que demonstrou em peças estruturais do tipo vigas-telhas com idade de 25 anos e traço em massa de 1:2 com o fator água/cimento de 0,37 uma profundidade de apenas 2 mm.

## 2.5 Corrosão em armadura no Concreto

Na bibliografia referente ao processo de corrosão temos diversas definições semelhantes entre autores, tais como Helene (1986) em uma das suas primeiras publicações salienta que a “corrosão é uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica”, em contrapartida Bauer (1994) faz menção que “ a corrosão é transformação não intencional de um metal, a partir de suas superfícies expostas, em compostos não aderentes, solúveis ou desprezíveis na ambiente em que o metal se encontra.” Em uma definição mais recente Gentil (2003) destaca que a corrosão se assemelha com o processo inverso metalúrgico onde “produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído.

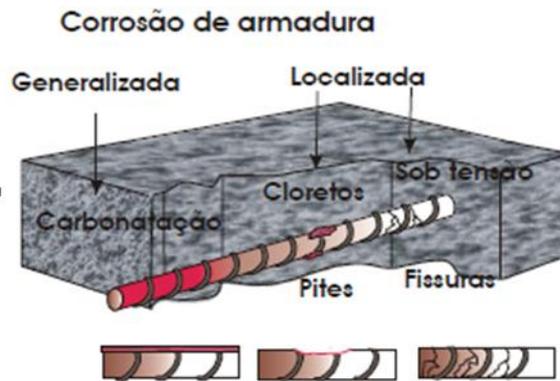
Helene (1993) em outra das suas publicações detalha que a deterioração de aço através do mecanismo de corrosão age por dois processos como mencionado acima, o de corrosão eletroquímica, e/ou por oxidação direta. Tratando-se de processo de ação eletroquímica e química respectivamente, levando em consideração que o processo de corrosão é definido por uma interação destrutiva de um material com o meio ambiente.

Dentre o mecanismo de deterioração do concreto armado, a corrosão da armadura é considerada um dos maiores fatores de risco ao comprometimento da estrutura, sendo o processo de deterioração da parte metálica presente no concreto. Quando há corrosão na ferragem é esperado ações como a perda da seção de barra ou expansão, que leva a fissuras no concreto. Há medidas de proteção usuais para que de não ocorra o processo de corrosão, tais medidas são elaboradas e constituídas de acordo com o grau de agressividade do meio ambiente (POLLITO, 2006).

Pollito (2006), explica que em caso de corrosão de armadura do concreto, existe dois mecanismos principais, sendo a carbonatação e a contaminação por cloretos. Desse modo é possível destacar que o grau de agressividade do meio influencia no processo de corrosão, como em casos de grande concentração de  $\text{CO}_2$ , que ocasiona a carbonatação. Tal fenômeno é responsável pela diminuição do pH do

concreto levando a despassivação, bem como os cloretos que também atacam a camada passivante através do aumento de condutividade. Na Figura 4 é demonstrado a atuação dos dois processos que levam a corrosão da armadura em concreto, de maneira generalizada e localizada.

Figura 4: Corrosão de armadura por cloreto e carbonatação.



Fonte: Cascudo, (1997) citado por Pollito, (2006).

Conforme apresentado na Figura 4 a corrosão do aço pode ocorrer de maneira localizada, podendo levar a perda da seção do material de formas diferentes ou generalizada de maneira distribuída por toda extensão de ataque dos agentes

Em estudos Pollito (2006) descreve em sua pesquisa que não necessariamente a corrosão deve ser vista como um evento indesejável, pois há caso em que é colocado um metal de menor qualidade, ou seja, menos nobre para que ocorra a oxidação em si, desta forma com a função de proteção o metal mais nobre, assim é o caso de proteção catódica sendo assim um fenômeno bem-vindo.

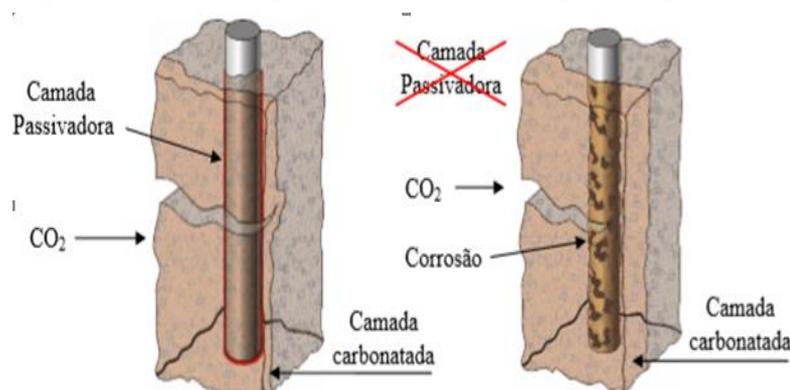
### 2.5.1 Camada de passivação

A passivação do metal ocorre por meio da proteção oferecida pela camada de cobertura do concreto, que tem função de proteger a armadura presente. Isso ocorre por meio do pH do extrato aquoso presente nos poros do concreto, que varia entre 12,5 a 13,5 que proporciona um equilíbrio ao metal e cria uma película protetora, sendo assim existe a proteção da armadura de maneira química, devido ao pH apresentado ser favorável ao meio, quanto a proteção física através do revestimento (LIMA, 1996 *apud* LIMA E LENCIONI, 2000).

Helene, (1993), destaca o processo de formação da película protetora do qual é referente a camada de passivação, em uma reação eletroquímica intensa e de curta duração, definida pela resistência à corrosão proporcionada por uma película fina de um filme de óxido estável e aderente na superfície do metal. Ressalta também a passivação como a formação de um filme transparente, fino, aderente e estável, composto por duas camadas de óxidos, sendo a externa com predominância do  $(Fe_3O_4)$  magnetita e a camada externa o  $(\gamma Fe_2O_3)$  maghemita.

Além da camada de óxidos existe a presença de hidróxidos que juntos exercem a função de proteger e impedir que haja o avanço da corrosão ao metal. Outro fator que favorece a proteção da armadura é a elevada alcalinidade obtida devido a formação de portlandita  $[Ca(OH)_2]$  (hidratação do cimento), contribuindo para a formação e manutenção da camada passiva do aço na parte interna do concreto. Porém essa camada de proteção pode ser alterada quando há ataques de agentes agressivos que modificam as condições internas, na Figura 5 salienta o processo de ataque e despassivação (CARMONA, 2005).

Figura 5: Despassivação da camada de proteção do aço.

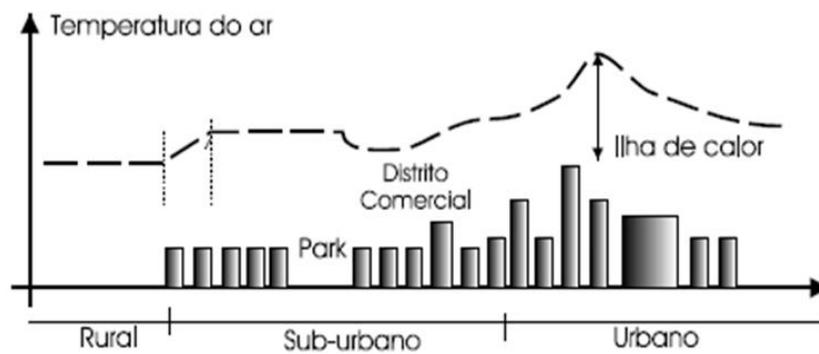


Fonte: Tula, (2000) *apud* Carmona, (2005).

### 2.5.2 Influência do meio ambiente

Segundo Lima e Lencioni (2004) a degradação das construções tem relação direta com a concentração populacional, alterando o meio original e promovendo ações de chuvas ácidas, deposição de partículas sólidas e a concentração de dióxido de carbono no meio ambiente. Também é destacado que tal concentração populacional acarreta também alterações no regime de ventos modificando assim a distribuição de temperaturas. Na Figura 6 é observado os picos de temperaturas do ar conforme a área populacional.

Figura 6 : Concentração de CO<sub>2</sub> de acordo com a localidade



Fonte: Duracrete, (1999) adaptado por Lima e Lencioni, (2004).

Com a alta concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumenta o ataque ao cobrimento da armadura do concreto, tornando o ambiente mais agressivo, logo aumentando a velocidade de deterioração da estrutura de concreto. Em construções que possuem pouca ventilação como túneis e viadutos o nível de concentração é maior, de modo a acelerar o acúmulo de CO<sub>2</sub>. Outros fatores além das condições de exposição do meio ambiente, influenciam para a deterioração da estrutura de concreto, bem como as características dos materiais utilizados e a concepção do projeto (LIMA E LENCIONI, 2004).

Assim como o meio urbano é apresentado como ambiente agressivo, o ambiente marinho também possui agressividade a estruturas de concreto. Lima e Lencioni (2004) afirmam que a durabilidade da estrutura está relacionada ao microclima que a construção se encontra com atuações específicas e reações de degradação características. Há uma divisão de zonas de ataque, caracterizadas pela forma de contato da água com a estrutura, sendo influenciada por diversos fatores.

Ainda com destaque ao grau de agressividade, a NBR 6118:2014 divide o meio agressivo em classe de I a classe IV, conforme apresentado no Quadro 4. A classe I possui agressividade fraca, que aumenta de acordo com o meio até a agressividade muito forte na classe IV. Essa classificação é importante para a dosagem do concreto e escolha do material mediante a localidade construtiva, com o intuito de promover a vida útil e melhor desempenho à estrutura.

Quadro 4: Classe de agressividade ambiental

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

<sup>a</sup> 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).

<sup>b</sup> 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.

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

Fonte: NBR 6118, (2014).

De tal modo se faz necessário o conhecimento do grau de agressividade do local para fins de cobrimento da armadura mediante os ataques que o concreto sofrerá de acordo com a classificação ambiental. Como é ilustrado no Quadro 4 acima além da classificação da agressividade ambiental é associado o mesmo com o risco de deterioração da estrutura, vindo a ser desde insignificante até elevado em condições ambientais classe IV com agressividade elevado em zonas industriais e com respingos de maré.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Tipo de pesquisa**

A pesquisa inicialmente é desenvolvida com base em estudos bibliográficos, com o objetivo de agregar conhecimento referente ao processo de carbonatação no concreto, utilizado para fundamentação teórica e embasamento técnico pesquisas anteriores, tais como trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado, livros, artigos e outros.

Como base no referencial teórico e técnico relacionado ao tema da pesquisa, foi possível o seguimento de modo exploratório da mesma, limitando assim do local de estudo para melhor coleta de dados, sendo explorado locais de maior ocorrência e exposição de respingo da maré devido a região construtiva local da ilha de São Luís-MA.

