

**UNICAP - Universidade de Católica de Pernambuco**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Mestrado**

**INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUO DE VIDRO  
NO CONCRETO CONTAMINADO POR ÍONS  
CLORETO, ÍONS SULFATO E CO<sub>2</sub>.**

Recife, Dezembro de 2019.



**UNICAP - Universidade Católica de Pernambuco**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Mestrado**

**GÊNOVA GABRIELA OLIVEIRA DE  
PAULA ROCHA**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil pela Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP.

Recife, Dezembro de 2019.

Gênova Gabriela Oliveira de Paula Rocha

**INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUO DE VIDRO  
NO CONCRETO CONTAMINADO POR ÍONS  
CLORETO, ÍONS SULFATO E CO<sub>2</sub>.**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de Mestre em Tecnologia da  
Construção em Engenharia Civil pela Universidade  
Católica de Pernambuco - UNICAP.

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2019.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Professora Dr<sup>a</sup>. Eliana Cistina Barreto Monteiro

---

Professor Dr<sup>o</sup>. Ângelo Just da Costa e Silva

---

Professor Dr<sup>o</sup>. João Manoel de Freitas Mota

Dedico esta conquista aos Meus Pais, Minha Irmã e Meu Amado Esposo que juntos formam a maior e melhor torcida que eu poderia ter, sendo a substância que me nutri de energia e ânimo para seguir em frente diariamente.

Dedico especialmente esta pesquisa a todas as mulheres que brilhantemente fazem ciência em nosso país, todas aquelas que têm o dom de ser: filhas, irmãs, esposas, mães, amigas, professoras, pesquisadoras... e tanto contribuem para a evolução da educação e da ciência no Brasil.

*“Uma criança, um professor, uma caneta e um livro podem mudar o mundo. A educação é a única solução”.*

Malala Yousafzai

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus pais, *Lúcia de Fátima* e *José Valdir*, que me educaram fortalecendo minhas habilidades e capacidades, me fazendo acreditar que posso chegar longe sem jamais esquecer o ponto de partida. Minha querida irmã *Penélope de Paula*, que hoje compartilhamos conhecimento e dialogamos sobre as “flores e espinhos” de nossas profissões, sempre nutrindo a admiração recíproca que temos entre nós.

Agradeço ao meu amantíssimo esposo, *Leduar Rocha*, que além de admirador e incentivador, sempre reconheceu meu potencial e aptidões, e que com discursos encorajadores me impulsiona a sonhar mais alto, a acreditar que é possível. Que diuturnamente é generoso em respeitar minha rotina de estudo, leituras, pesquisa e ensaios. E acima de tudo, por estar ao meu lado em todos os momentos desse sonho que se torna concreto agora.

Aos professores e a Universidade Católica de Pernambuco o meu ***muito obrigada***, aos mestres e doutores por suas contribuições massivas que me nutriram de tantas informações a ponto de eu jamais sentir-me só nesta caminhada. Em especial a orientadora *Doutora Eliana Monteiro* que tão gentil e generosamente adotou minha pesquisa e me apresentou parceiros importantes para o sucesso dos ensaios e fase experimental. Além de contribuir com a ciência, engenharia e servir de inspiração para muitos alunos. Ao coorientador *Professor Doutor Fuad Zarzar*, que me permitiu aprofundar o conhecimento através de ensaio pioneiro no Nordeste e pela oportunidade de aprender com suas pesquisas, publicações e tão vasta experiência.

Aos parceiros de trabalho que foram parte fundamental dos ensaios e experimentos, colaborando prosperamente em diversas etapas do processo. Meu agradecimento a Isabelle Vasconcelos, Carlos Fernando Nascimento, Rayssa da Silva, Nathan Bezerra, Agostinho Marinho, Thaís Silva, aos Laboratoristas Washington, Glaiser e Erick Lopes.

A Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco, pela oportunidade de utilizar os recursos e estrutura do laboratório de materiais e câmara de carbonatação acelerada.

Ao *Senhor Deus* que me dá ânimo, fé, tranquilidade, vigor e forças para lutar diariamente. Sendo meu combustível, meu pilar forte, minha estrutura sólida, minha fundação

# Resumo

**A**s estruturas de concreto têm seu desempenho diretamente relacionado com a conservação das propriedades mecânicas e propriedades vinculadas com a durabilidade. No tocante à durabilidade, é possível citar a ação de três agentes capazes de influenciar a redução de vida útil, como os *Íons Cloreto* que comprometem a capacidade de carga do concreto armado através da corrosão de armaduras; os *Íons Sulfatos* considerados os agentes químicos mais agressivos, podendo ser encontrados diluídos na água de solos; e o *Gás Carbônico (CO<sub>2</sub>)* que é capaz de penetrar nos poros agindo como redutor do Ph iniciando um processo de Carbonatação. Uma solução importante para mitigar o ingresso destes agentes agressivos nas estruturas de concreto, é a utilização traços bem dosados compostos por cimento Portland e pozolanas, que são capazes de interagir com os compostos do cimento melhorando o seu desempenho. Neste contexto, pesquisas e projetos na construção civil têm utilizado os resíduos de vidro como alternativa ao agregado miúdo e como adição, o que favorece a destinação sustentável para o resíduo e redução do consumo dos demais materiais, quando utilizado em substituição parcial. Nesta pesquisa, os resultados obtidos com a utilização do resíduo de vidro demonstrou que o material utilizado não age como mitigador frente aos ataques químicos, porém não age como fator que facilite a penetração dos ataques. Diante do exposto, esta pesquisa tem por objetivo analisar a influência do uso do resíduo de vidro proveniente de garrafas utilizadas na Ilha de Fernando de Noronha, utilizado no concreto como substituição parcial do agregado miúdo nas porcentagens de 0 %, 15 % e 30 %, que foram submetidos aos ensaios de: Penetração de íons cloreto por meio de ciclos de secagem e imersão parcial, Penetrabilidade de íons cloreto baseado na Carga Passante norma ASTM C 1202/2017, Indução acelerada da penetração de íons sulfato por meio de imersão total e Aceleração de Carbonatação em câmara de CO<sub>2</sub>. Para o concreto no estado fresco, foi realizado o ensaio massa específica, já no estado endurecido, os concretos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão.

**Palavras-chave:** Desempenho, Íons Cloreto, Íons Sulfatos, Carbonatação, resíduo de vidro.



# Abstract

Concrete structures have their performance directly related to the conservation of mechanical properties and properties linked to durability. Regarding durability, it is possible to mention the action of three agents that can influence the reduction of life, such as Chloride ions that compromise the load capacity of reinforced concrete through corrosion of reinforcement; Sulfate ions considered the most aggressive chemical agents and may be found diluted in underground water; and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) that is able to penetrate the pores acting as a Ph reducing agent initiating a carbonation process. An important solution to mitigate the ingress of these aggressive agents into concrete structures is the use of well-dosed traces composed of Portland cement and pozzolans, which are able to interact with cement compounds improving their performance. In this context, research and projects in construction have used glass waste as an alternative to fine aggregate and as an addition, which favors the sustainable disposal of the waste and reduction of the consumption of other materials, when used in partial replacement. In this research, the results obtained with the use of glass residue showed that the material used does not act as a mitigator against chemical attacks, but does not act as a factor that facilitates the penetration of the attacks. Given the above, this research aims to analyze the influence of the use of glass waste from bottles used in Fernando de Noronha Island, used in concrete as partial replacement of fine aggregate in the percentages of 0%, 15% and 30%, which were subjected to the tests of: Penetration of chloride ions through drying and partial immersion cycles, Penetration of chloride ions based on ASTM C 1202/2017 Passing charge, Accelerated induction of sulfate ion penetration by full immersion and Acceleration Carbonation in a CO<sub>2</sub> chamber. For fresh concrete, the specific mass test was performed, while in the hardened state, the concrete was submitted to the compressive strength tests.

**Keywords:** Performance, Chloride ions, Sulfate ions, Carbonation, Glass residue.

# Sumário

i	Índice de Figuras .....	15
ii	Índice de Tabelas .....	17
	<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>19</b>
1.	<b>Introdução .....</b>	<b>19</b>
1.1.	<b>Justificativa e importância do tema.....</b>	<b>19</b>
1.2.	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>21</b>
1.3.	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>21</b>
1.4.	<b>Estruturação da Pesquisa .....</b>	<b>22</b>
	<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>24</b>
2.	<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>24</b>
2.1.	<b>Concreto: conceito, composição e ataques químicos.....</b>	<b>24</b>
2.1.1.	<b>Componentes do concreto .....</b>	<b>26</b>
2.1.1.1.	<b>Aglomerante .....</b>	<b>26</b>
2.1.1.2.	<b>Relação Água/Cimento .....</b>	<b>26</b>
2.1.1.3.	<b>Agregados .....</b>	<b>27</b>
2.1.1.4.	<b>Aditivos .....</b>	<b>28</b>
2.2.	<b>A Utilização de Resíduo de Vidro no Concreto .....</b>	<b>29</b>
2.2.1.	<b>O Vidro no Brasil.....</b>	<b>29</b>
2.2.2.	<b>Conceito e Composição.....</b>	<b>30</b>
2.2.3.	<b>Aplicação do resíduo de vidro na construção civil .....</b>	<b>31</b>
2.3.	<b>Durabilidade e Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado ...</b>	<b>33</b>
2.4.	<b>Manifestações Patológicas nas estruturas de concreto .....</b>	<b>36</b>
2.4.1.	<b>Origens.....</b>	<b>37</b>

2.4.2.	Sintomas.....	38
2.4.3.	Mecanismos .....	39
2.4.4.	Causas .....	40
2.4.5.	Ações Mecânicas .....	41
2.4.6.	Ações Físicas.....	42
2.4.7.	Ações Químicas .....	42
2.4.8.	Ações Biológicas .....	43
2.5.	Processo de Corrosão das armaduras e do Concreto.....	43
2.5.1.	A Corrosão como Patologia: Aspectos gerais.....	43
2.5.2.	Passivação das armaduras .....	46
2.5.3.	Ação dos Íons Cloretos no Concreto Armado .....	48
2.5.4.	Ação dos Íons Sulfatos no Concreto Armado.....	51
2.5.5.	A Ação do CO <sub>2</sub> no Concreto Armado .....	53
Capítulo 3	.....	56
3.	<b>Materiais e Métodos: Procedimento Experimental</b> .....	56
3.1.	<b>Materiais Utilizados</b> .....	58
3.1.1	<b>Cimento</b> .....	58
3.1.2	<b>Agregado miúdo</b> .....	59
3.1.3	<b>Agregado graúdo</b> .....	62
3.1.4	<b>Água</b> .....	64
3.1.5	<b>Corpos de prova</b> .....	64
3.1.6	<b>Traço do Concreto</b> .....	65
3.1.7	<b>Preparação do resíduo de Vidro</b> .....	65
3.1.8	<b>Concretagem, Moldagem e Cura</b> .....	66
3.1.9	<b>Ensaio de Caracterização e Resistência à Compressão</b> .....	69
3.1.10	<b>Ensaio Contaminação por Íons Cloretos</b> .....	72

3.1.11	Ensaio Íons Sulfatos .....	80
3.1.12	Ensaio Carbonatação.....	82
Capítulo 4	.....	88
4.	Discussões dos Resultados .....	88
5.	Considerações Finais .....	102
Capítulo 6	.....	105
6.	Sugestões para Pesquisas Futuras .....	105
Referências	.....	106

## i Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Influência do fator água/cimento na permeabilidade do concreto. ....	27
<b>Figura 2:</b> Agregado graúdo – Brita 01 (19mm).....	27
<b>Figura 3:</b> Agregado miúdo - Grãos de areia. ....	28
<b>Figura 4:</b> Índice de reciclagem do vidro.....	30
<b>Figura 5:</b> Composição química do vidro. ....	31
<b>Figura 6:</b> Estrutura química do vidro. ....	31
<b>Figura 7:</b> Modelo de vida útil / Processo Grau máximo aceitável de corrosão. 34	
<b>Figura 8:</b> Origem dos problemas patológicos.....	37
<b>Figura 9:</b> Deterioração do concreto por ações mecânicas. ....	42
<b>Figura 10:</b> Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado.....	45
<b>Figura 11:</b> Diagrama de equilíbrio termodinâmico. ....	47
<b>Figura 12:</b> Esquema do mecanismo de corrosão por cloreto.....	50
<b>Figura 13:</b> Pilar degradado pela ação íons sulfato.....	52
<b>Figura 14:</b> Esquema simplificado de corrosão da armadura por carbonatação. 53	
<b>Figura 15:</b> Fluxograma Ensaios.....	58
<b>Figura 16:</b> Composição granulométrica Areia .....	61
<b>Figura 17:</b> Composição granulométrica Resíduo de Vidro .....	62
<b>Figura 18 -</b> Composição granulométrica do agregado graúdo (Brita).....	63
<b>Figura 19:</b> Corpos de prova Cilíndricos .....	64
<b>Figura 20:</b> Resíduo de Vidro. ....	66
<b>Figura 21:</b> Mistura do concreto em betoneira .....	67
<b>Figura 22:</b> Slump Test .....	67
<b>Figura 23:</b> Moldagem e vibração das amostras .....	68
<b>Figura 24:</b> Cura submersa corpos de prova .....	68
<b>Figura 25:</b> Caracterização Granulometria Resíduo de Vidro .....	69
<b>Figura 26:</b> Caracterização Granulometria Areia.....	69
<b>Figura 27:</b> Caracterização Granulometria Brita 19 .....	70
<b>Figura 28:</b> Composição Granulométrica Brita 19 .....	70
<b>Figura 29:</b> Amostras para Ensaio de Compressão Axial .....	71
<b>Figura 30:</b> Ensaio Compressão Axial - Prensa Hidráulica .....	72
<b>Figura 31:</b> Secagem de Amostras em Estufa.....	74

<b>Figura 32:</b> Ciclo de Molhagem em Solução NaCl .....	75
<b>Figura 33:</b> Método Aspersão Nitrato de Prata.....	76
<b>Figura 34:</b> Fatias Ensaio Norma ASTM C1202 (2017) .....	77
<b>Figura 35:</b> Amostras submetidas ao Vácuo.....	78
<b>Figura 36:</b> Circuito Ensaio Migração de Íons Cloretos .....	79
<b>Figura 37:</b> Imersão de amostras em solução Sulfato de Cálcio.....	81
<b>Figura 38:</b> Ensaio Compressão Axial - Sulfato .....	82
<b>Figura 39:</b> Câmara de Carbonatação .....	84
<b>Figura 40:</b> Esquema da câmara de carbonatação montada.....	84
<b>Figura 41:</b> Cortes Câmara de Carbonatação.....	85
<b>Figura 42:</b> Rompimento de Corpo de Prova por Compressão Diametral.....	86
<b>Figura 43:</b> Método Aspersão Fenolftaleína - Carbonatação.....	87
<b>Figura 44:</b> Gráfico Resistência à Compressão 28 dias .....	89
<b>Figura 45:</b> Medidas da frente de penetração de cloretos .....	90
<b>Figura 46:</b> Gráfico Área Penetração Cloretos Livres .....	91
<b>Figura 47:</b> Gráfico Carga x Proporções.....	95
<b>Figura 48:</b> Gráfico Comparativo Resistência à Compressão Axial.....	96
<b>Figura 49:</b> Gráficos Evolução da Carbonatação .....	100
<b>Figura 50:</b> Gráfico Penetração Carbonatação.....	101
<b>Figura 51:</b> Principais resultados dos Ensaios .....	101

## ii Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado. ....	40
<b>Tabela 2</b> – Análise química do aglomerante.....	59
<b>Tabela 3</b> – Propriedades físicas do aglomerante.....	59
<b>Tabela 4</b> – Características físicas do agregado miúdo Areia. ....	60
<b>Tabela 5</b> – Características físicas do agregado miúdo Resíduo de Vidro.....	61
<b>Tabela 6</b> - Propriedades físicas do agregado graúdo. ....	63
<b>Tabela 7</b> – Traço do concreto. ....	65
<b>Tabela 8</b> - Etapas do procedimento de indução da penetração de cloretos.....	73
<b>Tabela 9:</b> Ensaio Migração Íons Cloretos ASTM C1202 (2017). ....	77
<b>Tabela 10:</b> Penetrabilidade de íons cloreto baseado na Carga Passante.....	80
<b>Tabela 11:</b> Ensaio Câmara de Carbonatação .....	83
<b>Tabela 12:</b> Resultados Ensaio Resistência à Compressão 28 dias.....	88
<b>Tabela 13:</b> Método de Aspersão de Nitrato de Prata – NBR 13797 (1997) .....	90
<b>Tabela 14:</b> Correntes e Carga Total Passante nas Amostras sem Resíduo de Vidro.....	92
<b>Tabela 15:</b> Correntes e Carga Total Passante nas Amostras SRV 15% .....	93
<b>Tabela 16:</b> Correntes e Carga Total Passante nas Amostras SRV 30% .....	94
<b>Tabela 17:</b> Probabilidade Penetração Íons Cloreto.....	94
<b>Tabela 18:</b> Comparativo de Resistência à Compressão Axial .....	96
<b>Tabela 19:</b> Pesagem Amostras 70 dia Água Sulfatada .....	97
<b>Tabela 20:</b> Cronograma de Exposição das Amostras .....	98
<b>Tabela 21:</b> Resultados da Profundidade Média de Carbonatação .....	99

# Capítulo 1

## 1. Introdução

### 1.1. Justificativa e importância do tema

Nos meios científico e técnico, durabilidade das estruturas de concreto é um tema que protagoniza uma preocupação recorrente, principalmente devido ao meio agressivo no qual estão inseridas. As degradações provenientes da corrosão de armaduras sem dúvidas é um dos principais problemas que acometem a durabilidade das estruturas, implicando em sérias manifestações patológicas de ordem estrutural, tais como: perda de seção das barras de aço, fissuração do concreto, perdas de aderência barra/concreto, destacamento do concreto, perda de massa cimentícia do cobrimento, erosão e desgaste, segregação, manchas, eflorescência, porosidade, deformações excessivas da estrutura, flechas e, em casos extremos, riscos iminentes de colapso parcial ou total da estrutura.

Cascudo (1997) observou que, no Brasil, a manifestação patológica que mais preocupa é a corrosão de armaduras, devido ao fato das principais regiões metropolitanas estarem localizadas na costa do país, onde se sabe que existe uma grande quantidade de Íons Cloreto (Cl-) provenientes das águas marinhas. Além disso, outras cidades mesmo distantes da costa litorânea que apresentem um alto índice de poluição, seja por emissão de gases veiculares ou por emissão de gases industriais, também oferecem ambientes agressivos às estruturas de concreto.

Cascudo e Helene (2001) A corrosão de armaduras em estruturas de concreto constitui um dos problemas de maior exponência no contexto da *Patologia das Construções*. Atualmente é crescente e de certa forma relevante à mobilização de vários segmentos da engenharia civil no sentido de combater este fenômeno tão danoso e que tantos prejuízos econômicos traz para a sociedade de uma forma geral.



Silva (2016), em seu estudo na cidade do Recife, mostrou que a corrosão de armaduras esteve presente em 96,67% das obras analisadas, sendo elas a beira-mar, ou não.

Segundo Silva (2016) além da água do mar, os sulfatos estão presentes em águas de rio, lençóis freáticos, água de pântano e decomposição de matéria orgânica, além de locais poluídos com esgoto, ambientes industriais e nos próprios agregados constituintes do concreto. Para Mehta (1993) a deterioração do concreto dá-se principalmente por fenômenos físico-químicos, sendo os efeitos químicos decorrentes da interação com ambientes agressivos, como aqueles com a presença de sulfatos, um dos fenômenos de maior importância.

Tendo em vista a necessidade de se estimar a durabilidade das estruturas de concreto armado é de relevante importância o entendimento do mecanismo de ataque por sulfatos, principalmente o entendimento dos sulfatos na deterioração do concreto armado e os efeitos da formação de produtos oriundos desse ataque (SANTHANAM, 2001).

De modo geral, a corrosão pode ser definida como um processo de deterioração do material por meio da ação química ou eletroquímica do ambiente, e tem como resultado a perda de massa do material. O processo de corrosão inicia-se por dois agentes: os Íons Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), presente nas áreas salinas e industriais, e o  $\text{CO}_2$ , predominantemente presente nos grandes centros urbanos. Mas como já exposto, também pode ser intensificada pela ação dos agentes Sulfatos, presentes na água ou no solo.

Normalmente o concreto apresenta boas condições de proteção ao aço contra a corrosão em função do ambiente alcalino que rodeia as barras de aço, criando uma película protetora. No entanto, com a penetração de água ou de dióxido de carbono, a película é rompida pontualmente permitindo a corrosão (HELENE, 1993).

Uma vez que a armadura seja alcançada pelos agentes agressivos, com a sua despassivação, a probabilidade é que em poucos anos poderão aparecer manifestações patológicas como fissuras, deslocamento e mancha na estrutura que se tornará comprometida.

Como a vida útil do concreto está diretamente ligada à sua capacidade de resistir ao ambiente no qual está inserido, é extremamente relevante o interesse por estudos das mais diversas condições que podem atenuar sua durabilidade, e identificar formas para detectar previamente o início dos processos que levem a sua deterioração, para tratar o problema em seus primeiros sintomas.

## **1.2. Objetivo Geral**

O objetivo desta pesquisa é analisar a influência do uso do resíduo de vidro proveniente de garrafas utilizadas na Ilha de Fernando de Noronha, utilizado no concreto como substituição parcial do agregado miúdo nas porcentagens de 0 %, 15 % e 30 %, submetidas à ação dos Íons Cloreto, Íons Sulfatos e Carbonatação.

## **1.3. Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, a presente pesquisa se propõe a investigar os seguintes aspectos:

1. Realizar levantamento bibliográfico acerca dos temas relacionados à pesquisa, com objetivo de trazer referências da literatura técnica formando embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa.
2. Realizar moldagem de corpos de prova cilíndricos de concreto, com três diferentes porcentagens de substituição do resíduo de vidro: 0%, 15% e 30%.
3. Estudar o comportamento e reações químicas dos corpos de prova de concreto através de ensaios de: Indução acelerada da penetração de íons cloreto, Indução acelerada da penetração de íons sulfato e Aceleração de Carbonatação em câmara de CO<sub>2</sub>.

4. Realizar análise experimental de quatro métodos para investigar e avaliar a influência do resíduo de vidro inserido como substituição no traço do concreto estudado:
- I. Método de aceleração de penetração dos Íons Cloreto de Sódio (NaCl-) na estrutura de concreto por meio de 10 ciclos de 24h: imersão parcial e secagem em estufa a 50°C;
  - II. Método de indução elétrica dos Íons Cloreto de Sódio (NaCl-) na estrutura de concreto por meio de corrente contínua em circuito elétrico seriado de 60V.
  - III. Método de aceleração de penetração de Íons Sulfato de Cálcio (CaSO<sub>4</sub>), por imersão total das amostras em meio agressivo durante 60 dias;
  - IV. Método de aceleração da Carbonatação por meio de câmara de Gás Carbônico (CO<sub>2</sub>), com amostras submetidas ao gás durante os períodos de: 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias.

## **1.4. Estruturação da Pesquisa**

Foi realizada revisão bibliográfica a cerca dos temas alusivos à pesquisa, citando autores da literatura técnica, para dar embasamento e fundamentar as discussões. O trabalho está dividido em seis capítulos compreendidos da seguinte forma:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: compreende os temas julgados relevantes para entendimento da pesquisa. Foram abordadas todas as definições necessárias para se compreender os procedimentos experimentais, como: as normas brasileiras e internacionais vigentes, conceito de durabilidade, vida útil do concreto, patologia das estruturas e corrosão de armaduras no concreto.

