

RAFAEL DORS SAKATA

**ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS  
AUTOADENSÁVEIS DE ALTO DESEMPENHO COM  
ADITIVOS MITIGADORES DE RETRAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil  
da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Construção Civil.  
Orientador: Prof. Dr. Wellington  
Longuini Repette

Florianópolis  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sakata, Rafael Dors  
Estudo da durabilidade de concretos  
autoadensáveis de alto desempenho com aditivos  
mitigadores de retração / Rafael Dors Sakata ;  
orientador, Wellington Longuini Repette, 2017.  
151 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto autoadensável  
de alto desempenho. 3. Durabilidade. 4. Aditivos  
mitigadores de retração. I. Longuini Repette,  
Wellington . II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil. III. Título.

Rafael Dors Sakata

**ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS  
AUTOADENSÁVEIS DE ALTO DESEMPENHO COM  
ADITIVOS MITIGADORES DE RETRAÇÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 02 de março de 2017.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.  
Orientador – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

**Banca Examinadora:**

---

Prof.<sup>a</sup> Berenice Martins Toralles, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Estadual de Londrina (videoconferência)

---

Prof. Fernando Pelisser, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Philippe Gleize, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho aos meus pais,  
Arlindo e Regina e aos meus irmãos,  
Annelyse e Rodrigo.



## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pelas oportunidades e pela minha família.

Aos meus queridos pais Arlindo e Regina pelo amor, incentivo, apoio, carinho e inspiração. Tudo que conquisto e sou são graças a vocês, obrigado por tudo.

Aos meus queridos irmãos Rodrigo e Annelyse pelo amor, incentivo e amizade. Obrigado por serem fonte de inspiração, admiração e orgulho.

Ao meu orientador Wellington Longuini Repette pela orientação, confiança e apoio durante a realização deste trabalho. Obrigado pela paciência, tempo e suporte, serei sempre grato pela oportunidade de trabalhar com o senhor.

A professora Berenice Martins Toralles e aos professores Fernando Pelisser e Philippe Gleize pela disponibilidade e correções.

Ao grupo Nanotec, ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, e aos órgãos de fomento ANEEL, CAPES, CESP, CNPQ e FAPESC.

Agradeço ao professor Prudêncio, que me recebeu no GTec de portas abertas.

Ao professor Luís Gómez, pelo suporte técnico necessário para uso dos equipamentos usados nesta dissertação.

Ao amigo Luis Gustavo Rodrigues pelo incentivo, apoio e por possibilitar a minha vinda para Florianópolis, serei sempre grato.

Aos amigos Paulo, Vitor, Eduardo e Matheus pela parceria.

Aos amigos Rudiele e Ronaldo pelo apoio e incentivo.

Ao meus tios e primos, em especial ao primo e grande amigo Fernando.

Aos amigos Fernanda, Adriano, Ricardo, Rejane, Waldir, Jonathan, Heitor, Henrique, Kouth, César, Lidiane, André, Alex, Vitor Luiz Martini Piva (in memoriam), Roque, Luís, Renato e Nivaldo.

A querida nonna Humilde (in memoriam), a querida batian Aparecida (in memoriam) e ao querido nonno Jacob que são meus modelos de bondade, fé e humildade.

À Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, a seus professores e funcionários, em especial a Mari e a Priscila.



“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado.”

(J. R. R. Tolkien, 1954)



## RESUMO

O concreto autoadensável de alto desempenho (CAAAD) possui uma alta durabilidade, principalmente pelo fato de ter uma estrutura de poros mais refinada, porém se mostra vulnerável aos efeitos da retração autógena, que é majorada com a diminuição de tamanho dos poros do concreto. Esta retração pode gerar fissuras no concreto, diminuindo sua durabilidade. Para diminuir ou eliminar a retração do concreto são utilizados aditivos mitigadores de retração. Esta pesquisa tem como objetivo mostrar o comportamento de CAAAD que foram produzidos com aditivos mitigadores de retração, em relação à durabilidade, além disso, também é um objetivo mostrar o comportamento de CAAAD com diferentes relações água/aglomerante. Para tanto foram realizados nesta pesquisa os seguintes ensaios: ensaio acelerado de penetração de cloretos, carbonatação acelerada, resistividade elétrica superficial, resistividade elétrica volumétrica e permeabilidade em água. Para comparação da influência do uso de aditivos mitigadores de retração na durabilidade dos CAAAD, foram produzidos concretos com relações água/aglomerante (a/agl) 0,25 e 0,32 nos quais se utilizou aditivo redutor de retração (ARR) nos teores de 0,5%, 1% e 2%, em relação à massa de cimento, além de aditivo compensador de retração (ACR) nos teores de 5% e 10%, em substituição ao cimento, apenas para o concreto com relação água/aglomerante 0,25 utilizou-se o teor de 15%. Além destes para o concreto com relação a/agl de 0,378 foi utilizado um polímero superabsorvente (SAP) no teor de 0,04%, em relação a massa de cimento. Para se verificar a influência da relação água/aglomerante na durabilidade dos CAAAD foram ensaiados concretos produzidos sem aditivos mitigadores de retração, com os seguintes valores de relação água/aglomerante: 0,25; 0,295; 0,32 e 0,378. Concluiu-se que, excluindo o traço com 15% de ACR e relação a/agl 0,25, que demonstrou ser uma dosagem excessiva, os concretos produzidos com os aditivos mitigadores de retração não alteraram significativamente os parâmetros de durabilidade dos concretos estudados, portanto, podem ser utilizados em estruturas de CAAAD sem prejudicar sua durabilidade. Em relação aos concretos produzidos com diferentes relações a/agl, sem aditivo, os resultados demonstraram que quanto menor a relação a/agl melhor é o desempenho do concreto frente ao ingresso de agentes agressivos.

**Palavras-chave:** Concreto autoadensável de alto desempenho, durabilidade, aditivos mitigadores de retração.



## ABSTRACT

Self-Consolidating High Performance Concrete (SCHPC) has a high durability, mainly because it has a refined pore structure, however they are vulnerable to the effects of the autogenous shrinkage, which is increased with the decrease of concrete pore sizes. This shrinkage can generate cracks in concrete reducing its durability, shrinkage mitigation admixtures are used to reduce or eliminate the shrinkage of the concrete. This research has the objective to show the behavior of SCHPC that were produced with shrinkage mitigation admixtures in relation to its durability, besides that, it is also an objective to show the behavior of SCHPC with different water/binder (w/b) ratios. Therefore the following tests were made: rapid chloride permeation test, accelerated carbonation, surface resistivity, bulk resistivity and water permeability. In order to compare the influence of the use of shrinkage mitigation admixtures on the durability of SCHPC, concretes with w/b ratios 0.25 and 0.32 were produced using 0.5%, 1% and 2% of Shrinkage-Reducing Admixture (SRA), in relation to the cement mass, also were produced concretes with 5% and 10% of Shrinkage Compensating Admixture (SCA), in this case replacing the cement, only for concrete with w/b ratio 0.25 was used 15% of SCA content. Besides these, for the concrete with w/b ratio of 0.378, a superabsorbent polymer (SAP) was used in the content of 0.04%, relative to the cement mass. In order to verify the influence of the w/b ratio on the durability of the SCHPC, concrete tests were carried out without shrinkage mitigation admixtures with the following w/b ratio values: 0.25, 0.295, 0.32 and 0.378. It was concluded that, excluding the mix made with 15% SCA and w/b ratio of 0.25, which proved to be an excessive dosage, concretes produced with shrinkage mitigation admixtures did not significantly change the durability properties of the studied concretes, therefore, this admixtures can be used in SCHPC structures without harm to its durability. In relation to the concretes produced with different w/b ratios, the results showed that the lower the w/b ratio the better performance of the concrete against the ingress of aggressive agents.

**Keywords:** Self-consolidating high performance concrete, durability, shrinkage mitigation admixtures.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Efeito do uso de 1% de aditivo redutor de retração (ARR), em concreto de alta resistência, na retração por secagem nas primeiras horas. ....   | 35 |
| Figura 2 – Deslocamentos horizontais de concretos convencionais de 35 MPa no tempo, o concreto D utilizou um superplastificante a base de melamina, os concretos G, GE, GR e GS utilizaram um superplastificante a base de policarboxilato e as nomenclaturas de E, S e R se referem a três diferentes aditivos redutores de retração. .... | 36 |
| Figura 3 – Deslocamentos horizontais de concretos de alta resistência (65 MPa) no tempo, os concretos utilizaram um superplastificante (D) a base de melamina e um dos concretos utilizou o aditivo redutor de retração (DE).....   | 36 |
| Figura 4 – Influência da relação água cimento (0,45 e 0,65) e do uso de aditivo redutor de retração (ARR) na retração autógena de concretos. ....   | 37 |
| Figura 5 - Representação das mudanças de tamanho de concreto de cimento Portland e de concreto de retração compensada. ....   | 38 |
| Figura 6 – Comportamento da carga total passante com a relação a/agl.....   | 43 |
| Figura 7 – Perfis de cloretos obtidos nos ensaios de penetração acelerada de cloretos com os concretos de relação água/aglomerante 0,55.....  | 44 |
| Figura 8 – Quantidade de íons em diferentes profundidades de CAAAD com 400 kg e 500 kg de aglomerantes por metro cúbico de concreto, com adições de 5, 10 e 15% de cinza volante (CV), 10% de sílica ativa (SA), 2% de nano sílica (NS), 2% de nano sílica e 10% de sílica ativa.....   | 47 |
| Figura 9 – Valores médios de penetrabilidade de íons cloreto para cada classe em função do teor de ARR, na idade de 90 dias.....  | 50 |
| Figura 10 – Coeficiente de difusão de cloretos em função do tipo de aditivo redutor de retração (SRA). ....   | 51 |
| Figura 11 – Carbonatação em concreto aos 126 dias de câmara acelerada com 5% de dióxido de carbono. ....  | 62 |
| Figura 12 – Influência da relação a/c e da condição de cura na profundidade carbonatada do concreto.....  | 63 |
| Figura 13- Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente. ....   | 64 |
| Figura 14 – Relação entre o teor de cimento e a profundidade carbonatada. ....  | 65 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 15 – Profundidade de carbonatação em concretos de 50 MPa com diferentes concentrações de CO <sub>2</sub> em diferentes idades.....  | 66  |
| Figura 16 – Carbonatação do concreto aos 126 dias (98 dias de ensaios de carbonatação acelerada).....  | 67  |
| Figura 17 – Valores médios dos coeficientes de carbonatação natural e os respectivos desvios padrão para concretos de diferentes classes de resistência.....   | 68  |
| Figura 18 – Relação entre resistividade elétrica e relação água/cimento, aos 28 dias. ....   | 72  |
| Figura 19 – Constante de correção (K) para determinar a resistividade elétrica superficial de amostras cilíndricas de concreto...  | 74  |
| Figura 20 – Determinação da resistividade elétrica do material utilizando dois eletrodos potenciais em P1 e P2. ....   | 75  |
| Figura 21 – Determinação da resistividade elétrica de cubos ou cilindros de concreto. ....   | 76  |
| Figura 22 – Resistividade elétrica aparente superficial média de concretos com relação água/aglomerante de 0,40 e adições de sílica ativa (AS), metacaolim (MC) e misturas das duas adições.....   | 77  |
| Figura 23 – Relação entre a carga total passante pelo método de migração de cloretos e a resistividade elétrica. ....  | 78  |
| Figura 24 – Resistividade em função da composição do concreto (HES – Convencional e <i>White</i> – Branco) e da quantidade de aditivo redutor de retração (SRA) na idade de 330 dias. ....   | 79  |
| Figura 25 – Distribuição granulométrica do cimento. ....   | 84  |
| Figura 26 – Distribuição granulométrica da sílica ativa.....   | 86  |
| Figura 27 – Distribuição granulométrica do cimento P CSA.....  | 89  |
| Figura 28 – Fotos ilustrativas do polímero superabsorvente à base de policrilato de sódio. A parte (a) usa como referência de tamanho um paquímetro, que marca 31,20 mm, com uma quantidade de PSA e (b) uma foto mais próxima desta mesma quantidade de PSA. .... | 90  |
| Figura 29: Equipamento para análise de FTIR.....   | 91  |
| Figura 30: Espectro de infravermelho do aditivo redutor de retração.....   | 91  |
| Figura 31: Espectro de infravermelho do aditivo superplastificante .....   | 92  |
| Figura 32: Espectros de infravermelho do aditivo superplastificante e água.....  | 92  |
| Figura 33: Espectro de infravermelho do polímero superabsorvente.....  | 93  |
| Figura 34- Divisão dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de durabilidade.....  | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 35 – Instalação das câmaras de migração de cloreto.....  | 103 |
| Figura 36 – Cromatografo 883 Basic IC Plus da Metrohm utilizado para determinação do teor total de cloretos.....  | 105 |
| Figura 37 – Câmara de carbonatação acelerada.....   | 107 |
| Figura 38 – Esquema da instalação da câmara de carbonatação acelerada.....  | 107 |
| Figura 39 – Funcionamento da sonda Wenner. ....   | 108 |
| Figura 40 – Ligações elétricas no Resipod para o bulk test.....   | 109 |
| Figura 41 – Realização do bulk test.....  | 110 |
| Figura 42 - Valores de carga passante no ensaio acelerado de penetração de cloretos. ....   | 114 |
| Figura 43 – Valores de carga passante dos concretos produzidos com aditivo compensador de retração (ACR). ....  | 115 |
| Figura 44 - Valores de carga passante dos concretos produzidos com aditivo redutor de retração (ARR). ....  | 116 |
| Figura 45 - Valores de carga passante dos concretos para diferentes relações a/agl. ....  | 117 |
| Figura 46 – Temperaturas das soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e cloreto de sódio (NaCl) durante o ensaio de penetração acelerada de cloreto nos quatro corpos de prova (P1 a P4), do concreto com relação a/c 0,25 sem aditivo mitigador de retração. .... | 119 |
| Figura 47 – Corrente passante durante o ensaio de penetração acelerada de cloretos nos quatro corpos de prova do concreto com relação a/c 0,25 sem aditivo mitigador de retração. ....  | 119 |
| Figura 48 – Correntes passantes na média dos ensaios realizados e na extrapolação das médias das cargas iniciais. ....  | 120 |
| Figura 49 – Concentrações de íons cloreto (% íons cloreto no concreto) nas distancias de 0 a 5mm e de 5 a 10mm de profundidade. ....  | 121 |
| Figura 50 – Ensaio colorimétrico com aspersão de solução de fenolftaleína no concreto dosado com SAP.....   | 123 |
| Figura 51 – Profundidade de carbonatação aos 120 dias de câmara acelerada de carbonatação. ....   | 124 |
| Figura 52- Resistividade elétrica superficial. ....   | 126 |
| Figura 53 – Probabilidade de corrosão após 20 semanas de ciclos de molhagem e secagem, em função da resistividade dos concretos, água/cimento de 0,40, 0,45 e 0,55.....   | 128 |
| Figura 54 – Resistividade elétrica volumétrica. ....  | 129 |
| Figura 55 – Volume de poros permeáveis. ....  | 130 |
| Figura 56 – Densidade aparente. ....  | 131 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 57 – Correlação entre penetração de cloretos e concentração de cloretos de 0 a 5mm. ....           | 133 |
| Figura 58 - Correlação entre penetração de cloretos e resistividade elétrica superficial.....             | 134 |
| Figura 59 - Correlação entre penetração de cloretos e volume de poros permeáveis. ....                    | 135 |
| Figura 60 - Correlação entre penetração de cloretos e resistência a compressão.....                       | 136 |
| Figura 61 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e resistividade elétrica volumétrica..... | 137 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Influência da redução na tensão superficial no fenômeno de secagem causada pela adição de ARR.....   | 34 |
| Tabela 2 – Carga total passante em concretos no ensaio de migração de cloretos em concretos referência e com adições de 5, 10 e 20% de metacaolim (MC) e 5 e 10% de sílica ativa (SA).....  | 49 |
| Tabela 3 – Penetrabilidade de íons cloreto conforme carga total passante.....   | 54 |
| Tabela 4 – Parâmetros utilizados para ensaios de carbonatação acelerada por diferentes autores.....   | 69 |
| Tabela 5 – Avaliação do risco de corrosão através da resistividade.....   | 76 |
| Tabela 6 – Classificação de concretos em relação a penetração de íons cloreto no RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), no MRCPT (Modified Rapid Chloride Permeability test) e resistividade elétrica aparente superficial..... | 78 |
| Tabela 7 – Valores percentuais da distribuição granulométrica do cimento.....   | 85 |
| Tabela 8 – Caracterização química e física do cimento CP V ARI.....   | 85 |
| Tabela 9 - Valores percentuais da distribuição granulométrica da sílica ativa.....  | 86 |
| Tabela 10 - análise química quantitativa do cimento, da sílica ativa e do aditivo compensador de retração, o Denka.....   | 86 |
| Tabela 11 – Distribuição do percentual retido acumulado dos agregados utilizados nos concretos.....   | 87 |
| Tabela 12 – Caracterização química e física do cimento P CSA.....   | 88 |
| Tabela 13 – Valores percentuais da distribuição granulométrica do cimento P CSA.....  | 89 |
| Tabela 14 – Traços das misturas de CAAAD estudadas no programa experimental.....  | 94 |
| Tabela 15 – Consumo estimado de material para cada mistura de CAAAD.....  | 94 |
| Tabela 16 – Teores de aditivos superplastificantes utilizados para cada mistura de CAAD.....  | 95 |
| Tabela 17 – Resistência à compressão e módulo estático à compressão dos concretos estudados, SAP se refere ao polímero superabsorvente, ACR ao aditivo compensador de retração e ARR ao aditivo redutor de retração.....          | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 18- Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com relação água/aglomerante 0,25... 97   | 97  |
| Tabela 19 - Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com aditivo compensador de retração e relação água/aglomerante 0,32..... 97                  | 97  |
| Tabela 20- Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com aditivo redutor de retração e relação água/aglomerante 0,32. .... 98                      | 98  |
| Tabela 21- Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com polímero superabsorvente e relação água/aglomerante 0,378. .... 98                        | 98  |
| Tabela 22 – Resumo dos ensaios que serão executados..... 99   | 99  |
| Tabela 23 – Misturas que serão estudadas no programa experimental..... 100  | 100 |
| Tabela 24 – Penetração de íons cloreto em função da carga total passante..... 104   | 104 |
| Tabela 25 – Penetrabilidade do íon cloreto conforme carga passante..... 118   | 118 |
| Tabela 26 – Classificação de concretos em relação a penetração de íons cloreto no RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) e resistividade elétrica aparente superficial. .... 127 | 127 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl – Água/aglomerante