Os materiais utilizados para concepção das amostras analisadas foram submetidos a ensaios laboratoriais exigidos em norma técnica para o uso e determinação de características específicas, vindo a colaborar na análise e comparação dos resultados obtidos posteriormente na pesquisa de caráter experimental.

Como resultado a pesquisa possui caráter quantitativo, de modo a analisar os dados pré moldagem, moldagem e exposição das amostras dos corpos de prova cilíndricos e seus respectivos locais de exposição, em comparação como os resultados obtidos, os materiais utilizados e o tempo de exposição.

#### **3.2 Coleta de dados**

Corsini (2013) ressalta em artigo sobre ambiente agressivo que toda estrutura de concreto está sujeita a ações de deterioração em todos os ambientes, contudo a maior frequência, intensidade e grau de agressividade do meio podem acelerar o processo. Além dos fatores externos a deterioração pode ocorrer por ações e reações internas, como interação com a pasta do cimento e agregados reativos.

Mediante conhecimento da interação do meio agressivo e os materiais foram selecionadas duas estruturas de concreto para o desenvolvimento desta pesquisa, com o objetivo de avaliar o local e suas influências no fenômeno de carbonatação com 45

corpo de provas sobre exposição aos 28 dias de cura iniciais, promovendo a semelhança direta com o processo de desforma em construções civis.

A pesquisa conta com a análise de amostras padrões por localidade, sendo assim foram colocadas duas amostras separadas em cada localidade do estudo para um melhor comparativo. A Figura 8 apresenta a localização de cada ponto onde as amostras foram deixadas, sendo uma amostra na rotatória (local aberto), que corresponde ao centro da estrutura e uma outra amostra próxima ao início da elevação do viaduto na parte interna (confinado).

### 3.3 Local de estudo

A primeira localidade trata-se do viaduto da COHAMA (Cooperativa Habitacional do Maranhão), localizado no limite dos bairros do Bequimão e Vinhais, na região de São Luís - MA. Conforme apresenta a Figura 7 é possível observar a vista superior da estrutura e a demarcação da área de exposição das amostras para análise da atuação do CO<sub>2</sub> no avanço da frente de carbonatação.

Com uma estrutura de viaduto, túnel e rotatória, o primeiro local para o desenvolvimento da pesquisa possui um grande fluxo de circulação de veículos, sendo um dos principais acesso aos bairros vizinhos e desvio de rotas para o centro da cidade e centros comerciais.

Figura 7: Vista superior do viaduto da COHAMA.



Fonte: Google Earth adaptado pelo autor, (2020).

Conforme a Figura 7 apresenta o local de primeira análise da qualidade do concreto e ao grau de agressividade do local. Onde, a Figura 8 a seguir apresenta os pontos que as amostras foram depositadas para coleta de dados referente as mesmas.

Figura 8: Pontos de exposição no viaduto da COHAMA.



Fonte: Google Earth adaptado pelo autor, (2020).

A segunda estrutura trata-se também de um viaduto, conhecido popularmente como “viaduto do café”, localizado na divisa entre os bairros do Oiteiro da cruz e Radional na região de São Luís - MA. Na Figura 9 é observado a vista superior da estrutura, sobretudo a limitação dos pontos de estudo da pesquisa.

Figura 9: Vista superior do viaduto do café.



Fonte: Google Earth adaptado pelo autor, (2020).

Assim com o primeiro local da pesquisa as amostras foram divididas em dois pontos para análise, de tal modo deixadas nas extremidades do viaduto. As amostras neste local foram depositadas de maneira diferente, com o intuito de avaliação posterior, sendo assim a primeira amostra colocou-se em local coberto e amostra 02 ficou em ambiente aberto, ou seja, sujeita a maior exposição. Na Figura 10 é identificado os locais no viaduto onde as amostras foram depositadas.

Figura 10: Pontos de exposição no viaduto do café.



Fonte: Google Earth adaptado pelo autor, (2020).

Para o terceiro ponto de análise do processo de carbonatação no concreto, foi selecionado o espigão costeiro localizado no bairro Ponta D'areia. Sua escolha foi devido a maior proximidade com o mar e seus intemperes, apresentado de acordo com a ABNT NBR 6118, (2014) o maior grau de agressividade. No local foi a amostra pouco em área seca para fins de comparações futuras conforme identificado na Figura 11 a seguir.

Figura 11: Vista superior do espigão costeiro.



Fonte: Google Earth adaptado pelo autor, (2020).

Além dos locais apresentados acima foi realizado mais um local com o grau de agressividade considerado leve segundo a NBR 6118, (2014). Sendo esse local,

uma reserva ambiental localizada no bairro Cinturão Verde, nos limites da demarcação da cidade de São Luís-MA, conforme figura 12.

Figura 12: Vista superior do cinturão verde.



Fonte: Google Earth adaptado pelo autor, (2020).

A reserva contempla a moradia de algumas famílias e galpões de armazenamentos de grande porte, com acesso através de estradas sem pavimentação e com pouca circulação de veículos. Onde os corpos de prova foram expostos durante o mesmo período que os demais.

### **3.4 Materiais e Métodos**

Os métodos adotados ao longo da pesquisa foram todos norteados pelas normas técnicas de acordo com cada material e ensaio desejado. Além dos ensaios necessários, foram realizados outros ensaios para fins de caracterização específica. A seguir é apresentado todos os métodos empregados para a realização de cada ensaio.

#### **3.4.1 Agregados**

Com o auxílio da NBR 7211:2019 – Agregados para concreto – Especificações, foram determinados os ensaios necessários para dosar o concreto para o desenvolvimento da pesquisa, bem como o comparativo entre o objetivo final e a influência dos resultados encontrados nos materiais empregados. Do mesmo modo ocorre a utilização da norma técnica também para identificação de possíveis anomalias nos materiais, mediante especificações em concordância normativa.

Sendo assim para realização da dosagem do concreto foram empregados os agregados, areia natural e brita 0 comumente utilizada na região. A caracterização dos agregados em questão foi embasada em conformidade normativa da NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, NBR NM 52:2009 – Agregado Miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, NBR NM 53:2020 – Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água e NBR NM 45:2006 – Agregados - Determinação de massa unitária e do volume de vazios.

Relacionado ao contexto da pesquisa Silva, (2002) afirma em sua tese que o processo de carbonatação com os agregados não possuem uma relação direta, porém as características físicas podem influenciar e facilitar que o mesmo ocorra devido as propriedades apresentadas no concreto, como a porosidade que provoca a difusão dos gases, massa específica que quando alta torna o concreto denso e diminui a difusão e absorção de água que pode facilitar ou diminuir o processo de carbonatação dependendo das reações internas, tornando assim a caracterização dos agregados de suma importância.

A seguir é apresentado os tópicos referentes a composição granulométrica de cada agregado empregado, com os procedimentos normativos utilizados para obtenção dos dados.

### *3.3.1.1 Composição Granulométrica*

#### *a) Composição Granulométrica da areia*

Antes de iniciar o ensaio de composição granulométrica do material ensaiado a norma recomenda que a amostra tenha o teor de umidade retirado através do uso da estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Porém para o desenvolvimento da pesquisa o processo de secagem foi realizado de maneira natural, secado em bandejas metálicas ao ar livre, como mostra a Figura 11.

Figura 13: Material para secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Todo o material utilizado fez uso da secagem natural em lonas plásticas em grande quantidade, somente as amostras para caracterização que foram separados em bandejas metálicas para destinação de ensaios, pois conforme recomendações o material ensaiado deve ser descartado após sua caracterização devido à perda de características originais de britagem e retirada de jazida que ocorrem ao longo do processo do ensaio.

Para a composição granulométrica da areia empregada foram utilizados os equipamentos e/ou materiais conforme indicação normativa, tais como balança, conjunto de peneira da série normal e intermediária com tampa e fundo, pincel, recipiente retangular metálico e amostra do material ensaiado conforme especificação da NBR 248:2003.

Para iniciar o ensaio foi necessário misturar bem o material com o objetivo de uma melhor amostra para composição granulométrica, seguindo a separação de duas amostras de massa mínima de acordo com o que é estabelecido em norma conforme apresenta a Tabela 4, referente a dimensão máxima nominal do agregado.

Tabela 4: Massa mínima de acordo com a dimensão máxima nominal.

Dimensión máxima nominal del agregado / Dimensão máxima nominal do agregado mm	Masa mínima de la muestra de ensayo / Massa mínima da amostra de ensaio kg
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

(\*) Después del secado. / Após secagem.

Fonte: ABNT NBR 248:2003 adaptado pelo autor, (2020).

Como a recomendação normativa é que essa massa seja pesada com o material já seco, o procedimento de secagem foi realizado anteriormente, dando assim seguimento no ensaio reservando uma das amostras como contraprova, caso haja anomalias ou falhas durante a execução do ensaio conforme é mencionado no item 5.2.1 da norma, bem como o encaixe das peneiras em forma crescente e o fundo do conjunto, caso as duas amostras do material sejam muito semelhantes não há necessidade de apresentação de ambas, apenas de uma delas.

A colocação do conjunto de peneiras é definida pela classificação do material de acordo dimensão do grão do material na abertura da malha, o material ensaiado trata-se de agregado miúdo devido seus grãos passarem pela abertura da malha de 4,75mm. A Tabela 5 apresenta todo o conjunto de peneira pela norma que compreende a serie normal e intermediaria para via de esclarecimento.

Tabela 5: Conjunto de peneira da série norma e intermediaria.

<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: ABNT NBR 248:2003 adaptado pelo autor, (2020).

A norma não estabelece a obrigatoriedade do conjunto completo de peneira, ou seja, não é obrigado o uso das peneiras intermediárias identificada no lado direito na Tabela 5. Porém para melhor composição da curva granulométrica e identificação do tipo de areia pelo grão do mesmo é ideal usar o conjunto completo.

Definido o conjunto de peneira e classificação do material é dado seguimento no ensaio para determinação da composição granulométrica. Desse modo é passado todo o material por todas as peneiras contabilizando a massa retida e passante de cada

uma delas. Assim que todo material é passado é necessário realizar o somatório de tal modo que o resultado tenha uma perda de aproximadamente 0,1% do total da massa.

No desenvolvimento dessa pesquisa a agitação das peneiras foi realizada de maneira manual, logo adotou-se as recomendações normativas da agitação com duração de 2 minutos contínuos com movimentos laterais e circulares alternados, conforme apresenta a Figura 14. Além da curva granulométrica da areia empregada para o desenvolvimento da pesquisa, também é possível a obtenção do módulo de finura e dimensão máxima dos graus com os dados apresentados que serão discutidos posteriormente.