No Capítulo 3 – Materiais e Métodos: Planejamento Experimental: estão presentes todas as etapas executadas nos procedimentos experimentais e descrição

minuciosa dos ensaios realizados. Neste capítulo encontram-se o planejamento da pesquisa, a definição das séries de ensaios, a caracterização dos materiais utilizados, características dos corpos de prova e os procedimentos dos quatro ensaios realizados no universo de amostras.

No Capítulo 4 – Discussões dos Resultados: foram analisados e discutidos todos os resultados obtidos nos procedimentos experimentais.

No capítulo 5 estão presentes as Considerações Finais da pesquisa.

E no capítulo 6 são apresentadas as sugestões para pesquisas futuras.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

#### 2.1. Concreto: conceito, composição e ataques químicos

O concreto é um material composto, constituído, essencialmente, por cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita), água e ar, podendo conter também adições como cinza volante, pozolanas, sílica ativa, etc. e aditivos químicos com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Didaticamente pode-se dizer que a pasta é o cimento misturado com a água, a argamassa é a pasta misturada com a areia, e o concreto é a argamassa misturada com a pedra ou brita, também chamado concreto simples ou concreto sem armaduras (ISAIA, 2005; BASTOS, 2006).

O concreto é um material consumido em larga escala, que possui alta resistência à compressão e desempenha um papel importante no cenário da construção civil no geral. Além de resistir aos esforços de compressão solicitados, o concreto atua também como meio físico protetor das armaduras que estão em seu interior. Essa proteção ocorre por meio de dois fatores: O primeiro a proteção física, na qual o concreto funciona como uma barreira entre o meio externo e as armaduras; O segundo a proteção química, assegurada pelo elevado pH do concreto, que promove a formação de uma película passivadora envolta de todo o aço (SANTOS, 2015).

Apesar de toda a proteção imposta pelo concreto ao aço, é possível que esse sistema apresente falhas e as armaduras entrem em processo de despassivação, dando início a corrosão, comprometendo a durabilidade, a estabilidade, a funcionalidade, a estética das estruturas, e, conseqüentemente, sua vida útil (MONTEIRO, 2002).

Atualmente, inúmeros são os casos de corrosão de armaduras nas estruturas e em sua maioria não é fácil nem rápido justificar o seu motivo. A corrosão é um processo de natureza predominantemente eletroquímica, ocorrendo na presença de água, íons e

oxigênio, podendo ser propagada mais rapidamente por motivos intrínsecos (espessura do revestimento, permeabilidade do concreto, resistividade elétrica, tipo de cimento, água, areia e brita utilizada) e extrínsecos (o meio onde a estrutura encontra-se inserida) (SILVA, 2006).

Ainda de acordo com Silva (2006), a corrosão eletroquímica ocorre nas armaduras das estruturas na presença de pelo menos um eletrólito e oxigênio dissolvido no mesmo. A corrosão poderá ser mais agressiva, caso haja também a presença de cloretos, sulfatos e outros gases atmosféricos como o gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

Existem três consequências importantes provocadas pela corrosão de armaduras, são elas: perda de seção transversal da armadura e redução de sua resistência mecânica; formação de óxidos e hidróxidos que incorporam moléculas de água em sua composição, gerando tendência à expansão, o que pode resultar em fissuras, e, em situações mais drásticas, deslocamento da camada do revestimento; perturbação na interface aço/concreto, provenientes do desgaste das camadas externas do aço e do acúmulo de óxidos, afetando a transferência de tensões entre eles (TORRES, 2011).

Quando a estrutura está sujeita ao ataque de íons cloreto, a corrosão das armaduras desenvolvida possui característica pontiforme ou localizada. A corrosão pontiforme é consideravelmente grave, visto que, pode haver uma elevada perda da área da seção transversal em regiões ao longo da armadura. Na corrosão localizada, ocorre o desgaste pontual da armadura sob a forma de pites ou alvéolos, os quais evoluem enraizando-se, podendo causar a ruptura pontual (LIBERATI, 2014).

Diante dessa problemática, muitos estudos foram desenvolvidos para compreender os principais fatores que aceleram e facilitam a ocorrência da corrosão de armadura nas estruturas, visando prolongar sua durabilidade.

### **2.1.1. Componentes do concreto**

#### **2.1.1.1. Aglomerante**

O aglomerante é um material que tem a finalidade de aglutinar outros materiais com coesão quando misturado com água. Essa reação forma uma pasta moldável que facilita o manuseio do material, no caso do concreto, proporciona trabalhabilidade.

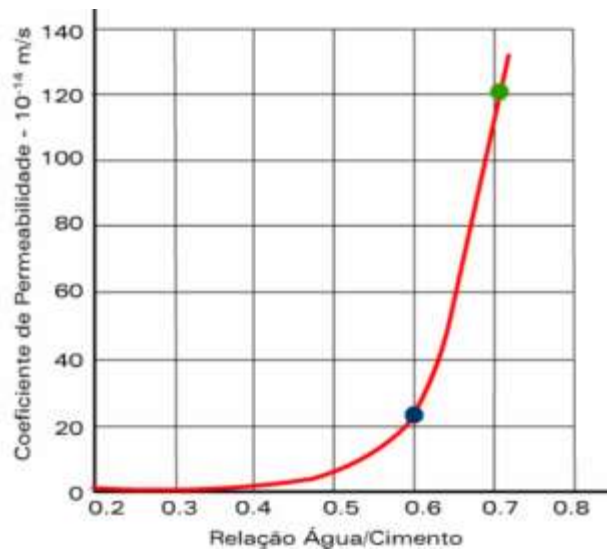
Apresentam-se sob a forma pulverulenta e, quando misturados à água, formam uma pasta capaz de endurecer por simples secagem ou como consequência de reações químicas, aderindo às superfícies com as quais foram postos em contato (BRUNAUER, 1964).

Os aglomerantes que produzem produtos não resistentes à água são aqueles resultantes da gipsita ou carbonatos de cálcio, os quais são denominados como não-hidráulicos ou aéreos. Os cimentos que não só endurecem pela reação com a água, mas também formam um produto resistente à água são chamados de cimentos hidráulicos como a cal hidratada e o, mais utilizado, cimento Portland (HEWLETT, 2019).

#### **2.1.1.2. Relação Água/Cimento**

A água é primordial na produção de concreto pois possibilita as reações químicas do cimento, chamadas reações de hidratação. No entanto, a relação água/cimento elevado faz com que o concreto seja muito permeável (Figura 1). A água excedente da hidratação do cimento evapora, deixando vazios, na maioria interligados. Além disso, um fator água/cimento alto provoca maior retração na pasta e leva ao aparecimento de fissuras de retração hidráulica (TENNIS et al., 2004).

O mesmo ocorre com curas inadequadas ou mal executadas (principalmente em concretos cuja superfície exposta seja grande), que são causas de fissuras de retração.

**Figura 1:** Influência do fator água/cimento na permeabilidade do concreto.

Fonte: DE SOUZA, 1998.

### 2.1.1.3. Agregados

É um material granular formado por grãos como: areia, pedregulhos, pedrisco, rocha britada, escória de alto-forno ou resíduos de construção e de demolição, que é usado com um meio cimentício para produzir concreto ou argamassa. Os agregados podem ser classificados como graúdo (pedregulho e brita) (Figura 2), o qual se refere a partículas maiores que 4,75 mm (peneira nº 4), e miúdo (areias) (Figura 3) são aquelas partículas de agregado menores que 4,75mm, porém maiores que 75mm (peneira nº 200) (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

**Figura 2:** Agregado graúdo – Brita 01 (19mm).

Fonte: Autora, 2019.



**Figura 3:** Agregado miúdo - Grãos de areia.

Fonte: Autora, 2019.

#### 2.1.1.4. Aditivos

São definidos como materiais que não tenham as características de agregados, cimento e nem de água, e que são adicionados à dosagem do concreto imediatamente antes ou durante a mistura (GOMES; BARROS, 2009; EFNARC, 2005).

O uso destes materiais no concreto é amplamente adotado pelos muitos benefícios que são possíveis com suas aplicações, como por exemplo os aditivos químicos que modificam a pega, influenciando dessa forma na hidratação do cimento. Outro exemplo são os aditivos plastificantes, os quais diminuem o uso de água na mistura reduzindo a relação a/c, através da redução da tensão superficial da água (ANDOLFATO, 2002).

São inúmeras as possibilidades de adição, porém todas tem o objetivo de otimizar as qualidades já apresentadas pela argamassa ou concreto.

## **2.2. A Utilização de Resíduo de Vidro no Concreto**

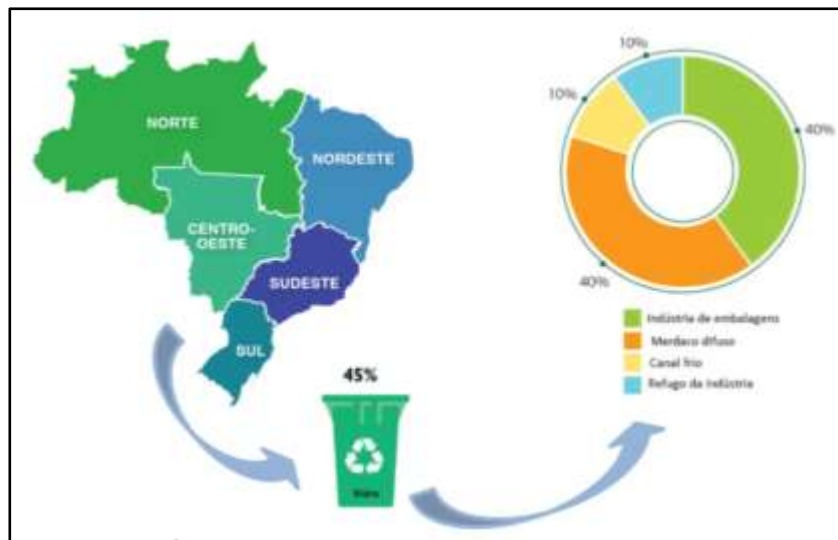
### **2.2.1. O Vidro no Brasil**

Após a Revolução de 30, na Era Vargas, o Brasil iniciou a fabricação de vidro em suas indústrias, apesar de que naquele momento o material não era considerado um insumo essencial para o país. Mesmo sem uma produção interna suficiente, o mercado possuía grande interesse em explorar o negócio, visto que pelo seu potencial de consumo, vislumbrava um futuro promissor. (COMLURB, 2009).

Quase no final de 1945, em São Paulo, a Vidraria Santa Marina criou a Companhia Paulista de Vidro Plano, que tinha o objetivo inicial de produzir garrafas; a nova fábrica produziria vidro para o mercado da capital paulista, para o interior do estado e regiões vizinhas. Então no início da década de 50 surgiram as Indústrias Reunidas Vidrobrás Ltda., resultado da fusão entre a Covibra e a CPVP, almejando a produção de vidro para todo o mercado nacional. (COMLURB, 2009).

Segundo a Abvidro (2011), nos tempos atuais, a produção de vidros tem aumentado no Brasil, chegando a uma marca de 3.000 10<sup>3</sup>t em 2011, com um crescimento progressivo de 6,75% ao ano, na última década. Neste cenário existem mais de duzentos fabricantes de vidro no Brasil que atendem tanto ao mercado interno quanto ao mercado externo.

Pesquisas realizadas pelo CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem) em 2009 mostram que o índice de reciclagem do vidro no país está em torno de 45%. Sendo que, 40% originários da indústria de embalagens, 40% do mercado difuso, 10% do “canal frio” (bares, restaurantes, hotéis etc.) e 10% do refugo da indústria, conforme ilustra a Figura 4.

**Figura 4:** Índice de reciclagem do vidro.

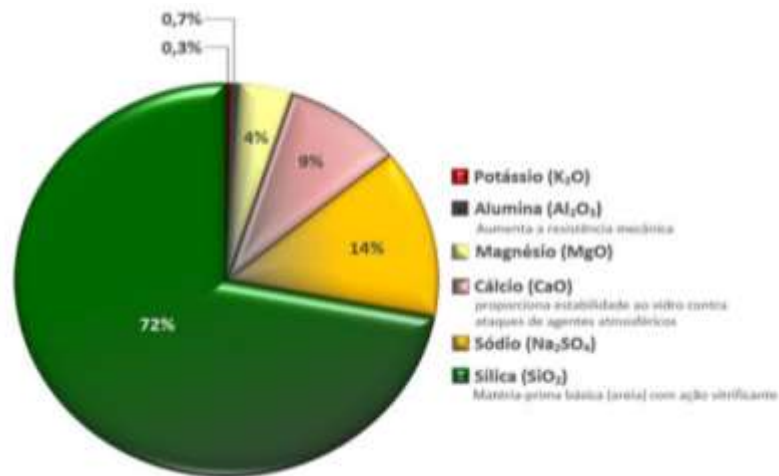
Fonte: adaptado de CEMPRE (2011).

### 2.2.2. Conceito e Composição

O vidro é um material proveniente da Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) amplamente encontrada na areia que é a matéria prima básica, apresenta-se como uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea, pois não possui estrutura atômica definida. Obtido através da mistura de materiais como a Sílica (72%), Sódio (14%), Cálcio (9%), Magnésio (4%), Alumina (0,7%) e Potássio (0,3%), que são misturados e enviados para um forno industrial capaz de atingir temperaturas de até 1600. Por resfriamento de sua massa em fusão de óxidos ou de seus derivados e misturas, sendo o dióxido de silício seu principal constituinte, a massa endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez, porém sem sofrer cristalização (SANTOS, 2009).

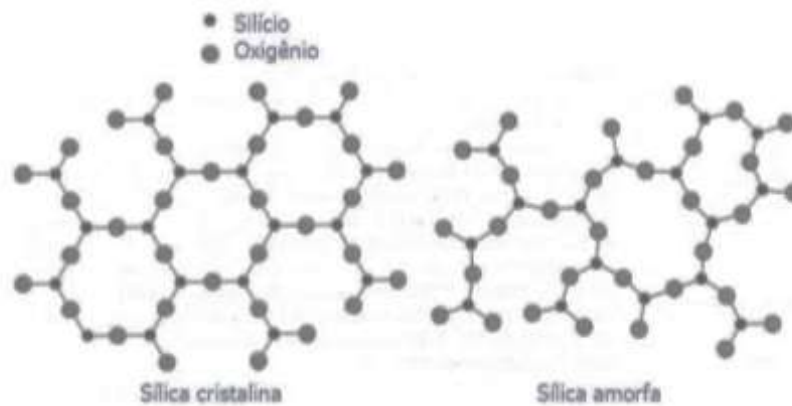
Nas Figuras 5 e 6, é possível visualizar os componentes e suas funções na fabricação do vidro, e a estrutura do vidro respectivamente.

**Figura 5:** Composição química do vidro.



Fonte: Divinal Vidros, 2017.

**Figura 6:** Estrutura química do vidro.



Fonte: SANTOS, 2012.

### 2.2.3. Aplicação do resíduo de vidro na construção civil

O emprego de adições/ substituições parciais minerais no concreto, é um método que pode minimizar impactos ambientais por conta de: aproveitamento de resíduos, maior preservação de jazidas e redução nas emissões de gás carbônico e outros gases intensificadores do efeito estufa, gerados durante a fabricação do cimento Portland.

Além das vantagens técnicas, ambientais e, em alguns casos, econômicas (Cordeiro, 2006).

Pereira (2012) relatou o uso de casco de vidro em várias vertentes, tais como: construção de estradas, pavimentação asfáltica, agregados de concreto, construção de aplicações (azulejos, tijolos de vidro, painéis de parede etc.), fibra de vidro para isolamento, fertilizantes agrícolas, paisagismo, louças, cimento hidráulico, entre outras aplicações.

O tipo de vidro comumente utilizado na construção civil é o vidro sodo- cálcico, que, em massa, representa 80% dos resíduos de vidro e sua composição é de aproximadamente 72 % de SiO<sub>2</sub>, 14 % Na<sub>2</sub>O e 4 % CaO. Assim, baseado em sua composição química, o vidro sodo-cálcico pode ser utilizado como material cimentício pozolânico, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que finamente moído e na presença de umidade reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentícias (Mehta e Monteiro, 2014).

Shao et al. (2000) mediram a resistência mecânica de vidro sodo-cálcico como adição, através do índice de atividade pozolânica para três granulometrias, de 150 µm, 75 µm e 38 µm. O intuito dos ensaios foi examinar se o vidro moído poderia apresentar comportamento pozolânico. Os resultados indicaram que a resistência das argamassas contendo vidro com 38 µm como substituto parcial de cimento satisfaz o requisito mínimo no ensaio de resistência aos 7 dias de idade, e alcançou um aumento na resistência mecânica após 21 dias de cura em água. Relativamente ao vidro com 150 µm, a resistência mecânica foi muito abaixo do limite, porque o tamanho das partículas de vidro era muito grande para agir como pozolana. A resistência das argamassas com vidro com 75 µm aos 7 dias foi ligeiramente inferior ao valor inicial, enquanto que aos 28 dias a resistência aumentou satisfatoriamente.

Bardini e Marchioro (2007) utilizaram o vidro moído como parte do agregado miúdo natural (areia) em proporções de 0, 5, 10, 15 e 20% para a produção de concreto. Objetivando, além da reutilização do material que seria descartado, obter melhores resultados relativos à resistência mecânica dos concretos nas idades de 7 e 28 dias. No que concerne à resistência à compressão, exceto pelo traço contendo 20% de

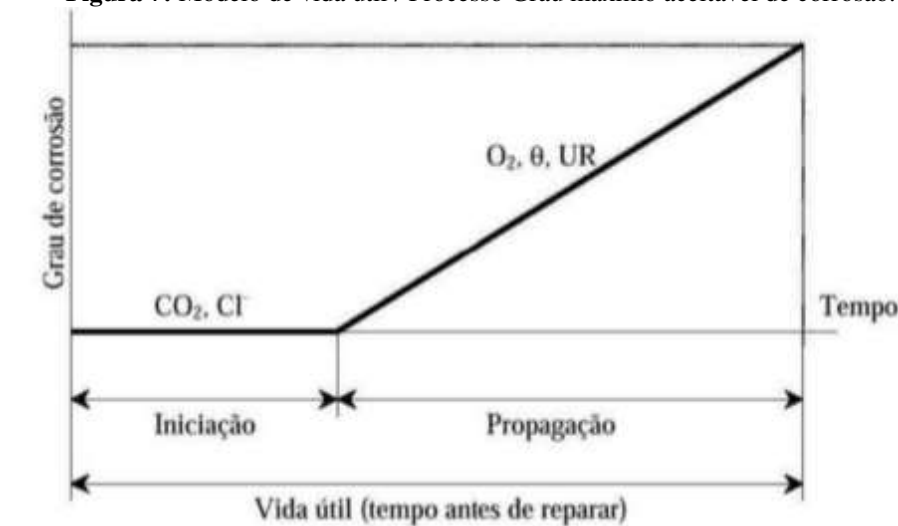
substituição do cimento pelo pó de vidro, todos os traços atingiram valores médios superiores ao traço de referência. O melhor desempenho foi observado nos concretos com 5% de substituição, que atingiu resistência média 40% superior a do concreto sem substituição. Concluíram que o aumento significativo da resistência à compressão pode ser atribuído ao preenchimento dos vazios do concreto pelo vidro moído. No entanto, sugerem estudos aprofundados em relação às reações álcali-sílica e à efetiva atividade pozolânica do resíduo.

### **2.3. Durabilidade e Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado**

Com os estudos de Collepardi sobre a penetração de cloretos, em 1972 surgiu o conceito de durabilidade constatando que o ingresso de cloretos na matriz do concreto ocorre por difusão iônica. Este conhecimento permite aplicar a segunda lei de Fick, dando origem a modelos capazes de esclarecerem como se dá a entrada de cloretos ou de CO<sub>2</sub> no concreto e que são usados até os dias atuais.

Em virtude dos inúmeros problemas de degradação precoce analisados nas estruturas, das necessidades de tecnologias mais competitivas e das exigências de sustentabilidade no setor da Construção Civil, fica claro, nos últimos anos, uma preocupação atenuada em privilegiar aspectos de projeto voltados à durabilidade e ao aumento de vida útil das estruturas de concreto armado e protendido (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Foi desenvolvido por Bazant (1979) e Tuutti (1982) outro importante entendimento com o chamado modelo de dois estágios para determinação da vida útil. O primeiro estágio abrange o período que vai desde a fabricação do componente de concreto até o início da corrosão (Figura 77).

**Figura 7:** Modelo de vida útil / Processo Grau máximo aceitável de corrosão.

Fonte: Tuutti, 1982.

A fase de propagação (segundo estágio) corresponde ao período no qual se considera que a estrutura atingiu uma condição de desempenho que irá requerer intervenção corretiva. A vida útil nesse caso equivale ao tempo de início do primeiro e uma fração do tempo correspondente ao segundo estágio.

Segundo a NBR 6118 (2014), as estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, sua estabilidade e sua aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, estabelecida pelo contratante. Esta norma pressupõe uma vida útil de no mínimo 50 anos, de acordo com as exigências de durabilidade.

Os fatores de fundamental importância para a elaboração de orçamentos reais para a obra são o conhecimento da vida útil e da curva de deterioração de cada material ou estrutura, assim como de programas de manutenção adequados e realistas (SOUZA e RIPPER, 1998).

Estudos mostram que para uma intervenção ser eficiente e a menos onerosa possível, as anomalias presentes na estrutura devem ser detectadas o mais rápido possível e em fase ainda inicial. Se os cuidados após a execução do projeto, construção e utilização da edificação forem deixados de lado, certamente a vida útil e o desempenho da sua estrutura será prejudicado (TUTIKIAN e PACHECO, 2013).

Sabe-se que existe correlação entre os conceitos de vida útil e durabilidade, porém a vida útil é a quantificação da durabilidade, o qual se considera a qualidade dos materiais estruturais. A vida útil pode também ser entendida como o período de tempo durante o qual a estrutura é capaz de desempenhar bem as funções para as quais foi projetada (BRANCO *et al*, 2013).

A fim de se obter uma melhor compreensão sobre durabilidade e vida útil das estruturas, é necessário o conhecimento de algumas definições e conceitos importantes sobre o tema. Para Neville e Brooks (2011), a durabilidade está ligada à capacidade de um material se manter em certo estado por um tempo determinado. Assim, os parâmetros mínimos de qualidade do material, a serem atendidos, devem ser especificados através de ensaios de desempenho da durabilidade da estrutura, frente ao tipo e nível de agressividade ambiental previstos em projeto.

De maneira mais específica, Helene (2001) evidencia que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores (regra dos 4C):

- 1) Composição ou traço do concreto;
- 2) Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- 3) Cura efetiva do concreto na estrutura;
- 4) Cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras.

Já para a NBR 6118:2014, durabilidade “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. No Item 6.1 preceitua que “as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil”.



## 2.4. Manifestações Patológicas nas estruturas de concreto

Pela etimologia da palavra, o termo “patologia” deriva do grego: pathos - doença e logia – ciência, estudo. De maneira geral, patologia é o “estudo da doença”. Ao que se refere à engenharia civil, essa expressão é amplamente atribuída aos estudos realizados referentes aos danos presentes nas edificações e construções em geral. Tais patologias apresentam-se de inúmeras formas, como: fissuras, manchas, trincas, entre outras. Por esse motivo, essas manifestações recebem a denominação de manifestações patológicas (ARIVABENE, 2015).

De acordo com Souza e Ripper (1998), a patologia das construções compreende uma esfera de análises pluridisciplinares para o estudo das origens do problema, com os seus inúmeros mecanismos de atuação e manifestação.