a/c – Água/cimento

ACR – Aditivo Compensador de Retração

ARR – Aditivo Redutor de Retração

C – Coulomb

CAA – Concreto Autoadensável

CAAAD – Concreto Autoadensável de Alto Desempenho

CAR – Concreto de Alta Resistência

CAD – Concreto de Alto Desempenho

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

C3A – Silicato tricálcico

MC – Metacaolim

MRCPT – Modified Rapid Chloride Permeation Test

NS – Nano sílica

PSA – Polímero Superabsorvente

REF - Referência

RCPT – Rapid Chloride Permeation Test

SA – Sílica ativa

V - Volt



## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>27</b> |
| 1.1          | JUSTIFICATIVA.....   | 28        |
| <b>1.1.1</b> | <b>Objetivos</b> .....   | <b>29</b> |
| <b>1.1.2</b> | <b>Estrutura da dissertação</b> .....                          | <b>29</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                             | <b>31</b> |
| 2.1          | CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO .....                | 31        |
| 2.2          | ADITIVOS MITIGADORES DE RETRAÇÃO.....                          | 32        |
| 2.2.1.1      | Aditivos redutores de retração .....                           | 32        |
| 2.2.1.2      | Aditivos compensadores de retração.....                        | 37        |
| 2.2.1.3      | Polímero superabsorvente .....                                 | 38        |
| 2.3          | PENETRAÇÃO DE CLORETOS .....                                   | 39        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Fatores que influenciam na penetração de cloretos</b> ..... | <b>42</b> |
| 2.3.1.1      | Relação água/cimento .....                                     | 42        |
| 2.3.1.2      | Grau de hidratação do cimento .....                            | 44        |
| 2.3.1.3      | Diâmetro do agregado.....                                      | 45        |
| 2.3.1.4      | Tipo de sal.....   | 45        |
| 2.3.1.5      | Tipo e consumo de cimento .....                                | 46        |
| 2.3.1.6      | Adições .....  | 48        |
| 2.3.1.7      | Aditivos.....  | 49        |
| 2.3.1.8      | Teor de umidade.....   | 51        |
| 2.3.1.9      | Temperatura .....  | 52        |
| 2.3.1.10     | Cura.....  | 52        |
| 2.3.1.11     | Fissuras .....   | 53        |
| <b>2.3.2</b> | <b>Ensaio e critérios de avaliação</b> .....                   | <b>53</b> |
| 2.4          | CARBONATAÇÃO .....   | 59        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Fatores que influenciam na carbonatação</b> .....           | <b>60</b> |
| 2.4.1.1      | Relação água/cimento .....                                     | 61        |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| 2.4.1.2      | Condições de cura.....  | 62         |
| 2.4.1.3      | Umidade e temperatura .....   | 63         |
| 2.4.1.4      | Consumo de cimento .....  | 64         |
| 2.4.1.5      | Concentração de CO <sub>2</sub> .....   | 65         |
| 2.4.1.6      | Adições .....   | 66         |
| 2.4.1.7      | Aditivos.....   | 67         |
| <b>2.4.2</b> | <b>Ensaio e critérios de avaliação .....</b>  | <b>68</b>  |
| 2.5          | RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....  | 70         |
| <b>2.5.1</b> | <b>Fatores que influenciam na resistividade elétrica .....</b>                                  | <b>71</b>  |
| <b>2.5.2</b> | <b>Ensaio e critérios de avaliação .....</b>  | <b>74</b>  |
| 2.6          | SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 79         |
| <b>3</b>     | <b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>83</b>  |
| 3.1          | MATERIAIS.....  | 83         |
| 3.2          | METODOLOGIA DE ENSAIOS .....  | 99         |
| <b>3.2.1</b> | <b>Ensaio acelerado de penetração de cloretos .....</b>   | <b>100</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Carbonatação acelerada.....</b>  | <b>105</b> |
| <b>3.2.3</b> | <b>Resistividade elétrica .....</b>   | <b>108</b> |
| <b>3.2.4</b> | <b>Permeabilidade em água .....</b>   | <b>111</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>  | <b>113</b> |
| 4.1          | PENETRAÇÃO DE CLORETOS .....  | 113        |
| 4.2          | CARBONATAÇÃO ACELERADA.....   | 122        |
| 4.3          | RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....  | 125        |
| <b>4.3.1</b> | <b>Resistividade elétrica superficial .....</b>   | <b>125</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Resistividade elétrica volumétrica.....</b>  | <b>128</b> |
| 4.4          | PERMEABILIDADE EM ÁGUA.....   | 129        |
| 4.5          | ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS REALIZADOS .....  | 131        |
| <b>4.5.1</b> | <b>Correlação entre a penetração de cloretos e a concentração de cloretos de 0 a 5 mm .....</b> | <b>132</b> |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| <b>4.5.2</b> | <b>Correlação entre a penetração de cloretos e a resistividade elétrica superficial .....</b>             | <b>133</b> |
| <b>4.5.3</b> | <b>Correlação entre a penetração de cloretos e o volume de poros permeáveis .....</b>                     | <b>134</b> |
| <b>4.5.4</b> | <b>Correlação entre a penetração de cloretos e a resistência a compressão.....</b>                        | <b>135</b> |
| <b>4.5.5</b> | <b>Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistividade elétrica volumétrica .....</b> | <b>136</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>139</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>141</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de armaduras de aço no concreto armado permite a concepção de estruturas das mais variadas formas e empregos. O concreto além de fornecer resistência às peças de concreto armado também tem a função de fornecer à armadura uma proteção frente a agentes agressivos do seu ambiente. Porém existem situações em que as estruturas de concreto armado deterioram-se mais rapidamente do que o previsto, isso pode ocorrer devido a falhas de concepção do projeto, falhas na execução ou a falta de qualidade dos materiais frente à agressividade do ambiente (BOUNY et al., 2014).

A falta de durabilidade das estruturas traz um impacto econômico para a sociedade pela necessidade de manutenção e reparo, como exemplos em 2007 a França gastou 79,6 bilhões e a Alemanha 99,0 bilhões de Euros em manutenção e reparo de suas construções (MEDEIROS et al., 2011 apud UEDA & TAKEWAKA, 2007). Sendo estes gastos diretamente ligados à durabilidade da estrutura, fica claro que a durabilidade é um fator que merece atenção nos materiais de construção.

A camada de revestimento que protege o aço do meio ambiente desempenha um papel importante na durabilidade das estruturas de concreto armado, porque além de ser uma barreira química, é também uma barreira física. Um revestimento de boa qualidade, bem executado e que possua baixa porosidade irá proteger melhor o aço se comparado com um revestimento permeável, pois irá dificultar a penetração de agentes agressivos como os íons cloretos e o dióxido de carbono. Mesmo após o início da corrosão do aço, um revestimento menos permeável irá diminuir a velocidade de propagação da corrosão ao dificultar a penetração de água e oxigênio, elementos necessários à existência da corrosão.

O concreto de alto desempenho vem ao encontro dessa necessidade de se ter revestimentos com propriedades de baixa permeabilidade, aumentando assim a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto armado. O concreto de alto desempenho possui baixas relações água/cimento, que influenciam diretamente na porosidade e permeabilidade do concreto.

No final da década de 1980, no Japão, os engenheiros identificaram que uma das principais causas de comprometimento da durabilidade nas estruturas de concreto armado era devido ao adensamento inadequado do concreto, portanto para suprir essa deficiência foi desenvolvido o concreto autoadensável (REPETTE,

2011). O concreto autoadensável possui alta fluidez no estado fresco, podendo fluir sobre seu próprio peso e preencher formas de vários formatos e com altas taxas de armadura, sem ter a necessidade de compactação.

Ao unir as propriedades benéficas do concreto de alto desempenho e do concreto autoadensável se desenvolveu um novo tipo de concreto, o concreto autoadensável de alto desempenho (CAAAD), que possuía a ótima fluidez e estabilidade do concreto autoadensável além da alta resistência e durabilidade do concreto de alto desempenho (SABET et al., 2013). O CAAAD melhora a durabilidade das peças de concreto armado tanto no quesito de desempenho quanto no quesito execução.

Um ponto negativo no uso de concretos com baixas relações água/cimento é o aumento da retração autógena, esta retração está relacionada à retirada de água dos poros capilares pela hidratação do cimento, a auto-dessecação, que aumenta a tensão exercida pela água nos poros capilares, retraindo a pasta. Betz & Jensen (2004) indicam que as fissuras geradas pela retração autógena podem provocar redução na resistência do concreto, diminuição da durabilidade, perda de pré-tensões em aplicação de protensões e problemas com estética e limpeza. Para diminuir os efeitos das retrações são utilizados os aditivos mitigadores de retração.

Porém o uso de aditivos mitigadores de retração gera dúvida em relação aos parâmetros de durabilidade.

Este trabalho irá mostrar a influencia destes aditivos mitigadores de retração na durabilidade dos concretos, em relação a penetração de cloretos, carbonatação acelerada, resistividade elétrica e porosidade. Ficando fora do escopo desta pesquisa verificar a influencia destes aditivos em relação à retração em concretos, a eficiência destes aditivos pode ser verificada em outras pesquisas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A importância de uma maior durabilidade nos concretos de estruturas nas quais os custos de manutenção e reparo são elevados, como em pontes e estruturas de difícil acesso, propicia a utilização de concretos de alta tecnologia, como o CAAAD. O concreto com baixa relação água/algomerante e elevado consumo de cimento, como é o caso do CAAAD, podem ser solicitados por tensões de tração decorrentes da retração autógena, colocando em risco a sua durabilidade.

Assim, este trabalho se justifica pela importância de se verificar o efeito de aditivos mitigadores de retração e da relação água/aglomerante (a/agl) na durabilidade de concretos autoadensáveis de alto desempenho.

### **1.1.1 Objetivos**

O objetivo do presente trabalho é verificar o comportamento de concretos autoadensáveis de alto desempenho, em relação à durabilidade destes concretos, em relação a penetração de cloretos, carbonatação acelerada, resistividade elétrica e porosidade, com diferentes aditivos mitigadores de retração e com diferentes relações água/aglomerante.

Assim sendo, são objetivos específicos deste trabalho:

- Estudar a influência do uso de aditivos mitigadores de retração em CAAAD no ensaio acelerado de penetração de cloretos, no ensaio de carbonatação acelerado, na resistividade elétrica do concreto e na permeabilidade em água.
- Estudar a influência da relação água/aglomerante em CAAAD no ensaio acelerado de penetração de cloretos, no ensaio de carbonatação acelerado, na resistividade elétrica do concreto e na permeabilidade em água.

### **1.1.2 Estrutura da dissertação**

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos, conforme descritos abaixo.

No capítulo 1 consta a introdução, onde se justifica a importância do trabalho, e seus objetivos.

No capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica sobre os o CAAAD e os aditivos mitigadores de retração, os cloretos, a carbonatação e a resistividade elétrica no concreto. São apresentadas as características, os ensaios e critérios de avaliação dos cloretos, da carbonatação e da resistividade elétrica no concreto.

No capítulo 3 apresenta-se o programa experimental da pesquisa, onde constam os materiais estudados e os procedimentos para realização dos ensaios.

No capítulo 4 encontram-se os resultados e discussões.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE ALTO DESEMPENHO

Concretos de relações água/cimento menores que 0,40, que utilizam superplastificantes e, que possuem misturas devidamente proporcionadas e curadas apresentam pouca ou nenhuma permeabilidade, propriedade que atribui durabilidade em estruturas expostas a ambientes corrosivos. Estes concretos quando utilizam superplastificantes e contém aditivos minerais, exibem classificações de baixa permeabilidade conforme o ensaio de migração de cloretos da ASTM C 1202 (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Segundo Aïtcin (2008) o concreto de alto desempenho possui uma matriz muito densa, que é a melhor proteção para o concreto em ambientes marinhos.

A retração é provavelmente uma das propriedades menos desejáveis no concreto. A retração quando restringida pode causar fissuras, que prejudica a aparência do concreto e o faz mais vulnerável ao ataque de agentes externos, afetando sua durabilidade. Mesmo a retração quando não é restringida é prejudicial, elementos de concreto retraem entre si abrindo fissuras externas (NEVILLE, 2011).

Segund Holt & Leivo (2004) a retração do concreto não pode ser evitada, ela irá ocorrer no mínimo pela redução de volume resultante da hidratação do cimento, que consome menos espaço que os produtos iniciais do cimento. A perda de água do concreto para o meio ambiente também pode causar retração. Quando há muita retração o concreto irá fissurar e a durabilidade da estrutura estará seriamente comprometida.

A retração está associada a deformações que acontecem nas pastas de cimento, argamassas e concretos mesmo quando não há nenhum tipo de carregamento, reações químicas deletérias e expansivas ou variações térmicas. Essas deformações são resultado das retrações plástica, autógena, hidráulica ou por secagem e por carbonatação (DINIZ *et al.*, 2011). Concreto autoadensável de alto desempenho

Para produzir concretos de alto desempenho é necessária a diminuição da porosidade do concreto, o que lhe atribui alta resistência e durabilidade, para tanto as seguintes ações são necessárias: diminuição da relação água/aglomerante pelo uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes, otimização da granulometria dos agregados para se obter maior compacidade, utilização de agregados graúdos de menor diâmetro e utilização de adições minerais que provoquem o refinamento dos poros (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

O concreto autoadensável (CAA) é caracterizado pela sua excelente fluidez, ele pode escoar sobre seu próprio peso e preencher formas de diferentes formatos e com altas taxas de armadura, sem a necessidade de compactação. O CAA apresenta estas características e ao mesmo tempo mantém sua estabilidade sem segregar ou exsudar. Algumas das vantagens do CAA são: um tempo de construção menor devido ao aumento da produtividade, uso em seções com altas taxas de armadura, melhora da qualidade do concreto, redução de barulhos e acidentes provocados pelo uso de vibradores e lançamento do concreto, excelente acabamento da superfície do concreto (SABET *et al.*, 2013). Segundo Repette (2011) o CAA apresenta menor quantidade de falhas, microestrutura mais homogênea e melhor hidratação do cimento.

Segundo Jalal *et al.* (2015) ao combinar as características e vantagens do concreto de alto desempenho e do concreto autoadensável, o concreto de alto desempenho autoadensável (CAAAD) possui alta resistência, alta durabilidade e boas propriedades reológicas, tanto no concreto fresco quanto no endurecido.

## 2.2 ADITIVOS MITIGADORES DE RETRAÇÃO

Nesta seção serão abordados os três tipos de aditivos químicos empregados no programa experimental.

Deve ficar claro que, no presente estudo, o único aglomerante usado será uma composição de cimento Portland CPV ARI com sílica ativa, contudo, as misturas estudadas com agente expensor terão uma fração de aglomerante substituída pelo cimento expansivo. Em razão do pequeno teor de substituição de aglomerante por cimento expansivo, este será chamado, convencionalmente no texto, de aditivo compensador de retração.

### 2.2.1.1 Aditivos redutores de retração

Os aditivos redutores de retração são utilizados para reduzir a retração de concretos e argamassas, propileno glicol e polioxi-alquilenol éter são alguns dos compostos químicos utilizados. A redução da retração é obtida pela redução da tensão superficial da água dos poros do concreto, sendo observadas reduções de 25% a 50% da retração por secagem (HARTMANN *et al.*, 2011). Segundo Repette (2011) ao diminuir a tensão superficial da fase aquosa do poro de concreto, o uso

de aditivos redutores de retração diminui a retração autógena causada pela auto-dessecação.

Segundo Rixon & Mailvaganan (1999), o aditivo redutor de retração reduz a tensão superficial da água nos poros com diâmetros entre 2,5 e 50 nm, consequentemente diminuindo a tensão capilar. Ele é adicionado na água de amassamento e disperso no concreto durante a mistura. Após o endurecimento do concreto o aditivo continua presente no sistema de poros, onde continua reduzindo os efeitos da tensão superficial da água que contribuem para a retração por secagem.

Uma grande parte da retração do concreto durante a secagem (externa e interna) é controlada pela pressão capilar que se desenvolve nos poros parcialmente preenchidos com água (BENTZ, 2005). Para poros cilíndricos, a equação de Kelvin descreve a relação entre o raio do poro e a umidade relativa acima do menisco, assumindo que as paredes do poro estão completamente úmidas pelo líquido (equação 1). Admitindo a equação de Laplace para raio único (equação 2), obtém-se a equação Kelvin-Laplace (equação 3). Desse modo, nota-se que a tensão capilar é diretamente proporcional à tensão superficial da solução dos poros; consequentemente, uma redução da tensão superficial irá implicar na redução da tensão capilar. Com relação à umidade relativa, a sua redução promove um incremento na tensão capilar.

$$\ln\left(\frac{UR}{100\%}\right) = \frac{-2\gamma V_m}{rRT} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

UR = umidade relativa (%);

$\gamma$  = tensão superficial da solução do poro (N/m);

$V_m$  = volume molar da solução do poro ( $m^3/mol$ );

r = raio do poro (m);

R = constante universal do gás [8314 J/(mol.K)];

T = temperatura absoluta (Kelvin).

$$\sigma_c = \frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{r} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

$\sigma_c$  = tensão capilar;

$\gamma$  = tensão superficial da solução do poro (N/m);

$\Theta$  = ângulo de contato entre a solução de poro e a parede do

poro;

$r$  = raio do poro (m).

$$\sigma_c = \frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{r} = \frac{-\ln\left(\frac{UR}{100\%}\right) \cdot RT}{V_m} \quad \text{Equação 3}$$

Conforme Bentz (2005), a influência da redução na tensão superficial, da solução dos poros do concreto, na retração por secagem, retração autógena e a perda de água por evaporação nas primeiras idades pode ser resumida na tabela 1.

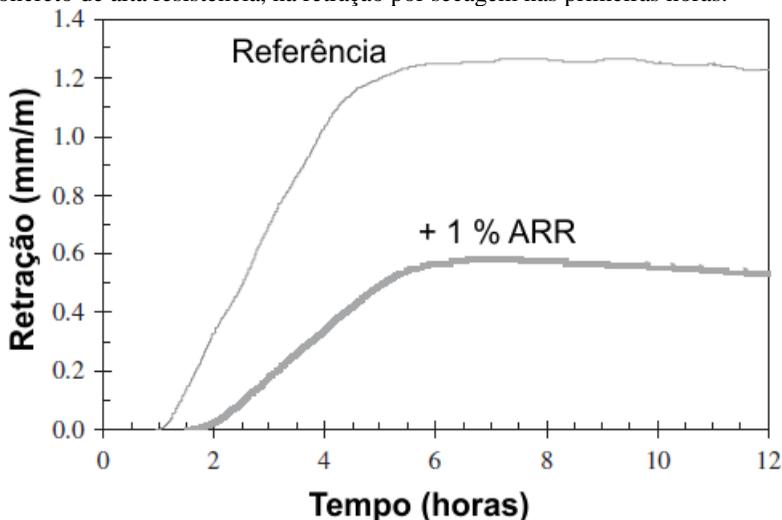
Tabela 1 – Influência da redução na tensão superficial no fenômeno de secagem causada pela adição de ARR.

| Fenômeno                        | Influência da redução da tensão superficial   |
|---------------------------------|---|
| Retração por secagem            | Redução no equilíbrio de saturação<br>Redução na taxa de secagem (menor perda de massa) |
| Retração autógena               | Redução da tensão capilar<br>Redução da umidade relativa interna                        |
| Evaporação nas primeiras idades | Modificação no perfil da curva de secagem<br>Redução da taxa de secagem                 |

Fonte: Bentz (2005).

Holt & Leivo (2004) estudaram o efeito na retração do uso de um aditivo redutor de retração, em concretos de alta resistência. A diminuição da retração pode ser verificada pela figura 1, que demonstra que o aditivo redutor de retração foi efetivo na diminuição das deformações de retração pela redução na tensão superficial da água.

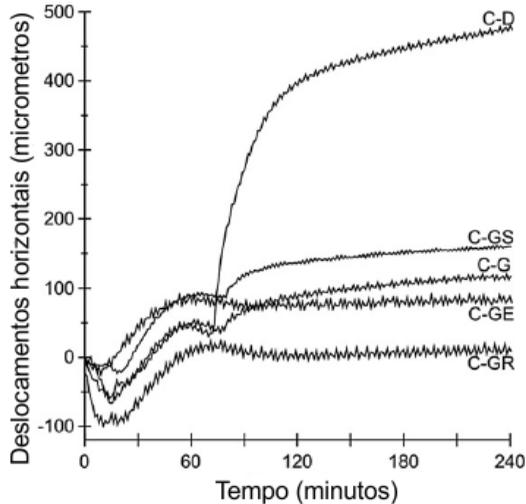
Figura 1 – Efeito do uso de 1% de aditivo redutor de retração (ARR), em concreto de alta resistência, na retração por secagem nas primeiras horas.



Fonte: Adaptado de Holt & Leivo (2004).

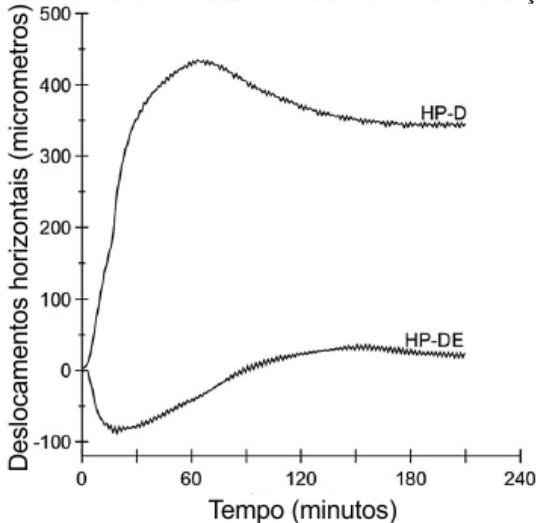
Mora-Ruacho *et al.* (2009) estudaram concretos convencionais de 35 MPa sem cura em um equipamento que simulou ventos fortes, e ao utilizarem três tipos de aditivos redutores de retração, verificaram que as aberturas de fissuras diminuíram muito quando comparadas às do concreto sem aditivos, conforme pode ser visto na figura 2. Também realizaram ensaios com dois concretos de alta resistência de 65 MPa e, ao utilizarem um aditivo redutor de retração também observaram uma grande diminuição nas aberturas de fissuras, como pode ser visto na figura 3.

Figura 2 – Deslocamentos horizontais de concretos convencionais de 35 MPa no tempo, o concreto D utilizou um superplastificante a base de melamina, os concretos G, GE, GR e GS utilizaram um superplastificante a base de policarboxilato e as nomenclaturas de E, S e R se referem a três diferentes aditivos redutores de retração.



Fonte: Adaptado de Mora-Ruancho *et al.* (2009).

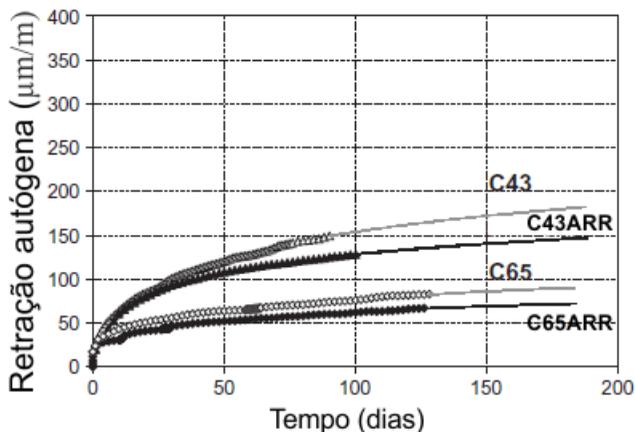
Figura 3 – Deslocamentos horizontais de concretos de alta resistência (65 MPa) no tempo, os concretos utilizaram um superplastificante (D) a base de melamina e um dos concretos utilizou o aditivo redutor de retração (DE).