Figura 14: Peneiramento da areia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Como observado na Figura 14 há peneiras em que o material retido é contido em pequenas quantidades e em outras em qualidade bem maiores. Contudo para averiguação da veracidade do ensaio o procedimento deve ser executado em duas amostras de areia seguindo orientações normativas, como ambas as amostras apresentaram o resultado muito semelhante, ao longo do desenvolvimento da pesquisa será apresentado apenas um resultado da composição granulométrica da areia.

#### b) *Composição Granulométrica da Brita 0*

O mesmo procedimento normativo da NBR 248:2003 foi adotado para o ensaio de composição granulométrica da brita 0 com as especificações para mesma, fazendo uso dos equipamentos já mencionados acima. Abaixo a Figura 15 apresenta o conjunto de peneiras utilizado para o ensaio sobre recomendações normativas de acordo com a classificação do material a ser ensaiado, que conforme as especificações o material é considerado agregado graúdo com passagem na abertura da malha 75 mm e retido na abertura malha 4,75 mm.

Figura 15: Peneiras para ensaio de composição granulométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

No conjunto apresenta na Figura 15 está compreendido na ordem decrescente da peneira de 37,5 mm até a peneira de 150 $\mu$ m. Obedecendo as orientações da norma para agitação manual, o material foi passado por todas as peneiras uma por vez na duração estimulada.

Assim como foi realizado com a areia o procedimento de agitação foi manual, dentro das recomendações normativas. O material passou por todo o conjunto de peneira da série o normal e intermediário de acordo com a abertura da malha para agregado graúdo conforme ilustrado na Figura 16, sendo uma por vez devido a procedimento de agitação manual como já mencionado.

Figura 16: Peneiramento da amostra de maneira manual.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

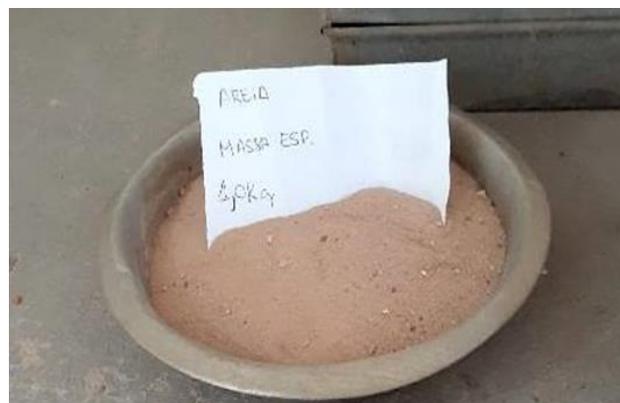
Para obtenção de módulo de finura dos respectivos materiais e a dimensão máxima foi utilizados os cálculos recomendados em norma, onde especifica que o módulo de finura deve ser obtido através do somatório do percentual retido na série normal dividido por 100, assim como a dimensão máxima deve ser um percentual acumulado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

### 3.1.1.2 Massa específica

#### a) Massa específica da areia

Com base na NBR NM 52:2009 em vigor foram adotados todos os procedimentos para obtenção da massa específica do agregado miúdo, sendo esta por sua vez em definição normativa a relação entre o agregado seco e o seu volume, incluindo os poros permeáveis. Para o procedimento de ensaio foram necessários balança, frasco aferido, molde tronco-cônico, haste de compactação, estufa ( $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) e bandeja metálica. O preparo da amostra é iniciado com a separação de 1kg do material conforme a Figura 17 e a sua colocação em bandeja metálica com água para repousar 24 horas, seguido pela retirada da água para a amostra secar ao ar livre.

Figura 17: Areia para ensaio de massa específica.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Para que a amostra seja conferida a secagem é submetida ao molde com compactação leve de 25 golpes com a haste, caso o material permaneça com o formato do molde a mesma não está totalmente seca, o procedimento é repetido até que o agregado miúdo perca a forma do molde com a sua retirada. Assim que verificada sua secagem é retirada da amostra 500g para realização do ensaio.

Agora a amostra do agregado miúdo de 500g é colocada no frasco com água para sua pesagem, a norma indica que seja preenchido o frasco até a marca de 500ml, seguido da retirada das bolhas de ar com movimentos circulares inclinados. Assim seguido para repouso em banho, para após 1 hora completar com água até a marca de  $500\text{cm}^3$  e determinar a massa total finalizando a parte prática do ensaio.

#### b) Massa específica da brita 0

Para realização do ensaio de determinação de massa específica para agregado graúdo foram empregadas as recomendações da NBR 53:2009, como o emprego de balança, recipiente para armazenamento do material, tanque d'água, cesto de malha metálica e peneiras. De modo inicial houve realização da retirada do material pulverulento com auxílio da peneira de abertura de malha 4,75mm e 75µm (Nº200) através da lavagem com água da brita 0, para assim ser colocada em estufa por 24 horas como apresenta a Figura 18.

Figura 18: Retirada do material pulverulento da brita 0.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Após a retirada do material da estufa seco e esperado o esfriamento do mesmo para a primeira pesagem da massa ( $m$ ) ser anotada com auxílio da balança digital com capacidade para 30kg. Em seguida o material é destinado a saturação em água submerso por 24 horas. O seguinte passo para finalizar o ensaio é a retirada a pesagem da massa após submersa sem os excessos d'água na superfície do material, seguido pela pesagem de massa hidrostática ( $m_a$ ) com uso de cesto metálico.

Para fins de cálculo é empregado a Equação 2 conforme apresentada abaixo, para obtenção da massa específica do agregado seco de acordo com indicação normativa.

**Equação 2:** Massa específica do agregado seco.

$$d = \frac{m}{m - m_a}$$

Onde:

D é a massa específica do agregado em centímetro cúbico.

$m$  é a massa ao ar da amostra seca em gramas.

$m_a$  é massa em água da amostra em gramas.

A norma especifica que o resultado encontrado deve apresentar uma aproximação de  $0,01 \text{ g/cm}^3$ , para seguir com a indicação do tipo de massa específica determinada. Conforme resultado encontrado é possível alterações na dosagem do traço, que ao decorrer da pesquisa serão discutidos.

### 3.1.1.3 Massa Unitária

Para o ensaio da massa unitária de ambos os agregados empregados no desenvolvimento da pesquisa foi utilizado as recomendações e procedimentos da NBR 45:2006. Conforme orientado para a determinação da massa unitária é necessário o uso de um recipiente cilíndrico com alças, haste de adensamento e balança. De modo prático o procedimento consiste no adensamento do material solto e compactado para retirada das massas, sendo estas a massa do recipiente vazio e a massa do recipiente.

Para definição da massa unitária do agregado é utilizado a Equação 3 conforme norma, empregando os valores de cada massa retirada do conjunto material e recipiente e a massa sem a tara do recipiente, ou seja, desconsiderando a massa do mesmo. Ressaltando que o mesmo procedimento normativo foi empregado para os dois tipos de agregados usados para o desenvolvimento da pesquisa obedecendo especificações da norma.

**Equação 3:** Massa unitária pelo método A, B e C.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V}$$

Onde :

$\rho_{ap}$  é a massa unitaria do agregado em quilogramas por metro cúbico

$m_{ar}$  é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas

$m_r$  é a massa do recipiente vazio, em quilogramas

$V$  é o volume do recipiente, em metros cúbicos

### 3.1.1.4 Cimento

Para a dosagem do traço foi empregado o cimento Portland CP IV-32 RS de fabricação da empresa Poty, sendo considerado de alto desempenho para ambiente de alta agressividade pelo fabricante, assim como baixo calor de hidratação. As caracterizações físicas foram obtidas conforme os procedimentos e métodos das normas técnicas NBR 16605:2017 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica e NBR 11579:2012 – Cimento Portland– Determinação do índice da finura por meio da peneira de 75 $\mu$ m (N<sup>o</sup>200).

Para a determinação da massa específica conforme norma é necessário os materiais e equipamentos a seguir, o frasco volumétrico Le Chatelier de 250 ml, funil de vidro para frasco de Le Chatelier, querosene para diluição e limpeza, balança, recipiente circular metálico, termômetro e 60g do cimento utilizado. Na Figura 19 é apresentado alguns dos equipamentos e materiais usados para os procedimentos do ensaio de massa específica do cimento empregado.

Figura 19: Materiais para determinação de massa específica.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Conforme as especificações normativas NBR 11579:2012 foram adotados os materiais e equipamentos para o ensaio de determinação de índice de finura do cimento peneira de 75 $\mu$ m (N<sup>o</sup>200), fundo para peneira, tampa para peneira e pincel médio. A Figura 20 apresenta tais materiais já citados acima, conforme norma técnica.

Figura 20: Ensaio de Massa específica do cimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Os resultados do material ensaio é de suma importância para a análise da pesquisa, tendo em vista que o processo de carbonatação ocorre justamente com a pasta do cimento e o calor de hidratação que envolve o processo de cura do concreto.

Para obtenção dos dados é necessário realizar a relação do resíduo do cimento na peneira 75 $\mu$ m em gramas multiplicado pelo fator de correção dividido pela massa inicial, onde para o cálculo final deve ser multiplicado por 100 para representar em porcentagem.

### 3.4.2 Dosagem do traço

No desenvolvimento da pesquisa para dosagem do traço foi norteado pela NBR 12655:2015 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento para fins de conhecimentos e desenvolvimento utilizado para possíveis correções de fatores. Para pesquisa foram moldados corpos de provas cilíndricos usando dosagem ABCP/ACI sendo está uma dosagem experimental e adaptação para as especificações dos materiais empregados no Brasil.

Após analisar as propriedades dos agregados e do cimento determinou-se a dosagem para “rodar” o traço. Fazendo uso das NBR NM 67:1998 E NBR 5738: respectivamente para ensaio de *slump test* e moldagem dos corpos de prova cilíndrico. A Tabela 6 a seguir apresenta a descrição de cada material para o uso quantitativo na proporção equivalente a 1kg de cimento para cada agregado e a relação água/cimento.

Tabela 6: Dosagem ABCP/ACI do traço.

Material	cimento	Areia	Brita	água
Consumo(kg)	1	2,2876	2,1814	0,60

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

A Tabela 6 apresenta a dosagem do concreto com o fator água/cimento correspondente a 0,60, que relacionado com a tabela 7 apresentada na norma descreve o concreto produzido próprio para o emprego em concreto armado para regiões com grau de agressividade moderado e para concreto protendido com o grau de agressividade fraco.