Segundo Helene (1992), "a patologia pode ser entendida como a parte da engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e origens dos defeitos das construções civis, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema".

À medida que uma estrutura de concreto armado envelhece, torna-se mais comum o surgimento de manifestações patológicas, uma vez que, quando em contato com o meio ambiente, esse material sofre certas alterações. Levando em conta que o aparecimento das manifestações patológicas é algo inevitável, devido às ações impostas pelo meio ambiente, é necessário, no mínimo, a tentativa de retardar o seu surgimento. Dessa forma, a realização correta da manutenção estrutural é primordial, para se obter resultados favoráveis, quanto a vida útil desejada. (ADAMATTI, 2016).

As manifestações patológicas podem ser causadas por uma infinidade de motivos. Frequentemente essas manifestações apresentam sintomas semelhantes, mesmo possuindo origens diversas. Estudos na área de patologia das construções é um campo de extrema complexidade na engenharia civil, devido à vasta diversidade e possibilidades de danos às estruturas (ROCHA, 2015).

Para obter um diagnóstico correto das manifestações patológicas, é extremamente necessário o amplo conhecimento envolvendo as possíveis origens, sintomas, mecanismos e causas. Os quais serão discutidos a seguir.

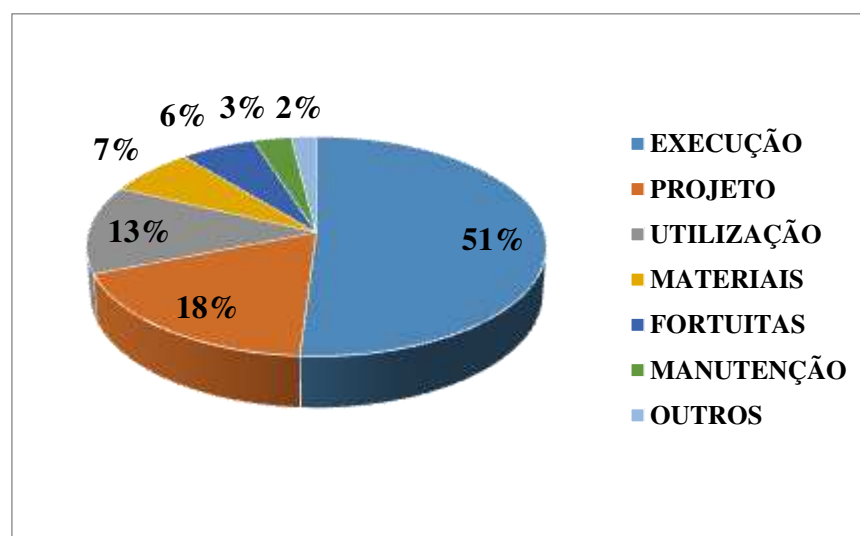
#### 2.4.1. Origens

A fim de se obter um correto diagnóstico de uma manifestação patológica, é necessário que se conheça em que etapa da vida da estrutura teve origem o problema. De acordo com Monteiro (2017), as origens das manifestações patológicas podem ser: congênitas, construtivas, adquiridas ou acidentais.

- Congênitas: fase de projeto;
- Construtivas: Fase de execução;
- Adquiridas: Agressividade do meio e/ou má uso;
- Acidentais: Fenômenos atípicos.

De acordo com Helene (1992), determinar a origem das manifestações patológicas, é de extrema importância para fins judiciais. Pois, essa determinação viabiliza a identificação do responsável pelo problema. Em sua maioria, as origens dos problemas patológicos ocorrem nos primeiros momentos da execução da obra, nas fases de projeto e planejamento (HELENE; PEREIRA, 2007). A Figura 8 a seguir, quantifica a incidência das principais origens das manifestações patológicas.

**Figura 8:** Origem dos problemas patológicos.



Fonte: Adaptado, Silva e Jonov (2011).

A fim de minimizar ou eliminar os problemas patológicos em uma estrutura, faz-se necessário a elaboração de um controle de qualidade mais eficaz, durante todas as etapas de seu desenvolvimento. É necessária também, a realização de um programa de manutenção eficiente (OLIVEIRA, 2013).

Figueiredo & O'Reilly (2003) citam que "o ambiente hoje em dia é mais agressivo que o de décadas atrás, além disso, o aperfeiçoamento de técnicas de dimensionamento mais avançadas e, portanto mais econômicas, também interferem negativamente na durabilidade das edificações". Assim, concluem ainda que as estruturas de concreto armado contemporâneas estão cada vez mais vulneráveis ao aparecimento precoce de manifestações patológicas.

#### **2.4.2. Sintomas**

Quando a integridade de uma edificação está comprometida, alguns sinais externos podem surgir, os sintomas, sinalizando uma não conformidade no sistema. Em alguns casos, esses sintomas aparecem tardiamente e em outros podem ser imperceptíveis à maioria dos leigos. A sintomatologia se atenta em estudar estes sinais com o objetivo de diagnosticar aquela manifestação ou problema patológico (TUTIKIAN; PACHECO, 2013).

Para Andrade e Silva (2005), "um sintoma para ser considerado patológico deve comprometer algumas das exigências de construção, quer seja de capacidade mecânica, funcional ou estética".

Existem três principais sintomas que podem aparecer nas estruturas isoladamente, ou ao mesmo tempo, são eles: a fissuração, a desagregação do concreto e a segregação (LAPA, 2008). Além desses, pode-se citar também as manchas e as flechas excessivas.

### 2.4.3. Mecanismos

Os mecanismos das manifestações patológicas podem ser entendidos como os processos responsáveis pelo seu surgimento nas estruturas.

De acordo com Gonçalves (2015), a degradação do concreto é iniciada, frequentemente, por processos químicos. Entretanto, princípios físicos e mecânicos também podem ser responsáveis por tal degradação, associados ou não, aos processos químicos. Pode-se citar ainda, outros fatores de degradação. São eles: os que são desencadeados por processos biológicos e os que são desencadeados por processos eletroquímicos, como no caso da corrosão das armaduras.

A NBR 6118 (2014) relata como mecanismos importantes de deterioração do concreto:

- A lixiviação por ação de águas puras, carbônicas agressivas ou ácidas, que dissolvem e carregam os compostos hidratados de pasta de cimento;
- A expansão por ação de águas e solos que estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias;
- A expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos;
- E as reações deletérias superficiais de certos agregados, decorrentes de transformações de produtos ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica.

Quanto aos mecanismos importantes de degradação referentes à armadura, destacam-se: a despassivação por carbonatação e a despassivação por elevado teor de íons cloreto. Na Tabela 1, podemos obter uma visão geral dos principais mecanismos físico-químicos de deterioração das estruturas de concreto armado e protendido.

**Tabela 1** - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado.

<i>AGRESSIVIDADE DO AMBIENTE</i>		<i>CONSEQUÊNCIAS SOBRE A ESTRUTURA</i>	
<b>Natureza do processo</b>	<b>Condições particulares</b>	<b>Alterações iniciais na superfície do concreto</b>	<b>Efeitos a longo prazo</b>
Carbonatação	UR 60% a 85%	Imperceptível	Redução do pH corrosão de armaduras fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera ácida, águas puras	Eflorescências, manchas brancas	Redução do pH corrosão de armaduras desagregação superficial
Retração	Umedecimento e secagem, ausência de cura, UR baixa (< 50%)	Fissuras	Fissuração corrosão de armaduras
Fuligem	Partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	Manchas escuras	Redução do pH corrosão de armaduras
Fungos e mofo	Temperaturas altas (> 20 °C e < 50 °C) com UR > 75%	Manchas escuras e esverdeadas	Redução do pH desagregação superficial corrosão de armaduras
Concentração salina Cl <sup>-</sup>	Atmosfera marinha e industrial	Imperceptível	Despassivação e corrosão de armaduras
Sulfatos	Esgoto e águas servidas	Fissuras	Expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras
Álcali-agregado	Composição do concreto, umidade, UR > 95%	Fissuras gel ao redor do agregado graúdo	Expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras

Fonte: MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011.

#### **2.4.4. Causas**

Por definição, as causas das manifestações patológicas devem ser compreendidas, como os agentes responsáveis por desencadear os seus mecanismos.

Andrade e Silva (2005) relatam, que inúmeros agentes naturais interagem sob o concreto armado ocasionando seu envelhecimento, ou melhor, a perda gradativa de seu desempenho estético, funcional e estrutural. As causas de degradação podem se originar de diversas ações, como por exemplo, as mecânicas, físicas, químicas e biológicas. Essas ações podem ocorrer isoladamente ou simultaneamente, dependendo da

velocidade de propagação e, principalmente, do tipo de ambiente que a estrutura está inserida.

#### **2.4.5. Ações Mecânicas**

Segundo Andrade (2013), “destacam-se como ações mecânicas de deterioração do concreto: a ação de cargas excessivas e a erosão. A carga excessiva pode provocar fissuração abrindo caminhos para que outras formas de deterioração se instalem”. Baseada em experiências profissionais a autora acrescenta, “é imprescindível que os projetistas aprovelem as cargas consideradas no dimensionamento da estrutura e que os construtores e usuários respeitem as condições especificadas em projeto”.

O processo de erosão do concreto ocorrerá devido ao desgaste de sua superfície por meio de processos de atrito, arranhões ou pela ação de águas em alta velocidade, tendo como principais causas a abrasão (ANDRADE, 2013).

Para Souza e Ripper (1998) *apud* Santos (2012), tais causas referem-se às solicitações mecânicas às quais as estruturas de concreto estão sujeitas, devido a:

- Choques e impactos (por veículos automotores, por exemplo);
- Recalque diferencial das fundações;
- Acidentes imprevisíveis (inundações, grandes tempestades, explosões e abalos sísmicos).

Além de comprometer a capacidade resistente da estrutura a deterioração por causas mecânicas, facilita a entrada de agentes agressivos na estrutura danificada, principalmente quando o concreto e a armadura ficam expostos devido ao impacto das solicitações (Figura 9), muito comum em viadutos, pontes, garagens e guarda-corpo (SANTOS, 2012).

**Figura 9:** Deterioração do concreto por ações mecânicas.

Fonte: SANTOS (2012).

#### **2.4.6. Ações Físicas**

Souza e Ripper (1998), apontam que as causas físicas, interligadas ao processo de degradação da estrutura, são desenvolvidas através da variação extrema da temperatura, da ação do vento, da água (sob a forma de chuva, gelo e umidade) e do fogo.

#### **2.4.7. Ações Químicas**

As ações químicas são uma das principais causas de degradação do concreto armado. O processo ocorre de duas maneiras. Na primeira, os agentes agressivos encontrados no meio ambiente, penetram os poros do concreto e, sob condições favoráveis de temperatura e umidade, desenvolvem reações químicas nocivas a estrutura (ANDRADE, 2013). Na segunda, os agentes agressivos encontram-se presentes no próprio concreto e, tendo todas as condições necessárias, desenvolverão as reações químicas de caráter deletério. São consideradas ações de deterioração química: Reação álcali-agregado, ataque por cloretos, carbonatação, entre outras.

#### **2.4.8. Ações Biológicas**

São consideradas ações de deterioração biológicas: O crescimento de vegetação indesejável nas edificações e o desenvolvimento de organismos e micro-organismos em certas partes da estrutura (ANDRADE, 2013).

### **2.5. Processo de Corrosão das armaduras e do Concreto**

#### **2.5.1. A Corrosão como Patologia: Aspectos gerais**

Normalmente, os metais são encontrados na natureza formando compostos óxidos, além de outros elementos. A fim de utilizá-los em sua forma elementar, é necessário a extração do metal através de um processo de redução, o qual demanda um elevado nível de energia. O processo contrário, onde o metal regressa ao seu estado natural, perdendo energia, ocorre por meio de uma reação espontânea. Esse processo, denominado de oxidação, é conhecido por corrosão e pode representar a destruição gradativa do metal (MONTEIRO, 2002).

Pode-se definir corrosão como a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação de natureza química ou eletroquímica, associado ou não a ações físicas ou mecânicas, levando a destruição do material. Basicamente são dois os processos principais de corrosão que podem sofrer as armaduras de aço para concreto armado, a oxidação e a corrosão propriamente dita (HELENE, 1986; SILVA *et al.*, 2015).

Gentil (2003) define corrosão como “a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”. Essa perspectiva vai de encontro com a de Huerta (1997), que conceitua corrosão como “a reação química e eletroquímica de um metal e a interação dele com o meio que o envolve e a deterioração de suas propriedades”.



De acordo com Cascudo (1997), Gentil (2012) e Liberati (2014), quando o metal passa pelo processo de corrosão, é convertido a um estado não metálico, perdendo as suas propriedades essenciais (resistência mecânica, elasticidade e ductibilidade).

Na oxidação o ataque é provocado por uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido. Este tipo de corrosão é extremamente lenta à temperatura ambiente e não provoca deterioração expressiva das superfícies metálicas. Já na corrosão propriamente dita, mais frequente na natureza e preponderantemente eletroquímica, ocorre em meio aquoso formando uma pilha com a circulação de elétrons na superfície metálica.

A corrosão acontece quando é formada uma película de eletrólito sob a superfície das barras de aço, na qual os agentes agressivos alteram as condições do concreto no entorno da barra, despassivando a armadura, seguindo-se da formação de uma célula de corrosão, responsável pela propagação da corrosão (ANDRADE, 2001).

As armaduras inseridas nas estruturas de concreto estão inicialmente protegidas pelo revestimento que forma uma barreira física aos fatores externos. A perda desta proteção pode desencadear e acelerar um processo corrosivo. A corrosão ocorre quando o concreto é permeável o suficiente para permitir que íons penetrem até a armadura.

Segundo Sales (2018) são diversos os fatores que influenciam nos parâmetros de corrosão de um metal imerso no concreto: o coeficiente de difusão do concreto, a relação água/cimento, a espessura de revestimento, a presença e a quantidade de aditivos, a umidade relativa, o pH do concreto, a formação de película passivadora e a temperatura de exposição. Entre esses fatores, o revestimento e a formação de película passivadora representam a maior influência na durabilidade da estrutura de concreto impedindo o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço. Sendo assim, só poderá ser garantido com o uso adequado de espaçadores e a presença de aditivos no cimento empregado, respectivamente.

Do Nascimento (2015) e Adamatti et al (2016) afirmam que a qualidade do concreto, a espessura de revestimento e a cura controlam a permeabilidade, a porosidade e a difusão, dificultam ou facilitam o ingresso dos agentes agressivos para o interior do concreto. Pode-se afirmar então que, quanto mais o concreto se mantiver inalterado, conseqüentemente a armadura estará mais protegida.

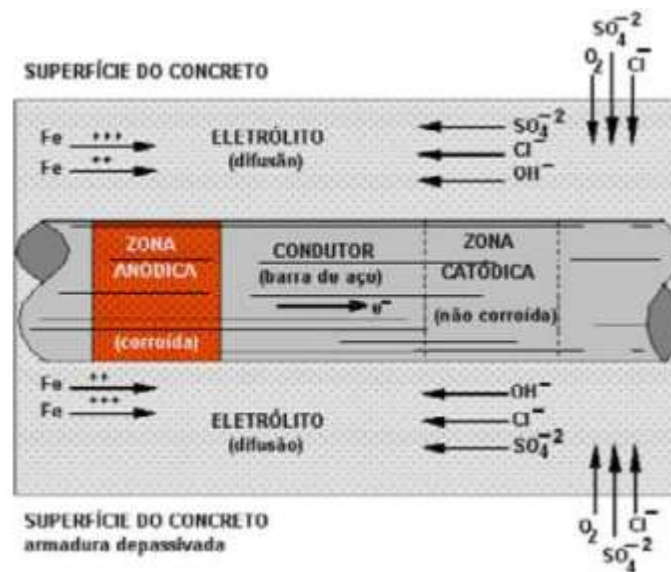
A corrosão pode ser acelerada por alguns agentes agressivos como os íons cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), dióxidos de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), cátion amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), entre outros, uma vez que aumenta de forma significativa a condutividade elétrica do eletrólito (BAUER, 1994; CORSINI, 2013). Além desses, logo assim que a armadura é exposta à atmosfera, por fissuração do concreto, pode também passar a sofrer a ação dos íons sulfato.

Estudos acerca desse assunto têm mostrado que a corrosão das armaduras está diretamente associada à durabilidade de estruturas de concreto e a difusão de cloretos e dióxidos de carbono é reconhecidamente um dos fatores de maior importância no desencadeamento do processo corrosivo.

Quando a corrosão metálica ocorre em um meio aquoso, desenvolve-se um fenômeno de caráter eletroquímico, ou seja, supõe-se uma reação de oxidação, uma de redução, deslocamento de elétrons pelo metal, e a movimentação de íons por meio do eletrólito, pressupondo a formação de um circuito fechado (MONTEIRO, 2002).

A Figura 10 demonstra, de forma ilustrativa, o processo de formação de uma célula eletroquímica. Na célula há um ânodo, um cátodo, um condutor metálico e um eletrólito. Existindo uma diferença de potencial (DDP), entre as zonas anódicas e catódicas, desenvolve-se uma corrente elétrica. Conforme a amplitude dessa corrente e do acesso de oxigênio, poderá ou não haver a corrosão (SILVA, 2006).

**Figura 10:** Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado.



Fonte: HELENE (1993)

Para que a célula de corrosão se desenvolva, é fundamental a presença de meios transportadores (eletrólito), que promovam a movimentação dos íons e elétrons, provenientes desse processo, entre as regiões anódicas e catódicas. Os elétrons deslocam-se através do contato direto metal-metal, e os íons, por meio de dissolução e deslocamento via solução. A combinação desses produtos de reações anódicas e catódicas gera os produtos de corrosão (ADAMATTI, 2016).

De acordo com Monteiro (2002), os parâmetros que regulam a velocidade ou taxa de corrosão, são, dentre outros, a resistividade elétrica do meio e a disponibilidade de oxigênio, bem como a temperatura, a umidade relativa e o grau de contaminação do meio ambiente.

Em resumo, para que ocorra o processo corrosivo é necessário que (BOHNI, 2005):

- Exista uma diferença de potencial entre dois pontos da armadura, possibilitando o fluxo de elétrons;
- O concreto esteja úmido garantindo a existência de um eletrólito;
- O oxigênio esteja presente, possibilitando a reação catódica;
- Ocorra o rompimento da camada passivadora da armadura, podendo ser pela ação de agentes agressivos (íons de cloreto, carbonatação).

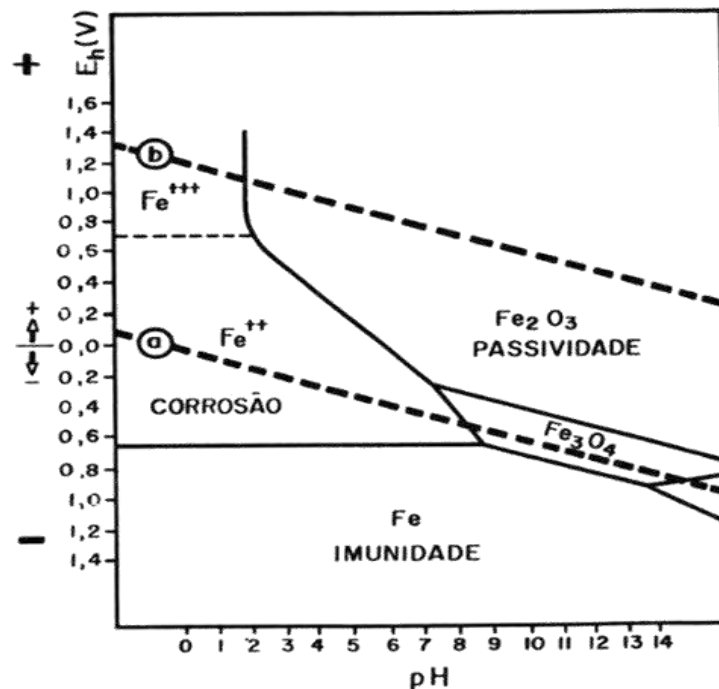
### **2.5.2. Passivação das armaduras**

A corrosão eletroquímica gera íons em dissolução, que podem participar de reações de equilíbrio com outros íons do meio, inclusive os da própria água. Dessa forma, a corrosão dependerá de diversas reações, na qual envolvem-se, direta ou indiretamente, os íons da água, e, conseqüentemente, o pH do meio aquoso (MONTEIRO, 2002).

A alcalinidade do concreto, onde as armaduras encontram-se, é conferida graças as reações de hidratação do cimento que formam compostos de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Alguns álcalis provenientes da pasta também contribuem para essa condição (CARMONA, 2005; CASCUDO, 1997).

Segundo Monteiro (2002), o potencial do processo de corrosão depende do equilíbrio das reações de corrosão, as quais dependem do pH do meio. Assim, é possível estabelecer uma relação em função do pH, representado graficamente como diagrama de Pourbaix (POURBAIX, 1961), também conhecido por diagrama de equilíbrio termodinâmico. Na Figura 11 a seguir, veremos o desempenho da curva que limita os índices de passivação e corrosão, bem como suas zonas de acontecimento.

**Figura 11:** Diagrama de equilíbrio termodinâmico.



Fonte: POURBAIX (1961).

O diagrama consiste em 3 (três) zonas: a primeira é a zona de imunidade do metal, a segunda é a zona de passivação e a terceira é a zona de corrosão. Na primeira, o metal não sofre corrosão, permanecendo estável para qualquer valor de pH. Na segunda, são formados os estados passivantes, que se comportam como uma camada de barreira protetora impedindo uma oxidação mais profunda. Por fim, na terceira zona, o pH e o potencial eletroquímico estabelecem condições termodinâmicas para que os óxidos da cobertura passiva se tornem instáveis (MONTEIRO, 2002).

Ainda de acordo com o diagrama de Pourbaix (1961), nas condições normais do concreto alcalino, cujo pH está entre 12,5 e 13,5 e o potencial de corrosão, em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, encontra-se na ordem de +0,1 a -0,4, as reações de

eletrodo verificada no ferro são de passivação (CASCUDO, 1997; POURBAIX, 1961; MONTEIRO, 2002).

Assim, a armadura localizada no interior do concreto, em meio alcalino, é protegida do processo da corrosão através de uma película passivadora. Essa película protetora é compacta, composta por óxidos de ferro estáveis ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e possui grande aderência à superfície do aço (ANDRADE, 1992; MEHTA e MONTEIRO, 2008; LIBERATI, 2014).

Diante do que vimos, entende-se, que o concreto protege a armadura de duas formas: a primeira através da passivação do aço (proteção química) e a segunda por meio do cobrimento do próprio concreto (proteção física), que se comporta como uma barreira, dificultando a penetração de agentes agressivos desencadeadores da corrosão (LIBERATI, 2014).

Quando o concreto não é capaz de operar a sua função protetora, ocorre a corrosão de armaduras. Por meio de uma série de fatores, combinados a ação de agentes agressivos (presentes no próprio concreto ou adquiridos por fontes externas), a armadura poderá perder a sua condição de passivação. Quando isso acontece, a película passivadora é rompida e armadura passa a ser despассивada. A presença de íons cloretos e a carbonatação do concreto são os principais iniciadores da corrosão (LIBERATI, 2014).