Fonte: Adaptado de Mora-Ruancho *et al.* (2009).

Saliba *et al.* (2011) demonstraram que o uso de aditivos redutores de retração diminuíram a retração autógena de concretos com relações a/c de 0,43 e 0,65, conforme pode ser verificado na figura 4.

Figura 4 – Influência da relação água cimento (0,45 e 0,65) e do uso de aditivo redutor de retração (ARR) na retração autógena de concretos.



Fonte: Adaptado de Saliba et al. (2011).

#### 2.2.1.2 Aditivos compensadores de retração

Inicialmente para se tentar prevenir a retração do concreto foram desenvolvidos estudos sobre cimentos expansivos e aditivos expansores. O aditivo expansor tem como princípio induzir tensões de compressão de modo a compensar as tensões de tração resultantes da restrição da retração no concreto. O principal responsável pela expansão induzida pelo aditivo expansor é a formação da etringita, esta normalmente é considerada inconveniente, podendo causar danos irreversíveis quando formada após o endurecimento do concreto (MELO, 2008).

A norma ASTM C 845 (1996) define três tipos de cimentos expansivos: o tipo K é um cimento Portland misturado com sulfoaluminato de cálcio anidro, anidrita e cal virgem; o tipo M é um cimento Portland misturado com cimento aluminoso e anidrita; o tipo S é um cimento Portland comum formulado para apresentar elevada quantidade de aluminato tricálcico e adicionado um excesso de anidrita.

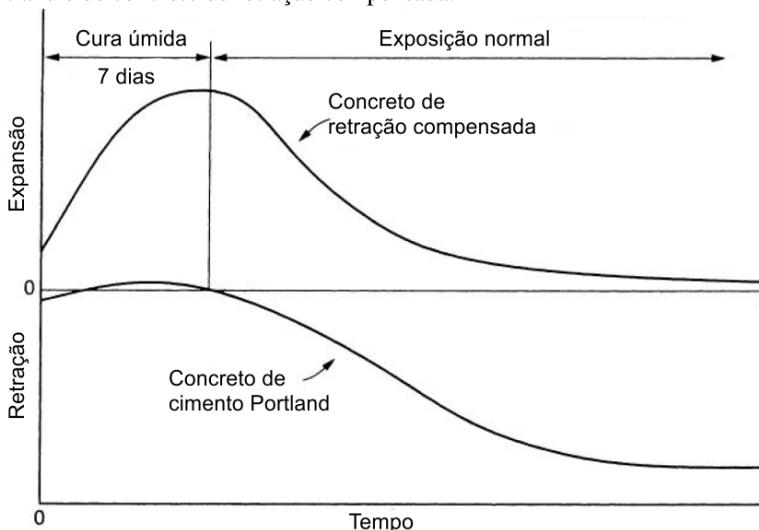
Segundo Melo (2008) dentre a maioria dos aditivos compensadores de retração disponíveis, os dois tipos principais são a base de sulfoaluminato de cálcio e à base de cal virgem, sendo os à base

cal virgem pouco utilizados por ser de difícil controle em razão da sua quase que imediata reação com a água.

Os aditivos compensadores de retração promovem a expansão do concreto, essa expansão compensa a retração. O combate à fissuração resultante da retração do concreto pelos aditivos compensadores de retração depende de quanto o concreto irá expandir e quando ocorrerá essa expansão (REPETTE, 2011).

Segundo Neville (2011) o uso de cimentos expansivos não previne o desenvolvimento da retração, o que acontece é que a expansão gerada pelo seu uso compensa aproximadamente a retração, como pode ser visto na figura 5.

Figura 5 - Representação das mudanças de tamanho de concreto de cimento Portland e de concreto de retração compensada.



Fonte: Adaptado de ACI Committee 223-77.

### 2.2.1.3 Polímero superabsorvente

Partículas de polímero superabsorvente e agregados leves são exemplos de materiais que armazenam grande quantidade de água, por isso são chamadas de materiais incorporadores de água. Estes materiais, quando incorporados ao concreto, tem a capacidade de liberar a água armazenada à medida que ocorre a redução de umidade nos poros do concreto, este fenômeno é chamado de cura interna que diminui a

autodessecação, responsável por parte considerável da retração autógena (REPETTE, 2011).

Os polímeros superabsorventes (PSA) são materiais desenvolvidos, em princípio, para absorver água ou soluções aquosas. Os mais comuns são os poliácridatos de ligações cruzadas covalentes e poliácridamidas/poliácridatos copolimerizados (JENSEN; HANSEN, 2001). Segundo os autores, devido à natureza iônica e estrutura interligada, o PSA pode absorver grandes quantidades de água sem se dissolver.

Para promover a cura interna, os PSAs são misturados ao concreto no estado fresco e o volume de água a ser absorvida pelo polímero é acrescido à água da mistura, o PSA absorve a água enquanto o concreto ainda está no estado fresco e depois a libera para combater a retração do concreto no estado endurecido (REPETTE, 2011).

Segundo Jensen & Hansen (2001) através de agentes de cura interna, como os polímeros superabsorventes, é provável que se possa evitar a retração autógena causada pela auto-dessecação do concreto, sem que haja impactos negativos na resistência e na durabilidade do concreto.

Jensen & Hansen (2002) estudaram os efeitos na retração do uso de dois tipos de polímeros superabsorventes, os concretos possuíam relação água/cimento 0,30 e foi realizada a adição extra de água para saturar os polímeros superabsorventes. Seus resultados demonstraram que foi possível evitar a auto-dessecação, diminuindo a retração livre e não houve fissuração no ensaio de retração restringida por três semanas.

### 2.3 PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Existem três mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado. A lixiviação, a expansão por sulfatos e a reação álcali-agregado são colocadas como sendo mecanismos de deterioração relativos ao concreto, a despassivação das armaduras por carbonatação e pela ação de cloretos são mecanismos de deterioração relativos à armadura e os mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita são aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação, bem como ações que atuam diretamente sobre a estrutura (ABNT NBR 6118, 2014).

A perda da estabilidade da camada passivadora do ferro, que protege a armadura da corrosão, ocorre pela penetração de substâncias

agressivas, a carbonatação reduz o pH do concreto a níveis insuficientes para manter a passivação da armadura, a presença do íon cloreto em quantidade suficiente rompe localizadamente a camada passivadora, também há ocorrências dos dois fenômenos combinados (BAKKER, 1998 apud FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

A durabilidade do concreto é fortemente dependente da facilidade com que líquidos e gases podem entrar e se mover no concreto, isto é comumente conhecido como a permeabilidade do concreto. Porém permeabilidade se refere ao mecanismo de transporte onde o fluxo do fluido ocorre sobre pressão externa, além deste mecanismo existem também a difusão e a absorção capilar. A difusão ocorre quando há diferenças de concentração dos elementos, sendo que a direção do movimento é do lugar de maior concentração para o de menor. Os gases difundem pelos espaços preenchidos com água ou com ar, porém o processo é  $10^4$  a  $10^5$  vezes mais lento na água. Absorção capilar é o resultado do movimento capilar nos poros do concreto que estão abertos ao meio ambiente, portanto a absorção capilar somente acontece em concretos parcialmente secos, não há absorção capilar em concretos completamente secos ou saturados em água (NEVILLE, 2011).

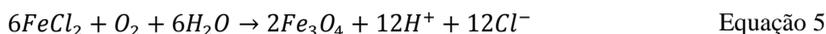
Um dos agentes mais agressivos para as barras de aço no concreto armado é o íon cloreto (ANDRADE *et al.*, 2011). Segundo Torres *et al.* (2014), a corrosão induzida por cloretos começa quando a concentração de cloretos nas barras de aço chega a uma concentração limite, destruindo a camada passivadora que protege o aço da corrosão.

Segundo Figueiredo (2011) os íons cloretos podem chegar ao interior do concreto pelos constituintes de sua mistura ou no estado endurecido pelo seu meio ambiente. Na mistura os íons cloreto podem estar presentes nos agregados, na água de amassamento e no uso de aceleradores de pega que contêm  $\text{CaCl}_2$ , já no estado endurecido os cloretos podem penetrar no concreto através da atmosfera marinha, da água do mar, em processos industriais ou nos sais utilizados para derreter o gelo. Neville (2011) destaca que o problema de ataque de cloretos normalmente aparece quando os íons cloretos ingressam no concreto endurecido e que os cloretos da água do mar podem ser transportados pela poeira ou pelos ventos por grandes distâncias.

A penetração de cloretos no concreto ocorre quando o concreto entra em contato com água que contém cloretos, sendo que quando esta água está estagnada a penetração ocorre através de mecanismos de difusão. Quando há ciclos de umedecimento e secagem do concreto a água pode penetrar também por sucção capilar (FIGUEIREDO, 2011).

Os íons cloretos podem estar no concreto quimicamente combinados com as fases alumino-ferríticas, formando os cloroaluminatos, fisicamente adsorvidos na superfície dos poros capilares ou livres na solução dos poros do concreto (FIGUEIREDO, 2011). Segundo Sabet *et al.* (2003), somente os íons cloretos livres podem se mover nos poros do concreto, penetrar até o aço e começar o processo de corrosão. Page *et al.* (1986) estudou a penetração de cloretos em pastas com diferentes concentrações de C<sub>3</sub>A (Silicato tricálcico) e verificou que quanto maior a quantidade de C<sub>3</sub>A presente no cimento menor foi a entrada dos íons cloreto, demonstrando a capacidade do C<sub>3</sub>A em se ligar com os íons cloretos.

Segundo Thangavel & Rengaswamy (1998) a ação de cloretos sobre a armadura de aço se dá através das seguintes reações:



Percebe-se por estas equações que a reação libera íons cloretos, que estão novamente disponíveis para a continuidade a reação.

Silva (2006) considera teores de 0,05% a 0,1% de cloretos como quantidade suficiente para despassivar o aço, ainda que possa haver grandes variações de material para material.

A resistência do concreto frente ao ingresso de íons agressivos é um fator importante na durabilidade do concreto. A absorção capilar do concreto representa indiretamente a porosidade, também da ideia do volume de poros permeáveis e a conectividade entre os poros (SABET *et al.*, 2013).

Segundo Silva (2006) a penetração de cloretos no concreto se dá através dos mecanismos de penetração de água e transporte de íons, sendo os principais mecanismos de penetração:

- Absorção ou sucção capilar: a penetração dos íons cloreto se dá nos poros do concreto devido à tensão superficial, principalmente em ciclos de umedecimento e secagem;
- Difusão de íons: o íon penetra devido à ação de um gradiente de concentração entre o elemento que difunde e o meio difusor;

- Migração de íons: ocorre quando há a presença de um campo elétrico, que pode ser gerado, por exemplo, pela corrente elétrica do ensaio acelerado de penetração de cloretos ou pela técnica de proteção catódica;
- Permeabilidade: o movimento do fluido ocorre quando submetido à ação de um gradiente de pressão.

O ensaio de difusão em condições normais é um ensaio bastante demorado. Para diminuir os tempos de ensaios é possível acelerar a difusão dos íons utilizando um campo elétrico, porém além da difusão neste caso ocorre também a migração. A migração é o mecanismo de transporte de íons devido à ação de um campo elétrico, que atua como força motriz e provoca aumento do fluxo dos íons (KROPP; HILSDORF, 2005).

### **2.3.1 Fatores que influenciam na penetração de cloretos**

Vários fatores influenciam na penetração de cloretos, a relação água/cimento influencia na porosidade do concreto, que tem grande influência na velocidade de penetração de cloretos. A presença de fissuras no concreto, dependendo do tamanho da abertura e da qualidade do concreto, pode levar a menores tempos necessários para os íons cloretos chegarem ao aço. Além destes também são fatores influentes: o tipo de cátion associado aos cloretos, se os cloretos foram incorporados à mistura ou após o endurecimento, a presença de outro ânion, o tipo de cimento, o estado de carbonatação do concreto, as condições de produção e cura, a umidade ambiental, a temperatura e o consumo de cimento (FIGUEIREDO, 2011).

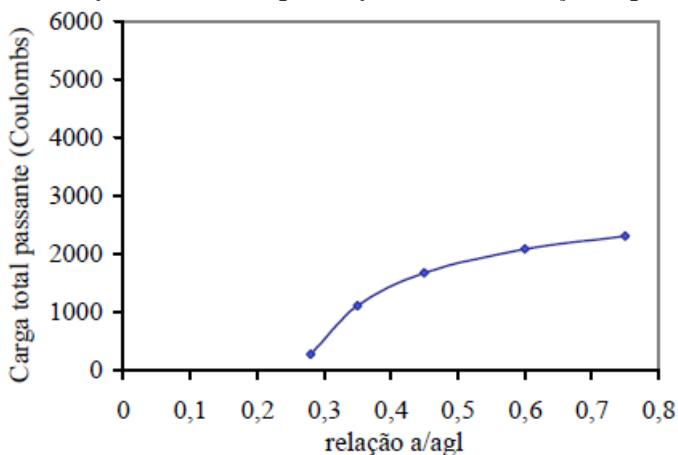
#### **2.3.1.1 Relação água/cimento**

A baixa relação água cimento diminui a velocidade da penetração de íons cloreto devido ao refinamento da porosidade dos capilares. Em pastas de cimento com baixas relações água/cimento os íons cloreto são obrigados a difundir em uma rede de poros mais tortuosa e desconectada (AÏTCIN, 2004).

Hoffmann (2001) investigou o comportamento do coeficiente de difusão de cloretos em concretos com diferentes relações água/aglomerante, com e sem dióxido de sílica ativa. Foi observado que a redução na relação água/aglomerante de 0,75 para 0,28 diminuiu o coeficiente de difusão de cloretos em 70%, o que prolongaria a vida útil de uma estrutura em concreto em 157%.

Em seu estudo Hoffmann (2001) ensaiou concretos com 10% de adição de sílica ativa conforme a ASTM C 1202 aos 28 dias, verificou que a relação água/aglomerante é significativa na carga total passante, conforme pode ser visto na figura 6.

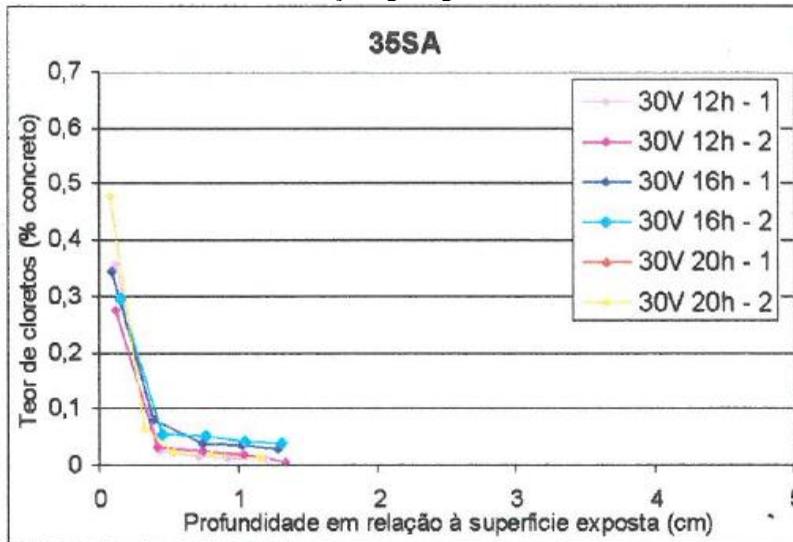
Figura 6 – Comportamento da carga total passante com a relação a/agl



Fonte: Hoffmann (2001).

Calçada (2004) realizou ensaios de penetração acelerada de cloretos com 30V por 12, 16 e 20 horas e após o ensaio determinou o teor de cloretos totais (% concreto). Os resultados dos concretos de com relação á/agl 0,35 com 10% de sílica ativa, estão demonstrados na figura 7. Observa-se que em seus resultados, o teor de cloretos estão próximos aqueles encontrados nesta pesquisa, entre 0 e 0,1% para as distâncias de 0,25 a 0,5mm. Segundo Calçada (2004) para os traços com relação á/agl 0,35, as profundidades de penetração de cloretos foram muito pequenas e que houve dificuldade na obtenção de perfis com mais de dois pontos apresentando teores de cloretos significativos.

Figura 7 – Perfis de cloretos obtidos nos ensaios de penetração acelerada de cloretos com os concreto de relação água/aglomerante 0,55.



Fonte: Calçada (2004).

### 2.3.1.2 Grau de hidratação do cimento

A hidratação do cimento é um processo progressivo no tempo, esta ação progressiva substitui os espaços ocupados pelos vazios capilares por produtos de hidratação, diminuindo assim a porosidade capilar. Os produtos de hidratação chegam a ocupar em média duas vezes o volume ocupado pelo cimento anidro (VITALI, 2013).

Segundo Mehta & Monteiro (2006) à medida que aumenta o grau de hidratação do cimento, o volume de poros vai reduzindo ao longo do tempo. Portanto, ao avançar a idade do concreto ocorre a diminuição da sua porosidade, reduzindo então a permeabilidade, a absorção capilar e a difusividade do cloreto no concreto.

Os íons cloreto podem combinar-se com o C-S-H de três formas: quimicamente adsorvidas na superfície do C-S-H, na superfície das camadas de C-S-H e compondo a estrutura do C-S-H. Portanto quanto maior o teor de C-S-H no concreto, maior a probabilidade de combinação com os íons cloreto e menor a velocidade de penetração dos íons cloreto no concreto de cobrimento (SILVA, 2006).

### 2.3.1.3 Diâmetro do agregado

A incorporação de agregados à pasta de cimento aumenta a sua permeabilidade e, quanto maior a dimensão do agregado, maior o coeficiente de permeabilidade do concreto. Isto ocorre devido à presença de microfissuras na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento. A dimensão do agregado e sua distribuição granulométrica afetam a exsudação da mistura de concreto, influenciando na zona de transição. Além disso no período inicial da hidratação a zona de transição é fraca e vulnerável à fissuração, devido aos esforços diferenciais entre a pasta de cimento e o agregado, permitindo estabelecer a interconexão entre os poros capilares presentes na pasta de cimento, facilitando assim o ingresso de agentes agressivos no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Basher *et al.* (2005) estudaram a influência do agregado graúdo na permeabilidade ao ar, na difusão de cloretos e na carbonatação do concreto, seus resultados mostraram que ao aumentar o agregado graúdo de 10mm para 20mm houve aumento na permeabilidade ao ar, na difusão de cloretos e na profundidade de carbonatação.

### 2.3.1.4 Tipo de sal

O tipo de cátion e sua concentração influenciam a penetração de cloretos, sendo que diferentes cátions promovem viscosidades e tensões superficiais diferentes às soluções que contém cloretos. O tipo de sal e sua concentração influenciam sobre a taxa de penetração de cloretos, já que depende da quantidade de cloretos que são fixados, e este processo depende do tipo de sal que contém os cloretos (KROPP, 1995).

Weerdt *et al.* (2015) estudaram a influencia do cátion associado ao íon cloreto em relação a ligações com os compostos do cimento, para os sais de cloreto de magnésio, cloreto de cálcio e cloreto de sódio. Concluíram que o tipo de cátion associado ao cloreto influencia a capacidade de ligação do cloreto, verificaram que os cátions  $Mg^{2+}$  e  $Ca^{2+}$  tem maior capacidade de se ligarem aos compostos do cimento do que o cátion  $Na^+$ .