Tabela 7: Grau de agressividade relacionado com A/C.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto $\text{kg/m}^3$	CA e CP	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
 CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 12655:2015 adaptado pelo autor, (2020).

Conforme orientação da NBR 67:1998 foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone para conhecimento da consistência do concreto fresco através da medida do seu assentamento como é apresentado na Figura 21 o procedimento da retirada do cone e leitura do abatimento com auxílio da trena.

Figura 21: Retirada do abatimento do concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Para a pesquisa em questão foram moldados 20 corpos de prova cilíndricos nas mesmas quantidades padrão para todos os locais de estudo, com a mesma

dosagem conforme apresenta a Figura 22. O processo de moldagem foi norteado pela NBR 5738:2016 – concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Figura 22: Corpo de prova moldados.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Ressaltando que Figura 22 apresenta somente os corpos de prova que foram colocados para exposição nos locais pré-determinados, além destes foi confeccionado mais uma amostra para o teste resistência a compressão com 28 dias de idade, ou seja, após tempo para a obtenção da resistência máxima características do concreto, além da representação para retirada das fôrmas.

### 3.4.3 Ensaio de Carbonatação

Para o desenvolvimento desta pesquisa, a carbonatação foi analisada por meio de deterioração do concreto com exposição natural, relacionado ao tempo de cura inicial e ao grau de agressividade exposto, através do uso da solução fenolftaleína para determinar a redução do pH, logo o avanço da frente de carbonatação presente.

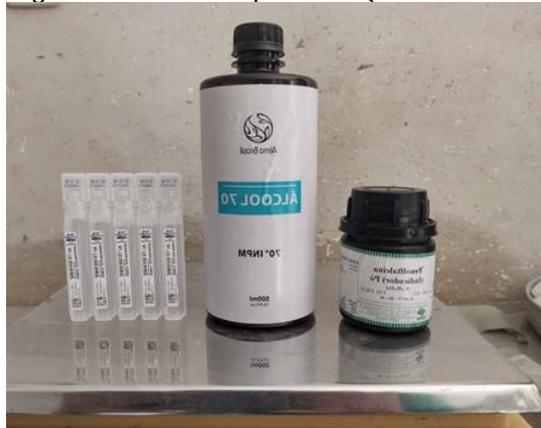
A execução do ensaio de carbonatação segue recomendações da RILEM (1988) – CPC 18 – (*Measurement of hardened concrete carbonation depth*) na qual indica que o procedimento de ensaio deve ser realizado assim que a amostra for rompida para o teste, para que não venha a ocorrer interação com a sua superfície interna com o meio. Para uma maior identificação da redução do pH na amostra é recomendado que haja a espera de 24 horas para a leitura, sendo assim necessário que uma colocação de resina incolor após a secagem do indicador para proteção da amostra, ou seja, não contaminação de gases e outros.

No que desrespeita a medição da área carbonatação e não carbonatação, é indicado pela RILEM que valores abaixo de 5 mm não serão considerados na leitura,

desse modo apenas valores acima ou igual ao indicado considera-se a frente de carbonatação na amostra ou estrutura em análise. Ressaltando que concreto desenvolvido em corpo de prova prismático não deve ser considerados leituras nos cantos e concretos com o emprego de agregados com dimensão máxima muito alta, ou seja, agregados grades a leitura de carbonatação deve ser realizada apenas na pasta do cimento.

Como já mencionado ao longo da pesquisa existem várias maneiras de realizar a leitura da frente de carbonatação no concreto, bem como diversos métodos de ensaio/equipamentos para identificação da redução do pH. Contudo as amostras ensaiadas foram feitas com medidas e recomendações baseadas na RILEM – CPC 18 com o uso de indicador através da solução da mistura de fenolftaleína, água destilada e álcool conforme indicado na Figura 23 a seguir.

Figura 23: Materiais para solução de fenolftaleína.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

O emprego da fenolftaleína para o desenvolvimento da pesquisa foi escolhido devido ao seu baixo custo e prática execução, embora tenha a existência de métodos mais precisos e superiores para identificação da frente de carbonatação em concreto. Ainda assim é possível afirmar segundo Pauletti (2004) que os indicadores químicos são os mais adequados para avaliação de carbonatação embora exista uma diferença na análise por métodos mais avançados.

Segundo as recomendações da RILEM, a solução deve ser preparada e aspergida na superfície do corpo de prova a ser analisado, respeitado o procedimento de limpeza e tempo para iniciar o ensaio. Para iniciar a medição deve ser esperado um determinado tempo para uma melhor visualização da área que sofreu a redução do seu pH e a área que ainda manter o pH em conformidade aceitável.

### 3.5 Resultados e Discussões

Neste capítulo será apresentado os tópicos a acerca dos resultados encontrados de todos os ensaios e procedimentos utilizado nessa pesquisa, de forma que servirão para validar e fomentar o embasamento teórico empregado para o seu desenvolvimento, bem como a comprovação prática das teses apresentadas.

#### 3.5.1 Composição granulométrica

##### a) Composição granulométrica da areia

De acordo com os resultados encontrados da composição granulométrica dos agregados é possível fazer algumas observações e discussões em torno do desenvolvimento da dosagem e a influência no concreto, posteriormente ao fenômeno de carbonatação.

A Tabela 8 apresenta a distribuição granulométrica de acordo com o percentual retido acumulado em cada peneira, ressaltando que conforme norma duas amostras devem ser ensaiadas do mesmo material, contudo quando os resultados apresentam um grau de semelhança alta não há obrigatoriedade na apresentação de ambas.

Tabela 8: Composição da Granulometria da Areia

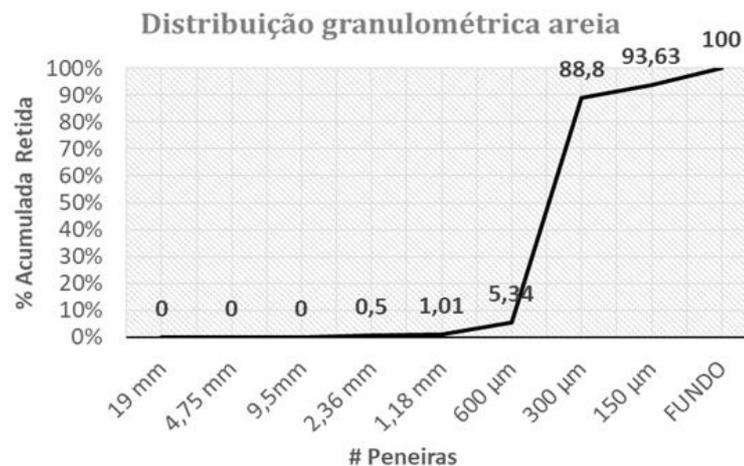
<b>Composição Granulometria da Areia</b>			
Normas de referência: NBR 7211:2019   NBR NM 248:2003			
<b>Peneiras</b>	<b>P. Retido (Kg)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acum.</b>
37,5 mm	0,00	0,00	0,00
19 mm	0,00	0,00	0,00
9,5mm	0,00	0,00	0,00
4,75 mm	0,00	0,00	0,00
2,36 mm	0,01	0,50	0,50
1,18 mm	0,01	0,50	1,00
600 µm	0,09	4,26	5,26
300 µm	1,64	82,21	87,47
150 µm	0,10	4,76	92,23
FUNDO	0,16	7,77	100,00
<b>TOTAL</b>	<b>1,995</b>	<b>100,00</b>	<b>286,47</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Os resultados de material retido e retido acumulado são apresentados em percentuais mediante orientações normativa, como observado na Tabela 8. Durante a realização do ensaio foi observado que o mesmo não apresentou nenhuma anomalia ou material orgânico que pudesse interferir nos resultados e análise.

A composição da curva granulométrica é apresentada no Gráfico 2 abaixo, com o detalhamento e o percentual de material retido e passante em cada peneira. Nota-se que a peneira de 600µm conteve um maior percentual retido, o representa que o material não possui uma uniformidade e que possivelmente irá influenciar no consumo do próprio na dosagem.

Gráfico 2: Curva granulométrica da Areia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

O Gráfico 2 foi obtido através da relação do percentual retido acumulado do material com a abertura da malha de cada peneira, obedecendo o descrito na NBR 7211:2019. Dessa forma é possível a obtenção e análise de outros dados necessários para a caracterização do material, como também sendo fundamental para dosagem do traço de concreto. Mediante apresentação da composição granulométrica como mencionado é possível obter os dados do módulo de finura e dimensão máxima característica da areia, sendo assim a Tabela 9 apresenta respectivamente cada valor referente ao agregado miúdo da composição do concreto.

Tabela 9: Módulo de Finura e Dimensão máxima Característica da areia

<b>Módulo de Finura</b>	<b>2,86</b>
<b>Dimensão Máximo Característica</b>	<b>1,18 mm</b>

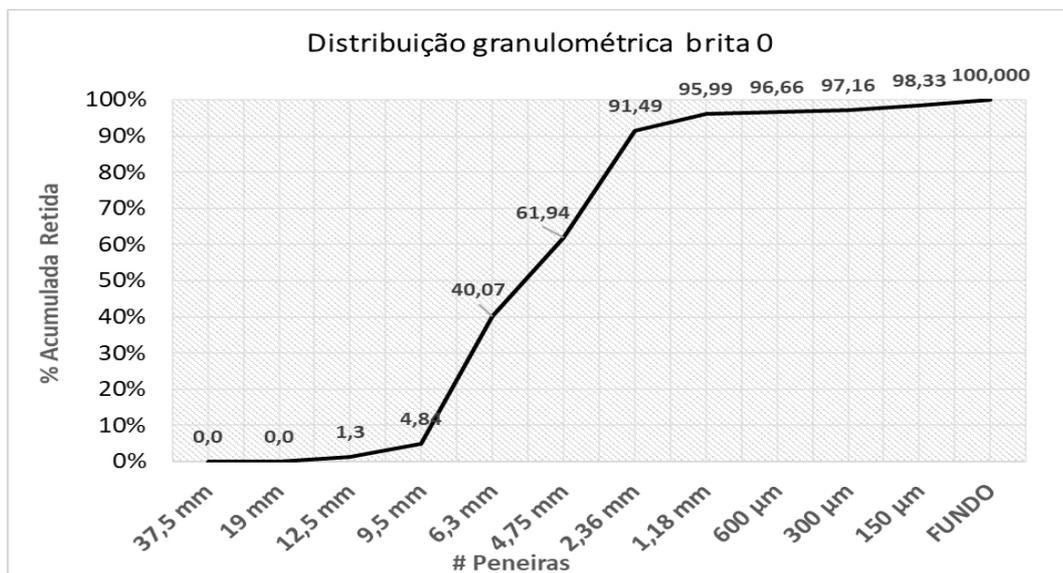
Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Tais resultados são calculados de acordo com as especificações em norma, sendo o módulo de finura correspondente ao valor obtido da somas das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividido por 100, assim como a dimensão máxima característica é a relação da abertura nominal da malha da peneira com o percentual retido acumulado do agregado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

### b) Composição granulométrica da brita 0

Os ensaios necessários para composição granulométrica da brita 0 também foram norteados pela NBR 248:2003, de tal modo que se obteve a seguinte curva granulométrica do material, conforme apresenta o Gráfico 3.