### 2.5.3. Ação dos Íons Cloretos no Concreto Armado

A penetração dos íons cloretos através do concreto se dá pelo processo de difusão iônica, estando o concreto inserido em meio considerado relativamente úmido. Neste caso, a lei física que rege esse tipo de mecanismo de transporte de íons cloretos é dada pela segunda Lei de Difusão de Fick, sendo esta considerada como unidimensional em um sólido semi-infinito, expressa como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

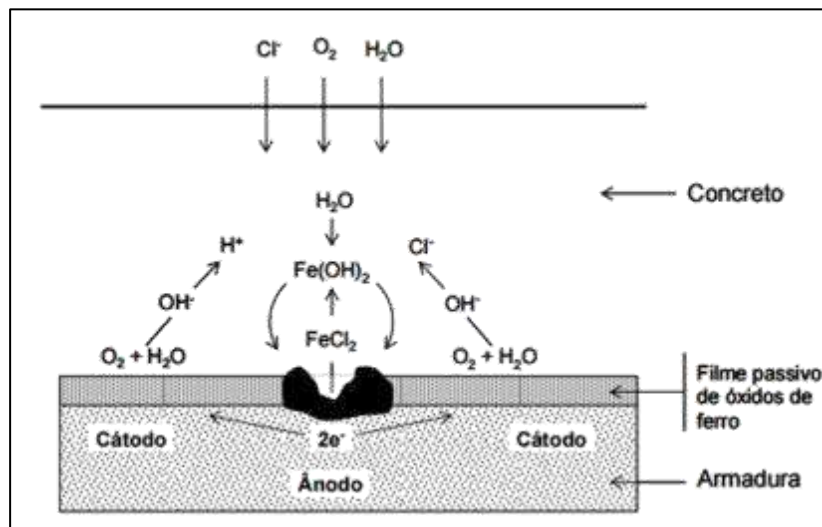
Onde  $C$  é a concentração de íon cloreto a uma distância  $x$  da superfície em  $t$  anos e  $D$  é o coeficiente de difusão aparente. É preferível que as concentrações sejam dadas em termos de cloretos solúveis em água, uma vez que é geralmente aceito que a corrosão é influenciada pela concentração de cloreto livre presente em soluções nos poros do concreto (TUUTTI, 1982).

Esse mecanismo de transporte é baseado na diferença de concentração entre duas regiões interconectadas. Os cloretos em regiões de maiores concentrações se movem para regiões de menores concentrações por surgimento de um gradiente de concentração iônica. Sendo assim, a difusão é um processo natural de transporte de massa. O transporte independe do estado físico da partícula, com isso, tanto o  $\text{Cl}^-$  dissolvidos na água, quanto o  $\text{CO}_2$ , podem ser transportados no interior dos poros do concreto até as armaduras do concreto.

Os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) podem adentrar através da rede porosa do concreto por diversos mecanismos de transporte, tais íons em conjunto com outros elementos, como a água e o oxigênio, por exemplo, provocam em certas quantidades desestabilizações pontuais na película passivadora.

O processo de despassivação por cloretos é cercado de muitas incertezas, algumas teorias tentam explicar como esse fenômeno acontece. Segundo Treadaway (1988), quando os íons cloretos alcançam a película passivadora, em certas quantidades, os mesmos passam a competir com os íons hidroxilas para produção de íons ferrosos. O acúmulo de cloretos metálicos ( $\text{FeCl}_2$ ), formados por essas reações e transportados por difusão a partir das áreas anódicas, quebra a película passivadora e permite a continuação do processo. A certa distância do eletrodo, o complexo é rompido através de hidrólise, precipitando-se em hidróxido de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), liberando  $\text{H}^+$  e reutilizando os íons cloretos para novas reações. A liberação de  $\text{H}^+$  faz com que haja uma redução de pH e potenciais mais eletronegativos na área anódica. Nas regiões catódicas, a formação de  $\text{OH}^-$  eleva o pH dessas áreas, dificultando a chance de futuros ataques dos cloretos nessas regiões.

Os novos cloretos que chegaram à armadura, unidos aos cloretos reutilizados na etapa anterior permitem a continuação do processo de corrosão, conforme ilustra a Figura 12.

**Figura 12:** Esquema do mecanismo de corrosão por cloreto.

Fonte: TREADAWAY, 1988; VIEIRA, 2003.

Segundo alguns pesquisadores, a corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto é a principal causa da aceleração da deterioração das estruturas de concreto armado (PINHEIRO, 2016; SILVA, 2016; MEIRA, 2017).

Angst et al. em 2011 relatou que depois que os íons cloretos foram reconhecidos como agentes desencadeadores da corrosão, grandes esforços em pesquisas têm sido feitos a este respeito. O aspecto principal dos estudos é: analisar as características do cimento que influenciam no processo (MEIRA, 2014; VIEIRA, 2010), modelar o fenômeno de transporte e processo de corrosão (MALHEIRO, 2014; MEDEIROS et al, 2015b; DE BARROS, et al 2016) e caracterizar os níveis de presença salina em zona de atmosfera marinha (MEDEIROS et al, 2010; ŠOMODÍKOVÁ et al, 2015; MEDEIROS et al, 2015a; KONEČNÝ, 2016).

Não há dúvida sobre a ação danosa que os íons cloretos exercem sobre as armaduras, tendo em vista que os cloretos aumentam essencialmente a condutividade elétrica do eletrólito, acelerando o processo corrosivo.

#### 2.5.4. Ação dos Íons Sulfatos no Concreto Armado

Os materiais de base cimentícia, como é o caso do cimento Portland, são materiais suscetíveis à ação degradante e destrutiva do meio aquoso contaminado por sulfatos. A esta ação danosa dá-se o nome de “ataques por sulfatos”. O ataque por sulfato é o termo comumente utilizado para descrever reações químicas entre os íons sulfato e os componentes do concreto endurecido, especialmente a pasta de cimento, como mostram diversas pesquisas realizadas em todo o mundo.

De acordo com diversos estudos à cerca do tema, o ataque de sulfatos é uma manifestação patológica clássica que ocorre na interação de íons sulfatos presente na pasta de cimento hidratada. Porém, o ataque por sulfatos pode se manifestar de várias formas, pois sua origem pode ser tanto do meio externo, quanto internamente a partir dos sulfatos presentes na composição do cimento (BROWN, 2002).

O ataque por sulfatos se dá por um mecanismo de deslocamento interno de uma frente de ataque. O processo completo de deterioração do concreto pelo ataque de sulfatos dá-se da seguinte forma (SOUZA, 2006):

- a. Difusão dos íons agressivos para o interior da matriz cimentícia, que ocorre em função da porosidade e permeabilidade do concreto;
- b. Reações químicas entre o íon sulfato e alguns constituintes hidratados do cimento (portlandita, monossulfoaluminato e outros aluminatos hidratados) formando espécies químicas que resultam em expansão;
- c. Fissuração da matriz, algumas vezes associada à reação química de descalcificação do C- S-H, resultando em perda de resistência e desintegração.

Segundo Collepari (1996) a formação de gesso causa perda de resistência mecânica, diminuição da adesão, lascamento e expansão. A formação da etringita está intimamente associada à expansão e fissuração do concreto, já a formação da taumasita tem o efeito mais danoso, capaz de transformar o concreto endurecido em uma massa não coesa.

Paralelamente a este processo de deterioração pode ocorrer uma ação danosa oriunda da cristalização de sais. Irassar et al. (1996) concluíram que o mecanismo de



ataque por sulfato de sódio pode ser dividido entre formação de etringita, formação de gipsita e cristalização de sais. Os compostos formados pela reação química de degradação ocupam mais espaço que os compostos originais, causando expansão, ruptura e fissuração. Conjuntamente a este efeito, os sais de sulfatos cristalizados também ocupam mais espaço na matriz cimentícia do que dissolvidos.

De acordo com o Building Research Establishment (2001, apud MILITITSKY et al, 2005, p.168), os fatores que influenciam o ataque por sulfatos são:

- a) A quantidade e natureza do sulfato presente (quanto maior a concentração de sulfatos no solo ou na água subterrânea, mais severo será o ataque),
- b) O nível da água e sua variação sazonal,
- c) O fluxo da água subterrânea e a porosidade do solo,
- d) A forma da construção e
- e) A qualidade do concreto.

Na Figura 13 observa-se uma estrutura degradada pela ação de sulfatos.

**Figura 13:** Pilar degradado pela ação íons sulfato.



Fonte: SOUZA, 2006.

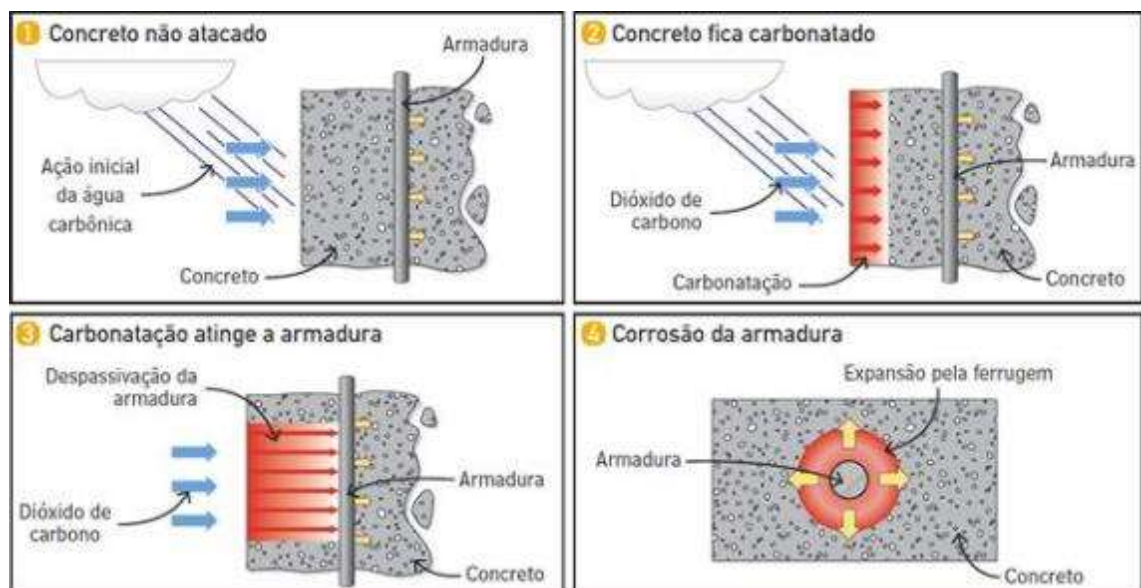
### 2.5.5. A Ação do CO<sub>2</sub> no Concreto Armado

Segundo Rebmann (2011), carbonatação é o processo no qual o gás carbônico presente no ar penetra no concreto por difusão e reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) produzido pela reação de hidratação do cimento. Isto leva a formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e causa a redução na alcalinidade do concreto.

A carbonatação do concreto representa um dos principais fatores desencadeantes do processo corrosivo das armaduras, visto que é responsável pela redução da alcalinidade do concreto (pH 7-9) o que altera as condições de estabilidade química da película apassivadora da armadura, propiciando o início de um processo de corrosão generalizada como observado na

Figura 14.

**Figura 14:** Esquema simplificado de corrosão da armadura por carbonatação.



Fonte: Corsini, 2013.

Esse processo se dá pela penetração do CO<sub>2</sub> nos poros do concreto, e dependendo da umidade, dilui-se na estrutura formando o composto chamado ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Este ácido reage com alguns componentes da pasta de cimento

hidratada resultando em água e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). O principal composto carbonatado pelo dióxido de carbono é o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), porém são também carbonatáveis o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), o hidróxido de potássio ( $\text{KOH}$ ) e os silicatos alcalinos (TAYLOR, 1997), como mostra nas equações simplificadas 2, 3 e 4.



Após a despassivação, o processo de corrosão iniciará se ao mesmo tempo houver eletrólito, diferença de potencial, agentes agressivos e oxigênio ao redor da armadura. No entanto, o carbonato de cálcio não deteriora o concreto, porém durante a sua formação consome os álcalis da pasta reduzindo assim o pH e despassivando a camada protetora do aço.

Vários estudos vêm sendo desenvolvido sobre a ação do dióxido de carbono no concreto armado e Chengfang em 2012 mostrou que quanto maior o período de exposição ao  $\text{CO}_2$ , maior também é o coeficiente de difusão de cloretos, ao contrário de Backus et al. (2014) e Malheiro et al. (2016) que, contrariando a literatura, mostraram que a combinação da carbonatação com o ingresso de cloretos pode agir reduzindo a penetração desses íons no concreto.

Bolina e Cascudo (2013) analisaram a eficiência preventiva de diferentes tipos de inibidores (nitrito de sódio, nitrito de cálcio, molibdato de sódio, amina e ‘tanino) na resistência à corrosão frente ao ataque por cloretos e carbonatação, e os resultados do estudo indicaram que todos inibidores, exceto o tanino, apresentaram boa capacidade de inibição da corrosão frente à carbonatação.

Estudos científicos recentes têm analisado o processo de captura do CO<sub>2</sub> pelo concreto, através das reações de carbonatação, durante sua vida útil (NEVES, 2014; TRAN, 2016; FELIX, 2018). No entanto, devem ser realizados mais estudos correlatos para que possa garantir que o “sequestro” de CO<sub>2</sub>, devido ao processo de carbonatação do concreto, seja de fato considerado uma medida compensatória.

## Capítulo 3

### 3. Materiais e Métodos: Procedimento Experimental

A presente pesquisa tem como finalidade analisar a influência do uso do resíduo de vidro utilizado no concreto como substituição parcial do agregado miúdo nas porcentagens de 0 %, 15 % e 30 %, com moldagem total de 48 amostras de corpos de prova 100 mm x 200 mm que foram submetidas à ação dos Íons Cloreto, Íons Sulfatos e Carbonatação.

Nesse capítulo, portanto, é descrito como foi realizado todo o programa experimental, onde são expostos de maneira detalhada: os métodos adotados, os equipamentos e os materiais utilizados para a realização dos ensaios. O planejamento da pesquisa foi baseado nas referências bibliográficas pesquisadas, em informações e diálogos trocados com os professores orientadores e referências de pesquisas anteriormente realizadas com tema semelhante.

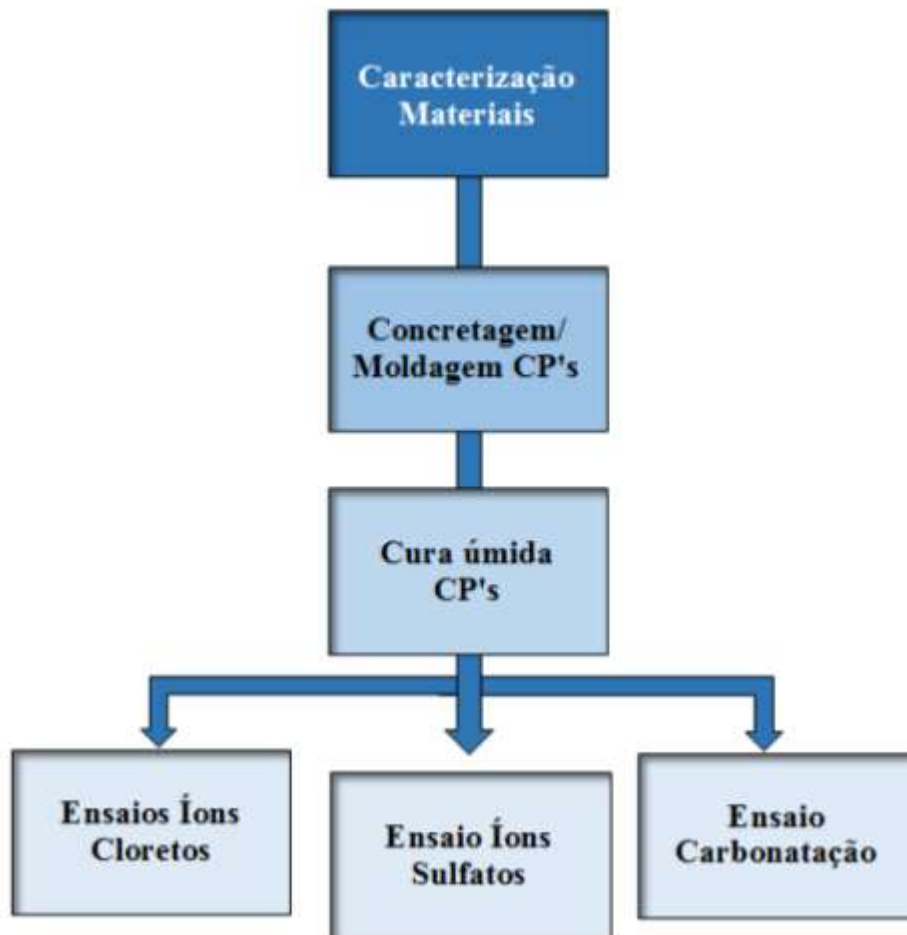
A presente pesquisa traçou uma estratégia que se divide nas seguintes etapas:

1. Ensaio de caracterização granulométrica dos materiais utilizados no traço de concreto (areia, brita e vidro).
2. Moldagem de corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensões de 100 mm x 200 mm, com três diferentes porcentagens de substituição do resíduo de vidro: 0 %, 15 % e 30 %.
3. Método de cura úmida por imersão total em tanque, por 28 dias, conforme a ABNT NBR 5738 (2015).

4. Método de indução da penetração de íons cloreto por meio de 10 ciclos de imersão parcial em solução de Cloreto de Sódio (NaCl), cuja concentração é de 5% de NaCl /1000ml de água potável, por 12 horas cada ciclo. Em seguida, foi realizada a secagem em estufa a 50° C, por 12 horas, a fim de avaliar os efeitos da penetração de íons cloreto no concreto.
5. Ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com a aspersão de Nitrato de Prata (AgNO<sub>3</sub>), cuja concentração é de 2,5g de AgNO<sub>3</sub> / 100ml de água destilada.
6. Método de Teste Padrão para Indicação Elétrica da Capacidade do Concreto de Resistir à Penetração de Íons de Cloreto, por meio de corrente contínua em circuito elétrico seriado de 60 v, normatizado pela ASTM C1202: 2017.
7. Método de aceleração de penetração de Íons Sulfato de Cálcio (CaSO<sub>4</sub>), por imersão total das amostras em meio agressivo durante 60 dias.
8. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos submetidos ao meio agressivo (água sulfatada), conforme a ABNT NBR 5739 (2018).
9. Método de aceleração da Carbonatação por meio de câmara de Gás Carbônico (CO<sub>2</sub>), com amostras submetidas ao gás durante os períodos de: 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias.
10. Ensaio de aspersão de fenolftaleína para avaliação da profundidade de penetração do CO<sub>2</sub> nas amostras de concreto.

Para melhor compreensão das atividades desempenhadas nesta pesquisa, é apresentado na Figura 15 um breve fluxograma das etapas de ensaios realizados, que serão explanados detalhadamente no decorrer desse capítulo.

Figura 15: Fluxograma Ensaios.



Fonte: Autora, 2019.

### 3.1. Materiais Utilizados

Nesse tópico, são apresentados os materiais escolhidos para fabricação dos corpos de prova, utilizados no procedimento experimental. Encontram-se também, informações sobre o traço do concreto e as propriedades de seus componentes (cimento, areia, brita e vidro).

#### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland composto com pozolana (CPII Z - 32), indicado para obras estruturais e mais utilizado na nossa região.

A análise química para o cimento utilizado, de acordo com informações do fabricante, pode ser visualizada na Tabela 2, já a sua caracterização física está apresentada na Tabela 3.

**Tabela 2** – Análise química do aglomerante.

<b>ANÁLISE QUÍMICA DO AGLOMERANTE</b>				
<b>Ensaio</b>	<b>NBR</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigência</b>
Perda ao fogo	ABNT NM 18/12	%	4,83	≤ 6,5
Resíduo insolúvel	ABNT NM 16/12	%	11,56	≤ 16,0
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	ABNT NM 16/12	%	2,34	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)	ABNT NM 21/12	%	2,67	≤ 6,5
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	ABNT NM 20/12	%	4,12	≤ 5,0

Fonte: Dados do fabricante.

**Tabela 3** – Propriedades físicas do aglomerante.

<b>PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGLOMERANTE</b>				
<b>Ensaio</b>	<b>NBR</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigência</b>
Área Específica	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	3853	≥ 3000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,13	Não aplicável
Início de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	192	≥ 60
Fim de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	242	≤ 600
Resistência à compressão (3 dias)	ABNT NBR 7215/97	MPa	22,2	≥ 10
Resistência à compressão (7 dias)	ABNT NBR 7215/97	MPa	29,6	≤ 20

Fonte: Dados do fabricante

### 3.1.2 Agregado miúdo

Os agregados miúdos utilizados foram: a areia lavada média, e o resíduo de vidro moído proveniente de garrafas de cerveja tipo “long neck”. Ambos os materiais apresentam granulometria e características semelhantes com suas propriedades físicas e análises granulométricas apresentadas seguir, nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Foram utilizadas duas amostras de 300 g cada, onde ambas apresentam dimensão



granulométrica máxima de 2,36 mm e características satisfatórias para utilização no concreto.

O que é possível destacar, é que o resíduo de vidro, por se tratar de um material processado traz características de formato lamelar, sem porosidade e superfícies lisas com irregularidades em sua forma. Diferentemente da areia que apresenta características de formato granular e superfícies porosas com formas regulares.

**Tabela 4** – Características físicas do agregado miúdo Areia.

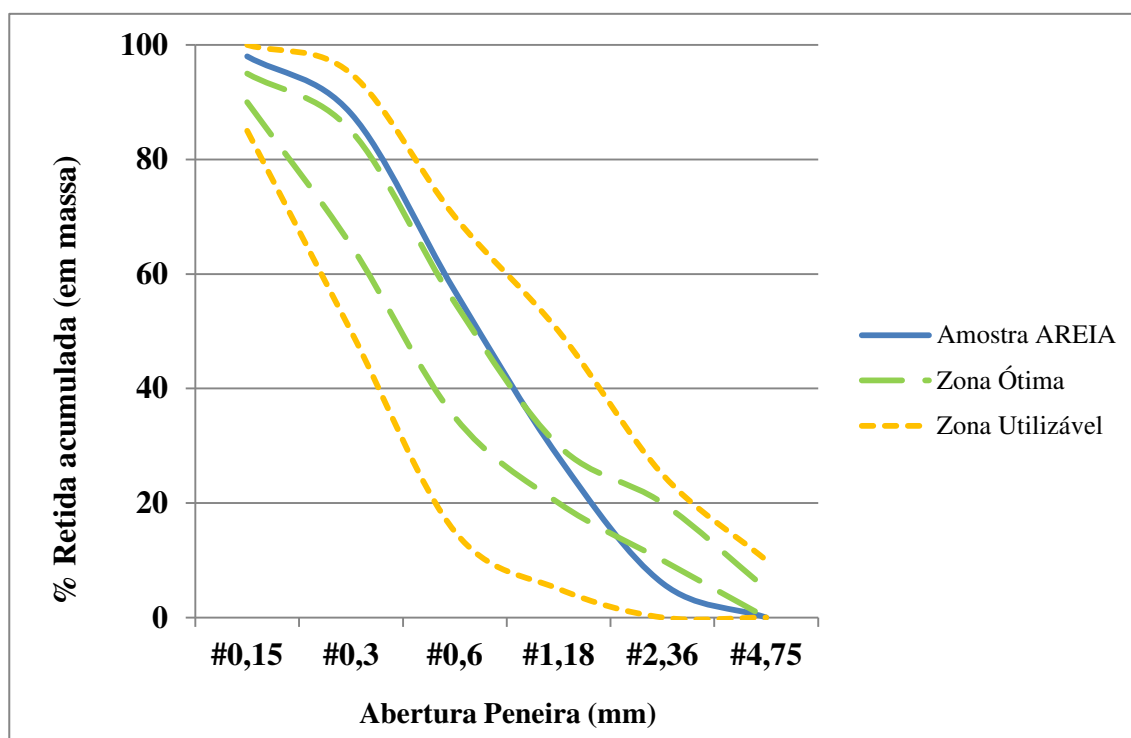
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO</b>						
<b>Característica</b>	<b>Método de ensaio ABNT NM 65/03</b>			<b>Areia natural média</b>		
Abertura da peneira (mm)	Amostra 1 (300g)	Amostra 2 (300g)	Média das Amostras	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)	
<b>Distribuição granulométrica</b>	4,75	0,0	0,0	0,0	00	
	2,36	15,9	18,2	17,0	06	
	1,18	62,4	67,4	64,9	22	
	0,60	85,4	90,2	87,8	29	
	0,30	95,0	91,6	93,3	31	
	0,15	32,4	27,2	29,8	10	
	<b>Fundo</b>	8,1	5,4	6,7	02	100
	<b>Total</b>	<b>299,2</b>	<b>300,0</b>	<b>299,5</b>	<b>100</b>	<b>277</b>

Fonte: Autora, 2019.