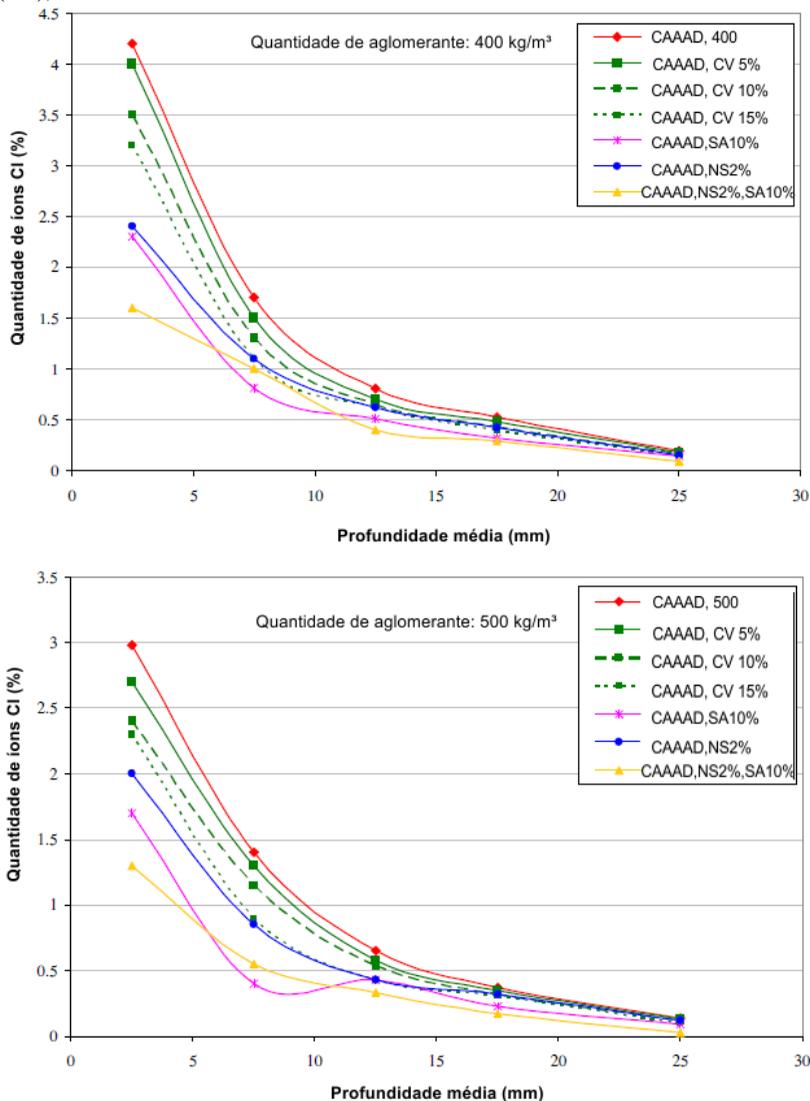
### 2.3.1.5 Tipo e consumo de cimento

A quantidade de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) presente no cimento a ser utilizado em concretos é determinante na penetração de íons cloreto, isso devido ao fato de que os íons cloreto reagem com o  $C_3A$  formando o cloroaluminato de cálcio hidratado ou sal de Friedel ( $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ ). Esse sal é insolúvel e diminui o fluxo de penetração de cloretos ao reduzir a concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto. O ferro aluminato tetra-cálcico ( $C_4AF$ ) também fixa os cloretos livre, porém em menores proporções, formando os cloroferratos de cálcio hidratado ( $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ ). Portanto quanto mais altos os teores de  $C_3A$  e  $C_4AF$  e quanto maior o consumo de cimento, menor será a penetração dos íons cloreto (SILVA, 2006).

Ramazanianpour & Malhotra (1995) pesquisaram o efeito do uso das adições de cinza volante, escória de alto forno e sílica ativa na penetração de cloretos em concreto, os resultados demonstraram que aos 180 dias de idade todos os concretos que utilizaram adições tiveram melhores resultados na resistência a cloretos conforme a ASTM C1202, isso ocorreu segundo os autores, devido a mudança na estrutura de poros pelo uso das adições.

A quantidade de cimento por metro cúbico e o uso de adições em substituição ao cimento foi estudada por Jalal *et al.* (2015) em concretos de alto desempenho autoadensáveis, foram feitos concretos com 400 kg/m<sup>3</sup> e 500 kg/m<sup>3</sup> de cimento e uso de adições em substituição ao cimento de 5%, 10% e 15% de cinza volante, 10% de sílica ativa, 2% de nano sílica e 2% de nano sílica com 10% de sílica ativa. Os resultados podem ser verificados na figura 8, onde se percebe que o uso de um teor maior de aglomerantes diminuiu a quantidade de cloretos que ingressaram no concreto, também se verifica que o uso de adições em substituição ao cimento também diminuiu a quantidade de cloretos, sendo que a mistura que teve menor ingresso de cloretos foi que usou 2% de nano sílica e 10% de sílica ativa.

Figura 8 – Quantidade de íons em diferentes profundidades de CAAAD com 400 kg e 500 kg de aglomerantes por metro cúbico de concreto, com adições de 5, 10 e 15% de cinza volante (CV), 10% de sílica ativa (SA), 2% de nano sílica (NS), 2% de nano sílica e 10% de sílica ativa.



Fonte: Adaptado de Jalal *et al.* (2015).

### 2.3.1.6 Adições

O uso de adições é comum no Brasil, normalmente a substituição do cimento por adições diminui a porosidade do concreto, pois normalmente são mais finas que o concreto, e, dessa forma podem diminuir a penetração dos íons cloreto.

Em seu estudo Sabet *et al.* (2013) verificou em concretos autoadensáveis de alto desempenho, que a substituição do cimento por 10% e 20% de zeólita natural, sílica ativa e cinza volante diminuíram a absorção de água e a entrada de cloretos nos concretos. O autor indica que o uso destas adições melhorou a resistência do concreto frente ao ataque de cloretos devido a redução do volume de poros e na melhora da zona de transição entre a pasta e os agregados.

Para verificar a influência da relação água/cimento e do uso de adições Poon *et al.* (2006) fez ensaios de cloretos conforme a ASTM C1202 em concretos convencionais com relações água cimento de 0,30 e 0,50, e substituições de 5, 10 e 20% de metakaolin e 5 e 10% de microsilica. Os concretos foram compactados em mesa vibratória e o abatimento em tronco de cone foi sempre maior que 100 mm. A tabela 2 demonstra os resultados das cargas totais passantes (C) obtidas, que indicam valores sempre maiores para as misturas feitas com relação água/cimento de 0,5 e que o uso de adições diminuiu as cargas totais passantes. Neste ensaio quanto menor a quantidade de carga passante (C) mais resistente é o concreto quanto à penetração de cloretos

Tabela 2 – Carga total passante em concretos no ensaio de migração de cloretos em concretos referência e com adições de 5, 10 e 20% de metacaolim (MC) e 5 e 10% de sílica ativa (SA).

| Água/aglomerante | Traço      | Carga total passante (C) |        |         |         |
|------------------|------------|--------------------------|--------|---------|---------|
|                  |            | 3 dias                   | 7 dias | 28 dias | 90 dias |
| 0,3              | Referência | 2461                     | 2151   | 1035    | 931     |
|                  | 5% MC      | 1327                     | 1244   | 862     | 646     |
|                  | 10% MC     | 417                      | 347    | 199     | 135     |
|                  | 20% MC     | 406                      | 395    | 240     | 124     |
|                  | 5% SA      | 1060                     | 945    | 665     | 426     |
|                  | 10% SA     | 567                      | 445    | 360     | 336     |
| 0,5              | Referência | 5312                     | 4054   | 2971    | 2789    |
|                  | 5% MC      | 4215                     | 3765   | 2079    | 1065    |
|                  | 10% MC     | 1580                     | 1247   | 918     | 752     |
|                  | 20% MC     | 751                      | 740    | 640     | 580     |
|                  | 5% SA      | 3156                     | 2047   | 1641    | 1235    |
|                  | 10% SA     | 3140                     | 1877   | 1523    | 1053    |

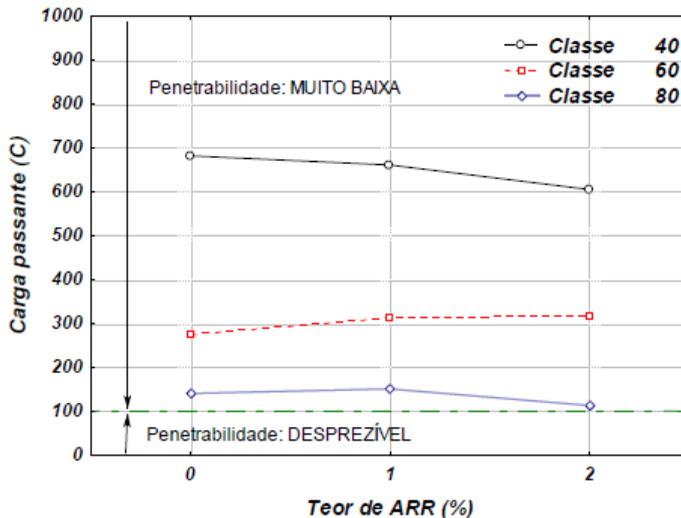
Fonte: Adaptado de Poon *et al.* (2006).

### 2.3.1.7 Aditivos

Uma das propriedades que mais afeta na penetração de íons cloreto no concreto é a porosidade, desta forma os aditivos que mais afetam a penetração dos íons cloreto são aqueles que alteram a porosidade do concreto.

Lopes (2009) avaliou a durabilidade de concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e verificou que o uso de ARR não comprometeu a penetrabilidade de íons cloreto, a permeabilidade à água, a carbonatação e a absorção capilar e por imersão. Os resultados dos ensaios de penetrabilidade de íons cloreto conforme ASTM C1202 podem ser verificados na figura 9, o uso de ARR não comprometeu o desempenho dos concretos, pois os valores de carga passante total deram bastante próximos.

Figura 9 – Valores médios de penetrabilidade de íons cloreto para cada classe em função do teor de ARR, na idade de 90 dias.



Fonte: Lopes (2009).

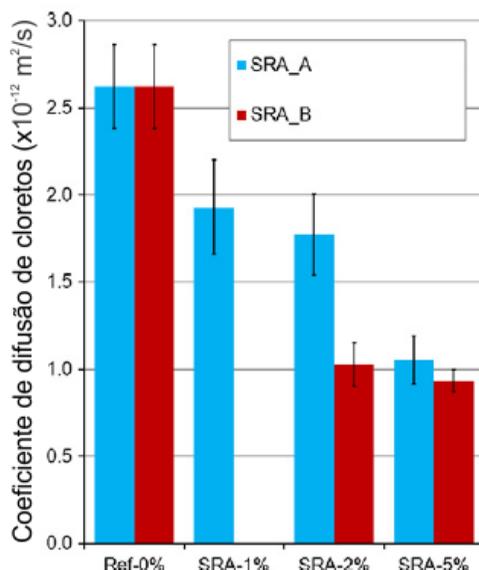
Deboodt *et al.* (2015) estudaram a durabilidade de concretos, frente a ação de cloretos, com aditivo redutor de retração conforme ASTM C1202, em seus resultados verificaram que ao utilizar 2% de aditivo redutor de retração houve diminuição da carga total passante em 23% nos ensaios realizados aos 56 dias e redução de 15% nos ensaios realizados aos 90 dias.

Nos estudos realizados por Hasholt & Jensen (2015) com uso de polímeros superabsorventes em concretos foi verificado, em ensaios de penetração de cloretos conforme NT BUILD 492, que ao utilizar o PSA sem adicionar água extra houve uma melhora na resistência aos cloretos devido a diminuição da relação água/cimento na pasta de cimento. Porém ao adicionar água extra para saturar o polímero superabsorvente, o uso de PSA somente melhora a resistência ao ingresso de cloretos se houver maior hidratação do cimento, sendo verificado este caso apenas em concretos com relação água/cimento menores que 0,42 e até certa quantidade de uso de PSA.

Maia *et al.* (2012) verificaram, conforme NT BUILD 492, que o uso de dois diferentes aditivos redutores de retração diminuiu o coeficiente de difusão de cloretos, conforme pode ser verificado pela figura 10. Segundo os autores a permeabilidade é ditada pelo volume de

poros capilares grandes e sua conectividade, os seguintes métodos podem ser utilizados para modificar a porosidade e melhorar a resistência à penetração de cloretos: reduzir a relação água/cimento, incorporar adições pozolânicas e adicionar aditivo redutor de retração. A diminuição da relação água/cimento e o uso de adições pozolânicas reduzem o tamanho dos poros e conseqüentemente aumentam a resistência do concreto e aumentam a chance de fissuras nas primeiras idades, o uso de ARR deve afetar pouco a resistência do concreto, mas ele irá diminuir a retração e a risco de fissuração.

Figura 10 – Coeficiente de difusão de cloretos em função do tipo de aditivo redutor de retração (SRA).



Fonte: Adaptado de Maia *et al.* (2012).

### 2.3.1.8 Teor de umidade

Sem presença de água não ocorre o processo de difusão de cloretos no concreto, em ambientes com umidade relativa alta, os poros da estrutura ficam saturados, proporcionando a difusão dos íons cloreto (ROMANO, 2009). Silva (2006) indica que as velocidades máximas de corrosão ocorrem em concretos com alto grau de umidade, porém não saturados, assim a resistividade do concreto é baixa, o que permite

grandes velocidades de corrosão e o oxigênio pode chegar livremente a armadura.

### 2.3.1.9 Temperatura

A temperatura influencia na velocidade de penetração de íons cloreto, pois com o aumento da temperatura há uma maior agitação das moléculas, gerando uma maior mobilidade que favorece o seu transporte para o interior do concreto (SILVA, 2006).

Al-Khaja (1997) pesquisou a influência da temperatura em concretos convencionais e de alta resistência em relação à penetração de cloretos, as temperaturas dos ensaios foram de 20°C e 45°C, os concretos foram expostos a soluções de 5% de NaCl. Tanto para os concretos convencionais quanto para os concretos de alta resistência o aumento da temperatura aproximadamente dobrou a quantidade de cloretos que penetraram no concreto em massa, indicando que a temperatura pode ser considerada um dos principais fatores que afetam a penetração de cloretos no concreto.

### 2.3.1.10 Cura

A prevenção da perda de água pela cura correta do concreto é importante não apenas pelos efeitos adversos no desenvolvimento de resistência do concreto, mas também porque a falta da cura leva a problemas como a retração plástica, aumento da permeabilidade e redução da resistência à abrasão do concreto (NEVILLE, 2011). Segundo Romano (2009) o concreto terá uma camada superficial mais porosa e menos resistente ao ingresso de cloretos caso não seja feita uma cura adequada.

Ramazanianpour & Malhotra (1995) pesquisaram os efeitos da cura na resistência mecânica, na porosidade e na resistência a penetração de cloretos de concretos com adições e sem, para todos os concretos pesquisados a cura demonstrou ser essencial para alcançar maiores resistências mecânica, diminuir a porosidade e aumentar a resistência à penetração de cloretos.

### 2.3.1.11 Fissuras

As fissuras são consideradas nos projetos de concreto armado devido a ciclos térmicos e de umidade, porém as fissuras térmicas e de retração por secagem podem ser controladas com técnicas de cura adequada diminuindo assim sua magnitude (MEHTA; MONTEIRO, 2006). A primeira região atingida pelos íons cloreto é a que contém fissuras, criando regiões anódicas no interior das fissuras e regiões catódicas fora delas (TORRES, 2011).

As fissuras são inevitáveis na maioria dos concretos devido a menor resistência do concreto a tração, essas fissuras podem afetar a penetração do cloreto no concreto (JANG, 2011).

Segund Holt & Leivo (2004) a retração do concreto não pode ser evitada, ela irá ocorrer no mínimo pela redução de volume resultante da hidratação do cimento, que consome menos espaço que os produtos iniciais do cimento. A perda de água do concreto para o meio ambiente também pode causar retração. Quando há muita retração o concreto irá fissurar e a durabilidade da estrutura estará seriamente comprometida.

A influência do tamanho das fissuras na penetração de cloretos foi investigado por Jang *et al.* (2011), foram testados concretos com fissuras de 15 a 200  $\mu\text{m}$  em concretos de 30MPa. Foi verificado que fissuras menores que 80  $\mu\text{m}$  não modificaram o coeficiente de difusão de cloretos, sendo indicado pelo pesquisador o limite de 80  $\mu\text{m}$  na abertura da fissura, para que não haja influencia na penetração de cloretos.

### 2.3.2 Ensaios e critérios de avaliação

A determinação do coeficiente de difusão natural de cloretos consome bastante tempo, portanto a maioria dos testes utiliza um campo elétrico com o objetivo de acelerar o processo de penetração dos cloretos (ISAIA 1995 apud HOFFMANN, 2011).

O método normatizado pela ASTM C 1202 (2012) (indicação elétrica da habilidade do concreto em resistir a penetração do íon cloreto) consiste em submeter uma fatia cilíndrica de 10cm de diâmetro por 5cm de espessura entre duas células, uma contendo uma solução de 3% de NaCl e outra com uma solução 0,3 mol/L de NaOH. Em cada célula é posicionado um eletrodo e aplicada uma diferença de potencial de 60V durante 6 horas e a corrente passante no corpo de prova é registrada em intervalos de 30 minutos. O eletrodo junto à célula com

NaCl é o eletrodo positivo, forçando assim os íons negativos, como o Cl<sup>-</sup> a migrarem através do corpo de prova para o outro polo. A carga total passante no corpo de prova durante o ensaio indica a maior ou menor resistência à penetração de cloretos e é expressa em coulombs. Esse método é conhecido como ensaio acelerado de permeabilidade de cloretos. A norma ainda indica a penetrabilidade dos íons cloreto no concreto conforme a carga total do ensaio, conforme pode ser verificado na tabela 3.

Tabela 3 – Penetrabilidade de íons cloreto conforme carga total passante

| Penetrabilidade de íons cloreto | Carga total (Coulombs) |
|---------------------------------|------------------------|
| Alta                            | >4000                  |
| Média                           | 2000 - 4000            |
| Baixa                           | 1000 - 2000            |
| Muito baixa                     | 100 - 1000             |
| Negligenciável                  | < 100                  |

Fonte: ASTM C 1202(2012).

A carga passante total é afetada por diversos parâmetros, Andrade (1993) analisou o que acontece com o concreto submetido a um campo elétrico no ensaio acelerado de permeabilidade de cloretos no concreto, proposto por Whiting (1981) apud Andrade (1993) (normatizada pela ASTM C 1202), foi observado:

- Antes da aplicação do campo elétrico, ocorre difusão para o interior do concreto principalmente pelos íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) resultantes da solução de NaOH, devido a sua alta mobilidade iônica. Esta difusão da hidroxila ocorre devido a diferença de concentração dos diferentes íons, podendo ser mantida durante todo o experimento. Quando o campo elétrico é aplicado a migração de todos os íons ocorre para o eletrodo de sinal oposto, portanto para os íons hidroxila há a

difusão para o interior do concreto e migração para o eletrodo positivo simultaneamente.

- Todos os íons presentes no eletrólito participam da migração, por possuírem diferentes mobilidades iônicas, como os íons  $\text{OH}^-$  que conduzem muito mais corrente que os íons  $\text{Cl}^-$  e transportam diferentes quantidades de eletricidade, portanto a corrente total utilizada para o cálculo não corresponde ao fluxo apenas dos íons cloretos.
- Quando ocorre o fluxo dos íons cloreto através do concreto pode ocorrer a reação com o  $\text{C}_3\text{A}$ , fazendo com que um fluxo constante de cloretos só seja atingido quando todas as reações estiverem saturadas. No cálculo da corrente total não há distinção entre o fluxo de cloretos quando ainda está reagindo com o  $\text{C}_3\text{A}$  e o fluxo simples.
- Devido a alta diferença de potencial aplicada, 60V, pode ocorrer o efeito Joule, elevando a temperatura e assim influenciando a velocidade do fluxo dos íons.

Em uma estrutura, zonas mais permeáveis terão comparativamente menor resistividade elétrica e maior penetração de cloretos. Durante o ensaio rápido de penetração de cloretos (ASTM C 1202), por causa da alta voltagem utilizada (60V), e da duração do ensaio (6 h), a temperatura do concreto aumenta, diminuindo a resistência elétrica do concreto e aumentando a corrente total passante. A temperatura também aumenta os danos à microestrutura e pode mudar a composição química da solução dos poros, portanto a condição inicial do concreto será alterada, especialmente em concretos com altas relações água/cimento. A resistividade elétrica do concreto depende das propriedades de sua microestrutura e da condutividade da solução dos poros (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2011).

Apesar das críticas, o ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C 1202), fornece uma boa ideia da conectividade dos poros do concreto que são muito pequenos para o fluxo de água. O ensaio rápido de cloretos mostra que a conectividade do sistema de poros diminui drasticamente quando a relação água/aglomerantes diminui, dificultando o ingresso de íons e gases agressivos nos concretos de alto desempenho (AÍTCIN, 2003).

Andrade (1993) sugeriu um método de obter o coeficiente de difusão a partir de medidas elétricas similares às propostas pela “AASHTO TEST”, *Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete* (normatizada pela ASTM C 1202), para este cálculo é necessário mais tempo de ensaio para obter um fluxo contínuo de íons cloreto no concreto. Portanto é necessário medir a concentração dos íons cloreto, na câmara que inicialmente não possuía cloretos durante o ensaio.

Zhang & Gjorv (1994) calcularam coeficientes de difusão pela equação de Nernst-Planck através do fluxo contínuo de cloretos em três diferentes diferenças de potencial, 6, 9 e 12V, chegando a conclusão que para os concretos testados o uso de diferentes diferenças de potencial não alterou os coeficientes de difusão do cloreto. Porém para reduzir o tempo de ensaio a voltagem de 12V pode ser usada para ensaios em concretos.