Gráfico 3: Curva granulométrica da Areia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Conforme ilustrado no gráfico o material se apresenta como uma brita uniforme com uma distribuição granulométrica bem gradativa, sendo dessa maneira considerada o compatível com o estabelecido em norma para classificação da mesma.

A Tabela 10 apresenta toda a distribuição conforme material retido e passante no conjunto de peneiras, de maneira que são apresentados os percentuais retidos e retidos acumulados conforme solicita a norma para obtenção de cálculos de módulo de finura e dimensão máxima característica do material.

Tabela 10: Composição Granulométrica da Brita.

<b>Composição da Granulometria da Brita</b>			
<b>Normas de referência: NBR 7211:2019   NBR NM 248:2003</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>P. Retido (Kg)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acum.</b>
37,5 mm	0,000	0,000	0,000
19 mm	0,000	0,000	0,000
12,5 mm	0,040	1,34	1,34
9,5 mm	0,105	3,51	4,84
6,3 mm	1,055	35,23	40,07
4,75 mm	0,655	21,87	61,94
2,36 mm	0,885	29,55	91,49
1,18 mm	0,135	4,51	95,99
600 µm	0,020	0,67	96,66
300 µm	0,015	0,50	97,16
150 µm	0,035	1,17	98,33
FUNDO	0,050	1,67	100,00
<b>TOTAL</b>	<b>2,995</b>	<b>100,00</b>	<b>687,81</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Conforme apresentado para o ensaio de granulometria da brita 0 adotou-se o conjunto de peneira completo, incluindo a serie normal e intermediária. Contudo para fins de cálculo de modulo de finura e dimensão máxima característica foram consideradas apenas as peneiras de serie normal como especifica a NBR 7211:2019.

Logo obteve-se com os resultados adquiridos os seguintes dados da brita 0 mediante Tabela 11 apresentada a seguir. Os dados encontrados serão utilizados posteriormente para o procedimento de dosagem seguindo o método ABCP/ACI como já citado.

Tabela 11: Modulo de Finura e Dimensão Máxima Característica da Brita.

<b>Módulo de Finura</b>	<b>3,89</b>
<b>Diâmetro Máximo Característico</b>	<b>9,5 mm</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Para dosagem do concreto não será necessário do módulo de finura da brita empregada, porém para apresentação da caracterização completa do material é apresentado, obedecendo o mesmo método do agregado miúdo obtidos através da relação do somatório o percentual retido acumulado da série normal dividido por 100.

### 3.5.2 Massa Específica

Fazendo uso da NBR NM 53:2009 e NBR NM 53:2009 foram obtidos dados necessários para o conhecimento da massa específica dos agregados utilizados, como também a utilização da NBR 16605:2017 para massa específica do cimento. Tais dados são de suma importância para análise do comportamento do concreto produzido empregando os materiais ensaiados.

Para encontrar os resultados com os dados do ensaio da massa específica do agregado miúdo adotou-se a Equação 4 descrita a seguir.

**Equação 4:** Massa específica do agregado miúdo.

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

Onde:

M é a massa da amostra seca em estufa (g)

V é a o volume do frasco (cm<sup>3</sup>)

V<sub>a</sub> é o volume de água adicionado ao frasco

M<sub>s</sub> é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)

ρ<sub>a</sub> é a massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>)

Empregado a fórmula com dados do ensaio do agregado miúdo obteve-se o valor da massa específica igual a 2,63 (g/cm<sup>3</sup>), obtendo a recomendação normativa de aceitável devido a variação permitida de 0,02g/cm<sup>3</sup>. A obtenção da massa específica do agregado graúdo adotou as recomendações da NBR 53:2009 da qual obteve-se a valor de 2,77 g/cm<sup>3</sup>, da qual foi calculada utilizando a Equação 5 apresentada a seguir.

**Equação 5:** Massa específica do agregado graúdo.

$$d = \frac{m}{m - m_a}$$

Onde:

$m$  é a massa ao ar em condição saturada (g).

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

Referente a massa específica do cimento foi adotada a NBR 16605:2017 como base para o procedimento de ensaio, bem como para obtenção dos dados. A seguir é apresentado na Equação 6 o meio matemática para encontrar a massa específica do cimento.

**Equação 6:** Massa específica do cimento.

$$\rho = m/V$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica do material (g/cm<sup>3</sup>).

$M$  é a massa do material (g).

$V$  é o volume deslocado pela massa (cm<sup>3</sup>).

Mediante orientação normativa o resultado encontrado deve corresponde a uma única determinação e der ser calculado com aproximação ao milésimo, sendo expresso com duas casas decimais, o que indica que o material ensaiado empregado na dosagem do traço apresenta o valor de 2,83g/cm<sup>3</sup>.

### 3.5.3 Massa Unitária

Em relação aos resultados da massa unitária de cada agregado empregado, como já mencionado adotou-se para os ensaios a norma tecnica NBR 45:2006, na qual especifica os procedimentos para a obtenção de massa unitária solta e compactada e agregados, de maneira que descreve que os resultados não devem apresentar um desvio maior que 1% em relação a média. Logo para os resultados encontrados adotou-se o metodo "A" como já citado, de maneira que foi possível encontrar os valores apresentado na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12: Massa Unitária da Areia e Brita.

<b>Material</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Massa Unitária da Areia	1,746
Massa Unitária da Brita 0	1,534

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Os valores apresentados acima foram obtidos a partir dos procedimentos normativos dos quais fazem referência a retirada da massa na média entre três pesagem do conjunto (material+recipiente) e retirada da massa do recipiente vazio, assim como é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Dados do procedimento de massa unitária.

<b>Areia</b>		<b>Brita 0</b>	
Mass. + Recipiente	Massa do agregado	Mass. + Recipiente	Massa do agregado
17,6	13,1	15,3	10,8
18,1	13,6	16,6	12,1
17,2	12,7	16,2	11,7
<b>Média</b>	13,1	<b>Média</b>	11,5

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Ressaltando que a massa do recipiente corresponde a 4,48 kg e volume 7,53l, sendo que para efeito de cálculos direcionado pela norma deve ser retirado a massa do recipiente, obtendo assim somente a massa do material ensaiado. Resultados de cada local com a carbonatação.

#### 3.5.4 Dosagem

Com todos os resultados dos materiais empregados conforme apresenta a Tabela 14 abaixo, adotou-se o método ABCP/ACI como já descrito no item 3.1.4.2 para dosagem do concreto de referência utilizado para o comparativo de atuação no CO<sub>2</sub> nos locais descritos.

Tabela 14: Dados para dosagem do traço.

<b>Dados</b>	<b>Medida</b>
Dimensão máxima da brita 0	9,5 mm
Módulo de finura da areia	2,8
Massa unitária compactada seca da areia	1,74 (g/cm <sup>3</sup> )
Massa unitária compactada seca da brita 0	1,53 (g/cm <sup>3</sup> )
Massa específica do cimento	2,83(g/cm <sup>3</sup> )
Massa específica da areia	2,63(g/cm <sup>3</sup> )
Massa específica da brita 0	2,77(g/cm <sup>3</sup> )

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Estabelecido os dados necessários, houve também a definição do tipo de cimento empregado, sendo este o CP IV 32 RS POTY como já mencionado, estabelecido também a resistência mecânica aos 28 dias de idade de 25 Mpa, o *slump* de  $120 \pm 20$ , de modo que o preparo obedeça as condições “A” empregando assim um desvio padrão de 4,0 Mpa conforme descrito na NBR 12665:2015.

Dado as condições de controle para dosagem do material é necessário majorar a resistência do concreto, fazendo uso da seguinte Equação 7.

**Equação 7:** Resistência majorada.

$$F_{c28} = F_{ck} + 1,65 \times S_d$$

Onde:

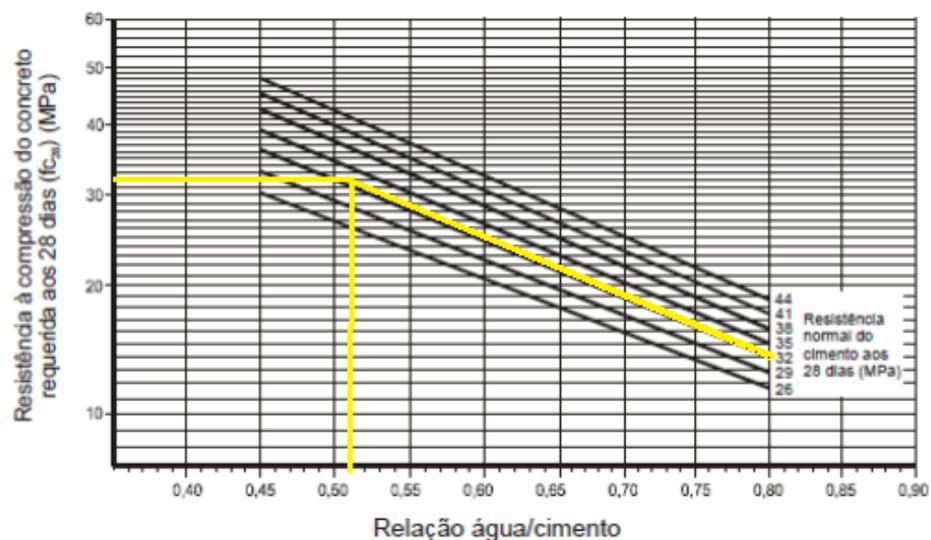
$F_{c28}$  é a resistência adotada para 28 dias de idade.

$F_{ck}$  é a resistência mecânica característica.

$S_d$  é o desvio padrão adotado.

Realizando o cálculo da resistência majorada do concreto, conforme equação 6, chegamos no resultado de 31,60 Mpa aproximadamente 32 Mpa. A curva de Abrams foi utilizada para encontrar a relação de água por cimento (a/c), onde é possível relacionar os valores da resistência majorada aos 28 dias ( $f_{c28}$ ) e a resistência alcançada pelo cimento utilizado neste trabalho, conforme Figura 23.

Figura 24: Curva de Abrams.