A Figura 16 apresenta graficamente a composição granulométrica do agregado miúdo utilizado no traço desenvolvido para esta pesquisa. Essa composição enquadra-se na Zona 3, considerada uma areia média, segundo a norma brasileira NBR 7211 (2009).

Através da observação do gráfico é possível identificar que as amostras de areia analisadas, encontram-se nos limites de utilização das Zona Utilizável Inferior e Zona Utilizável Superior, com uma faixa de transição na Zona Ótima, e diversos pontos limítrofes na Zona Ótima.

Figura 16: Composição granulométrica Areia



Fonte: Autora, 2019.

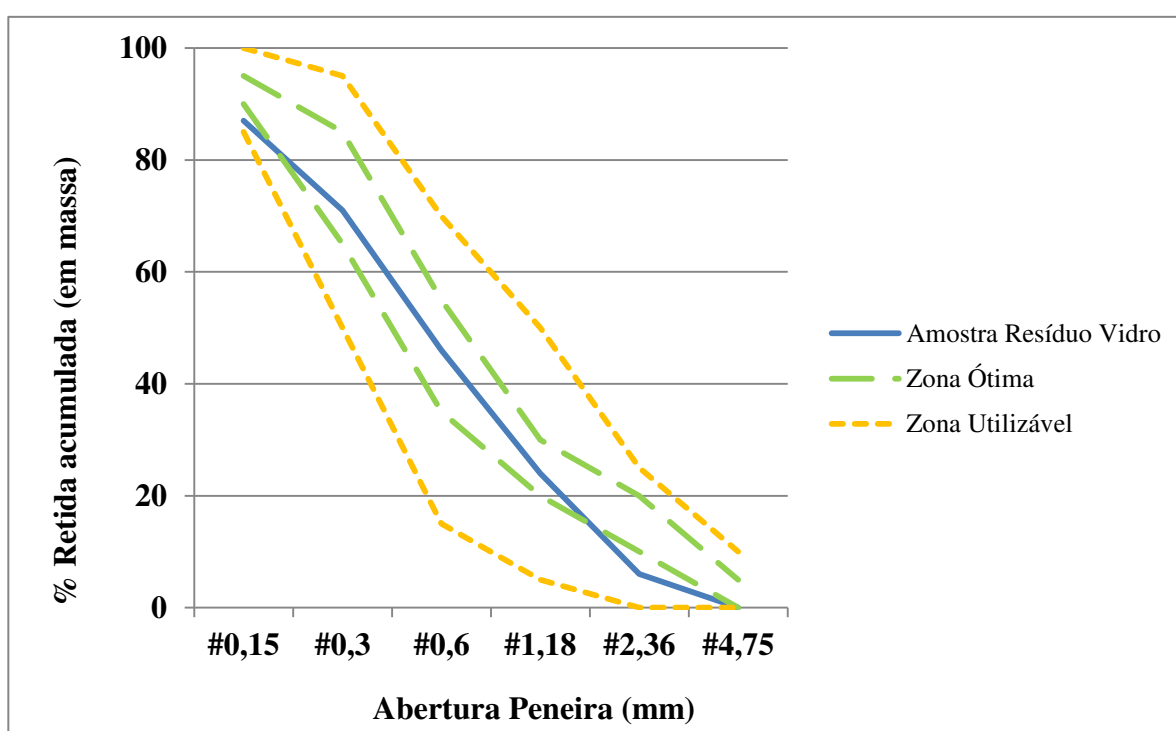
Tabela 5 – Características físicas do agregado miúdo Resíduo de Vidro.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO					
Característica	Método de ensaio ABNT NM 65/03			Resíduo de Vidro	
Abertura da peneira (mm)	Amostra 1 (300g)	Amostra 2 (300g)	Média das Amostras	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)
Distribuição granulométrica	4,75	0,0	0,0	0,0	00
	2,36	18,8	18,9	18,8	6
	1,18	54,6	51,8	53,2	18
	0,60	67,6	66,8	67,2	22
	0,30	73,8	73,6	73,7	25
	0,15	46,7	49,2	47,9	16
	Fundo	38,0	39,5	38,7	13
	Total	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>100</b>

Fonte: Autora, 2019.

A Figura 17 apresenta graficamente a composição granulométrica do agregado miúdo (resíduo de vidro) utilizado no traço desenvolvido para esta pesquisa. Essa composição bem como a areia utilizada também enquadra-se na Zona 3, podendo ter avaliação semelhante a areia média, segundo a norma brasileira NBR 7211 (2009). Diante desta apreciação, o resíduo de vidro foi considerado apto para substituição parcial do agregado miúdo areia média, pois como é perceptível no gráfico, grande parte da curva das amostras de resíduo de vidro utilizadas encontram-se dentro da Zona Ótima, e com alguns pontos de sua granulometria dentro da Zona Utilizável Inferior.

**Figura 17:** Composição granulométrica Resíduo de Vidro



Fonte: Autora, 2019.

### 3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no traço desenvolvido foi a Brita 19 que possui variação entre 9,5mm e 19,0mm, ou também conhecida comercialmente como Brita1, de origem basáltica, cujas propriedades físicas e análise granulométrica encontram-se descritas a seguir, na Tabela 6 e graficamente na Figura 18, respectivamente.

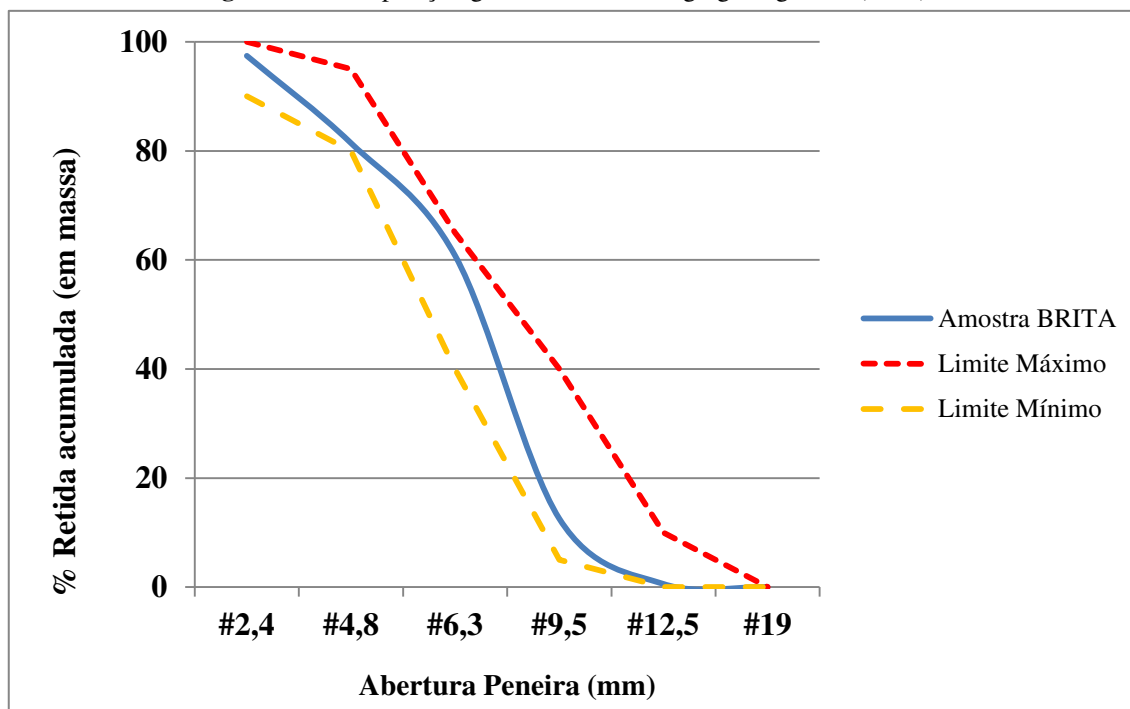
**Tabela 6** - Propriedades físicas do agregado graúdo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO GRAÚDO				
Característica		Método de ensaio	Brita 19	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,64	
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	12,5	
Módulo de finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	6,48	
Abertura da peneira (mm)		ABNT NM 65/03	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)
Distribuição granulométrica	19		0	0
	12,5		0,58	0,58
	9,5		11,96	12,54
	6,3		48,23	60,77
	4,8		20,66	81,43
	2,4		16,01	97,44

Fonte: Autora, 2019.

As composições granulométricas da brita estão apresentadas graficamente na Figura 18, na qual os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211 (2009).

**Figura 18** - Composição granulométrica do agregado graúdo (Brita)



Fonte: Autora, 2019.

### 3.1.4 Água

Ao longo da pesquisa, foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de distribuição do Recife, tanto para confecção do traço de concreto, quanto para a cura submersa das amostras.

### 3.1.5 Corpos de prova

A fabricação dos corpos de prova cilíndricos de concreto para a realização dos ensaios seguiu as orientações da ABNT NBR 5738 (2015) – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

As formas metálicas utilizadas têm forma cilíndrica e diâmetro de 10 cm, e altura de 20cm, cujas dimensões são compatíveis com o tipo de concreto e com a dimensão dos agregados utilizados. É importante impermeabilizar as formas com material não absorvente e que não reaja com o cimento Portland, e identificar as amostras com numeração e indicação dos traços.

Após moldados, as amostras foram posicionadas em uma base de superfície plana e seca, na qual permaneceu durante as próximas 24 horas, até serem desmoldadas, conforme Figura 19.

**Figura 19:** Corpos de prova Cilíndricos



Fonte: Autora, 2019.

### 3.1.6 Traço do Concreto

O traço do concreto utilizado foi determinado entre a orientadora da pesquisa e baseado em pesquisas de outros autores sobre o tema. Para fabricação dos corpos de prova as descrições do traço estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Traço do concreto.

<b>TRAÇO DO CONCRETO</b>			
<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>	<b>Relação a/c</b>
1,00	1,75	2,75	0,55

Fonte: Autora, 2019.

O traço empregado costuma ser bastante utilizado nas obras de Recife, adotou-se a relação água/cimento de 0,55 cuja resistência à compressão desejável é de  $\leq 30$  MPa.

### 3.1.7 Preparação do resíduo de Vidro

O resíduo de vidro proveniente de garrafas de bebidas tipo long neck coletadas na Ilha de Fernando de Noronha, é processado numa central de resíduos no próprio arquipélago. Chegou ao continente triturado com granulometria semelhante à areia média, contendo algumas sugilidades de embalagens e pouca matéria orgânica.

Para preparação deste material, primeiramente o resíduo foi lavado, secou em local seco e ventilado, e posteriormente foram removidos manualmente os resíduos de embalagens que restaram, conforme é possível visualizar na Figura 20 a seguir.

**Figura 20:** Resíduo de Vidro.



Fonte: Autora, 2019.

### **3.1.8 Concretagem, Moldagem e Cura**

A concretagem das amostras aconteceu em dois dias de trabalho, com o auxílio de um ajudante geral de obra com experiência em manuseio de betoneira e concretagem. O processo de concretagem, moldes e cura submersa seguiu as seguintes etapas:

- Pesagem do material em balança digital de precisão;
- Mistura dos materiais em betoneira elétrica de 50 litros, até o concreto apresentar forma e consistência úmida e uniforme;
- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, também conhecido como Slump Test conforme prevê a norma NBR NM 67 (1998);
- Moldagem dos corpos de prova em formas metálicas cilíndricas com vibração elétrica através de vibrador tipo mangote, conforme prevê a norma NBR 5738 (2015);
- Identificação das amostras contendo numeração e traço.



Para ilustrar as etapas descritas, segue as Figuras 21, 22 e 23 a seguir.

**Figura 21:** Mistura do concreto em betoneira



Fonte: Autora, 2019.

Todas as etapas de preparação das amostras e confecção foram realizadas no Laboratório de Materiais da Universidade Católica de Pernambuco. O Slump test foi realizado em todas as betonadas, para cada traço rodado.

**Figura 22:** Slump Test



Fonte: Autora, 2019.



**Figura 23:** Moldagem e vibração das



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2019.

Após as amostras terem sido moldadas, ficaram em superfície plana e em local seco e arejado por 24 horas. Após este período, foram retiradas das formas, devidamente identificadas e imediatamente acondicionadas em tanque de cura submersa pelo período de 28 dias, conforme prevê a norma NBR 5738 (2015) (Figura 24).

**Figura 24:** Cura submersa corpos de prova



Fonte: Autora, 2019.

### 3.1.9 Ensaios de Caracterização e Resistência à Compressão

Para o planejamento da concretagem e preparação dos materiais, foi necessário caracterizar a granulometria do resíduo de vidro (Figura 25), da areia (Figura 26) e da brita 19, os três materiais passaram pelo processo de peneiramento mecânico, cujas amostras foram tomadas aleatoriamente. Para as amostras de areia e resíduo de vidro, foram adotadas pesagens de 500g conforme prevê a norma NBR 7217 (1987) Agregados - Determinação da composição granulométrica.

**Figura 25:** Caracterização Granulometria Resíduo de Vidro



Fonte: Autora, 2019.

**Figura 26:** Caracterização Granulometria Areia



Fonte: Autora, 2019.

Para a caracterização granulométrica da brita 19, é tomada uma amostra aleatória de 2.000 g e submetida ao peneiramento mecânico da sequência das seguintes

peneiras: #19mm, #12,5mm, #9,5mm, #6,3mm e #4,75mm (Figuras 27 e 28), conforme prevê a norma NBR 7217 (1987).

**Figura 27:** Caracterização Granulometria Brita 19



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2019.

**Figura 28:** Composição Granulométrica Brita 19



Fonte: Autora, 2019.



A resistência à compressão no Brasil é obtida através da tensão de ruptura à compressão axial do corpo de prova cilíndrico de concreto, cujas dimensões devem obedecer à relação: altura igual ao dobro do diâmetro (em centímetros), atualmente para um corpo de prova usual, utilizado no controle de edificações urbanas, as dimensões ideais seriam:  $(100\pm 1)$  mm por  $(200\pm 4)$  mm. Em alguns países são adotados corpos de prova cúbicos, em outros, prismáticos (HELENE, 2012). A norma brasileira NBR 7215 (2019) Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos preconiza a quantidade de amostras e determina as etapas do ensaio.

Para esta pesquisa, foram utilizadas 12 (doze) amostras, sendo 04 (quatro) corpos de prova de cada traço: 0 %, 15 % e 30 % (Figura 29).

**Figura 29:** Amostras para Ensaio de Compressão Axial



Fonte: Autora, 2019.

Os corpos de prova cilíndricos 100 mm x 200 mm foram submetidos à prensa hidráulica (Figura 30) de acordo com os procedimentos NBR 5739:2018 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

**Figura 30:** Ensaio Compressão Axial - Prensa Hidráulica



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2019.

### 3.1.10 Ensaio Contaminação por Íons Cloretos

Para simular a contaminação por íons cloretos no concreto com resíduo de vidro, foram adotados dois métodos de ensaios:

1. Indução da penetração de íons cloreto nos corpos de prova por meio de ciclos de imersão parcial e secagem.  
Ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata.

2. Teste Padrão para Indicação Elétrica da Capacidade do Concreto de Resistir à Penetração de Íons de Cloreto, por meio de corrente contínua em circuito elétrico seriado de 60 v, normatizado pela ASTM C1202 (2017).

Silva et al. (2015), desenvolveu um procedimento de indução de penetração de íons cloreto, através de ciclos de imersão parcial em solução de Íons Cloreto de Sódio e secagem. Nesse procedimento realizado na Universidade Católica de Pernambuco, a imersão parcial dos corpos de prova foi feita em solução com 5% NaCl com duração de 2 (dois) dias e a etapa de secagem, com duração de 5 (cinco) dias em estufa ventilada. Assim como Monteiro (2002), também utilizou em sua pesquisa empregando este mesmo método de indução de penetração de Íons Cloreto para avaliar a extração eletroquímica de cloretos em reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.

Nesta pesquisa, foram adotados 10 ciclos de imersão parcial e secagem em estufa à temperatura de 50° C, totalizando 24 horas cada ciclo. Todas as amostras passaram por um período de secagem de 30 (trinta) dias em ambiente controlado no laboratório, e só então os ciclos iniciaram conforme descrito na Tabela 8 a seguir.

**Tabela 8** - Etapas do procedimento de indução da penetração de cloretos.

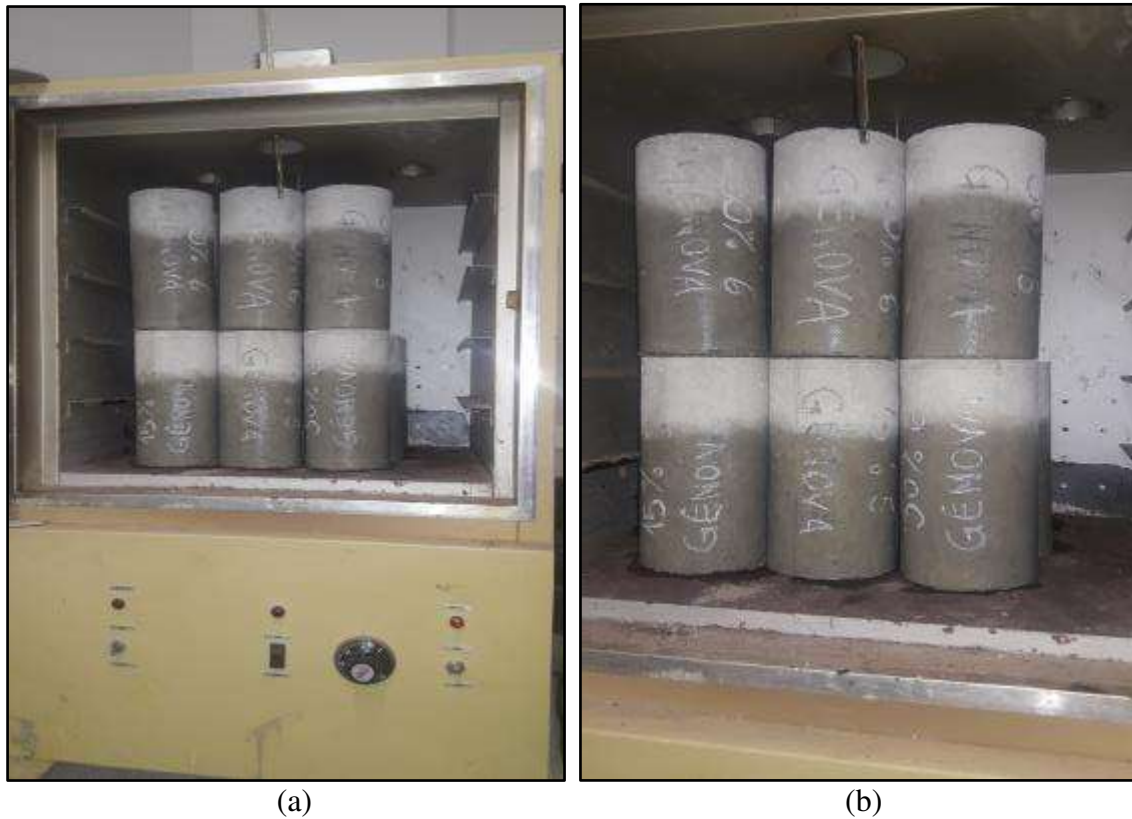
Ciclo	Condição	Quantidade	Duração
Umedecimento	Parcialmente submerso em solução de 5% de NaCl/1000ml	10	12 horas
Secagem	Estufa à 50° C	10	12 horas

Fonte: Autora, 2019.

Como o concreto é um material capaz de reter e perde umidade para o ambiente em velocidade significativamente inferior àquela que ele absorve, é necessário obter

grande controle no procedimento de secagem das amostras, fazendo uso da estufa ventilada e do rigoroso controle de estabilidade da temperatura. Para garantir o sucesso deste procedimento, a secagem consiste em dispor os corpos de prova em estufa ventilada, mantendo-se a temperatura em 50 °C , num período de 12 horas (Figura31).

**Figura 31:** Secagem de Amostras em Estufa



Fonte: Autora, 2019.

Para os ciclos de molhagem em imersão parcial, as amostras foram acondicionadas em recipiente limpo, com solução de Cloreto de Sódio (NaCl-) cuja concentração é 5%/1000ml de água potável, de forma que a solução atingisse aproximadamente 50% da altura das amostras (Figura 32).

**Figura 32:** Ciclo de Molhagem em Solução NaCl

Fonte: Autora, 2019.

Após as etapas de indução da penetração de íons cloreto, os corpos de prova foram rompidos diametralmente em prensa hidráulica. Logo em seguida, a zona fraturada, dos corpos de prova, foi submetida ao ensaio clorimétrico de aspersão de Nitrato de Prata ( $\text{AgNO}_3$ ).

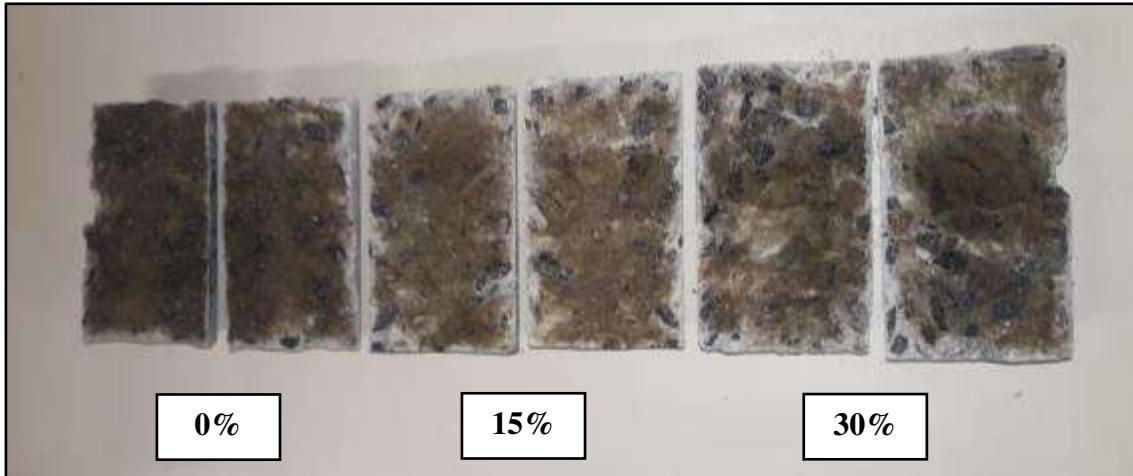
Este método possui caráter qualitativo e objetiva basicamente a identificação visual da presença dos íons cloretos livres através da mudança de coloração do indicador químico. A aspersão de solução de nitrato de prata em uma estrutura de concreto recém-exposta ao meio agressivo é capaz de reagir de maneira imediata. A solução é preparada numa proporção de 2,5g de Nitrato de Prata diluído em 100 ml de água destilada. A manipulação da solução deve ser feita por profissional habilitado, assim como seu manuseio, pois o Nitrato de Prata tem ação fotoquímica capaz de provocar manchas na pele e superfícies.