Segundo Geiker *et al.* (1995) apud Helene *et al.* (2012) o coeficiente de difusão de íons cloreto pode ser calculado através da medida da profundidade de penetração de cloretos por aspersão de uma solução aquosa de 0,1 Mol/L de  $\text{AgNO}_3$ , ao aspergir esta solução, na região com cloretos ocorre a precipitação de  $\text{AgCl}$  e a região se torna branca, onde não há cloretos a cor característica é marrom. O experimento deve ser realizado da seguinte maneira para utilizar a equação 6 e obter o coeficiente de difusão de cloretos: o corpo de prova de 100mm de diâmetro e 50mm de altura deve ser colocado nas câmaras de migração de cloretos conforme ASTM C 1202, sendo uma das câmaras preenchida com 0,3Mol/L de  $\text{NaOH}$  e a outra com 3% de  $\text{NaCl}$ , então deve ser aplicada uma tensão de 30V por 30h.

$$D = \frac{R.T}{z.F.E} \cdot \frac{x_d - a.x_d^b}{t} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

D- coeficiente de difusão de cloretos ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

R- constante dos gases (8,314472 J/mol.K)

$T$  - temperatura (K)  
 $z$  - valência do íon (para cloreto = -1)  
 $F$  - constante de Faraday (96485,3383 J/V.mol)  
 $E$  - campo elétrico (-600 V/m)  
 $x_d$  - profundidade de penetração (m)  
 $t$  - tempo de ensaio (s)  
 $a$  - 1,061  
 $b$  - 0,589 (para  $E = 600$  V/m)

Berke & Hicks (1992) estudaram a relação de valores de carga passante conforme ASTM C 1202 com o coeficiente de difusão de cloretos e chegaram a equação 7 (empírica) apresentada abaixo.

$$D_{ap} = 0,0103 \cdot 10^{-8} \cdot Q^{0,84} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$D_{ap}$  - coeficiente de difusão aparente ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 $Q$  - carga total passante com ddp de 60V durante 6 horas de ensaio (C)

Para análise do teor de cloretos normalmente se obtém amostras de pó dos corpos-de-prova a partir de realização de furos com uma broca, ou a partir do corte em fatias de pedaços dos corpos-de-prova que são triturados. Para a determinação da concentração de cloretos totais as amostras em pó são usualmente dissolvidas em ácido, para determinação da concentração de cloretos livres o pó é diluído em água. Após a extração dos cloretos do pó do concreto, métodos químicos são utilizados na determinação da quantidade de cloretos nas soluções.

Dentre os métodos químicos para determinação da concentração de cloretos, Silva (2006) destaca os seguintes:

- Gravimetria: o procedimento consiste em adicionar nitrato de prata à solução me análise, há a formação de cloreto de prata, o qual é filtrado, seco e pesado. Conhecendo-se a massa atômica do cloreto de prata, determina-se o teor de cloretos da amostra.
- Titulometria ou análise volumétrica: a concentração de cloretos é determinada através do volume de uma

solução, cuja concentração é conhecida e requer uma determinada quantidade de substância, a ser determinada, para reagir. A visualização é realizada através de um indicador adicionado junto à solução que se quer determinar a concentração. Existem dois métodos bastante conhecidos, o de Mohr e o de Volhard. Em ambos os métodos o nitrato de prata é usado como solução padrão, porém no método de Mohr o indicador utilizado é o cromato de potássio e no método de Volhard o indicador é o sulfato férrico amoniacal.

- Potenciometria: esse método consiste em medir a diferença de potencial entre dois eletrodos, um eletrodo de referência com potencial conhecido e um eletrodo indicador, por exemplo prata/cloreto de prata, cujo potencial depende da concentração iônica da solução titulada. Essa metodologia é a mais indicada pois não depende da experiência do operador, porém o ensaio é demorado, devido a dificuldade de estabilização do potencial.

- 

Calçada (2004) testou os métodos de titulação potenciométrica, método de Mohr e o método Volhard. Segundo a autora o método de Mohr é de difícil identificação visual do ponto de viragem, a titulação potenciométrica apresentou comportamento anômalo devido a contaminação do eletrodo pelos aditivos químicos utilizados, era necessário limpar o eletrodo utilizado a cada ensaio. O método escolhido para ser utilizado em sua tese foi o método Volhard, pois nenhuma anomalia foi observada e o ponto de viragem era de fácil identificação, além de ser o mais rápido dos três.

## 2.4 CARBONATAÇÃO

A ação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente no ar representa um dos fatores iniciadores mais importantes na corrosão das armaduras do concreto armado, a ação ácida do  $\text{CO}_2$  transforma íons alcalinos como os cátions de sódio, potássio e cálcio em sais de carbonatos desses elementos. A carbonatação ocorre lentamente e devido à contínua hidratação do cimento e, a colmatação dos poros superficiais do concreto pelos produtos da reação de carbonatação, a velocidade da carbonatação diminui com o tempo (CASCUDO; CASAREK, 2011).

Segundo Taylor (1997) o dióxido de carbono se dissolve na solução dos poros da pasta de cimento (Equação 8), produzindo íons  $\text{CO}_3^{2-}$ , que reagem com os íons  $\text{Ca}^{2+}$  para produzir carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Equação 10). Os íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$  necessários para estas reações são obtidas pela dissolução da portlandita, ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (equação 9) e pela diminuição da razão Ca/Si do C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado).



Uma reação química simplificada ao se considerar a dissolução da portlandita pode ser escrita conforme a equação 11:



Além da reação com o hidróxido de cálcio o dióxido de carbono também reage com os hidróxidos de sódio e potássio, diminuindo da mesma forma o pH da solução aquosa de aproximadamente 12,5 para em torno de 9 (SILVA, 2006).

O processo de carbonatação passa pela dissolução do dióxido de carbono na fase líquida intersticial, possibilitando as reações químicas. O avanço do  $\text{CO}_2$  para o interior do concreto é realizado por difusão molecular quando há uma camada seca do concreto. Quando há uma camada parcialmente ou plenamente saturada de água inicialmente o  $\text{CO}_2$  na forma gasosa se dissolve na solução, e o que ocorre é o

transporte difusional do íon carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (CASCUDO; CASAREK, 2011).

A ação do  $\text{CO}_2$  acontece mesmo em baixas concentrações, como em áreas rurais, onde a concentração de  $\text{CO}_2$  gira em torno de 0,03 % em volume. Em um laboratório sem ventilação a concentração de  $\text{CO}_2$  pode ser maior que 0,1 %, em grandes cidades a concentração é em média 0,3 % e excepcionalmente pode chegar a 1% em alguns locais, como em um túnel rodoviário (NEVILLE, 2011). Segundo Cascudo & Casarek (2011) quanto maior for a concentração de  $\text{CO}_2$  no ar, maior será o gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$ , propiciando taxas maiores de difusão desse gás no concreto, aumentando então a velocidade e intensidade da carbonatação.

Para que haja reação de carbonatação são necessários íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$ , que podem ser obtidos pela dissolução da portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ou pela diminuição da razão  $\text{Ca}/\text{Si}$  do C-S-H, portanto quanto maior for a disponibilidade de portlandita, mais reações de carbonatação vão acontecer para uma mesma quantidade de  $\text{CO}_2$  presente no concreto. Esse aumento de reações não é prejudicial ao concreto, na verdade isto faz com que haja colmatação dos poros do concreto, dificultando a entrada de  $\text{CO}_2$  e também diminui a quantidade de  $\text{CO}_2$  livre que pode entrar mais profundamente no concreto. As adições minerais pozolânicas usam em suas reações químicas a portlandita para formação do C-S-H, diminuindo a sua quantidade disponível para reagir com o  $\text{CO}_2$ , facilitando neste caso a entrada do dióxido de carbono no concreto. Contudo há um lado positivo no uso de adições minerais no que se refere à resistência do concreto frente a carbonatação, que é a alteração física da estrutura da pasta de cimento quando utilizadas adições mineiras, produzindo um sistema de poros mais refinado, menos conectado e com maior grau de tortuosidade, implicando em redução na difusão do  $\text{CO}_2$  (CASCUDO; CASAREK, 2011).

#### **2.4.1 Fatores que influenciam na carbonatação**

Influenciam na taxa de carbonatação do concreto a relação água/aglomerante, condições de cura, grau de hidratação, quantidade e tipo de cimento, concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente, quantidade de álcalis na pasta de cimento hidratada e presença de fissuras (NEVILLE, 2011).

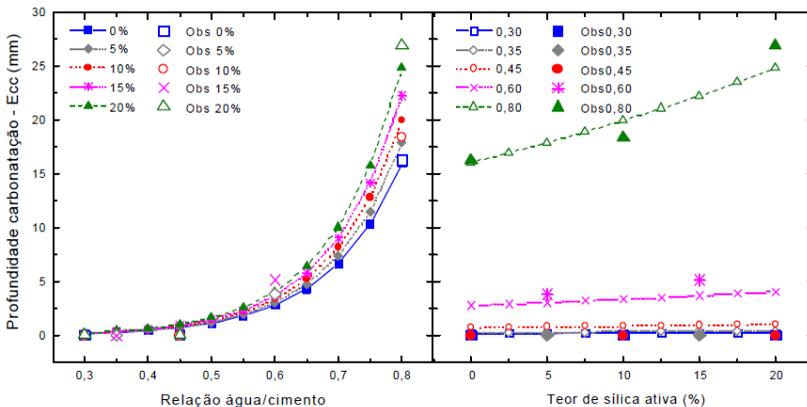
### 2.4.1.1 Relação água/cimento

Quanto maior a porosidade do concreto, mais facilmente ocorre a penetração do  $\text{CO}_2$ , a relação água/cimento influencia significativamente na porosidade, portanto quanto maior for a relação água/cimento, maior a porosidade e a facilidade da penetração do  $\text{CO}_2$ . A cura do concreto deve ser adequada, pois ao impedir a evaporação da água de amassamento do concreto nas primeiras idades, o fenômeno da retração plástica do concreto é minimizado, reduzindo assim as fissuras por retração plástica. Além disso, a cura também aumenta o grau de hidratação da pasta de cimento na superfície do concreto, conseqüentemente diminui sua porosidade (CASCUDO; CASAREK, 2011).

Song & Kwon (2007) realizaram ensaios de carbonatação acelerada em argamassas de relação água/cimento de 0,55 e 0,65 que foram condicionadas durante quatro meses em ambiente com 5% de  $\text{CO}_2$ , temperatura de  $25 \pm 0,5$  °C e 65  $\pm$ 5% de umidade relativa. Os corpos-de-prova cilíndricos de 10cm de diâmetro e 10cm de altura com relação água/cimento de 0,65 tiveram uma carbonatação média de 24mm e os de relação 0,55 tiveram uma carbonatação média de 16mm. Foi demonstrado através de porosimetria por injeção de mercúrio que os dois traços de argamassas tiveram uma diminuição de 25 a 30% na porosidade das argamassas carbonatadas em relação as não carbonatadas, provavelmente devido a colmatação dos poros pelos produtos do dióxido de carbono.

Kulakowski (2002) realizou ensaios de carbonatação acelerada em concretos com relação a/c 0,30 a 0,80 e com teor de sílica ativa de 0% a 20% em câmara acelerada com 5% de dióxido de carbono, até a idade de 126 dias. Os resultados de carbonatação aos 126 dias podem ser vistos na figura 11, onde se verifica a baixa carbonatação nos concretos produzidos com baixas relações a/c.

Figura 11 – Carbonatação em concreto aos 126 dias de câmara acelerada com 5% de dióxido de carbono.

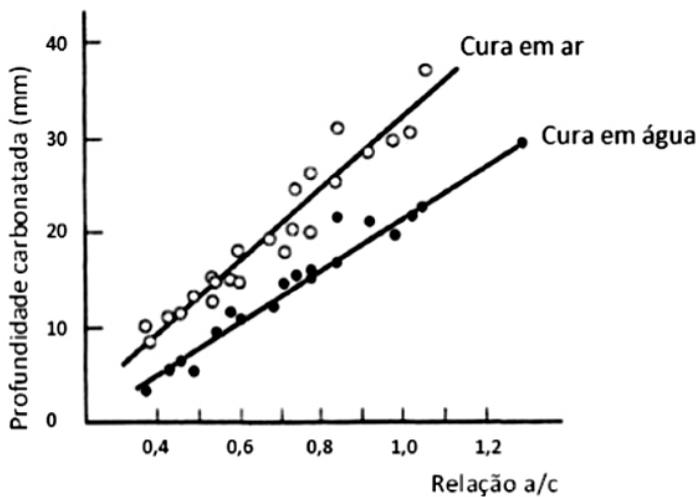


Fonte: Kulakowski (2007).

#### 2.4.1.2 Condições de cura

A camada superficial do concreto é a primeira camada por onde o dióxido de carbono irá penetrar no concreto, portanto quanto maior for o grau de hidratação do cimento nessa camada e quanto menor for sua porosidade, menor será a profundidade de carbonatação. A cura e a relação água/cimento influenciam na qualidade da camada superficial, conforme pode ser verificado na figura 12 (Pina *et al.*, 2009, apud Salta, 1996).

Figura 12 – Influência da relação a/c e da condição de cura na profundidade carbonatada do concreto.

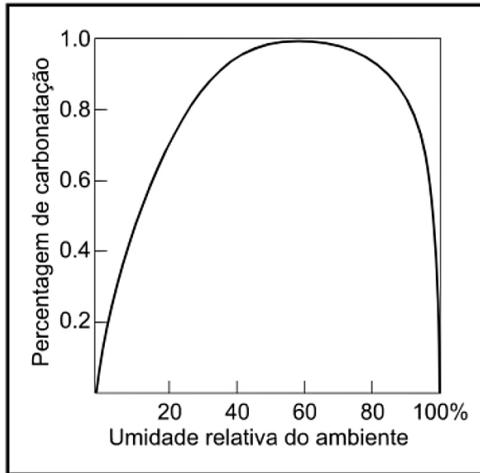


Fonte: Pina *et al.* (2009) apud Salta (1996).

#### 2.4.1.3 Umidade e temperatura

Segundo Cascudo & Casarek (2011) - apud ROSEMBERG *et al.* (1989) há maior avanço da carbonatação em ambientes com umidades relativas entre 50% e 70%, conforme pode ser visto na figura 13.

Figura 13- Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.



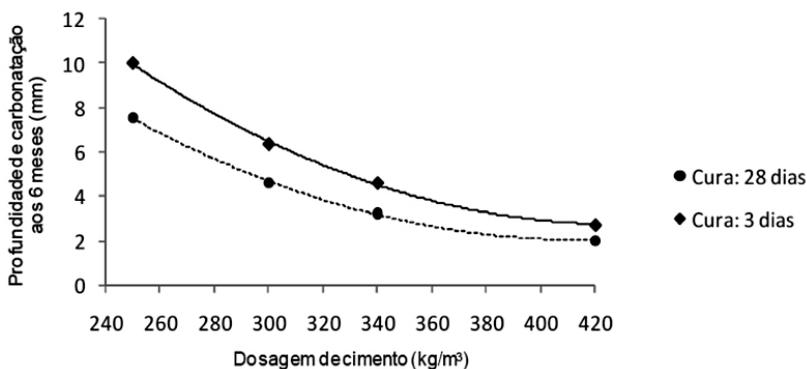
Fonte: Cascudo & Casarek (2011) apud ROSEMBERG et al. (1989).

A temperatura é conhecida por catalisar as reações químicas, portanto quanto há o aumento da temperatura a velocidade das reações químicas aumenta, isso se deve ao fato da maior mobilidade das espécies iônicas com o acréscimo da temperatura (CASCUDO; CASAREK, 2011). Segundo Neville (2011) pequenas variações de temperatura afetam pouco a carbonatação, mas altas temperaturas aumentam a velocidade de carbonatação.

#### 2.4.1.4 Consumo de cimento

Um dos produtos da reação de hidratação do cimento é a portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), portanto quanto maior o teor de cimento utilizado no concreto maior será a quantidade de portlandita, e menor a velocidade de carbonatação, pois o  $\text{CO}_2$  ao reagir com a portlandita gera carbonato de cálcio, colmata os poros do concreto e diminui a quantidade de  $\text{CO}_2$ . Os cimentos com menores teores de adição são os mais indicados para combater a carbonatação, pois aumentam a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  disponível. O efeito da carbonatação em concretos com diferentes teores de cimento pode ser verificado na figura 14 (PINA *et al.*, 2009 - apud GRANDET *et al.*, 1998).

Figura 14 – Relação entre o teor de cimento e a profundidade carbonatada.



Fonte: Pina *et al.* (2009) apud GRANDET *et al.* (1998).

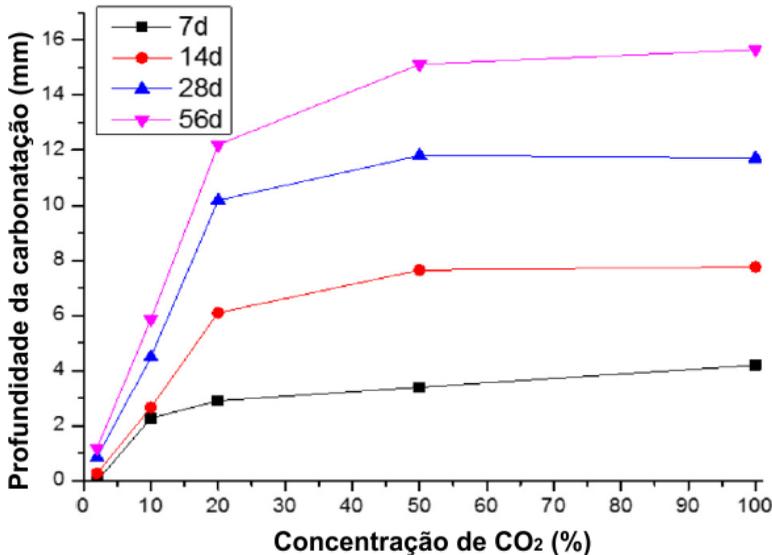
#### 2.4.1.5 Concentração de CO<sub>2</sub>

Quanto maior a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, maior a profundidade carbonatada do concreto. Yoon *et al.* (2007) estudaram a profundidade de carbonatação em câmaras aceleradas com 3%, 5% e 10% de CO<sub>2</sub>, temperatura de 20°C e UR de 65%, foi verificado que ao aumentar a concentração de CO<sub>2</sub>, a carbonatação progride mais rapidamente nos concretos com maiores relações água/cimento do que nos concretos com baixas relações água/cimento.

Na carbonatação natural, a concentração de CO<sub>2</sub> e a proteção ou não das intempéries são fatores muito influentes na carbonatação, pois quando em local protegido das intempéries a velocidade de carbonatação é maior (PAULETTI, 2009).

Cui *et al.* (2015) estudaram a influência da concentração de CO<sub>2</sub> no ensaio acelerado de carbonatação em concretos de 50 MPa, verificou que há grande aumento da profundidade de carbonatação entre as concentrações de 2% e 20%, porém após este valor o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> não é tão significativa, conforme figura 15.

Figura 15 – Profundidade de carbonatação em concretos de 50 MPa com diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> em diferentes idades.



Fonte: Adaptado de Cui *et al.* (2015).

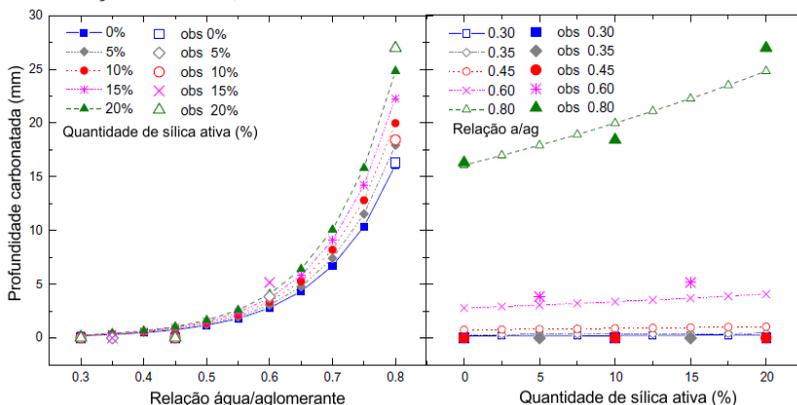
#### 2.4.1.6 Adições

Geralmente as adições minerais aumentam a carbonatação, embora seu uso também melhore a compacidade e diminuam a penetração de líquidos, gases e íons, que no balanço final, pode trazer mais benefícios que prejuízos (PAULETTI, 2009).

Kulakowski *et al* (2009) estudaram concretos com adições de microsilica variando de 0 a 20% e relações água/cimento de 0,30 a 0,80 em relação a carbonatação, os concretos foram expostos a um ambiente com 5% de CO<sub>2</sub>, 70±2% de umidade relativa e 25 ± 1 °C durante 126 dias. Os resultados (figura 16) demonstraram que a adição de sílica ativa não alterou significativamente a carbonatação dos concretos com água/cimento menores do que 0,45, para os concretos com relações água/cimento maiores que 0,45 o aumento do teor de microsilica aumentou as frentes de carbonatação. Provavelmente a diminuição do conteúdo alcalino de Ca(OH)<sub>2</sub> que pode ser carbonatado foi fator que resultou nesse aumento de tamanho da frente de carbonatação. O mesmo pode ser visto no trabalho de Salvoldi *et al.* (2015) que comparou frentes de carbonatação de cimentos puros em relação a cimentos com

adições de micro-silica, cinza volante e escória de alto forno, seus resultados demonstraram que os concretos que menos carbonataram foram os concretos com cimento puro.

Figura 16 – Carbonatação do concreto aos 126 dias (98 dias de ensaios de carbonatação acelerada).