Fonte: ABCP/ACI, (2020).

A relação água por cimento representa a proporção de quantidade de água e cimento utilizada no traço, que no caso o valor encontrado utilizando a curva de Abrams foi igual a 0,50. Entretanto na NBR 12655:2015 o valor da relação de água por cimento (a/c) encontrada foi averiguado, onde podemos encontrar uma correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto, sendo que o valor encontrado para a relação de água por cimento (a/c) se encontra dentro das recomendações e pode ser menor ou igual a 0,60. Considerando que quanto maior for fator a/c, menor será o consumo de cimento, foi utilizado o valor de 0,60 de a/c para realização deste trabalho, estando dentro do limite estabelecido pela NBR 12655:2015.

A próxima etapa ao encontrar o fator água/cimento foi utilizar os resultados laboratoriais, especificamente o valor de abatimento ( $120 \pm 20$ ) e o DMC do agregado graúdo (9,5 mm), para obter a previsão de quantidade de água para o consumo, encontrando-se um valor igual a 230 l/m<sup>3</sup>, conforme Tabela 15.

Tabela 15: Consumo de água x slump test.

<b>Slump Test</b>	<b>Consistência</b>	<b>Brita 0</b>
		<b>9,5 mm</b>
<b>50±10 mm</b>	1	220
<b>80±20 mm</b>	2	225
<b>120±20 mm</b>	3	230
<b>140±20 mm</b>	4	240

Fonte: Adaptado de Castro, (2016).

De acordo com a caracterização da brita utilizada é possível relacionar com o meu abatimento requerido e o meu consumo de água, de que que apresenta o meu dado de consistência conforme a Tabela 15 apresenta do concreto produzido.

Após a determinação aproximada do consumo de água, foi possível calcular o consumo de cimento, resultando em 383,33 kg/m<sup>3</sup>. Foi possível obter o resultado do consumo de cimento após fazer a divisão do consumo de água (230 l/m<sup>3</sup>) com o fator água/cimento.

Em seguida, determinamos o consumo dos agregados. Os valores resultantes de experimentos realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) de volumes compactados dos agregados graúdos por metro cúbico de concreto, relacionado à dimensão máxima dos agregados, correlacionando o módulo de finura do agregado miúdo com a dimensão máxima do agregado graúdo, chegaremos

ao valor do volume aparente compactado de agregado seco, igual a 0,545 dm<sup>3</sup>. Com isso, chegaremos ao resultado de consumo de agregado graúdo de valor aproximado igual a 836,20 Kg/m<sup>3</sup>. Foi possível obter o resultado do consumo de agregado graúdo após fazer a multiplicação da massa unitária do agregado graúdo compactado com o volume aparente compactado do agregado.

Com o consumo de agregado graúdo (Cb) determinado, o próximo passo foi determinar volume absoluto de areia (Va) para posteriormente encontrar o consumo de agregado miúdo (Ca), sendo que “Va” é obtido pela diferença entre a soma dos volumes absolutos dos demais constituintes já calculados. Chegaremos ao valor de volume de agregado miúdo aproximado igual a 333,43 dm<sup>3</sup> e com isso o consumo de areia no concreto possui o valor aproximado igual a 879,93 kg/m<sup>3</sup>, após multiplicar a massa específica da areia com o seu respectivo volume.

Com todos os consumos calculados, a última etapa é determinar o traço, sendo que esse os valores em massa para o cimento, areia, brita e água, são encontrados dividindo cada consumo encontrado por o consumo de cimento, conforme Tabela 16.

Tabela 16: Traço produzido

<b>CONSUMO</b>			
<b>CIMENTO</b>	<b>AREIA</b>	<b>BRITA 0</b>	<b>ÁGUA</b>
383,33	879,93	836,2	230
<b>TRAÇO</b>			
1	2,2876	2,1814	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

A Tabela 16 expressa o traço produzido nesse trabalho e vale lembrar que além dos ensaios da frente de carbonatação, dois exemplares serão rompidos ao completar 28 dias de cura para verificar se a resistência à compressão desejada de 25 Mpa foi alcançada.

### 3.5.5 Ensaio de Carbonatação

Para o primeiro local de observação, sendo este o viaduto da COHAMA, o efeito da carbonatação nas amostras exposta foram de uma frente carbonada variante entre os dois corpos de prova - CP's, conforme apresentado a seguir.

Para a primeira amostra ensaiada pertencente ao primeiro local de exposição em área aberta apresentaram uma frente de carbonatação de valor 3,72 mm no CP-1 conforme a Figura 24 e no CP-2 a frente de carbonatação de 3,75mm.

Figura 25: Amostra viaduto da COHAMA – Espaço aberto.

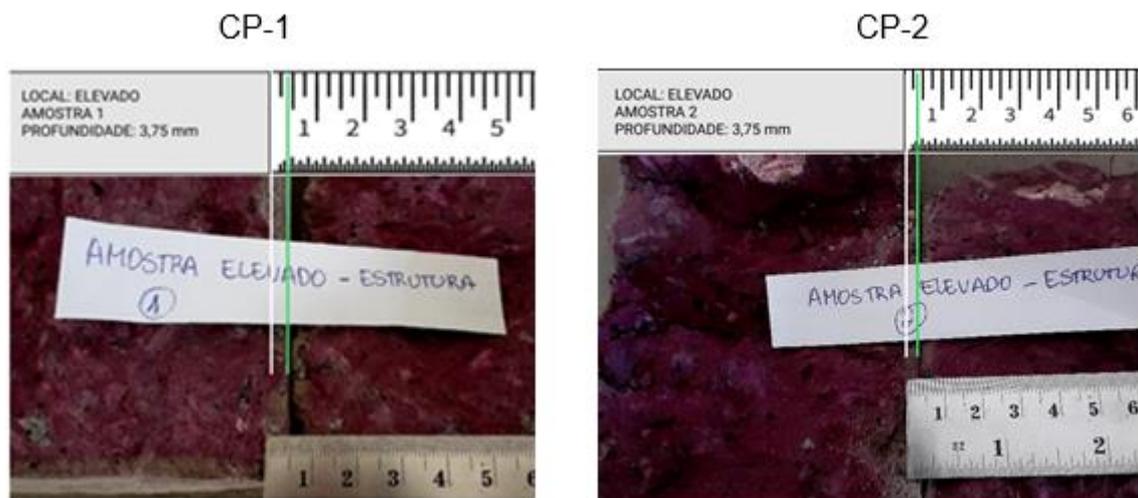


Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

É possível afirmar que ambas as amostras apresentam resultados aproximados, comprovando que o concreto produzindo exposto na mesma duração de tempo e no mesmo local de estudo se apresentam de maneira uniforme na análise de profundidade da frente de carbonatação, ressaltando assim para fins de cobertura de ferragem no local.

No mesmo local como já citado acima foram depositados mais uma amostra com dois corpos de prova, no entanto a amostra foi colocada em um espaço mais confinado em comparação com a anterior. Conforme a Figura 25, o resultado da frente de carbonatação dos CP's de tal amostragem apresentou a mesma profundidade correspondente a 3,75 mm.

Figura 26: Amostra do Viaduto da COHAMA – Espaço confinado.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Nesse caso é correto afirmar que a amostra não apresentou nenhuma diferença entre os corpos de prova, devido aos resultados relacionados à profundidade de frente de carbonatação em ambos serem iguais, de modo a considerar o valor para classificação do local quanto a concentração do  $\text{CO}_2$  no nível de pesquisa.

Para o segundo ponto de coleta de dados e estudo para a pesquisa, foram distribuídos da mesma maneira que o local anterior as amostras de mesma dosagem, de forma que foi uma das amostras divididas em dois pontos com dois CP's por ponto. Como já mencionado acima o segundo local também se trata de um viaduto, onde as amostras foram depositadas nas extremidades da estrutura. A Figura 26 apresenta a medição da profundidade da frente de carbonatação no primeiro ponto no local, onde os dois CP's apresentaram a mesma aproximação na leitura do avanço na frente de carbonatação, correspondente a 3 mm de profundidade de atuação no  $\text{CO}_2$  no concreto.

**Figura 27:** Amostra do Viaduto do café – Ponto 1.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

O resultado apresentado na Figura 26 comprova que os dois CP's colocados nesse ponto estão totalmente uniformes entre si, de maneira que a mesma frente de carbonatação é atuante em ambos. Assim como os demais apresentados anteriormente com uma frente de carbonatação esse valor deve ser considerado para fins de cobrimento de armadura, mesmo que inferior.

Para o segundo ponto com os CP's expostos na outra extremidade da estrutura, apresentou-se o resultado igualmente o ponto anterior entre as profundidades dos CP's coletados. Conforme apresentado na Figura 27 o CP-1 a frente de carbonatação corresponde ao valor de 3mm, igualmente aproximado ao CP-2 na mesma figura, que apresenta de 3 mm.

Figura 28: Amostra do Viaduto do café – Ponto 2.

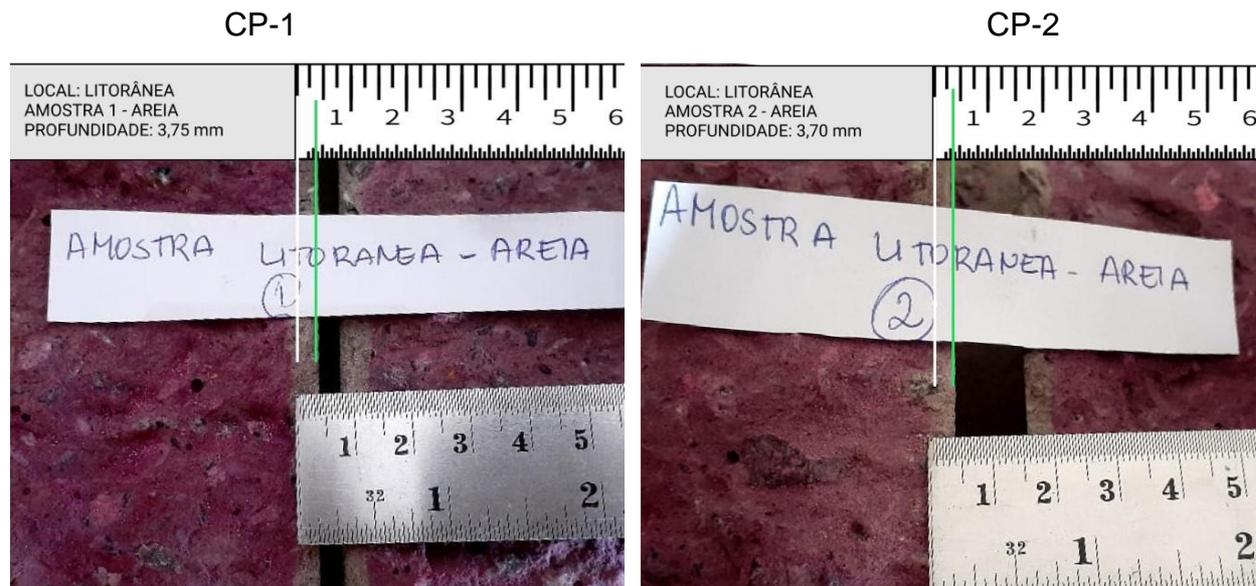


Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Embora os resultados da amostra na estrutura do viaduto do café tenham se mostrado iguais em questão de frente carbonatação em ambos, vale ressaltar que durante o período de exposição o ponto 1 foi depositado em um local sem cobertura, ou seja, sem proteção de possíveis chuvas. Os CP's deixados na outra extremidade da estrutura denominado de ponto 2 ficou sobre proteção de coberta. Embora seja muito semelhante as leituras de profundidade de carbonatação nos corpos de prova, é válido chamar atenção para o CP-2 no ponto 2, que apresenta um leitura de pouca visibilidade na superfície, isso se dar pela pouca atuação continua do  $\text{CO}_2$  e abertura do poros, contudo houve o avanço do fenômeno de carbonatação.