A execução do ensaio é baseada na aspersão da solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) nas amostras de concreto. Uma reação fotoquímica é realizada, que somente ocorre em presença de luz, ou é catalisada pela mesma. Onde há a presença de cloretos livres, ocorre a formação de um precipitado branco e floculento, denominado cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ). Porém, quando os cloretos se encontram na forma combinada, há a



formação de um precipitado marrom, denominado óxido de prata (PINTAN et al. 2015), conforme mostra a Figura 33.

**Figura 33:** Método Aspersão Nitrato de Prata



Fonte: Autora, 2019.

Ensaio de migração de cloretos são usados para mensurar a capacidade do concreto em inibir o ataque por cloretos. O procedimento do ensaio idealizado por Whiting é ainda recomendado pela ASTM C1202 (2017), ensaio que não permite a determinação do coeficiente de difusão de cloretos, mas é um caminho possível para comparações qualitativas. Contudo muitos estudos, para se determinar o coeficiente de difusão de cloretos, a partir de ensaios de migração, têm sido desenvolvidos (Luping; Nilsson, 1992; Andrade, 1993; Andrade et al., 1999; Truc et al., 2000; Castellote et al., 2001; Yang, 2005; Medeiros; Helene, 2009), gerando a possibilidade de executar comparações quantitativas (MEDEIROS et al., 2012). Assim como Silva et al., (2019), também desenvolveu pesquisa utilizando este mesmo método para avaliar o ataque de íons cloreto em estruturas de concreto, contendo ou não adições minerais.

Nesta pesquisa, os ensaios foram realizados durante 6 (seis) horas, com 4 (quatro) fatias de concreto com espessura de 5 cm, cuja variação deve ser de  $\pm 1$ cm, para cada traço determinado, conforme ilustra a Tabela 9.

**Tabela 9:** Ensaio Migração Íons Cloretos ASTM C1202 (2017).

Traço	Nº de Fatias	Espessura	Duração Ensaio/ Amostra
0%	04	5 cm	6h
SRV 15%	04	5 cm	6h
SRV 30%	04	5 cm	6h

Fonte: Autora, 2019.

Os traços de concreto desenvolvidos foram analisados através do desenvolvimento da norma internacional ASTM C1202 (2017), ensaio intitulado “Método de teste padrão para indicação elétrica da capacidade do concreto de resistir à penetração de íons cloreto”. Esse ensaio, ainda não normatizado no Brasil, consiste na aplicação de uma carga elétrica de 60 V, em um corpo de prova de concreto cilíndrico de 10 cm x 5 cm. Após o processo de moldagem e cura dos corpos de prova, as amostras foram cortadas nas dimensões que a norma preconiza, cuja sugestão é utilizar a face superior do corpo de prova (Figura 34).

**Figura 34:** Fatias Ensaio Norma ASTM C1202 (2017)

Fonte: Autora, 2019.

Porém, de acordo com (MEDEIROS, 2012) não existe influência significativa nos resultados do ensaio de migração de íons, utilizando mais de uma fatia do corpo de prova, além da superior, como sugerida na norma. Para essa pesquisa foram utilizadas quatro fatias de cada traço, sendo apenas a primeira fatia analisada, retirada da face superior do corpo de prova.

Como especifica a norma, antes da realização do ensaio os corpos de prova devem permanecer durante 18h no vácuo submersos em água, com pressão de 50 mm Hg, como mostra na Figura 35, com a finalidade de preencher todos os vazios da microestrutura do concreto.

**Figura 35:** Amostras submetidas ao Vácuo.



Fonte: Autora, 2019.

Após o vácuo, as amostras são secas superficialmente e colocadas no equipamento para o início do ensaio. Uma das faces do corpo de prova tem contato com uma solução líquida de Cloreto de Sódio ( $\text{NaCl}$ -) e a outra com uma solução líquida de Hidróxido de Sódio ( $\text{NaOH}$ ).

A separação entre as soluções e o corpo de prova é feita por uma tela condutora, que está ligada a um circuito associado em série com duas células instaladas, recebendo uma tensão contínua de 60 Volts. O ensaio tem duração de 6h e a cada 30 min é aferida

a corrente passante na fatia ensaiada. A Figura 36 ilustra o circuito durante a execução do ensaio.

**Figura 36:** Circuito Ensaio Migração de Íons Cloretos



Fonte: Autora, 2019.

Com o recebimento da corrente, o circuito montado representa uma eletrólise forçada, onde a posição do ânodo (+) e do cátodo (-) são invertidas, sendo o ânodo (-) e o cátodo (+). No NaCl está o cátodo e no NaOH o ânodo. Onde nós forçamos a difusão do Cloro de um lado do corpo de prova para o outro. O Cloro ao receber a corrente se desloca dentro do corpo de prova, através de seus “vazios” que foram preenchidos com água durante as horas que passou no vácuo submerso inicialmente.

Como especificado na norma, ao final do ensaio o cálculo da carga total passante no corpo de prova durante o ensaio é encontrado através da fórmula:

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + I_{360})$$

Onde:

**I** – é a corrente a cada 30 minutos, em Ampère;

**Q** – é a carga total passante durante todo o ensaio, em Coulomb.

Ao obter a carga total passante, utiliza-se a Tabela 10, mostrada a seguir, disponibilizada pela própria norma ASTM C1202 (2017), para a determinação da resistência à penetrabilidade de íons cloreto no concreto.

**Tabela 10:** Penetrabilidade de íons cloreto baseado na Carga Passante

<i>Charge Passed (Coulombs)</i> Carga Passante (Coulombs)	<i>Chloride Ion Penetrability</i> Penetrabilidade do cloreto de sódio
<b>&gt;4.000</b>	<b>High - Alto</b>
<b>2.000 – 4.000</b>	<b>Moderate - Moderado</b>
<b>1.000 – 2.000</b>	<b>Low - Baixo</b>
<b>100 – 1.000</b>	<b>Very Low – Muito Baixo</b>
<b>&lt;100</b>	<b>Negligible - Insignificante</b>

Fonte: Adaptado, ASTM C1202:2017.

### 3.1.11 Ensaios Íons Sulfatos

O Mehta Test, apresentado por Mehta e Gjorv (1974) foi um dos testes mais conhecidos com corpos de prova. Inicialmente dentro da proposta envolvia a confecção de corpos de prova de pasta cúbicos com 12,5 mm de aresta e relação a/c 0,5. Para a realização deste teste, os corpos devem ser colocados num ambiente úmido com temperatura de 50°C por sete dias, de maneira a acelerar a cura e garantir que antes da imersão a pasta se encontre adequadamente hidratada. A imersão é realizada em uma solução de 4% de Sulfato de Sódio, garantindo um teor de SO<sub>3</sub> de 2,8% .

São submetidos os corpos de prova ao ensaio de resistência à compressão axial após 14 e 28 dias de imersão. De acordo com Prudêncio (1993) o teste também foi usado para testar cimentos com adição de escória, porém, com diferenças no procedimento de cura. O critério utilizado para considerar um cimento como resistente a sulfatos foi a obtenção de uma diminuição de resistência menor que 20%.

Nesta pesquisa, o método experimental adotado foi a imersão total das 12 (dose) amostras em meio aquoso com solução agressiva de Sulfato de Cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) cuja concentração foi de 2,8%, ao longo de 70 dias em temperatura ambiente (Figura 37).

**Figura 37:** Imersão de amostras em solução Sulfato de Cálcio



Fonte: Autora, 2019.

Após o período determinado, as amostras de concreto foram submetidas à análise visual para identificação de formação de cristais, aferição de dimensões, pesagem e ensaio de compressão axial (Figura 38).



**Figura 38:** Ensaio Compressão Axial - Sulfato



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2019.

O Sulfato de Cálcio foi o composto químico escolhido para ser utilizado nesta pesquisa, por ser o mais presente na construção civil. É facilmente encontrado na natureza e pode se apresentar na forma de cristais de anidrita ou gipsita (gesso).

### 3.1.12 Ensaio Carbonatação

O método empregado para avaliar o ataque por carbonatação acelerada ao concreto contendo resíduo de vidro foi a utilização da câmara de carbonatação, método este amplamente utilizado por diversos pesquisadores, tais como: Abreu (2004), Cadore (2008), Nascimento (2017), entre outros.

Para desenvolver este ensaio, as etapas foram realizadas em câmara de carbonatação construída pelos alunos do curso de mestrado da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco e da Universidade Católica de Pernambuco. O procedimento consiste em utilizar uma câmara hermeticamente fechada na qual se introduz o gás CO<sub>2</sub> em teores superiores aos encontrados na atmosfera, com controle de sensor que indica a concentração do gás presente no interior da câmara (Figura 39).

Doze amostras de concreto foram submetidas à ação do gás por diferentes períodos, para que fosse possível avaliar o avanço da penetração do CO<sub>2</sub> ao longo das idades, sendo 3 (três) amostras para cada idade de exposição, conforme ilustra a Tabela 11.

**Tabela 11:** Ensaio Câmara de Carbonatação

<b>Traço</b>	<b>Nº de Amostras</b>	<b>Idades do Ensaio</b>
<b>0%</b>	01	07 dias
	02	14 dias
	03	21 dias
	04	28dias
<b>SRV 15%</b>	05	07 dias
	06	14 dias
	07	21 dias
	08	28dias
<b>SRV 30%</b>	09	07 dias
	10	14 dias
	11	21 dias
	12	28dias

Fonte: Autora, 2019.



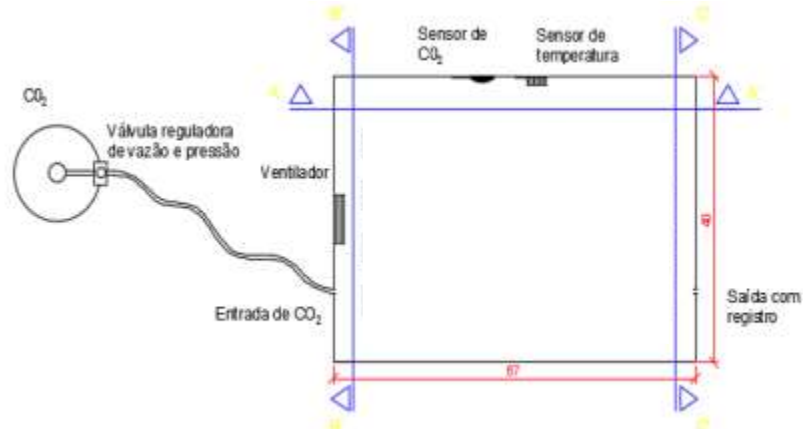
**Figura 39:** Câmara de Carbonatação



Fonte: Autora, 2019.

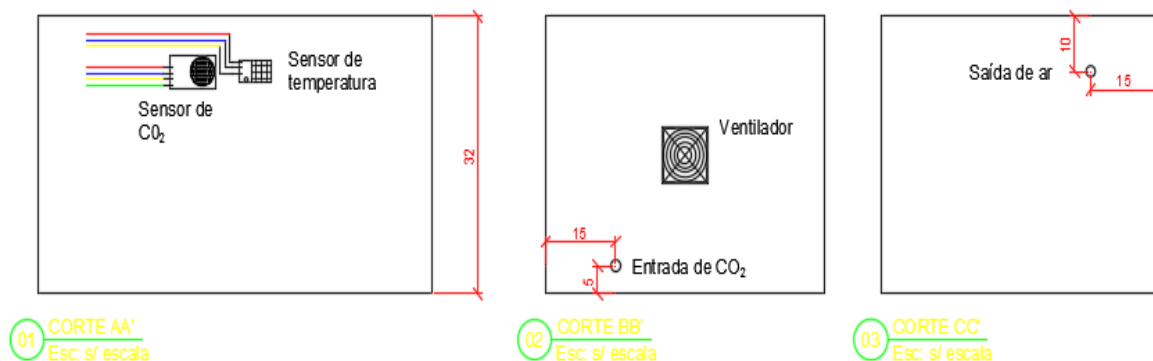
A câmara de carbonatação foi desenvolvida seguindo os princípios de Bauer (1995) com algumas adequações necessárias à realidade da pesquisa, como é demonstrado nas Figuras 40 e 41 respectivamente. O gás na concentração de 100% é injetado na câmara através de uma válvula localizada na parte inferior, a saída é localizada na parte superior da câmara, como o ar é mais denso que o CO<sub>2</sub>, o mesmo se desloca por entre os corpos de prova expulsando o ar pela válvula de saída localizada no topo da câmara.

**Figura 40:** Esquema da câmara de carbonatação montada



Fonte: MARQUES, 2018.

**Figura 41:** Cortes Câmara de Carbonatação



Fonte: MARQUES, 2018

O sistema utilizado para regular a pressão e a vazão do CO<sub>2</sub> é composto por um cilindro com capacidade para 10 kg, acoplado em um regulador de vazão e pressão analógicos, possibilitando a regulagem e controle da vazão do gás que entra na câmara e também a pressão no cilindro.

Os corpos de prova, ao saírem da cura úmida, encontravam-se saturados, e por este motivo, não possuíam condições adequadas de serem submetidos imediatamente à carbonatação devido aos poros estarem preenchidos de água. Sendo assim, as amostras passaram por um período de secagem em temperatura ambiente por 30 dias antes de iniciar as etapas do ensaio, a partir de então os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação acelerada.

O método foi realizado através da aplicação diária de dois fluxos intermitentes de CO<sub>2</sub> na câmara de carbonatação, com vazão de 20l/min e duração de 4 minutos. Como o volume total da câmara era de 80 litros, a cada fluxo aplicado injetava-se um volume de CO<sub>2</sub> correspondente a aproximadamente 100% do volume total da câmara.

O ensaio acelerado de corrosão por carbonatação foi realizado por um período total de 28 dias. Ao sair da câmara, as amostras foram submetidas ao ensaio de tração por compressão diametral do concreto (Figura 42).

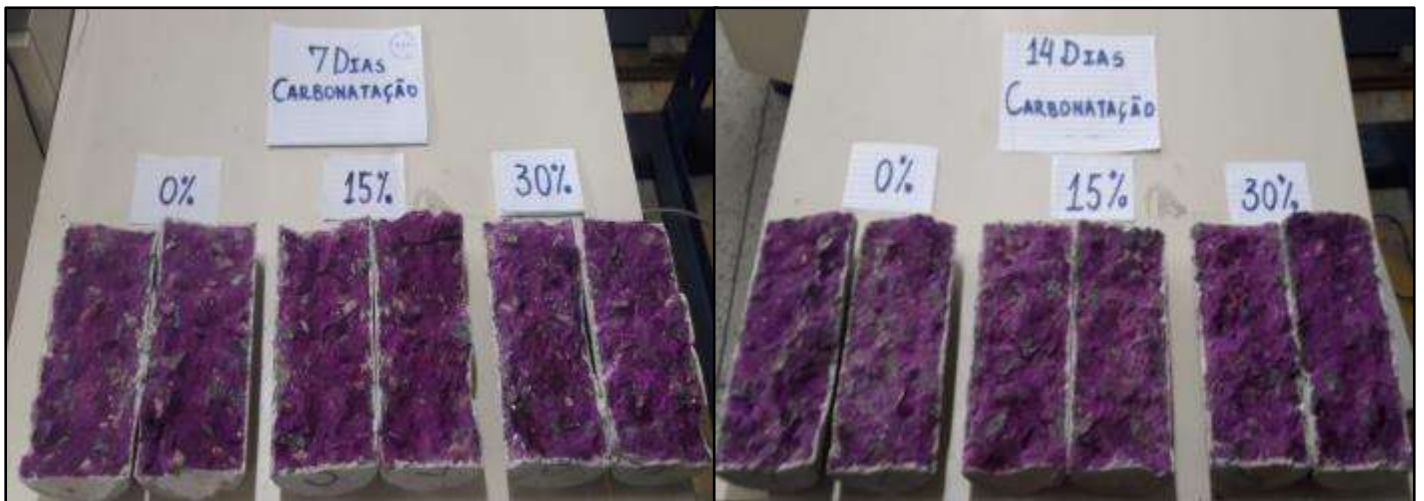
**Figura 42:** Rompimento de Corpo de Prova por Compressão Diametral.



Fonte: Autora, 2019.

Existem diferentes formas de avaliar o avanço da frente de carbonatação. Uma delas é por acompanhamento da evolução de massa. Outra forma simples, é o emprego de indicadores (Fenolftaleína e Timolftaleína) que indicam mudança de pH entre 8 e 11 permitindo mensurar a espessura carbonatada (Helene, 1986). Nesta pesquisa o método escolhido foi o indicador químico de aspersão de Fenolftaleína em toda face interna das amostras, aferindo com paquímetro a evolução da frente de carbonatação que penetrou nos corpos de prova (Figura 43).

Figura 43: Método Aspersão Fenolftaleína - Carbonatação



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Autora, 2019.

## Capítulo 4

### 4. Discussões dos Resultados

Neste capítulo estão dispostas discussões dos resultados obtidos através dos variados métodos e ensaios desenvolvidos ao longo da pesquisa.

Os resultados do ensaio de Resistência à compressão axial, Indução da penetração de íons cloreto, Teste padrão para indicação elétrica da capacidade do concreto de resistir à penetração de íons de cloreto, Aceleração de penetração de Íons Sulfato de Cálcio e Carbonatação por meio de câmara de Gás Carbônico (CO<sub>2</sub>), encontram-se descritos ao longo deste capítulo.

#### 4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (28 Dias)

Na Tabela 12, apresentam-se os resultados do ensaio de resistência à compressão para os corpos de prova cilíndricos produzidos no canteiro de obras do Laboratório de Materiais da Universidade Católica de Pernambuco, que seguiu os padrões e exigências da norma ABNT NBR 5739 (2018).

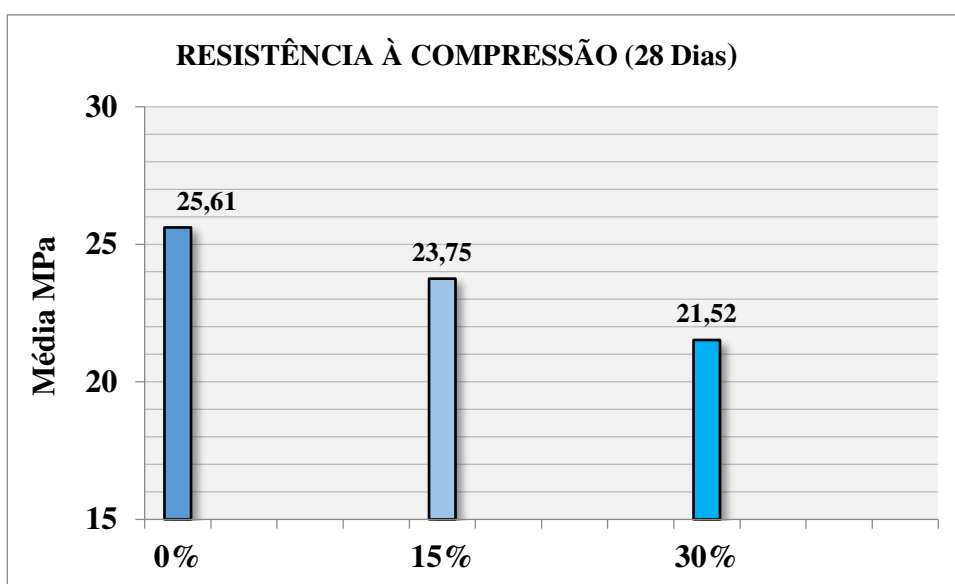
**Tabela 12:** Resultados Ensaio Resistência à Compressão 28 dias

<b>ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (28 Dias)</b>			
<b>CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS</b>			
<b>TRAÇO</b>	<b>AMOSTRAS</b>	<b>Resultado Fck (MPa)</b>	<b>Média Fck (MPa)</b>
<b>0%</b>	01	25,78	<b>25,61</b>
	02	25,86	
	03	25,52	
	04	25,31	
<b>SRV 15%</b>	05	23,89	<b>23,75</b>
	06	23,59	
	07	23,90	
	08	23,61	
<b>SRV 30%</b>	09	21,50	<b>21,52</b>
	10	21,48	
	11	21,70	
	12	21,42	

Fonte: Autora, 2019.

É possível observar que os corpos de prova contendo resíduo de vidro, atingiram o valor mínimo de resistência 21,42 MPa, já o traço referência (0%) atingiu Fck mínimo de 25,31 MPa. O que nos indica que os 3 (três) traços escolhidos atenderam a expectativa em relação aos resultados baseados na relação água/cimento de 0,55 cuja resistência à compressão desejável é de  $\leq 30$  MPa. Observa-se ainda que há uma queda de resistência de aproximadamente 15% quando correlacionando o traço Padrão (0%) e o traço Substituição Resíduo de Vidro (SRV 30%), como ilustra a Figura 44.

**Figura 44:** Gráfico Resistência à Compressão 28 dias

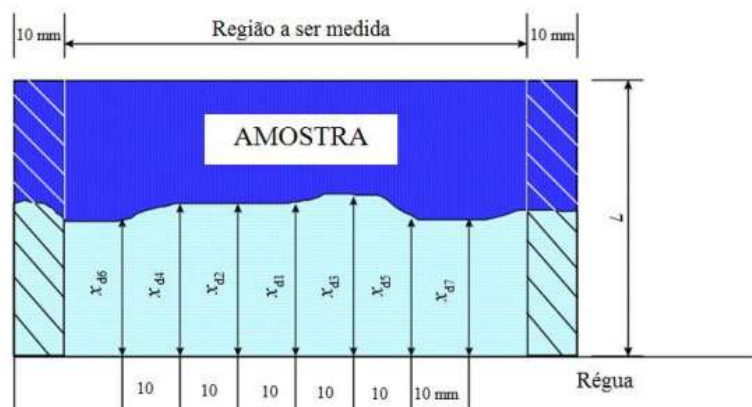


Fonte: Autora, 2019.

## 4.2 INDUÇÃO DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Como a penetração de cloretos não é dada de maneira uniforme a norma finlandesa utilizada nos Estados Unidos NT BUILD 492 (2000) orienta realizar sete medidas a cada 10 mm, sendo o resultado a média aritmética entre todas as medidas do corpo de prova analisado. No caso de impossibilidade de leitura pela presença de agregados, deve-se alterar o ponto de medição ou ignorar esta profundidade se houver outras cinco válidas (Figura 45).

**Figura 45:** Medidas da frente de penetração de cloretos



Fonte: NT BUILD 492, 2000.

Na Tabela 13 é possível compreender de maneira detalhada os resultados apresentados no método clorimétrico de aspersão de Nitrato de Prata, conforme norma ABNT NBR 13797:1997 - Água - Determinação de cloretos - Métodos titulométricos do nitrato mercúrio e do nitrato de prata.