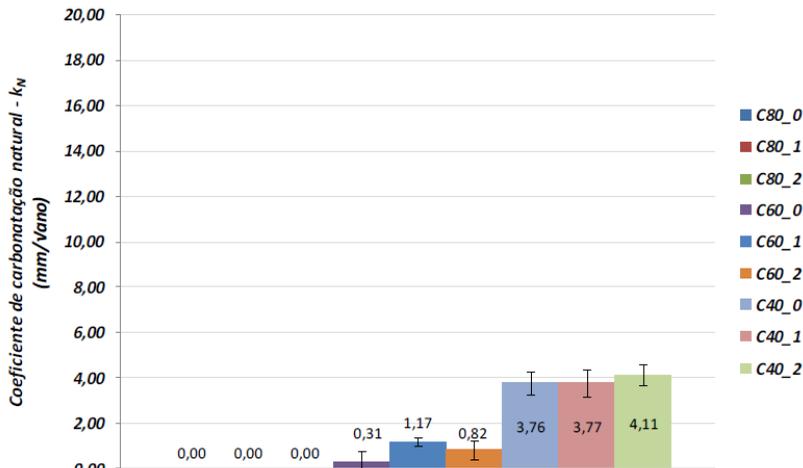
Fonte: Adaptado de Salvoldi *et al.* (2015).

#### 2.4.1.7 Aditivos

Uma das propriedades que mais afeta na carbonatação no concreto é a porosidade, desta forma os aditivos que mais afetam a carbonatação são aqueles que alteram a porosidade do concreto.

Lopes (2009) estudou a carbonatação natural de concretos de diferentes resistências com uso de 1% e 2% de aditivos redutores de retração. Após três anos em exposição ao ambiente natural, protegidos de intempéries, os concretos da classe de 80 MPa, tanto o referência quanto com 1 e 2% de ARR não apresentaram ataque por  $\text{CO}_2$ , segundo a autora o refinamento de poros e a redução da interconexão dessa estrutura de poros, proporcionados pela baixa relação a/agl e uso de sílica ativa protegeram o concreto frente à carbonatação. O concreto de 60 MPa que utilizaram ARR possuíam maiores coeficientes de carbonatação, o que parece indicar uma redução do desempenho destes concretos ao se empregar o ARR. Para os concretos de 40 MPa o uso de ARR não apresentou influência expressiva frente ao avanço da carbonatação, os resultado do ensaio de carbonatação podem ser verificados na figura 17.

Figura 17 – Valores médios dos coeficientes de carbonatação natural e os respectivos desvios padrão para concretos de diferentes classes de resistência.



Fonte: Lopes (2011).

#### 2.4.2 Ensaios e critérios de avaliação

O pH de precipitação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se encontra em uma faixa que varia de 8,3 a 9 à temperatura ambiente, diferente do pH do cimento hidratado que é maior que 12. O dióxido de carbono ao penetrar no concreto gera uma “frente de carbonatação” onde consegue-se distinguir a parte com pH menor que 9 que está carbonatada e outra com pH maior que 12 não está carbonatada. Pode-se verificar a frente de carbonatação utilizando-se o método colorimétrico, são utilizados os indicadores de pH a fenolftaleína, a timolftaleína ou amarelo de alizarina. Esses indicadores são substâncias químicas que ao entrarem em contato com a solução alcalina do concreto, rica em hidróxido de cálcio, adquirem colorações típicas a partir de uma determinada faixa de pH da solução. A fenolftaleína adquire coloração vermelha com pHs iguais ou superiores a uma faixa entre 8,0 e 9,8, aproximadamente, portanto ao borrifar uma solução de fenolftaleína no concreto a parte que ficar com coloração vermelha admite-se que não está carbonatada, porém se ele não alterar sua cor natural assume-se que está carbonatada (CASCUDO; CASAREK, 2011).

A tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados por diversos autores, tanto no Brasil quanto no exterior: nota-se que dentre estes

trabalhos o valor mais utilizado é 5% de concentração de CO<sub>2</sub>, a umidade relativa mais encontrada é de 70% e a temperatura mais usual é de 25°C.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados para ensaios de carbonatação acelerada por diferentes autores.

| <b>Autor</b>           | <b>CO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>Umidade relativa (%)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| KIRCHHEIN (2003)       | 5 e 100                   | 70 ± 2                      | 25 ± 1                  |
| POSSAN (2004)          | 5                         | 70 ± 5                      | 25 ± 2                  |
| SONG & KWON (2007)     | 5                         | 65 ± 5                      | 25 ± 0,5                |
| PAULETTI (2009)        | 6 e 100                   | 70 ± 5                      | 20 ± 1                  |
| KULAKOWSKI (2009)      | 5                         | 70 ± 2                      | 25 ± 1                  |
| JIANG et al. (2015)    | 20                        | 82                          | 20                      |
| SALVOLDI et al. (2015) | 2 ± 0,1                   | 65 ± 5                      | 20 ± 2                  |
| LEEMANN et al. (2015)  | 1 e 4                     | 57                          | 20 ± 1                  |
| CUI et al. (2015)      | 2, 10, 20, 50 e 100       | 70                          | 20                      |
| RAISDORFER (2015)      | 5 ± 1                     | 60 ± 0,5                    | 40 ± 0,1                |

Fonte: Autor.

O coeficiente de carbonatação ( $k_c$ ) é a relação da profundidade carbonatada de um concreto em função da raiz quadrada do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>, expresso normalmente em mm/ano<sup>0,5</sup> ou mm/semanas<sup>0,5</sup>, conforme equação 12, que é uma simplificação da primeira lei de Fick segundo modelo de Tuutti (1982) apud Possan (2004). O coeficiente de aceleração é adimensional e segundo o modelo de expressa o número de vezes que um concreto degrada em um ensaio acelerado em relação a degradação natural do gás CO<sub>2</sub> (POSSAN, 2004).

$$e_c = k\sqrt{t}$$

Equação 12

Onde:

$e_c$  – profundidade de carbonatação;

$k$  – coeficiente de carbonatação;

$t$  – tempo decorrido.

Ho & Lewis (1987) ensaiaram concretos em câmara de carbonatação acelerada com 4% de CO<sub>2</sub>, 50% de UR e 23°C, e em

ambiente laboratorial natural, em 23°C e 50% de UR, o coeficiente de aceleração entre os corpos-de-prova da câmara acelerada para o ambiente natural foi de 52,1.

Possan (2004) estudou a carbonatação acelerada e natural de concretos produzidos com sílica ativa. O ensaio de carbonatação acelerado foi realizado com 5% de CO<sub>2</sub>, UR de 70% e temperatura de 23°C, o ensaio de carbonatação natural foi realizado na cidade de Porto Alegre/RS, desprotegidas da chuva. Para os concretos de relação água/aglomerante 0,80 sem adição de sílica ativa, foi verificado que 14 semanas de ensaio acelerado corresponderam a 436 semanas (8,3 anos) de degradação natural, portanto o coeficiente de aceleração para estes concretos foi 31, ou seja o ensaio acelerado representou 31 vezes a magnitude da degradação natural. Para os concretos de relação a/agl 0,80 com 20% de adição de sílica ativa, o período correspondente a 14 semanas de ensaio acelerado foi de 497 semanas (9,5 anos) de carbonatação natural, correspondendo a um coeficiente de aceleração de 35,50 vezes.

## 2.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A inspeção visual ainda é o método mais utilizado para verificar a corrosão das estruturas de concreto armado, quando é detectado o problema tradicionalmente são utilizados testes intrusivos para revelar a causa do problema, porém há limitações para a retirada de amostras. Os métodos não-destrutivos podem detectar as causas da corrosão, a condição do aço, a sensibilidade para a perda de proteção ou a severidade da corrosão sem a necessidade de retirada de amostras, sendo normalmente mais rápidos e possibilitam analisar toda superfície do concreto. A maioria dos testes não destrutivos são métodos eletromecânicos: mapeamento potencial, teste de resistência de polarização e medição da resistividade elétrica do concreto (RILEM TC 154, 2000).

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade do material que pode ser definida como a resistência do concreto ao fluxo de uma corrente elétrica, fatores como a relação água/cimento, o tipo de cimento, o uso de adições pozolânicas e o grau de hidratação do cimento afetam a resistividade elétrica do concreto (SENGUL, 2014). Segundo o Figueiredo *et al.* (2011) a presença de agentes agressivos no concreto também influenciam na resistividade elétrica aparente superficial do

concreto, portanto a carbonatação e a presença de cloretos no concreto alteram sua resistividade elétrica.

A velocidade do processo de corrosão da armadura após ser despassivada depende basicamente de dois fatores, a resistividade elétrica do concreto e do acesso de oxigênio à armadura. Baixos valores de resistividade elétrica do concreto significa uma fácil mobilidade iônica, indicando uma maior velocidade do processo corrosivo se comparado com um concreto com maior resistividade elétrica (ABREU, 1998).

A resistividade elétrica do concreto caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem de corrente elétrica, que é fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluídos e à difusividade de íons através dos poros do concreto, estando assim intimamente relacionada à velocidade do processo de corrosão das armaduras (SANTOS, 2006).

Segundo Silva (2006) a resistividade elétrica do concreto tem grande influência na definição do período de iniciação da corrosão e, ao lado da difusão do oxigênio na propagação da corrosão, pois a resistividade elétrica regula o fluxo de íons que se deslocam através da solução aquosa presente nos poros do concreto.

A corrente elétrica é transportada nos poros do concreto e um aumento na resistividade elétrica é uma indicação de um sistema de poros mais refinados. Como esperado, a resistividade elétrica aumenta com o aumento da classe do concreto. A estrutura de poros é também o principal fator que afeta a resistência do concreto contra a penetração de substâncias agressivas, como os cloretos (YILDIRIM *et al.*, 2011).

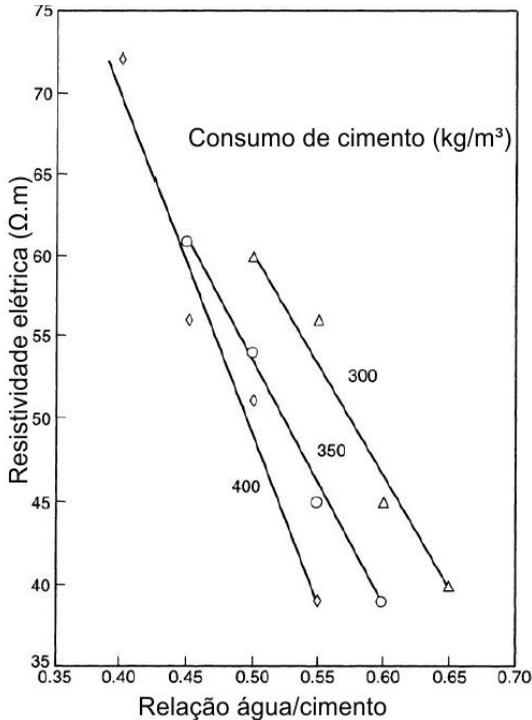
### **2.5.1 Fatores que influenciam na resistividade elétrica**

No concreto a corrente passa através dos íons dissolvidos no líquido dos poros, quanto mais água (concreto saturado) e quanto maiores os poros (maior relação água/cimento) menor é a resistividade elétrica do concreto. Para uma mesma condição de umidade a resistividade aumenta com a diminuição da relação água/cimento, com maior tempo de cura (hidratação) e com o uso de adições minerais como a cinza volante, escória de alto forno e microsilica. A resistividade aumenta quando o concreto está seco e quando há carbonatação (POLDER, 2001).

Segundo Huges (1985) apud Neville (2011) um aumento do volume de água e da concentração de íons presentes na água dos poros da pasta de cimento diminuem a resistividade elétrica da pasta de

cimento. Um menor consumo de cimento no concreto também diminui a resistividade elétrica, isto ocorre porque a uma relação água/cimento constante, mas com menor consumo de cimento, haverá menos eletrólitos disponíveis para a passagem da corrente. A figura 18 demonstra a influência da relação água/cimento e do consumo de cimento para concretos com dimensões máximas de agregado de 40mm.

Figura 18 – Relação entre resistividade elétrica e relação água/cimento, aos 28 dias.



Fonte: Adaptado de Huges (1985) apud Neville (2011).

Através de espectroscopia de impedância, McCarter (1994) observou que a resistividade elétrica de argamassas e concretos é quase completamente dependente da fração volumétrica da pasta de cimento na mistura. Aumentando a quantidade de agregados reduz a seção transversal pela qual ocorre a condução da corrente elétrica. Nos resultados de McCarter (1994), a resistividade elétrica diminuiu com o aumento da fração volumétrica da pasta.

Adições minerais pozolânicas como cinza volante, sílica ativa e escória granulada de alto-forno, ou filers, materiais inertes de pequenas dimensões, alteram significativamente a microestrutura da matriz de cimento devido ao efeito pozolânico e microfíler. A densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de menores diâmetros, pelas adições minerais, dificultam a condução da corrente elétrica no concreto e aumentam a resistividade elétrica. (SANTOS, 2006).

Segundo Whiting & Nagi (2003) apud Loudimine 2006 o uso de aditivos em concretos deve influenciar apenas indiretamente a resistividade elétrica, sendo relacionada às alterações que os aditivos promovem na microestrutura da matriz, podendo ser sua influência no volume de poros, nas propriedades reológicas da mistura ou na evolução do processo de hidratação do cimento.

A temperatura e a umidade relativa influenciam na resistividade elétrica, pois alteram a mobilidade iônica e a concentração da solução do poro.

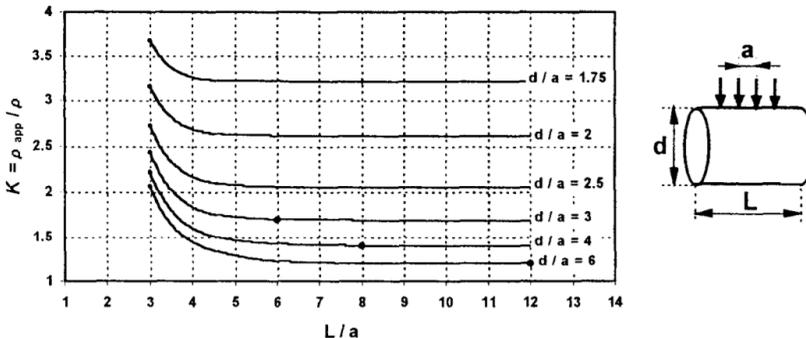
Em geral o aumento da temperatura diminui a resistividade elétrica do concreto, devido a influencia da temperatura na mobilidade iônica, nas interações entre os íons e entre os íons e os sólidos. É recomendado evitar medições de resistividade em temperaturas muito altas ou muito baixas (POLDER, 2001).

Segundo Whiting & Nagi (2003) apud Santos (2006) o grau de saturação dos poros é a variável que possui maior influência na resistividade elétrica do concreto, pois o fluxo de corrente através do concreto se dá predominantemente pela água dos poros, quanto maior for o grau de saturação dos poros do concreto, maior será a condutividade do concreto e menor a sua resistividade elétrica.

Olsson *et al.* (2013) estudaram a condutividade de argamassas em diferentes umidades relativas e verificaram que em altas umidades relativas a condutividade é maior do que em menores umidades relativas, portanto quanto maior a umidade relativa menor será a resistividade da argamassa.

Segundo Morris *et al.* (1996) o uso de sondas de quatro pontas do tipo Wenner em amostras de cimento cilíndricas, como em corpos de prova para resistência mecânica ou em amostras extraídas por perfuração, devem ter seu valor corrigido por um coeficiente K. Portanto dependendo das dimensões do corpo de prova e da distância entre os eletrodos da sonda Wenner o valor apresentado pela sonda ( $\rho_{app}$ ) deve ser dividido pelo coeficiente K para se obter o valor real de resistividade do concreto ( $\rho$ ), conforme apresentado na figura 19.

Figura 19 – Constante de correção (K) para determinar a resistividade elétrica superficial de amostras cilíndricas de concreto.

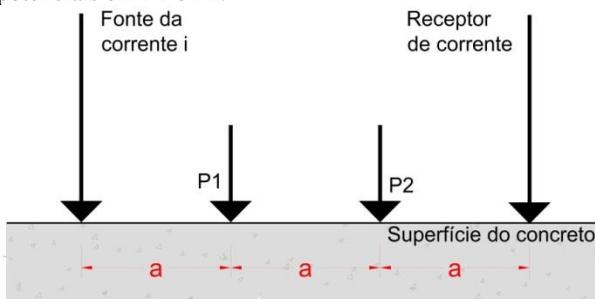


Fonte: Morris *et al* (1996).

### 2.5.2 Ensaios e critérios de avaliação

A resistividade elétrica é um dos parâmetros de durabilidade do concreto mais efetivas, pois é um fator significativo na corrosão do concreto armado (ACI 222, 2001). Segundo Mehta & Monteiro (2006) concretos com alta resistividade elétrica tem baixa possibilidade de desenvolver corrosão no aço, em campo a resistividade elétrica é determinada ao se medir a diferença de potencial na superfície de concreto quando da aplicação de uma pequena corrente elétrica. Uma configuração prática é dada pela figura 20, onde uma pequena corrente é aplicada na superfície do concreto por uma fonte de corrente e recebida pelo receptor presente na outra extremidade, a diferença de potencial é medida entre os pontos P1 e P2. Um caso especial desta técnica é quando o espaçamento entre a fonte de corrente, P1, P2 e o receptor de corrente são todas iguais, sendo a resistividade elétrica nestas condições dadas pela equação 13.

Figura 20 – Determinação da resistividade elétrica do material utilizando dois eletrodos potenciais em P1 e P2.



Fonte: adaptado de Mehta & Monteiro (2006).

$$\rho = \frac{2\pi \times a \times \Delta V}{i} \quad \text{Equação 13}$$

Onde  $\rho$  é a resistividade elétrica,  $\Delta V$  é a diferença de potencial,  $a$  é o espaçamento equidistante entre os pontos de envio de corrente e os de recebimento e  $i$  é a corrente.

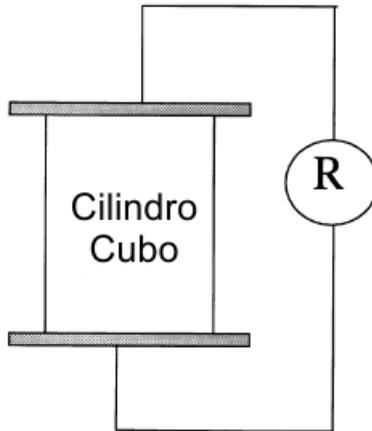
Segundo Ramezaniyanpour *et al.* (2011) um dos melhores métodos para medir a resistividade elétrica do concreto é usando uma sonda Wenner de 4 pontos. Sendo um método não destrutivo, rápido e fácil de usar, a sonda Wenner é uma alternativa promissora para caracterizar a penetração de cloretos no concreto.

Um ponto positivo da sonda Wenner de 4 pontos é que a resistividade medida referente à região do concreto situada entre os dois eletrodos internos, quando maior que o tamanho máximo do agregado, diminui a influência do agregado na resistividade elétrica (SANTOS, 2006).

A RILEM TC 154 (2000) recomenda o procedimento de resistividade elétrica volumétrica para calibrar os métodos não-destrutivos elétricos: resistividade elétrica aparente superficial utilizando a sonda de Werner e eletrodo de disco. Sendo que para calibrar o eletrodo de disco é necessário posicionar barras de aço em uma ou mais profundidades do corpo de prova.

A medida da resistividade elétrica volumétrica do concreto é realizada em corpos-de-prova saturados utilizando discos de metal em duas faces paralelas e aplicando uma corrente pelo corpo de prova (figura 21), é medida a resistência entre os discos e a resistividade elétrica do concreto é calculada pela equação 14 (POLDER, 2001).

Figura 21 – Determinação da resistividade elétrica de cubos ou cilindros de concreto.



Fonte: adaptado de Polder (2001).

$$\rho = R_{medido} \times \frac{B}{L} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:  $\rho$  é a resistividade elétrica ( $\Omega.m$ ),  $R_{medido}$  é a resistência entre os pratos (em  $\Omega$ ),  $B$  é a área da face do corpo de prova ( $m^2$ ) e  $L$  é o comprimento da amostra (m).

A tabela 5 mostra os critérios para avaliação dos resultados obtidos, de acordo com a FIP-CEB 192 (1989) apud Santos (2006).

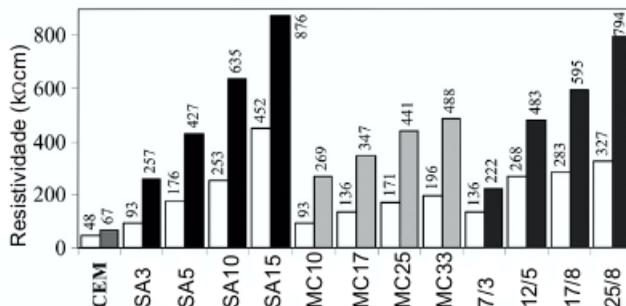
Tabela 5 – Avaliação do risco de corrosão através da resistividade .

| <b>Resistividade (<math>\Omega.cm</math>)</b> | <b>Risco de corrosão da armadura</b> |
|---|--------------------------------------|
| < 5000  | Muito alto                           |
| 5000 a 10000                                  | Alto                                 |
| 10000 a 20000                                 | Baixo/moderado                       |
| > 20000                                       | Baixo                                |

Fonte: FIP-CEB 192 (1989) apud Santos (2006).