O próximo local de análise trata-se de uma área diferente da demais estudados, pois é um local com as influências do mar mais elevadas e atuantes, sendo este já citado como o Espigão costeiro localizado no bairro da Ponta D'areia. No local foram seguidos os mesmos padrões de análise dos demais locais, com duas amostras em pontos distintos e cada com dois corpos de prova. A primeira amostra foi colocada em uma área seca e livre de respingos da maré e sem contato com a água salgada diretamente denominada de amostra litorânea-AREIA. Conforme a Figura 28 o CP-1 e o CP-2 apresenta uma profundidade muito semelhante, sendo o CP-1 com o valor de 3,75mm e o CP-2 com uma profundidade de 3,70mm.

Figura 29: Amostra litorânea – Areia.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

A frente de carbonatação em ambos conforme apresentado na Figura 28 se mostra bem visível para leitura de profundidade, além de apresentarem um avanço linear em toda lateral do corpo de prova, de maneira não observada em todas as amostras ensaiadas. De todo modo ainda foram expostos durante o mesmo período de tempo que as demais, além de pertencer a mesma dosagem do traço, destacando que o tempo de exposição foram de 28 dias após desmoldagem para todas, o que corresponde ao tempo de retirada da fôrma em construções de modo geral.

Ao falar sobre o grau de agressividade correlacionado com os locais, houve a necessidade de exposição de uma amostra em um local considerado semi-urbano para fins comparativos. A amostra permaneceu exposta o mesmo tempo que as demais no local descrito no item 3.2, conforme apresentado na Figura 29 o corpo de prova não apresentou profundidade nenhuma em relação ao avanço da frente de carbonatação.

Figura 30: Local Semi-Urbano.

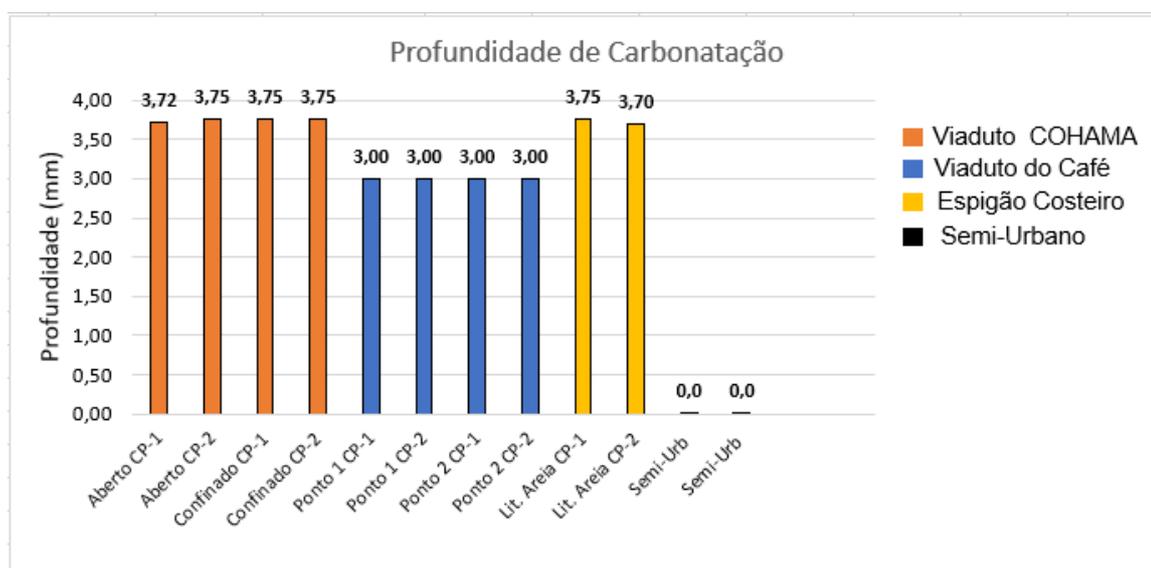


Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Discorrendo sobre a amostra de exposição no local semi-urbano é possível associar o ocorrido com a pouca influência do local do CO<sub>2</sub> devido ao pouco fluxo de circulação de veículos e fatores que proporciona o fenômeno. Destacando que tanto as amostras anteriores pertencem à mesma dosagem de concreto, logo não há fatores distintos em sua produção física e química, com exceção de possível alteração mecânica devido ao adensamento manual.

A seguir é apresentado um comparativo no Gráfico 4 em todas as amostras ensaiadas de maneira mais visível sob atuação do CO<sub>2</sub> de acordo com cada localidade.

Gráfico 4: Todas as amostras de acordo com profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Como identificado no gráfico não houve grandes variação de profundidade de frente de carbonatação nos corpos de provas entre as localidades, assim como houve casos que em todos os CP's do local tiveram a mesma medição de profundidade, como é o caso das amostras do viaduto do café. O Gráfico 4 ilustra o comportamento do grau de agressividade do ambiente entre os locais estudados de acordo com o concreto produzido para pesquisa. É notável a aproximação de profundidade do avanço da frente de carbonatação em todos os locais e a igualdade entra as amostras deixadas no Viaduto do Café.

#### 3.4.6 Ensaio de Resistencia a compressão

Para a comprovação de resistência a compressão baseado na dosagem elaborada e averiguação da resistência alcançada aos 28 dias, foi realizado o acompanhamento de ruptura dos corpos de prova produzido para o estudo, empregada a NBR 5739:2018.

Adotou-se todas as recomendações descritas para o ensaio de resistência a compressão em corpo de prova cilíndrico de concreto, como tal emprego de Neoprene, paquímetro, prensa calibrada e a tolerância permitida para casa idade de ensaio, conforme apresentado abaixo na Tabela 17.

Tabela 17: Tolerância permitida para execução do ensaio de compressão.

<b>Idade de ensaio</b>	<b>Tolerância permitida h</b>
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

NOTA Para outras idades de ensaio, a tolerância deve ser obtida por interpolação.

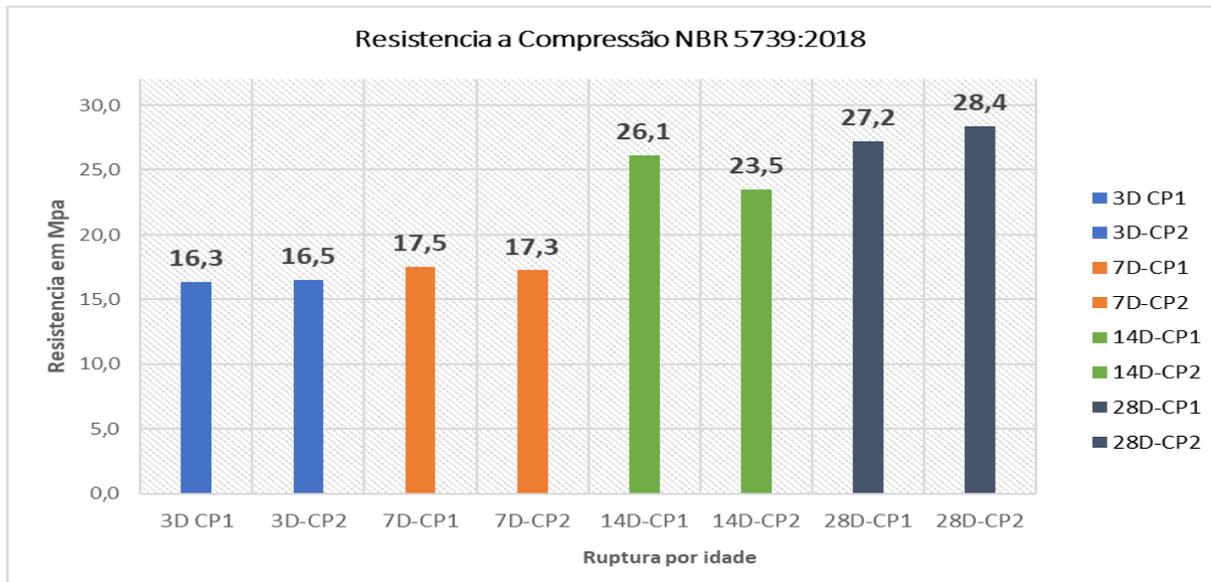
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5739, (2018).

Todos os corpos de prova rompidos obedeceram às tolerâncias especificadas acima de maneira a obter os seguintes resultados, conforme apresentado no APÊNDICE 1. As amostras usadas para obtenção de dados de ruptura foram

ensaiadas nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias com a prova e contra prova como recomenda a norma técnica.

O Gráfico 5 apresenta as resistências alcançada com as amostras de acordo com as idades citadas. Destacando a evolução de todas as amostras ilustradas no gráfico e o comparativo entre os dois corpos de prova por idade. O concreto produzido aos 28 dias apresentou a resistência esperada de acordo com a dosagem.

Gráfico 5: Resultados da resistência a compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2020).

Como apresentado no Gráfico 5 as rupturas de cada idade acompanharam o resultado aproximado entre as amostras de maneira a evoluir de acordo com o avanço das idades. Apenas a idade de 14 dias apresentou uma variação, sendo essa variação justificada pela norma com a tolerância entre prova e contra prova, além do destaque do comportamento do concreto frente ao ensaio de resistência a compressão, onde o mesmo se apresenta de forma contínua e crescente.