**Tabela 13:** Método de Aspersão de Nitrato de Prata – NBR 13797 (1997)

<b>MÉTODO DE ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA</b>			
<b>TRAÇO</b>	<b>AMOSTRAS</b>	<b>Área Penetração Cloretos Livres (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Média (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>0%</b>	1	56,70	<b>56,82</b>
	2	56,88	
	3	56,92	
	4	56,79	
<b>SRV 15%</b>	5	55,08	<b>56,09</b>
	6	56,95	
	7	57,05	
	8	55,26	
<b>SRV 30%</b>	9	58,41	<b>57,96</b>
	10	57,03	
	11	58,40	
	12	58,00	

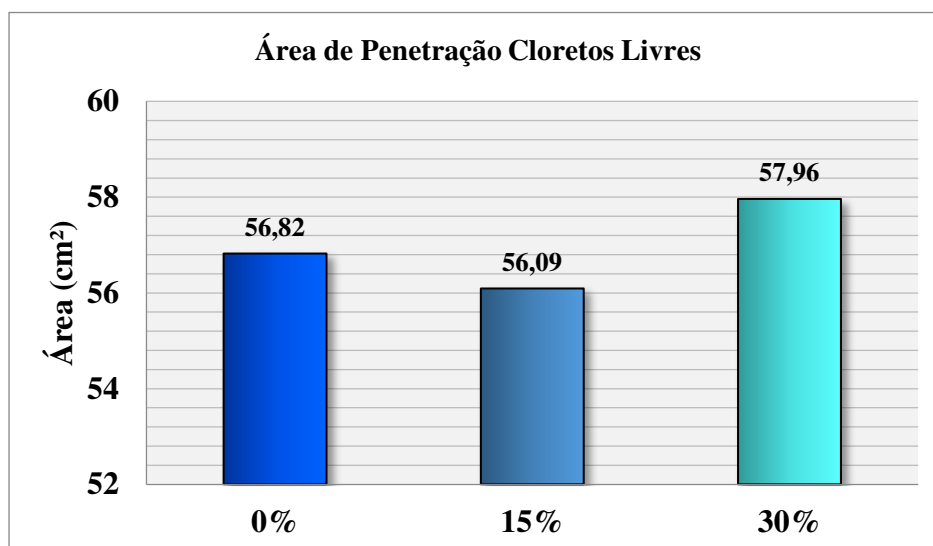
Fonte: Autora, 2019.

Comparativamente os valores médios encontrados nas três famílias de amostras não representam variação expressiva. É possível inferir que para este método a substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro não interfere



significativamente na penetração dos íons cloretos livres. Quando comparados com o Traço Padrão, os traços de Substituição Resíduo de Vidro 15% (SRV 15%) e Substituição Resíduo de Vidro 30% (SRV 30%) não possuem ação mitigadora ao ataque químico. Na Figura 46 a seguir é possível visualizar a variação sutil dos resultados.

**Figura 46:** Gráfico Área Penetração Cloretos Livres



Fonte: Autora, 2019.

#### **4.3 TESTE PADRÃO PARA INDICAÇÃO ELÉTRICA DA CAPACIDADE DO CONCRETO DE RESISTIR À PENETRAÇÃO DE ÍONS DE CLORETO (ASTM C1202:2017)**

Primeiramente foi produzido o concreto experimental Padrão com 0% de substituição de resíduo de vidro, cujo abatimento foi de 7,6 cm. O ensaio de migração de íons foi feito com quatro fatias dos corpos de prova, sendo a fatia número 1, retirada da face superior do corpo de prova 01, como preconiza em norma americana.

A Tabela 14 mostra os resultados comparativos desse primeiro traço.



**Tabela 14:** Correntes e Carga Total Passante nas Amostras sem Resíduo de Vidro

TRAÇO	AMOSTRAS			
	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04
0%				
Corrente (A)				
I0	0,1260	0,1390	0,1477	0,1740
I30	0,1500	0,1630	0,1717	0,1980
I60	0,1684	0,1870	0,2142	0,2464
I90	0,1830	0,2055	0,2490	0,2985
I120	0,1925	0,2199	0,2747	0,3341
I150	0,1942	0,2335	0,2772	0,3511
I180	0,1924	0,2475	0,2839	0,3557
I210	0,1907	0,2638	0,2899	0,3392
I240	0,1889	0,2647	0,2794	0,3082
I270	0,1886	0,2725	0,2861	0,2981
I300	0,1863	0,2821	0,2669	0,2773
I330	0,1833	0,2891	0,2779	0,2619
I360	0,1807	0,2932	0,2727	0,2486
Carga Total Passante ( C )				
Q t	3908,97	5120,46	5545,98	6263,64
<b>Qm</b>	<b>5209,76</b>			

Fonte: Autora, 2019.

De acordo com a Tabela 10 - Penetrabilidade de íons cloreto baseado na Carga Passante, supracitada, quando a carga total passante é maior que 4000 C, o concreto tem alta probabilidade de penetração de íons cloreto. Isso ocorreu em três dos corpos de prova analisados, sendo o CP 01 o único que obteve uma carga menor que 4000 C, sendo considerado com moderada probabilidade de penetração. Mas ao realizar a média dos resultados, obtemos uma carga total passante de 5209,76 C, o que enquadra o traço com alta probabilidade de penetração de íons cloreto.

O segundo traço de concreto contém a menor porcentagem de substituição analisada nesta pesquisa, foi produzido com 15% de resíduo de vidro resultando em um abatimento de 8 cm. A Tabela 15 a seguir mostra os resultados dos ensaios com esse traço.

**Tabela 15:** Correntes e Carga Total Passante nas Amostras SRV 15%

<b>TRAÇO</b>	<b>AMOSTRAS</b>			
<b>SRV 15%</b>	<b>CP 01</b>	<b>CP 02</b>	<b>CP 03</b>	<b>CP 04</b>
<b>Corrente (A)</b>				
I0	0,2399	0,2237	0,1260	0,1559
I30	0,2639	0,2477	0,1500	0,1799
I60	0,2746	0,2785	0,1710	0,2167
I90	0,2745	0,2675	0,1877	0,2430
I120	0,2756	0,2751	0,2023	0,2590
I150	0,2842	0,2784	0,2166	0,2810
I180	0,2842	0,2662	0,2275	0,2999
I210	0,2860	0,2769	0,2384	0,3044
I240	0,2863	0,2716	0,2455	0,3150
I270	0,3196	0,2349	0,2485	0,2980
I300	0,3316	0,2632	0,2481	0,2978
I330	0,3435	0,2645	0,2434	0,2928
I360	0,3569	0,2602	0,2417	0,2979
<b>Carga Total Passante ( C )</b>				
<b>Q t</b>	6340,32	5699,61	4613,13	5785,92
<b>Qm</b>	<b>5609,75</b>			

Fonte: Autora, 2019.

O traço contendo a menor porcentagem substituição de resíduo de vidro gerou uma carga média passante de 5609,75 C, indicando que esse concreto tem alta probabilidade de penetração de íons cloreto, apresentando valor bem superior a 4.000 C.

O traço seguinte foi confeccionado com 30% de resíduo de vidro obtendo um abatimento de 4,9 cm. A Tabela 16 a seguir mostra os resultados da análise desse traço.

**Tabela 16:** Correntes e Carga Total Passante nas Amostras SRV 30%

TRAÇO	AMOSTRAS			
	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04
SRV 30%				
Corrente (A)				
I0	0,1843	0,1529	0,0810	0,1175
I30	0,2083	0,1769	0,1050	0,1923
I60	0,2686	0,2100	0,1450	0,2125
I90	0,3260	0,2429	0,1789	0,2350
I120	0,3709	0,2878	0,1921	0,2719
I150	0,3990	0,3029	0,2439	0,2751
I180	0,3841	0,3405	0,2554	0,3117
I210	0,3495	0,3409	0,2798	0,3021
I240	0,3201	0,3364	0,2835	0,2209
I270	0,3079	0,3442	0,3010	0,2198
I300	0,3030	0,3147	0,3067	0,2164
I330	0,3014	0,3160	0,2912	0,2127
I360	0,2981	0,2960	0,2992	0,2092
Carga Total Passante ( C )				
Q t	6804,00	6187,77	4990,68	5100,75
<b>Qm</b>	<b>5770,80</b>			

Fonte: Autora, 2019.

A carga média passante para esse traço de concreto foi de 5770,80 C, o que indica uma alta probabilidade de penetração de íons cloreto. As quatro amostras apresentaram resultados bem superiores ao limítrofe da norma americana. A amostra CP 01 apresentou carga média de 6804,00 C , 70% maior que o valor máximo determinado.

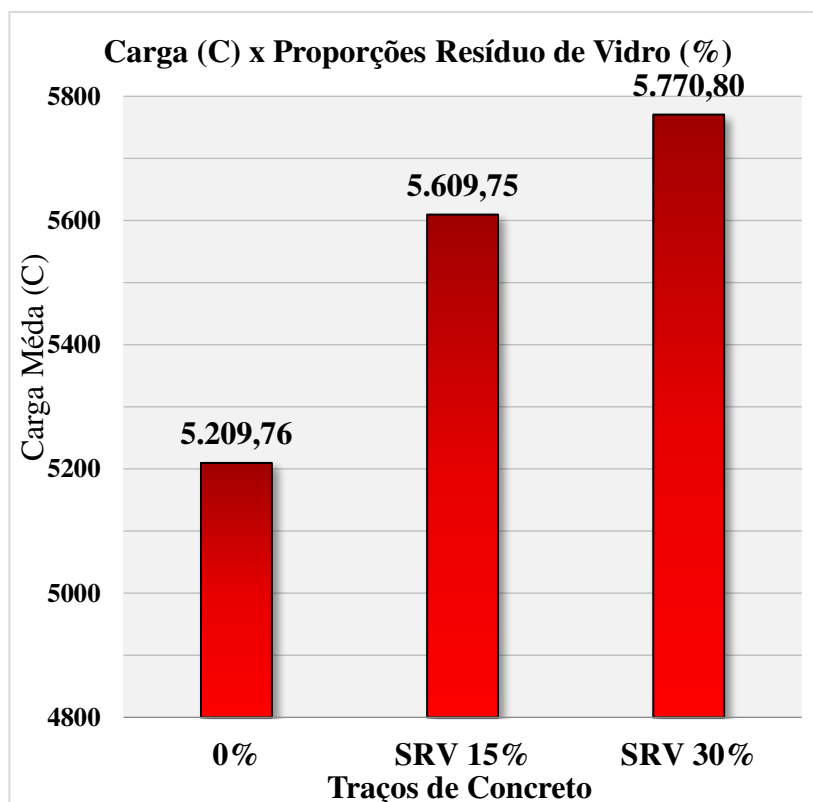
Os três traços de concreto analisados nesta pesquisa apresentaram resultados de carga média que representam alta probabilidade de penetração de íons cloretos, como resume a Tabela 17 a seguir e ilustração do Gráfico na Figura 48.

**Tabela 17:** Probabilidade Penetração Íons Cloreto

TRAÇO	Carga Média ( C )	Probabilidade de Penetração
0%	<b>5.209,76</b>	<b>ALTA</b>
SRV 15%	<b>5.609,75</b>	<b>ALTA</b>
SRV 30%	<b>5.770,80</b>	<b>ALTA</b>

Fonte: Autora, 2019.

Figura 47: Gráfico Carga x Proporções



Fonte: Autora, 2019.

#### 4.4 INDUÇÃO ACELERADA DA PENETRAÇÃO DE ÍONS SULFATO DE CÁLCIO

Os resultados da indução acelerada da penetração de íons sulfato de cálcio nas amostras analisadas nesta pesquisa foram obtidos a partir: da comparação de resistência à compressão axial dos corpos de prova expostos por 70 dias em água sulfata com os corpos de prova cuja cura úmida de 28 dias foi realizada em água potável fornecida pela rede abastecedora de águas em Pernambuco. O tempo de exposição das amostras foi definido em função da logística e considerando o programa experimental.

É sabido que as agressões por ataques de sulfatos demoram a se manifestar temporalmente, porém este método foi estudado por outros autores como Joshi (1987) que adotou tempo de exposição de suas amostras de 120 dias.

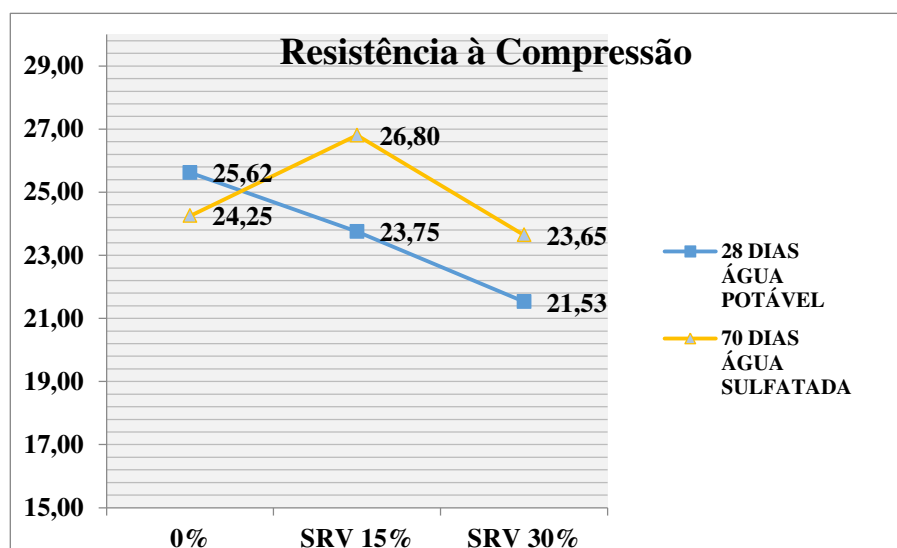
A Tabela 18 contém detalhadamente os resultados individuais de cada corpo de prova e as médias de resistência à compressão axial das amostras comparadas. Na Figura 48 apresenta-se o gráfico das médias em MPa.

**Tabela 18:** Comparativo de Resistência à Compressão Axial

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO					
CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS					
TRAÇO	AMOSTRAS	28 DIAS ÁGUA POTÁVEL		70 DIAS ÁGUA SULFATADA	
		RESULTADO (MPa)	MÉDIA (MPa)	RESULTADO (MPa)	MÉDIA (MPa)
0%	01	25,78	25,62	25,48	24,25
	02	25,86		21,10	
	03	25,52		23,54	
	04	25,31		26,89	
SRV 15%	05	23,89	23,75	26,59	26,80
	06	23,59		27,48	
	07	23,90		26,38	
	08	23,61		26,76	
SRV 30%	09	21,50	21,53	23,77	23,65
	10	21,48		24,68	
	11	21,70		23,60	
	12	21,42		22,53	

Fonte: Autora, 2019.

**Figura 48:** Gráfico Comparativo Resistência à Compressão Axial



Fonte: Autora, 2019.

Como é possível verificar na Figura 49 e na Tabela 18, o resultado médio do traço Padrão 0 % sofreu sutil queda após ser exposto durante 70 dias na água com Sulfato de Cálcio (24,25 MPa).

Já os traços SRV 15% e SRV 30% após serem expostos ao ambiente agressivo da água sulfatada tiveram sua média de resistência à compressão axial levemente aumentada (26,80 MPa) e (23,65 MPa) respectivamente. Para entender que estes traços são considerados resistentes à sulfatos é necessário ampliar o tempo de exposição das amostras ao ambiente agressivo, bem como ampliar o universo de amostras.

Na análise de inspeção visual para verificar a presença de cristais de sulfato de cálcio nas amostras, não foi identificada formação dos mesmos em nenhum corpo de prova. O que observou-se foi uma precipitação do gesso saturado no fundo do reservatório.

No aspecto aferição das dimensões, não houve variação nas formas geométricas das amostras por formação e expansão de etringita. A formação desse composto acontece nos primeiros momentos da hidratação do cimento, pela combinação de sulfatos disponíveis em solução aquosa.

No aspecto pesagem a Tabela 19 detalha os valores obtidos em (Kg).

**Tabela 19:** Pesagem Amostras 70 dia Água Sulfatada

<b>PESAGEM AMOSTRAS 70 DIAS ÁGUA SULFATADA</b>			
<b>TRAÇO</b>	<b>AMOSTRAS</b>	<b>RESULTADO (Kg)</b>	<b>MÉDIA (Kg)</b>
<b>0%</b>	01	3,64	<b>3,65</b>
	02	3,68	
	03	3,64	
	04	3,64	
<b>SRV 15%</b>	05	3,70	<b>3,67</b>
	06	3,68	
	07	3,68	
	08	3,60	
<b>SRV 30%</b>	09	3,62	<b>3,66</b>
	10	3,64	
	11	3,72	
	12	3,64	

Fonte: Autora, 2019.

Não foram identificadas variações de massa nos corpos de prova analisados nesta pesquisa, visto que as amostras antes de serem submetidas ao ambiente agressivo da água sulfatada apresentavam média de massa igual a 3,60 Kg.

#### 4.5 ACELERAÇÃO DE CARBONATAÇÃO EM CÂMARA DE CO<sub>2</sub>

Os resultados das grandezas avaliadas no ensaio acelerado de carbonatação, apresentados a seguir, representam a média dos valores obtidos para as duas faces dos corpos de prova de concreto ensaiados em cada traço determinado na pesquisa.

Na Tabela 20, está descrita a maneira como as amostras foram expostas ao ataque químico do gás carbônico. Já na Tabela 21 são apresentados os resultados da profundidade média de carbonatação para as famílias analisadas, determinadas segundo o item 3.1.12, nas idades de 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias.

**Tabela 20:** Cronograma de Exposição das Amostras

<b>CÂMARA DE CARBONATAÇÃO</b>		
<b>TRAÇO</b>	<b>AMOSTRAS</b>	<b>EXPOSIÇÃO</b>
<b>0%</b>	CP 01	7 DIAS
	CP 02	14 DIAS
	CP 03	21 DIAS
	CP 04	28 DIAS
<b>SRV 15%</b>	CP 05	7 DIAS
	CP 06	14 DIAS
	CP 07	21 DIAS
	CP 08	28 DIAS
<b>SRV 30%</b>	CP 09	7 DIAS
	CP 10	14 DIAS
	CP 11	21 DIAS
	CP 12	28 DIAS

Fonte: Autora, 2019.

**Tabela 21:** Resultados da Profundidade Média de Carbonatação

<b>CÂMARA DE CARBONATAÇÃO</b>			
<b>Exposição</b>	<b>AMOSTRAS</b>	<b>TRAÇO</b>	<b>RESULTADO (mm)</b>
<b>07 DIAS</b>	CP 01	0%	3,20
	CP 05	SRV 15%	6,55
	CP 09	SRV 30%	6,97
<b>14 DIAS</b>	CP 02	0%	6,81
	CP 06	SRV 15%	6,55
	CP 10	SRV 30%	7,71
<b>21 DIAS</b>	CP 03	0%	5,40
	CP 07	SRV 15%	5,20
	CP 11	SRV 30%	6,78
<b>28 DIAS</b>	CP 04	0%	7,95
	CP 08	SRV 15%	7,43
	CP 12	SRV 30%	9,97

Fonte: Autora, 2019.

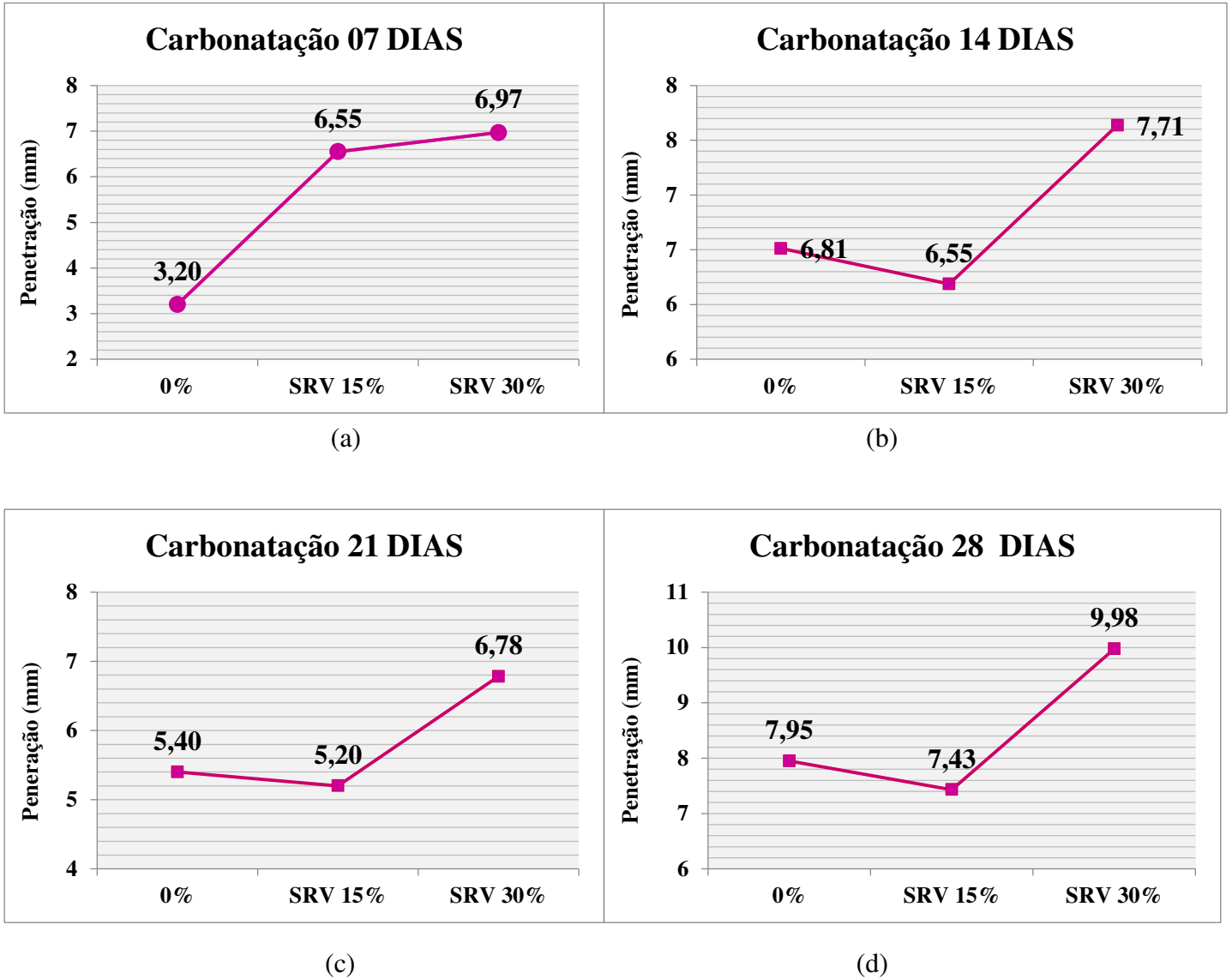
Na Figura 49 a seguir, está disposta graficamente a evolução da profundidade de penetração do gás carbônico ao longo das idades de exposição das amostras ao efeito da câmara de carbonatação acelerada. É possível identificar a penetração dada em milímetros e perceber que das quatro aferições realizadas, em três delas o traço de substituição de resíduo de vidro SRV 15% apresentou leve queda, quando comparado com os demais traços de concreto estudados nesta pesquisa.

Esta análise não é capaz de inferir que o traço SRV 15% é superior aos traços Padrão e SRV 30%, pois ao analisar gráfica e numericamente as médias ao longo de todas as idades de exposição o traço SRV 15% obteve resultado de 6,43 mm, já o traço Padrão apresentou resultado de 5,84 mm.

Observou-se que na semana da idade 21 dias os valores de penetração tiveram leve redução, o que pode-se considerar uma falha de ensaio na introdução do gás nesse período.