Borosnyói (2016) realizou estudos em concretos de alto desempenho com relação água/cimento de 0,40 com substituições do cimento por micro sílica e metacaolim, os ensaios de resistividade elétrica aparente superficial demonstraram que o uso das adições no concreto aumentou consideravelmente a resistividade elétrica aparente superficial. O resultado pode ser visto na figura 22.

Figura 22 – Resistividade elétrica aparente superficial média de concretos com relação água/aglomerante de 0,40 e adições de sílica ativa (AS), metacaolim (MC) e misturas das duas adições.



Fonte: adaptado de Borosnyó (2016).

Moreno *et al* (2013) ensaiaram três traços de concreto com a/c 0,40, um sem adição, um com substituição, em massa de cimento, de 20% de cinza volante e um com substituição também em massa de cimento de 20% de cinza volante e 8% de microsílca. Os ensaios de resistividade elétrica aparente superficial foram realizados até idades superiores a mil dias, foi verificado que após aproximadamente 300 dias não houve ganhos expressivos de resistividade elétrica.

Pilvar *et al.* (2015) estudaram diversos concretos em relação a três métodos, o RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), o MRCPT (Modified Rapid Chloride Permeability Test) e a resistividade elétrica aparente superficial, e verificou uma relação muito boa entre os resultados. Com os resultados obtidos produziu a tabela 6, onde podem ser verificados os valores da permeabilidade de concreto conforme previsto na ASTM C1202 e para os outros dois métodos.

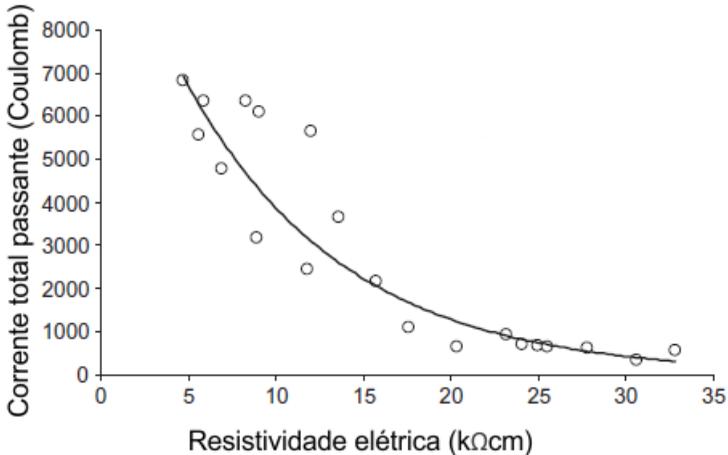
Tabela 6 – Classificação de concretos em relação a penetração de íons cloreto no RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), no MRCPT (Modified Rapid Chloride Permeability test) e resistividade elétrica aparente superficial.

| Permeabilidade de íons cloreto | RCPT (C)    | Resistividade elétrica aparente superficial (kΩcm) | MRCPT (mS/cm) |
|--------------------------------|-------------|--|---------------|
| Alta                           | >4000       | <14  | >0,9          |
| Média                          | 2000 - 4000 | 14-25  | 0,7-0,9       |
| Baixa                          | 1000 - 2000 | 25-43  | 0,6-0,7       |
| Muito baixa                    | 100 - 1000  | 43-270   | 0,4-0,6       |
| Negligenciável                 | < 100       | >270   | <0,4          |

Fonte: Adaptado de Pilvar *et al.* (2015).

Nos estudos de Yildirim *et al.* (2011) foi verificada a relação existente entre a resistividade elétrica do concreto e a carga total passante conforme ensaio da ASTM 1202, encontraram uma relação forte entre esses dois parâmetros ( $R=0,95$ ), a relação entre a resistividade elétrica aparente superficial e o ensaio de migração de cloretos pode ser visto na figura 23.

Figura 23 – Relação entre a carga total passante pelo método de migração de cloretos e a resistividade elétrica.



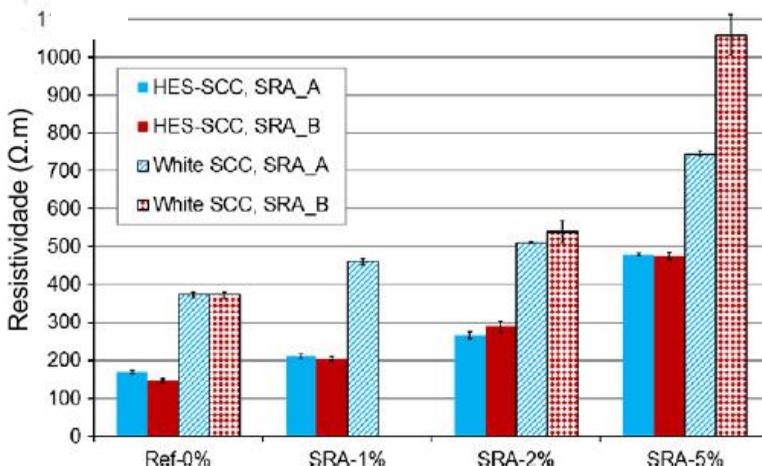
Fonte: adaptado de Yildirim *et al.* (2011).

Sengul (2014) demonstrou em seu experimento que há uma relação muito forte ( $R=0,97$ ) entre a difusividade de cloretos feita

através do procedimento indicado na NT Build 492, a resistividade elétrica de massa pelo procedimento indicado ASTM C1760 e a resistividade elétrica volumétrica indicado pela RILEM TC-154.

Maia *et al.* (2012) estudaram a influência de dois tipos de aditivos redutores de retração diferentes em concretos convencionais e brancos, verificou que houve influência do uso de aditivos redutores de retração na resistividade elétrica, conforme pode ser visto na figura 24 o uso do ARR aumentou a resistividade elétrica dos concretos estudados, sendo que o aumento foi maior para os concretos convencionais do que para os concretos brancos.

Figura 24 – Resistividade em função da composição do concreto (HES – Convencional e *White* – Branco) e da quantidade de aditivo redutor de retração (SRA) na idade de 330 dias.



Fonte: adaptado de Maia *et al.* (2012).

## 2.6 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para aumentar a vida útil das estruturas se faz necessário que o cobrimento de concreto da armadura possua baixa permeabilidade, para tanto o concreto deve possuir baixas relações água/cimento e boas propriedades reológicas, propriedades que o concreto autoadensável de alto desempenho possui.

A retração autógena é maior em concretos com baixas relações água/cimento, que pode gerar fissuras e provocar uma diminuição da

durabilidade de estruturas de concreto armado e protendido. Para diminuir os efeitos das retrações são utilizados aditivos mitigadores de retração.

Nesse trabalho de pesquisa serão verificados alguns parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis de alto desempenho, com diferentes relações água cimento e uso de aditivos mitigadores de retração, o CAAAD visa, além da resistência mecânica e boas propriedades reológicas, a melhora da durabilidade das estruturas de concreto armado.

Os aditivos redutores de retração (ARR) promovem a redução da retração do concreto, pois quando são adicionados à mistura diminuem a tensão superficial da água. Ao diminuir a tensão superficial da fase aquosa do poro de concreto, o ARR diminui a retração autógena causada pela auto-dessecação. Propileno glicol e polioxi-alkileno alquil éter são alguns dos compostos químicos utilizados para produzir ARR. O ARR utilizado nesta pesquisa é à base de polipropileno glicol.

Os aditivos compensadores de retração (ACR) promovem a expansão do concreto, essa expansão compensa a retração. O principal responsável pela expansão induzida pelo ACR é a formação de etringita, que é expansiva. Dentre a maioria dos ACRs os tipos principais são à base de sulfoaluminato de cálcio e à base de cal virgem. O ACR utilizado nesta pesquisa é um sulfoaluminato de cálcio.

Os polímeros superabsorventes, ou *superabsorbent polymers* (SAP), são materiais que armazenam grande quantidade de água. Estes materiais, quando incorporados ao concreto, tem a capacidade de liberar a água armazenada à medida que ocorre a redução de umidade nos poros do concreto, este fenômeno é chamado de cura interna que diminui a autodessecação, responsável por parte considerável da retração autógena. Os SAPs mais comuns são os poliácridatos de ligações cruzadas covalentes e poliácridamidas/poliácridatos copolimerizados. O SAP utilizado nesta pesquisa é à base de policrilato de sódio.

Os cloretos são um problema nas obras em concreto armado e protendido próximas ao mar, os cloretos presentes na água do mar podem ser transportados pela poeira ou pelos ventos por grandes distâncias. Os íons cloreto penetram no concreto através do contato da água que contém cloretos com o concreto, sendo que a velocidade dessa penetração depende da relação água/cimento do concreto, do grau de hidratação do cimento, do diâmetro e quantidade de agregados, da presença de fissuras, do tipo de cátion associado aos cloretos, do tipo e consumo de cimento, da execução de cura, da umidade ambiental e da temperatura.

Os ensaios de difusão de cloretos normalmente consomem bastante tempo, para diminuir o tempo dos ensaios de cloretos normalmente utiliza-se um campo elétrico com objetivo de acelerar o processo de penetração dos cloretos. O método normatizado pela ASTM C 1202 (2012), sendo este utilizado como base nesta pesquisa, é um dos mais utilizados para verificar a resistência dos concretos em relação à penetração de cloretos, este ensaio consiste em submeter uma fatia cilíndrica de 10 cm de diâmetro por 5 cm de espessura entre duas células, uma contendo uma solução de 3% de NaCl e outra com uma solução 0,3 mol/L de NaOH. Em cada célula é posicionada um eletrodo e aplicada uma diferença de potencial de 60V durante 6 horas e o resultado do ensaio é a corrente total passante no corpo de prova. Nesta pesquisa utilizou-se 18V por 20 horas, isso foi definido para que não houvesse aumento de temperatura durante o ensaio dos corpos de prova, o que poderia alterar os resultados, porém foram mantidas as mesmas 360 V.h do ensaio conforme ASTM C 1202 (2012).

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente no ar penetra no concreto e transforma íons alcalinos do concreto, como cátions de sódio, potássio e cálcio, em sais de carbonatos desses elementos. A reação de carbonatação é prejudicial às estruturas de concreto, pois diminui o pH da solução aquosa do concreto, gerando uma frente de carbonatação, e quando esta frente de carbonatação chega na armadura há a despassivação do aço que possibilita a corrosão das armaduras. Nesta pesquisa será utilizado um método acelerado de carbonatação, onde se utiliza uma concentração maior de dióxido de carbono que o meio ambiente apresenta, isso é realizado para diminuir o tempo de ensaio, nesta pesquisa utilizou-se a concentração de 6% de  $\text{CO}_2$ , 70% de umidade relativa e 30°C.

Um dos métodos para verificar a frente de carbonatação é o método colorimétrico, podendo-se utilizar os indicadores de pH fenolftaleína, timolftaleína ou amarelo de alizarina. Esses indicadores são substâncias químicas que ao entrarem em contato com a solução alcalina do concreto, rica em hidróxido de cálcio, adquirem colorações típicas, a fenolftaleína utilizada nesta pesquisa adquire coloração vermelha com pHs iguais ou superiores a uma faixa entre 8,0 e 9,8.

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade do material que pode ser definida como a resistência do concreto ao fluxo de uma corrente elétrica, que é relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do concreto. A resistividade elétrica demonstra a qualidade do concreto frente a agentes agressivos, baixos valores de resistividade elétrica significa uma fácil mobilidade

iônica, indicando uma maior possibilidade de desenvolver corrosão no aço se comparado com um concreto de alta resistividade elétrica.

Um dos melhores métodos para medir a resistividade elétrica do concreto é utilizando a sonda Wenner de 4 pontos (utilizada nesta pesquisa), neste método uma pequena corrente é aplicada na superfície do concreto por uma fonte de corrente e recebida por um receptor na outra extremidade e, entre a fonte e o receptor a diferença de potencial é medida entre dois eletrodos. A resistividade elétrica é calculada com os valores da diferença de potencial lida, da corrente e do espaçamento entre os eletrodos.

Nesta pesquisa também será avaliada a resistividade elétrica volumétrica do concreto, que é realizado em corpos-de-prova saturados utilizando discos de metal em duas faces paralelas, é aplicada corrente elétrica entre os discos e também é lida a resistência elétrica entre os discos. Com os valores da resistência elétrica e das dimensões do corpo de prova é calculada a resistividade elétrica do concreto.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consiste em analisar parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis de alto desempenho com diferentes relações água/aglomerante e o uso de aditivos mitigadores de retração.

Os concretos utilizados nesta pesquisa fizeram parte de um projeto mais amplo, onde foram estudadas além das propriedades no estado endurecido do concreto, as propriedades no estado fresco, a retração e ficou a cargo deste trabalho estudar a durabilidade. O projeto mencionado tem como título: Combate à retração para prevenção da fissuração do concreto de alto desempenho e de materiais de base cimento usados na construção e no reparo de estruturas. Trata-se de um projeto ANEEL, ciclo 2010, gerenciado por Luiz Roberto da Silva (Companhia Energética de São Paulo – CESP) e coordenado por Wellington Longuini Repette (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC). O projeto foi realizado entre 2 de fevereiro de 2012 e 31 de dezembro de 2016.

Assim, para comparação da influência do uso de aditivos mitigadores de retração na durabilidade, foram produzidos concretos com relações a/agl 0,25 e 0,32 nos quais se utilizou aditivo redutor de retração nos teores de 0,5%, 1% e 2%, em relação a massa de cimento, além de aditivo compensador de retração nos teores de 5% e 10%, em substituição ao cimento, apenas para o concreto com relação água/aglomerante 0,25 utilizou-se o teor de 15%. Além destes para o concreto com relação a/ag de 0,378 foi utilizado um polímero superabsorvente no teor de 0,04%, em relação a massa de cimento.

Para se verificar a influência da relação água/aglomerante na durabilidade dos concretos foram ensaiados concretos produzidos sem aditivos mitigadores de retração com os seguintes valores de relação água/aglomerante: 0,25;0,295;0,32 e 0,378.

Neste capítulo apresenta-se a caracterização dos materiais, bem como a metodologia empregada na realização dos ensaios.

#### 3.1 MATERIAIS

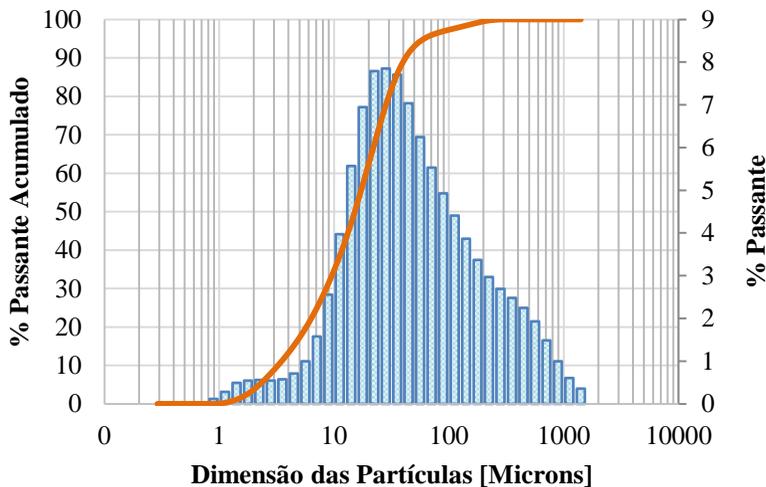
Todos os concretos tiveram o mesmo volume de pasta e agregados e a mesma proporção entre os agregados miúdos e graúdos. Optou-se por empregar quatro relações a/ag, de 0,25, 0,295, 0,32 e 0,378, como são valores inferiores a 0,40, podem ser enquadrados como

concretos de alto desempenho. Os concretos que receberam os aditivos redutores e compensadores de retração foram os com relações água/aglomerantes 0,25 e 0,32, o concreto com relação água/aglomerante 0,378 recebeu o polímero superabsorvente.

Foi fixada a abertura do ensaio de espalhamento entre 66 e 75, atendendo à classe SF2 da ABNT NBR 15823 (2010), enquadrando os concretos como autoadensáveis, exceto o concreto dosado com aditivo promotor de cura interna, o polímero superabsorvente, que se enquadra como concreto convencional. Para atingir o espalhamento foram utilizados diferentes teores de aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos.

O cimento Portland utilizado foi o de alta resistência inicial (CP V ARI), de massa específica  $3,02 \text{ kg/dm}^3$ , sendo este escolhido por apresentar as menores quantidades de adições entre os cimentos comercializados atualmente. A distribuição granulométrica das partículas do cimento (figura 25) foi obtida em equipamento Microtrac S3500, sem meio dispersante.

Figura 25 – Distribuição granulométrica do cimento.



Os dados da tabela 7 referem-se aos tamanhos de partículas de cimento inferiores aos percentuais de 10%, 50% e 90%, além do diâmetro máximo.

Tabela 7 – Valores percentuais da distribuição granulométrica do cimento.

| Material        | D10    | D50      | D90      | Dmáx      |
|-----------------|--------|----------|----------|-----------|
| Cimento CPV-Ari | 2,75µm | 13,08 µm | 47,56 µm | 209,30 µm |

A Tabela 8 apresenta as características químicas e físicas do cimento informadas pelo fabricante, estando todas em conformidade com a ABNT NBR 5733 (1991).

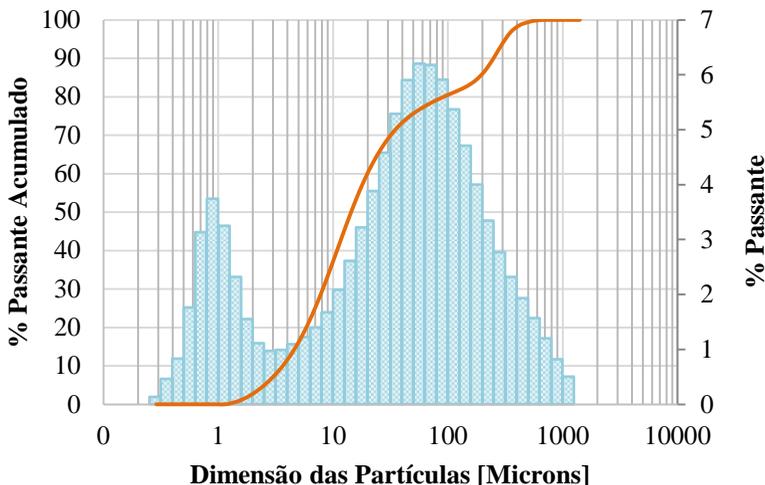
Tabela 8 – Caracterização química e física do cimento CP V ARI.

|                            |   |               |      |
|----------------------------|---|---------------|------|
| Caracterização física      | Área específica Blaine (NBR 7224/84) (cm <sup>2</sup> /g) | 4071          |      |
|                            | Expansibilidade a quente (NBR 11582/91) (mm)              | 0,20          |      |
|                            | Finura - resíduo na peneira                               | #200 (%)      | 0,47 |
|                            |   | #325 (%)      | 3,05 |
|                            | Tempo de pega (NBR 11581/91)                              | Início (min.) | 145  |
|                            |   | Fim (min.)    | 183  |
|                            | Resistência à compressão (NBR 7215/91)                    | 1 dia (MPa)   | 22,4 |
|                            |   | 3 dias (MPa)  | 37,5 |
|                            |   | 7 dias (MPa)  | 42,8 |
|                            |   | 28 dias (MPa) | 51,1 |
| Caracterização química (%) | Perda ao fogo   | 2,93          |      |
|                            | Resíduo insolúvel   | 0,64          |      |
|                            | MgO   | 4,51          |      |
|                            | SO <sub>3</sub>   | 2,85          |      |

Fonte Cimentos Itambé (abril de 2014).

Os concretos foram produzidos com de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento, fornecida pela Elken, contendo grau de pureza de 95% e massa específica 2,22 kg/dm<sup>3</sup>. A distribuição granulométrica das partículas de sílica ativa (figura 26) foi obtida em equipamento Microtrac S3500, sem meio dispersante. Esta distribuição das partículas de sílica ativa indica que a sílica ativa é menos fina que as partículas de cimento, porém provavelmente houve aglomeração das partículas de sílica ativa neste ensaio.

Figura 26 – Distribuição granulométrica da sílica ativa.



Os dados da tabela 9 referem-se aos tamanhos de partículas da sílica ativa inferiores aos percentuais de 10%, 50% e 90%, além do diâmetro máximo.

Tabela 9 - Valores percentuais da distribuição granulométrica da sílica ativa.

| Material     | D10               | D50                | D90                 | Dmáx                |
|--------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Sílica ativa | 3,3 $\mu\text{m}$ | 13,1 $\mu\text{m}$ | 248,9 $\mu\text{m}$ | 592,0 $\mu\text{m}$ |

Foi realizada a determinação da análise química quantitativa do cimento, da sílica ativa e do aditivo compensador de retração, o Denka, (Tabela 10). O ensaio foi realizado via espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) utilizando equipamento Espectrômetro S2 Ranger XFlash Technology – Bruker, com pastilha fundida.