## 4 CONCLUSÃO

A pesquisa apresentada foi desenvolvida através do comparativo de atuação do CO<sub>2</sub> em amostra de corpo de prova cilíndrico de concreto, relacionado ao processo de carbonatação natural com exposição em localidades distintas aos 28 dias após desmoldagem, empregando os materiais usuais da região afim de apresentar um comparativo com as construções de modo geral.

Com os resultados obtidos de cada localidade de exposição foi possível observar o processo de avanço na frente de carbonatação na medição de profundidade entre as amostras produzidas, levando em consideração que todas apresentam as mesmas condições de fabricação e dosagem dos materiais. De modo que foi observado dentre as amostras que houve locais em que os CP's apresentaram as mesmas medições de profundidade da ação do CO<sub>2</sub>.

Dentro das localidades estudadas houve uma maior atuação do CO<sub>2</sub> nas amostras deixadas no viaduto da COHAMA e viaduto do café, comparada as outras localidades se mostraram muito similar. Assim como as demais amostras estudadas, as deixadas na estrutura de concreto do viaduto da COHAMA foram divididas em dois pontos no local, do qual um ficou em ambiente aberto e o outro em um espaço confinado.

Como observado o CP-1 deixado em ambiente aberto apresentou uma leitura de frente de carbonatação maior que os demais, maior até mesmo que o CP-2 que teve o mesmo tempo de exposição e no mesmo local. Diante disso, é possível concluir que o CP-1 da amostra deixada em local aberto pode não ter recebido um bom adensamento em sua moldagem, e por conta disso apresentou em sua estrutura uma porosidade mais elevada que os demais, apresentando assim a condição propícia para entrada do dióxido de carbono no concreto de maneira a reagir com a pasta do cimento.

Além da observação realizada na amostra exposta no viaduto da COHAMA, a amostra deixada na estrutura do viaduto do café também apresentou uma frente de carbonatação relevante. Contudo os corpos de prova expostos em tal local

apresentaram a mesma frente de carbonatação, correspondente a aproximação de 3mm entre todos. Logo, conclui-se que a concentração de CO<sub>2</sub> adentrou de maneira uniforme em todos os CP's e que as condições estruturais no concreto são as mesmas.

Além da observação realizada na amostra exposta no viaduto da COHAMA, a amostra deixada na estrutura do viaduto do café também apresentou uma frente de carbonatação relevante. Apesar disso os corpos de prova expostos em tal local apresentaram a mesma frente de carbonatação, correspondente a aproximação de 3mm entre todos. Sendo assim a concentração de CO<sub>2</sub> adentrou de maneira uniforme em todos os CP's e que as condições estruturais no concreto são as mesmas.

É válido destacar que somente a amostra do viaduto de café apresentou essa condição, pois como observado a amostra deixada no espigão costeiro separada em dois pontos de observação apresentou variação nas profundidades apresentada referente a carbonatação.

Como observado os corpos de prova ensaiados apresentam uma variação de carbonatação entre si, de modo que o maior valor de medição de profundidade é correspondente ao CP-1 exposto em local seco e sem ação de respingo da maré, com 3,75mm de carbonatação no concreto.

Por fim para conclusão da pesquisa é notório que a frente de carbonatação nas amostras expostas apresentaram uma variação entre as localidades de exposição, diante disso é possível afirmar que essa variação apresentada pode ser provocada pelo fator que envolve a produção do concreto, como o adensamento na forma que leva a não retirada do ar incorporado gerando porosidade. Além disso, é correto discorrer que apenas a localidade que foi exposta na estrutura do viaduto do café apresentou um resultado satisfatório para pesquisa, levando em consideração a aproximação da profundidade em todos os corpos de prova exposto no local.

Embora os demais locais tenham apresentado uma profundidade de medição da área carbonatação variantes, os resultados serviram para possíveis futuras pesquisas, bem como o conhecimento do comportamento do concreto nos seus 28 dias de idade exposto em condições adversas. Todavia não é viável considerar os resultados insatisfatórios ou não aceitáveis, considerando que a pesquisa visa apresentar um comparativo entre localidade com diferentes agressividades relacionado com o fenômeno de carbonatação no concreto.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP): **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, Boletim Técnico BT-106, 2002, 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Abnt, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Abnt, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Abnt, 2015. 9 p. 97

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Abnt, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 4 p.

BAUER L.A.F. **Materiais de construção**, Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1994, 5<sup>o</sup> edição v.2

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997.

CARMONA, Thomas Garcia. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CADORE, William. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobertura de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CORSINI, Rodnei. **Projetos de estruturas de concreto expostas a ambientes quimicamente agressivos exigem atenção especial para assegurar desempenho e vida útil à edificação**. Fortaleza: Pini, 2013.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GENTIL, VICENTE **Corrosão**. 4<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 341p.

GOMES, Nilvado de Almeida. **Estrutura de concreto armado interrompidas em ambiente urbano: Avaliação da carbonatação à luz da recomendação da NBR 6118:2003**. 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **CONTRIBUICAO AO ESTUDO DA CORROSAO EM ARMADURAS DE CONCRETO ARMAO**. 1993. 248 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 1993

HELENE, Paulo Roberto do Lafo *et al.* **Patologia das construções: uma especialidade na engenharia civil**, 2011.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Santa Maria, 41p. 1999.

LAPA, José S. **Patologia, Recuperação e Reparo da Estruturas de Concreto**. 2008. 56. Monografia Especialização em Construção Civil, Univ. Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

LIMA, Maryangela G.; LENCIONI, Julia Wippich. **A problemática da corrosão e da durabilidade das construções em ambientes agressivos – o caso do ambiente marinho urbano e das estruturas de concreto**. 2004. 1º Simpósio internacional de ciências integradas da UNAERP campus guarujá, 2004.

MOREIRA, Jairo Dutra. **Verificação de profundidade de carbonatação em estruturas de concreto – estudo de caso**. 2016. 40 f. Monografia (bacharel em Engenharia Civil) Departamento de Construção Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. 191 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAULETTI, Cristiane; POSSAN, Edna; MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. 2006,. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RAISDORFER, J. W.; SOUZA, D. J.; KRUCHELSKI, N.; NIKKEL, S.; TORRE, E. M.; LENCZUK, B.T.; MEDEIROS, M. H. F. **CARBONATAÇÃO – PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DAS OBRAS DE ARTES ESPECIAIS**. 2015, 14 f. 44ª Reunião Anual De Pavimentação, 18 a 21 de agosto de 2015. Foz do Iguaçu, 2015.

RILEM **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. RILEM CPC-18 Recommendation. Materials and Structures Journal, Vol. 21, Number 126, p. 453 – 456 1988.

SANTOS, Camila Freitas dos. **Patologia em estruturas de concreto armado**. 2014. 91 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

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

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

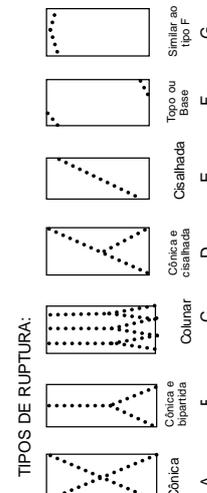
TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria.

TRINDADE, Diego dos Santos. **Patologia em estruturas de concreto armado**. 2015. 88 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

VALENÇA, Daniel Victor da Costa. **Análise da deterioração do concreto por carbonatação natural com exposição às classes de agressividade ambiental marinha e respingos de maré**. 2016. 75 f. Monografia (Curso de Engenharia Civil) Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

## APÉNDICES

**APÊNDICE 1:** Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova.

CONCRETO - ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICO - NBR 5739:2018											FCK (Mpa)		25																	
AMOSTRA	CP N°	DATA DA MOLDAGEM	TRAÇO (kg)	DIÂMETRO (mm)	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CORPO DE PROVA		CARGA RUPTURA (Tf)	TENÇÃO RUPTURA (Mpa)	TENÇÃO DO EXEMPLAR (Mpa)	% PARA ALCANÇAR FCK	TIPO	IDADE (DIAS)	DATA DE RUPTURA															
							RETIFICADO	NEOPRENE																						
AMOSTRA 3D	1	28/09/20		98,35	99,25	201,55		X	12,78	16,3	16,54	66%	D	3	01/10/20															
	2			98,42	98,50	201,29		X	12,84	16,5																				
AMOSTRA 7D	1	28/09/20		99,71	98,78	200,12		X	12,80	16,2	16,23	65%	C	7	05/10/20															
	2			100,01	99,15	201,04		X	11,10	14,0																				
AMOSTRA 14D	1	28/09/20		98,52	99,51	200,41		X	20,52	26,1	26,13	105%	C	14	12/10/20															
	2			99,12	99,64	200,06		X	18,59	23,5																				
AMOSTRA 28D	1	28/09/20		100,12	99,55	200,10		X	21,74	27,2	28,37	113%	D	28	26/10/20															
	2			99,78	99,15	199,68		X	22,48	28,4																				
EQUIPAMENTOS		OBSERVAÇÕES:																												
PRENSA: HD-100T		ALUNO: Adriele Rodrigues Gomes																												
PAQUÍMETRO: PQ - 03		ORIENTADOR: Prof. Esp. Ratael Walachinski																												
		TIPO DE RUPTURA:																												
																														
		TOLERÂNCIA																												
		<table border="1"> <tr> <td>IDADE</td> <td>1 dia</td> <td>30 min</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3 dias</td> <td>2 horas</td> </tr> <tr> <td></td> <td>7 dias</td> <td>6 horas</td> </tr> <tr> <td></td> <td>28 dias</td> <td>24 horas</td> </tr> <tr> <td></td> <td>63 dias</td> <td>96 horas</td> </tr> </table>														IDADE	1 dia	30 min		3 dias	2 horas		7 dias	6 horas		28 dias	24 horas		63 dias	96 horas
IDADE	1 dia	30 min																												
	3 dias	2 horas																												
	7 dias	6 horas																												
	28 dias	24 horas																												
	63 dias	96 horas																												

Fonte: O autor, (2020).

## ANEXOS

ANEXO - 1: Porcentagem de Plágio.

## Resultado da análise

Arquivo: ADRIELE RODRIGUES GOMES - P1 - TCC2 - VERSÃO FINAL.doc

---

### Estatísticas

**Suspeitas na Internet: 10,78%**

Percentual do texto com expressões localizadas na internet .

---

**Suspeitas confirmadas: 4,46%**

Percentual do texto onde foi possível verificar a existência de trechos iguais nos endereços encontrados .

---

**Texto analisado: 80,73%**

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.

---

Fonte: Plagius - Detector de Plágio 2.6.9, (2020).