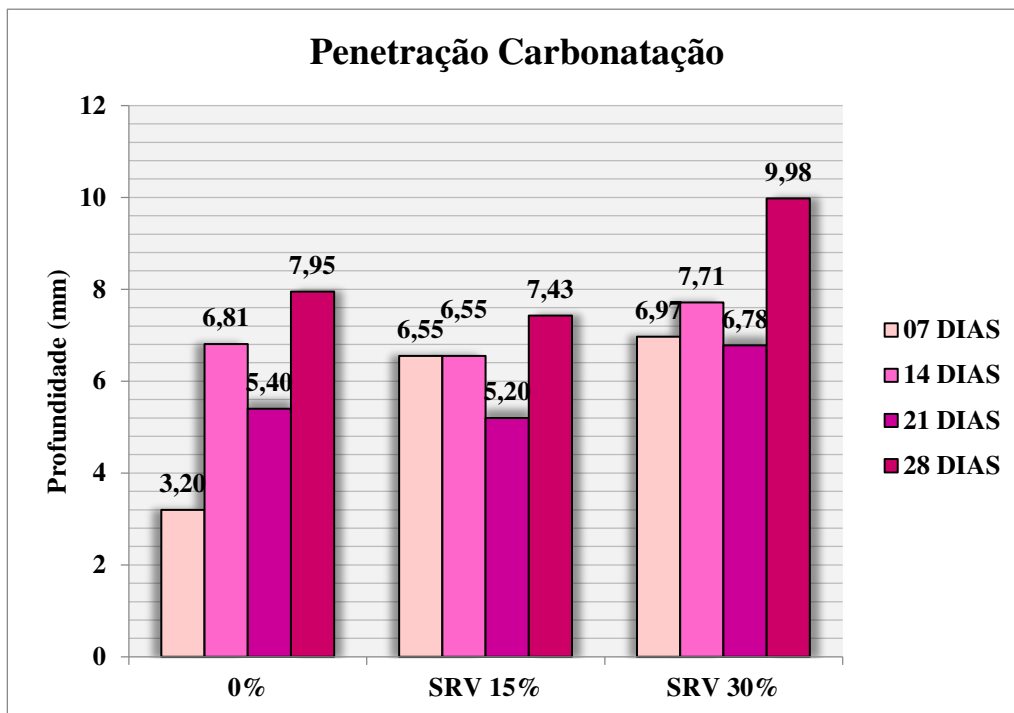
Figura 49: Gráficos Evolução da Carbonatação



Fonte: Autora, 2019.

Na Figura 50 a seguir, a penetração da carbonatação é representada graficamente através de barras verticais que nos permite visualizar a evolução de cada amostra ensaiada e perceber o comportamento ao longo das idades.

Figura 50: Gráfico Penetração Carbonatação



Fonte: Autora, 2019.

Figura 51: Principais resultados dos Ensaios

Principais Ensaios	Idade (Dias)	Média dos Resultados			Coeficiente de Variação (%)		
		Padrão 0 %	SRV 15 %	SRV 30 %	Padrão 0 %	SRV 15 %	SRV 30 %
Resistência à Compressão (MPa)	28 dias	25,61 MPa	↓ 7,26%	↓ 15,90%	8,90	5,92	7,60
Penetração Íons Cloreto - Método Nitrato de Prata (mm)	40 dias	56,82 mm	↓ 1,28%	↑ 2%	2,10	0,90	1,80
Penetração Íons Cloreto - Método Carga Passante ASTM C1202: 2017 (C)	50 dias	5209,76 C	↑ 7,67%	↑ 10,76%	1,95	1,98	3,45
Ataque Sulfatos - Resistência à Compressão (MPa)	70 dias	24,25 MPa	↑ 10,50%	↓ 2,47%	15,65	10,25	8,76
Profundidade de Carbonatação Acelerada (mm)	07 dias	3,20 mm	↑ 104,6%	↑ 117,8%	5,80	12,75	16,84
	14 dias	6,81 mm	↓ 3,81%	↑ 13,21%	6,75	4,28	9,87
	21 dias	5,40 mm	↓ 3,70%	↑ 25,50%	12,35	14,06	12,00
	28 dias	7,95 mm	↓ 6,54%	↑ 25,50%	1,90	2,40	1,85

\* Porcentagem de aumento (↑) ou redução (↓) em relação ao valor do Traço Padrão.

Fonte: Autora, 2019.

## Capítulo 5

### 5. Considerações Finais

A presente pesquisa desenvolveu uma avaliação da influência do resíduo de vidro utilizado como substituição parcial do agregado miúdo em concreto submetido aos ataques químicos de íons cloreto de sódio, íons sulfatos de cálcio e carbonatação.

Esta pesquisa evidenciou a importância de analisar e desenvolver estudos utilizando alternativas de novos materiais inseridos no concreto como sugestão de tecnologias de construção. Além de evidenciar a carência de normas brasileiras que preconizam diretrizes, métodos e ensaios para estudos no campo de ataques químicos (cloretos, sulfatos e carbonatação).

Quanto aos ensaios realizados pode-se concluir que:

- Os ensaios de caracterização dos agregados miúdos (areia média e resíduo de vidro) auxiliaram na interpretação dos resultados finais dos ensaios;
- A análise de resistência característica à compressão axial dos corpos de prova contendo ou não substituições parciais de resíduo de vidro permitiu identificar que os traços de concreto desenvolvidos atingiram média acima de 20 MPa, podendo em algumas aplicações serem utilizados como concretos estruturais de Classe C20 do Grupo I, conforme a norma ABNT NBR 8953 (2015) - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência;
- A análise de penetração de íons cloretos livres nos corpos de prova através do método clorimétrico de aspersão de nitrato de prata possibilitou perceber que os três traços desenvolvidos tiveram desempenho bastante semelhante neste aspecto, não apresentando significativa diferenciação de resultados. É possível inferir que a utilização do resíduo de vidro como substituição de agregados miúdos não possuem ação mitigadora ao ataque químico de íons cloretos de sódio.

- No ensaio normatizado pela ASTM C1202: 2017, os valores obtidos como resultado das médias de carga passantes nas fatias ensaiadas, deixou claro que os traços desenvolvidos e estudados nesta pesquisa possuem alta probabilidade de penetração de íons cloretos. Não houve diferenciação expressiva que pudesse representar estatisticamente a variação dos resultados entre si.
- No aspecto dos ataques por sulfato de cálcio, os traços: Padrão, SRV 15% e SRV 30% não apresentaram variação de massa, dimensional, nem formação de cristais de sulfatos em sua superfície. É possível inferir que devido à ação lenta da formação do ataque, as amostras não conseguiram desenvolver resultados expressivos em função do tempo de exposição na água sulfatada. Quanto ao ensaio de resistência característica à compressão os traços SRV 15% e SRV 30% apresentaram resultados de 26,80 MPa e 23,65 MPa, respectivamente, sendo um pouco superiores 12% e 9% respectivamente quando comparados aos resultados das amostras não expostas à água sulfatada por 70 dias.

Para poder concluir que a substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro é uma alternativa de mitigação ao ataque de íons sulfato de cálcio, é necessário desenvolver pesquisas mais aprofundadas com maior exposição das amostras e universo de amostras mais amplo.

- Para o ensaio de carbonatação acelerada em câmara de gás carbônico, as amostras apresentaram uma penetração evolutiva ao longo das idades de exposição, como era o esperado pela pesquisa. Quanto aos resultados de profundidade apresentados em milímetros, as médias foram: Traço Padrão 0 % igual a 5,84 mm, Traço SRV 15 % igual a 6,43mm e Traço SRV 30 % igual a 7,82mm. Destacando que o traço sem substituição do resíduo de vidro se sobressai positivamente em relação aos demais traços.

A análise da Influência do uso de resíduo de vidro no concreto contaminado por Íons Cloreto, Íons Sulfato e CO<sub>2</sub>, ainda é uma abordagem muito superficial que precisa de mais pesquisas.

Após realização de todos os estudos e ensaios nesta pesquisa, pode-se concluir que a utilização parcial de resíduo de vidro não age como ação mitigadora aos ataques de Íons Cloreto, Íons Sulfato e CO<sub>2</sub>.

Por fim, é preciso que os estudos futuros levem em consideração um número maior de variáveis, outros métodos de ensaios para realizar comparações ou até mesmo porcentagens de substituição de agregado miúdo diferentes das estudadas nesta pesquisa, a fim de que seja possível desenvolver soluções de concretos mais resistentes à ataques químicos.

## Capítulo 6

### 6. Sugestões para Pesquisas Futuras

Como sugestões para pesquisas futuras é possível destacar:

- Estudos com maior tempo de exposição das amostras aos ataques químicos;
- Ampliação do universo de amostras;
- Desenvolver novos traços com porcentagens de substituições como por exemplo: 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 30 %.
- Realizar ensaios de Difração de Raio – X e Microscopia Eletrônica de Varredura.

---

## Referências

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. **ANUÁRIO ABIVIDRO 2011**. Disponível em: <[www.abividro.org.br](http://www.abividro.org.br)>. Acesso em: outubro 2019.

ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. Porto Alegre: UFRGS. 2004. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. NBR 8953**: Brasil, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – especificações. NBR 7211-2005**: Brasil, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67**: Brasil, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água - Determinação de cloretos - Métodos titulométricos do nitrato mercúrio e do nitrato de prata. NBR 13797-1997** : Brasil, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projetos de estruturas de concreto – procedimento. NBR 6118-2014**: Brasil, 2014.

---

ASTM C1202 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **Standard Test Method for Electrical indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM C1202-2017:** Estados Unidos, 2017.

ADAMATTI, D. S.; GRAEFF, A. G.; ANDRADE, R.; PERONDI, M.; FILHO, L. C. P. S. **Análise do desempenho de espaçadores no concreto através da corrosão por íons cloreto.** Revista de Engenharia Civil IMED, v.2, n.3, p. 3-15, 2016.

ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto.** Ilha Solteira:[s. N.], 2002.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos.** 256f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, Tibério; SILVA, Angelo Just da Costa. **Considerações sobre durabilidade, patologia e manutenção das estruturas.** In: ISAIA, Geraldo. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Ibracon, 2005.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. **Chloride induced reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values.** Corrosion Science. V. 53, p. 1451-1464, 2011.

ARIVABENE, Antonio Cesar. **Patologias em Estruturas de Concreto Armado Estudo de Caso.** 2015. 22 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Instituto de Pós-graduação – Ipog, Vitoria, 2015.

BACKUS, J. et al. **Combined chloride and carbon dioxide ingressión in concrete exposed to cyclic wetting and drying.** Civil Engineering Research Association of Ireland. CERAI. Belfast, p. 28-29.08, 2014.

BARDINI, I. S.; MARCHIORO, T. B. **Um estudo exploratório do uso de vidro reciclado como agregado de concretos.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2007.



BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do Concreto Armado – Notas de Aula**. UNESP. Bauru, São Paulo, 2006.

BAZANT, Z. **Physical model for steel corrosion in concrete structures. Part 1 – Theory, Part-2 – Application**, *Journal of Structural Division*, ASCE, 105, ST6, pp.1137-1166, 1979.

BOLINA, C. C.; CASCUDO, O. **Inibidores de corrosão: análise da eficiência frente à corrosão do aço induzida por cloretos e carbonatação em meio aquoso**. *Engevista*, v. 15, n. 1, p. 81-94, 2013.

BRANCO, F.A.; PAULO, P.; GARRIDO, M. **Boletim Técnico ALCONPAT nº 04**. 2013.

BROWN, P.B. Thaumasite formation and outhere forms of sulfate attack. **Cement and Concret Composites**, nº 24, p.303-303,2002.

BRUNAUER, Stephen; COPELAND, L. E. **The chemistry of concrete**. *Scientific American*, v. 210, n. 4, p. 80-93, 1964.

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

CARMONA, A. F.; MAREGA, A. **Retrospectiva da patologia no Brasil: estudo estatístico**. Jornadas em Español y Portugués sobre Estructuras y Materiales, CEDEX, IETcc, p. 325-348, 1988.

CASCUDO, Oswaldo; HELENE, Paulo Roberto do Lago. Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**: Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, p.20, 2001.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e**

**técnicas eletroquímicas.** Pini, 1997.

CHENGFANG, Y.; DITAO, N.; DAMING, L. **Effect of carbonation on chloride diffusion in fly ash concrete.** Disaster Advances, v. 5, n. 4, p. 433-436, 2012.

COLLEPARDI, M., MARCIALIS, A., TURRIZIANI, R. **Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes.** J. Am. Cer. Soc., Discussion and Notes. Vol. 55, N.10, pp.534-535, 1972.

COLLEPARDI, M. **Concrete Deterioration from sulfate and acid attacks. Course on Durability of concrete.** In: International Congress High-Performance Concrete-Performance and Quality of Concrete Structures. Santa Catarina, 1990. Proceedings...Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

COMLURB. Gerência de Pesquisas aplicadas – **Caracterização Gravimétrica e Microbiológica dos Resíduos Sólidos -2009**

CORDEIRO, G. C. . **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto,** 2006.pg.326-370

CORSINI, R. **Ambientes agressivos: Projetos de estruturas de concreto expostas a ambientes quimicamente agressivos exigem atenção especial para assegurar desempenho e vida útil à edificação.** Técnica. Pini/ IPT, São Paulo, Ed. 196, 2013.

COUTO, José Antônio Santos et al. **O concreto como material de construção.** Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT, v. 1, n. 3, p. 49-58, 2013.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DA SILVA, T. J. **Como estimar a vida útil de estruturas projetadas com critérios que visam a durabilidade.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São José dos Campos, 2002.

DE BARROS, T. C. M. F. et al. Análise de fatores contribuintes para a ocorrência de corrosão de armaduras. Anais do Seminário de Patologia e Recuperação Estrutural, v. 1, n. 1, 2016.

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN. **Encuesta sobre patología de estructuras de hormigón.** Grupo Español del Hormigón, 1992.

DE SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** Pini, 1998.

DIVINAL VIDROS. **Como é feita a fabricação dos vidros?** Disponível em: <http://www.divinalvidros.com.br/blog/2017/12/13/como-e-feita-fabricacao-dos-vidros/> Acesso em: 10 de outubro de 2019.

DO NASCIMENTO, F. B. C. **Corrosão em armaduras de concreto.** Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 3, n. 1, p. 177-188, 2015.

EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete.** BIBM, et al, v. 22, 2005.

FIGUEIREDO, E.J.P; O'REILLY, V. **Orientación para el diagnóstico. Capítulo 2. In: Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: reparación, refuerzo y protección.** CYTED – XV – F. 2003, Capítulo 2, p.111- 157.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável.** 1ª edição, pág 165, editora PINI, 2009.

IRASSAR, E.F.; MAIO, A. DI.; BATIC, O.R.; **Sulfate attack on concrete with mineral admixtures,** Cement and Concrete Research. 26(1):113-123. 1996.

HELENE, P. **Contribuição à análise da resistência do concreto em estruturas existentes para fins de avaliação da segurança.** São Paulo, ABECE Informa, ano 16, n. 90, Mar.Abr. 2012 p.16-23.

HELENE, P. R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo, SP: Pini/IPT, 1986.

HELENE, P. **Manutenção para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto.** Pini, 2<sup>a</sup>ed. São Paulo, 1992.

HELENE, P. R. L.; MONTEIRO, P. J. M. **Reparos localizados podem ser considerados soluções eficientes para correção de problemas de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado?.** In: II Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y IIV Congreso de Control de Calidad, 1993, Barquisimeto. Anais. 1993.

HEWLETT, P.; LISKA, M. (Ed.). **Lea's chemistry of cement and concrete.** Butterworth-Heinemann, 2019.

ISAIA, Geraldo C. et al. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 953-983, 2005.

KONEČNÝ, P.; LEHNER, P. **Durability assessment of concrete bridge deck considering waterproof membrane and epoxy-coated reinforcement.** Perspectives in Science, v. 7, p. 222-227, 2016.

L. V. Real , D. R. B. Oliveira , T. Soares, M. H. F. Medeiros. **Método colorimétrico por aspersion de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte.** Revista da Associação Latinoamericana de Controle de Qualidade, Patologia y Recuperação da Construção – ALCONPAT. Agosto, 2015.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparação das estruturas de concreto armado.** 2008. 56f. Monografia (Construção civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LIMA, S.F. et al. **Concreto e suas inovações**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 1, n. 1, p. 31-40, 2014.

MAGALHÃES, C.P.; FOLLONI, R.; FURMAN, H. **Análise da Patologia das Obras de Arte do Município de São Paulo**. Simposium Nacional de Reforços, Reparos e Proteção das Estruturas de Concreto, São Paulo, p. 3-17, 1989.

MALHEIRO, R. L. M. C. et al. **Effect of carbonation on the chloride diffusion of mortar specimens exposed to cyclic wetting and drying**. In: XIII DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components. p. 482-489, 2014.

MALHEIRO, R.; CAMÕES, A; MEIRA, G.R. E AMORIM M.T. P. **Chloride Penetration into Carbonated Concrete**. In Proceedings of the 7th International Conference on Safety and Durability of Structures. Portugal, 2016.

MARQUES, P. H. R. J. **Análise da influência de espaçadores na corrosão de armaduras em concretos induzidos por carbonatação**. Dissertação Mestrado Universidade Católica de Pernambuco, 2018.

MEDEIROS, H. **Doenças concretas**. Revista técnica, São Paulo, n. 160, p. 62-68, jul. 2010.

MEDEIROS, M. H F. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas. Artigo, Revista de Minas, Ouro Preto, Programa de pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. São Paulo, 2012.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 22. p. 1-37.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; BRITO, P. C.; MEDEIROS, M. H. F. **Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions**. Ocean Engineering, v.103, p.78-87, 2015a.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F. **Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport.** Environment, Development and Sustainability, v.17, p.1103-1119, 2015b.

MEHTA, P. K.; GJORV, O. E. **A new test for sulfate resistance.** In: **Journal of Testing and Evaluation**, v.2, n.6. Nov. 1974.

MEHTA, P.K. **Durability of concrete-Fifty years of progress.** In: **Seminário sobre a Qualidade e Durabilidade de Estruturas de Concreto.** Porto Alegre, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** Ibracon, 2014.

MEIRA, G. R. et al. **Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos.** Ambiente construído., Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 33-52, Dec. 2014.

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de Armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção.** IFPB. João Pessoa, 2017.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações.** Editora: oficina de Textos, São Paulo, 2005, 207 p.

MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** 2002. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NASCIMENTO, R.Z. **Efeitos da sílica ativa, cinza volante, metacaulim e cinza de casca de arroz sobre a velocidade de carbonatação do concreto.** 2017. TCC (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

NEVES, A. J.; TOLEDO, R. D. F.; DWECK, J.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Captura**

**de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios através de Carbonatação Acelerada.** Tese Doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

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

NT BUILD 492: 2000 - **Simulation of the concrete chloride NT build-492 migration test.** Finland, 2000.

OLIVEIRA, P.S.F; HELENE, P.R.L. **Proteção e Manutenção das Estruturas de Concreto.** São Paulo, Engenharia, n. 485, p. 11-26, 1991.

OLIVEIRA, Marta. **Norma de Projeto de Estruturas de Concreto é reconhecida internacionalmente.** 2015. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/banco-de-pautas/norma-de-projeto-de-estruturas-de-concreto-e-reconhecida-internacionalmente-2/>>. Acesso em: 29 maio 2018.

PARROT, L. J. A review of carbonation in reinforced concrete. Cement and concrete Association report, 1987.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. M. S. **The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components.** Construction and Building Materials, 2012. p. 197-203.

PINHEIRO, H.; MONTEIRO, E. C. B. **Análise Comparativa do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão de armaduras por íons cloretos.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 2, n. 1, 2016.

PINTAN, N. M.; BERENQUER, R. A.; SILVA, A. J. C. E.; LINS, C. M. M. S.; MONTEIRO, E. C. B. **Pathological manifestations and the study of corrosion present on bridges on the city of Recife.** The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 20, p. 11893-11907, 2015.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas**

**de concreto em ambiente urbano.** Tese de doutorado, 2010.

PROCEQ SA. **Analizador de Corrosão.** Manual de instruções operacionais. Suíça. [www.proceq.com](http://www.proceq.com). 2012.

PROCEQ SA. **Detector de Vergalhões Totalmente Integrado.** Manual, Suíça. [www.proceq.com](http://www.proceq.com). 2013.

PRUDÊNCIO, JR., L. R. **Durabilidade do Concreto frente ao Ataque de Sulfatos e Cloretos.** In: Seminário sobre a Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto. Porto Alegre, 1993.

REBMANN, M.S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.** Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

RECICLAGEM, CEMPRE - **Consórcio Empresarial para a Reciclagem.** Disponível em: <[www.cempre.org.br](http://www.cempre.org.br)>. Acesso em: outubro 2019.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENCO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.

RILEM TC 154-EMC. **Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures.** Materials and Structures, Vol. 36, 2003.

SALES, Almir et al. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.** Elsevier Brasil, 2018.

SANTHANAM, Manu. **Studies on sulfate attack: mechanisms, test methods, and modeling.** 2001. 275p. Ph.D. Tesis – Purdue University. 2001.



SANTOS, Aleilson Vilas Bôas dos. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação**. 2015. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Instituto de Pós-graduação - Ipog, Salvador, 2015.

SANTOS, M. R. G., **Deterioração das estruturas de concreto armado** – estudo de caso. 2012. 122f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012. Disponível em: <<http://pos.demc.ufmg.br/novocecc/trabalhos/pg2/88.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

SHAO Y, THIBAUT L, SHYLES M & DAMIAN R. **Studies on concrete containing ground waste glass**. Cement and Concrete Research, 2000. p. 91- 100.

SHEN, Weiguo. et al. **Mixing Design and Microstructure of Ultra High Strength Concrete with Manufactured Sand**. Construction and Building Materials. v. 143, n. 14, p. 312-321, 2017.

SILVA R.V.; PEREIRA J. W. G.; ZARZAR F. C. J. **Avaliação do Ataque de Íons Cloreto em Estruturas de Concreto, contendo ou não Adições Mineraias**. 61º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON – Fortaleza, 2019.

SILVA A. P., JONOV C.M.P. **Curso de especialização em construção civil**. Departamento de engenharia de materiais e construção. Minas Gerais, 2011.

SILVA, L. K. da. **Levantamento de Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado no Estado do Ceará**. 51 f. Monografia de final de curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

SILVA, M. V. F.; PEREIRA, M. C.; CODARO, E. N. **Corrosão do aço-carbono: uma abordagem do cotidiano no ensino de química**. Química Nova, v. 38, n. 2, p. 293–296, 2015.

SILVA, R.; MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação Do Desempenho De Impregnante Inibidor De Corrosão Aplicado Em Estruturas De Concreto Armado Sob A**

- Ação De Íons Cloreto.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 2, n. 1, 2016.
- SILVA, S. H. Lopes da et al. **Escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto através de análise hierárquica.** Revista Latino-americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção, Mérida, v. 5, n. 3, p.174-189, dez. 2015.
- SOUZA, R. B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado.** 2006. 139p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto.** São Paulo: Pini, 1998.
- ŠOMODÍKOVÁ, M.; TEPLÝ, B.; VOŘECHOVSKÁ, D.; LEHKÝ, D. **Modelling of the Service Life of Concrete Structures under Combined Mechanical and Environmental Actions.** July: 4219–24, 2015.
- TAYLOR, Harry FW. **Cement chemistry.** Thomas Telford, 1997.
- TENNIS, PAUL, D; LEMING, MICHEL, L; E AKERS, DAVID, J., **Previous Concrete Pavements, EB302.02.** Portland Cement Association, Skokie, Illinois, e National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, EUA. 36p. 2004.
- TRAN, C. et al. **An evaluation of carbon dioxide capture by carbonation of red mud under different operating conditions.** Chemeca: Chemical Engineering-Regeneration, Recovery and Reinvention, p. 547, 2016.
- TREADAWAY, K. Corrosion period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of steel in concrete.** New York: RILEM / Chapman and Hall, p. 56-69, 1988.
- TUTIKIAN, B; PACHECO, M. **Inspección, diagnóstico y pronóstico em la construcción civil.** Boletín Técnico. ALCONPAT Internacional, Mérida, 2013.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 468 p, 1982.

VIEIRA, F.M.P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 242 p, 2003.

VIEIRA, D. V. et al. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado**. Revista Matéria, v. 15, n. 3, p. 431-444, 2010.

VU, Tran Huyen et al. **Carbonation and chloride induced steel corrosion related aspects in fly ash/slag based geopolymers-a critical review**. In: 5th International fib Congress. 2018.