Tabela 10 - análise química quantitativa do cimento, da sílica ativa e do aditivo compensador de retração, o Denka.

| Amostras     | SiO <sub>2</sub><br>(%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | K <sub>2</sub> O<br>(%) | Na <sub>2</sub> O<br>(%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | TiO <sub>2</sub><br>(%) | CaO<br>(%) | MgO<br>(%) | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>(%) | SO <sub>3</sub><br>(%) | P.F. <sup>1</sup><br>(%) |
|--------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------|------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Cimento      | 18,89                   | 3,69                                  | 0,47                    | 0,41                     | 2,76                                  | 0,26                    | 62,94      | 4,22       | 0,05                                  | 0,03                                 | 3,09                   | 3,20                     |
| Sílica ativa | 94,64                   | <0,04                                 | 1,34                    | 0,49                     | 0,06                                  | <0,02                   | 0,19       | 0,34       | 0,04                                  | 0,14                                 | 0,08                   | 2,68                     |
| Denka        | 1,77                    | 4,66                                  | 0,08                    | 0,12                     | 1,27                                  | <0,02                   | 68,48      | 0,87       | 0,02                                  | <0,01                                | 18,25                  | 4,45                     |

<sup>1</sup>P.F. = Perda ao fogo

Com relação aos agregados, foram empregados dois tipos de areia natural: uma areia fina de duna e outra areia média de cava. Para compor a fração graúda, foi empregado apenas agregado de britagem de origem granítica, pertencente à faixa granulométrica 4,75/12,5

Foram utilizados dois tipos de areia natural, uma areia fina de duna e outra areia média de cava, a areia fina possui massa específica de 2,64 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura igual a 0,98, a areia média possui massa específica de 2,55 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura igual a 2,99.

O agregado graúdo utilizado é de origem granítica, pertencente à zona granulométrica 4,75/12,5 (brita 0), conforme a ABNT NBR 7211 (2009), a massa específica da brita é de 2,64 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura igual a 5,89. A porcentagem retida acumulada de cada agregado é mostrada na tabela 11.

Tabela 11 – Distribuição do percentual retido acumulado dos agregados utilizados nos concretos.

| Peneiras<br># | Porcentagem retida acumulada (%) |             |            |
|---------------|----------------------------------|-------------|------------|
|               | Brita                            | Areia Média | Areia Fina |
| 19            | 0,00                             | 0,00        | 0,00       |
| 12,5          | 0,00                             | 0,00        | 0,00       |
| 9,5           | 1,85                             | 0,00        | 0,00       |
| 6,3           | 53,79                            | 0,00        | 0,00       |
| 4,8           | 89,35                            | 0,00        | 0,00       |
| 2,4           | 99,52                            | 16,15       | 0,00       |
| 1,2           | 99,58                            | 39,00       | 0,10       |
| 0,6           | 99,58                            | 61,66       | 0,22       |
| 0,3           | 99,58                            | 81,27       | 2,14       |
| 0,15          | 99,58                            | 93,84       | 95,01      |
| 0,075         | 99,58                            | 98,59       | 99,01      |
| Pulverulento  | 100                              | 100         | 100        |

Foram utilizados dois aditivos mitigadores de retração, um redutor de retração e um compensador de retração e um agente de cura interna. O aditivo redutor de retração utilizado foi o Eclipse, fabricado pela Grace. O aditivo foi doado pela Grace e está à venda no mercado brasileiro. Foi fornecido na forma líquida, possui coloração transparente

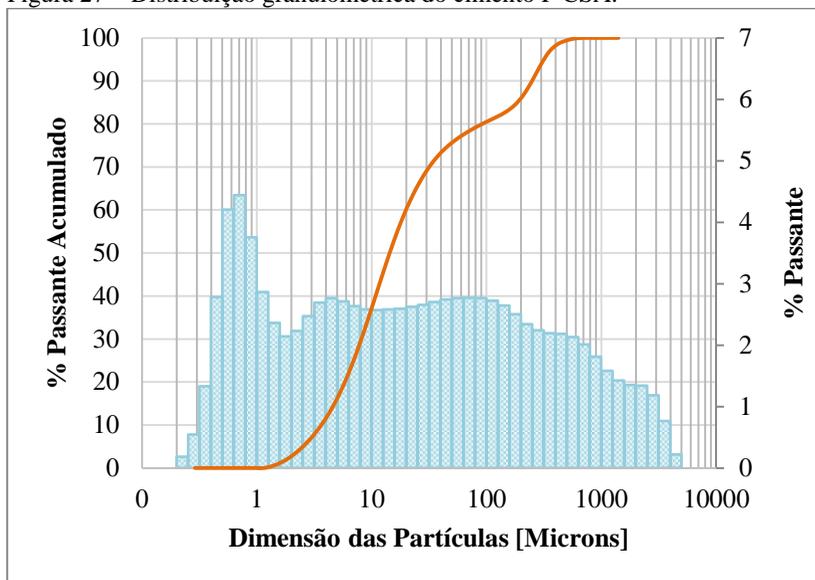
e a sua massa específica é de  $0,91 \text{ g/cm}^3$ , a base química do Eclipse é o polipropileno glicol, conforme dados fornecidos pelo fabricante. O aditivo compensador de retração utilizado foi o cimento P CSA (*Calcium Sulpho Aluminate*), um sulfoaluminato de cálcio, fabricado pela Denki Kagaku Kogyo Kabushiki Kaisha (DENKA). O cimento P CSA foi adquirido por meio de importação do Japão, em sacas de 25 kg, na forma granular. A caracterização do cimento P CSA é apresentada na Tabela 12. Nota-se que a resistência alcançada em corpos de prova dosados com o cimento P CSA é inferior àquela obtida com cimento Portland CPV ARI, até os 7 dias de idade. A distribuição granulométrica das partículas do cimento P CSA (figura 27) foi obtida em equipamento Microtrac S3500, sem meio dispersante.

Tabela 12 – Caracterização química e física do cimento P CSA.

|   |               |       |
|---|---------------|-------|
| Área específica Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) |               | 3740  |
| Expansão, variação de comprimento (%)             | 7 dias        | 0,039 |
|   | 28 dias       | 0,003 |
| Tempo de pega                                     | Início (min)  | 90    |
|   |               |       |
| Resistência à compressão                          | 3 dias (MPa)  | 26,9  |
|   | 7 dias (MPa)  | 38,5  |
|   | 28 dias (MPa) | 54,8  |
| Perda ao fogo (%)                                 |               | 2,0   |
| Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )              |               | 3,10  |
| MgO (%)   |               | 0,9   |
| K <sub>2</sub> O (%)                              |               | 0,2   |

Fonte: DENKA.

Figura 27 – Distribuição granulométrica do cimento P CSA.



Os dados da tabela 13 referem-se aos tamanhos de partículas do cimento P CSA inferiores aos percentuais de 10%, 50% e 90%, além do diâmetro máximo.

Tabela 13 – Valores percentuais da distribuição granulométrica do cimento P CSA.

| Material      | D10                | D50                | D90                 | Dmáx                 |
|---------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Cimento P CSA | 1,60 $\mu\text{m}$ | 26,2 $\mu\text{m}$ | 352,0 $\mu\text{m}$ | 209,30 $\mu\text{m}$ |

O agente de cura interna é um polímero superabsorvente (PSA), à base de policrilato de sódio e fabricado pela Grace, este material não é comercializado no Brasil pela fabricante. O PSA foi fornecido na forma granular e pode ser observado na figura 28.

Figura 28 – Fotos ilustrativas do polímero superabsorvente à base de policrilato de sódio. A parte (a) usa como referência de tamanho um paquímetro, que marca 31,20 mm, com uma quantidade de PSA e (b) uma foto mais próxima desta mesma quantidade de PSA.



O aditivo superplastificante utilizado foi o ADVA CAST 500, à base de policarboxilatos e fabricado pela Grace. É comercializado no mercado brasileiro, a sua massa específica é de  $1,04 \text{ g/cm}^3$ .

Os aditivos utilizados foram analisados pela técnica de espectroscopia de infravermelho (FTIR) em um espectrômetro JASCO modelo FT-IR-4200 (Figura 29a), com acessório de ATR (refletância total atenuada) PRO450-S/470-H, o qual possui cristal de seleneto de zinco (Figura 29b). Foram realizadas 2 varreduras (scans) com  $0,5 \text{ cm}^{-1}$  de resolução por espectros, no intervalo de número de onda de 4000 a  $550 \text{ cm}^{-1}$ . Para a análise, colocou-se uma gota de amostra no compartimento cobrindo todo o cristal do acessório ATR. Todos os espectros foram avaliados pelos programas Spectral analysis da empresa JASCO e pelo Knowitall® da Bio-Rad Laboratories.

Figura 29: Equipamento para análise de FTIR.



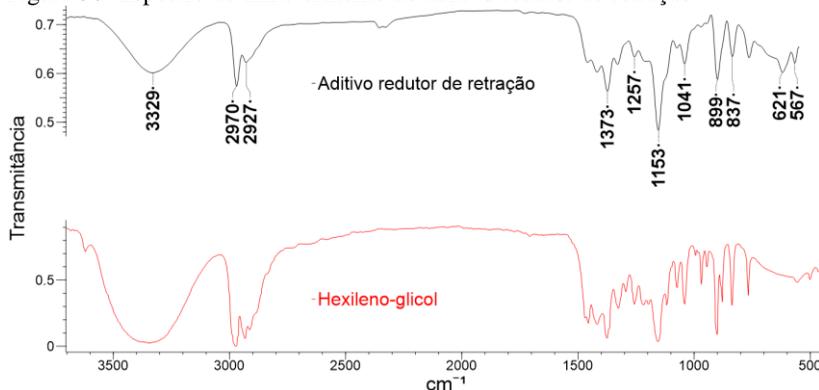
(a) FTIR-4200 Jasco



(b) Acessório ATR

Como resultado da caracterização por infravermelho (FTIR), pôde-se perceber que a base química do aditivo redutor de retração é o hexileno-glicol, conforme o banco de dados do software Spectral Analysis. Concomitantemente, foram comparados os espectros de infravermelho do aditivo redutor de retração e do hexileno-glicol, conforme mostrado na Figura 30. Nota-se que ambos são semelhantes. O espectro do hexileno-glicol foi obtido no banco de dados do NIST (*National Institute of Standards and Technology*) (acessado em <http://webbook.nist.gov>).

Figura 30: Espectro de infravermelho do aditivo redutor de retração.



Pela análise de infravermelho do aditivo superplastificante (Figura 31) pode-se assumir, conforme Janowska-Renkas (2013), que a região do pico de transmitância para o número de onda de  $2924 \text{ cm}^{-1}$  refere-se ao grupo alifático ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ). A região do pico de  $1639 \text{ cm}^{-1}$  é

correlata ao grupo carboxílico (R-COOH). Por fim, a região do pico em  $1084\text{ cm}^{-1}$  é referente ao grupo éter poliglicol ( $\text{CH}_2\text{-O-CH}_2$ ).

As leituras nas regiões dos picos de transmitância para o número de onda de  $3375\text{ cm}^{-1}$ ,  $1639\text{ cm}^{-1}$  e  $629\text{ cm}^{-1}$  estão, possivelmente, majoradas pela presença de água na composição do aditivo superplastificante, conforme pode ser observado na Figura 32, a qual sobrepõe os espectros de infravermelho da água com o do aditivo superplastificante. A região do pico de  $3446\text{ cm}^{-1}$  é referente à hidroxila (OH).

Figura 31: Espectro de infravermelho do aditivo superplastificante

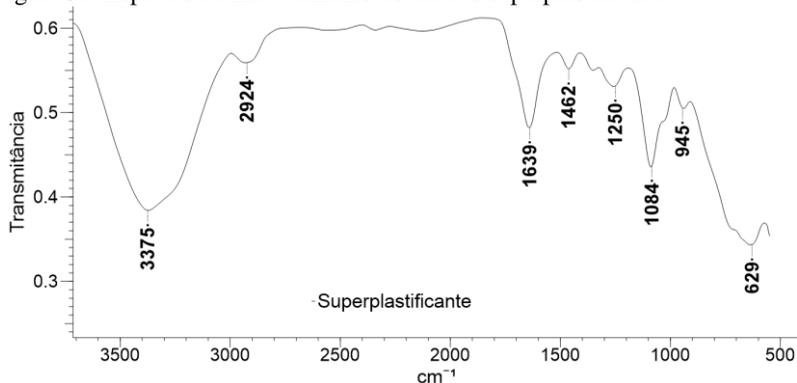
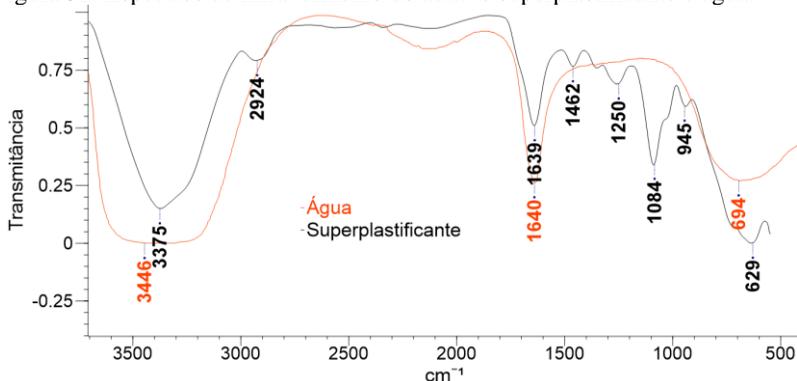


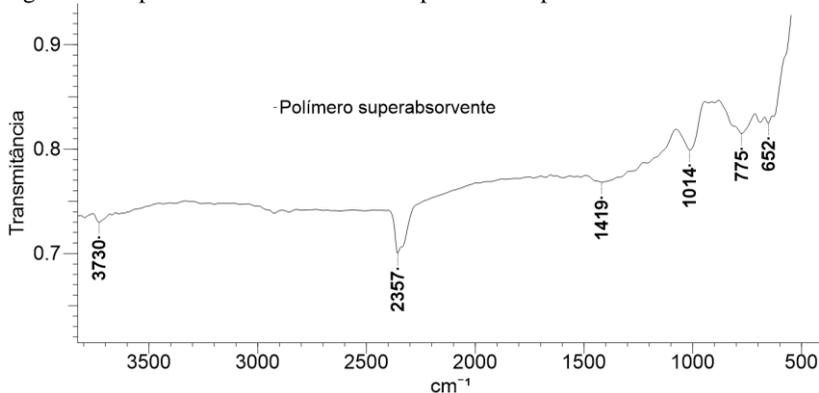
Figura 32: Espectros de infravermelho do aditivo superplastificante e água.



Na análise de infravermelho do polímero superabsorvente (figura 33) a leitura na região do pico de transmitância para o número de onda de  $1419\text{ cm}^{-1}$  pode ser associada ao grupo carboxílico, enquanto a banda entre  $804\text{ cm}^{-1}$  e  $623\text{ cm}^{-1}$  é correlata ao estiramento assimétrico das

ligações Si-O-Al. A região do pico 1419  $\text{cm}^{-1}$  está relacionado ao alongamento do grupo Si-O.

Figura 33: Espectro de infravermelho do polímero superabsorvente.



Os concretos possuem 35% do volume total de concreto composto por agregado graúdo, do volume restante 30% é composta por agregado miúdo, sendo este composto por 40% de areia natural fina e 60% de areia natural média. Também foi utilizado 10% de sílica ativa em relação a massa de cimento. A intenção da dosagem dos concretos foi de se ter concretos com os mesmos materiais constituintes e a mesma proporção entre eles, para assim avaliar de forma comparativa os efeitos da incorporação dos aditivos mitigadores de retração, do agente de cura interna e das relações água/aglomerantes. A tabela 14 mostra os traços utilizados nos concretos 0,25; 0,295; 0,32 e 0,378, a tabela 15 demonstra os consumos destes concretos.

Tabela 14 – Traços das misturas de CAAAD estudadas no programa experimental.

| Materiais            | Traço em massa (kg/kg) |       |       |       |
|----------------------|------------------------|-------|-------|-------|
|                      | 0,250                  | 0,295 | 0,320 | 0,378 |
| a/ag                 | 0,250                  | 0,295 | 0,320 | 0,378 |
| Cimento              | 1,000                  | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Sílica ativa         | 0,111                  | 0,111 | 0,111 | 0,111 |
| Areia natural fina   | 0,438                  | 0,472 | 0,491 | 0,535 |
| Areia natural grossa | 0,286                  | 0,308 | 0,321 | 0,349 |
| Brita 0              | 1,306                  | 1,407 | 1,463 | 1,593 |
| a/c                  | 0,278                  | 0,328 | 0,356 | 0,420 |

Tabela 15 – Consumo estimado de material para cada mistura de CAAAD.

| Materiais            | Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) |       |       |       |
|----------------------|------------------------------|-------|-------|-------|
|                      | 0,250                        | 0,295 | 0,320 | 0,378 |
| a/ag                 | 0,250                        | 0,295 | 0,320 | 0,378 |
| Cimento              | 706                          | 655   | 630   | 579   |
| Sílica ativa         | 78                           | 73    | 70    | 64    |
| Areia natural fina   | 309                          | 309   | 309   | 309   |
| Areia natural grossa | 202                          | 202   | 202   | 202   |
| Brita 0              | 922                          | 922   | 922   | 922   |
| Água                 | 196                          | 215   | 224   | 243   |

Os concretos foram misturados em uma betoneira, inicialmente foi colocada toda a água e parte do aditivo superplastificante, posteriormente foi adicionado todo o cimento, brita e areias e, por último os aditivos mitigadores de retração. Para cada nova adição de material foi ligada a betoneira por três minutos para homogeneizar a mistura. Após a mistura do concreto, o teor de aditivo superplastificante foi ajustado para que o concreto apresentasse a fluidez requerida para se chegar a um espalhamento entre 66 e 75 cm. A tabela 16 mostra os teores de aditivo superplastificante utilizados nos concretos.

Tabela 16 – Teores de aditivos superplastificantes utilizados para cada mistura de CAAD.

| Aditivo mitigador de retração | Teor de aditivo | Relação a/agl | Teor de aditivo superplastificante (% do cimento) |
|-------------------------------|-----------------|---------------|---|
| NENHUM                        |                 | 0,25          | 1,205   |
|                               |                 | 0,295         | 0,819   |
|                               |                 | 0,32          | 0,683   |
|                               |                 | 0,378         | 0,541   |
| SAP                           | 0,04%           | 0,378         | 3,179   |
| ACR                           | 5%              |               | 1,395   |
|                               | 10%             | 0,25          | 1,495   |
|                               | 15%             |               | 1,833   |
|                               | 5%              |               | 0,772   |
|                               | 10%             | 0,32          | 1,506   |
|                               |                 | 0,50%         |   |
| ARR                           | 1,00%           | 0,25          | 0,925   |
|                               | 2,00%           |               | 0,842   |
|                               | 0,50%           |               | 0,764   |
|                               | 1,00%           | 0,32          | 0,711   |
|                               | 2,00%           |               | 0,601   |
|                               |                 |               |   |

Depois de 24 h os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados na câmara úmida, com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $95 \pm 2\%$ , onde permaneceram no mínimo por 400 dias.

Como caracterização dos materiais utilizados, as médias dos resultados dos ensaios de compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias estão apresentadas na tabela 17, para os ensaios de módulo de elasticidade foram produzidos 3 corpos de prova e para os ensaios de resistência a compressão 5 corpos de prova, todos cilíndricos de 10cm de diâmetro e 20cm de altura. Não foram feitos estes ensaios nos concretos sem aditivos mitigadores de retração com relações água/aglomerantes 0,295 e 0,378.

Tabela 17 – Resistência à compressão e módulo estático à compressão dos concretos estudados, SAP se refere ao polímero superabsorvente, ACR ao aditivo compensador de retração e ARR ao aditivo redutor de retração.

| Aditivo mitigador de retração | Teor de aditivo | Relação a/agl | Resistência à compressão (MPa) | Desvio da resistência (MPa) | Módulo Elástico à Compressão (MPa) | Desvio padrão do módulo (MPa) |
|-------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| NENHU<br>M                    |                 | 0,25          | 89                             | 12                          | 39                                 | 4                             |
|                               |                 | 0,32          | 94                             | 11                          | 31                                 | 1                             |
| SAP                           | 0,04%           | 0,378         | 59                             | 2                           | 29                                 | 3                             |
|                               | 5%              |               | 99                             | 6                           | 37                                 | 4                             |
| ACR                           | 10%             | 0,25          | 92                             | 8                           | 34                                 | 3                             |
|                               | 15%             |               | 28*                            | 5                           |                                    |                               |
|                               | 5%              | 0,32          | 84                             | 2                           | 32                                 | 2                             |
|                               | 10%             |               | 88                             | 4                           | 25                                 | 2                             |
| ARR                           | 0,5%            | 0,25          | 99                             | 7                           | 35                                 | 3                             |
|                               | 1,0%            |               | 99                             | 6                           | 33                                 | 1                             |
|                               | 2,0%            |               | 99                             | 4                           | 30                                 | 2                             |
|                               | 0,5%            | 0,32          | 90                             | 2                           | 30                                 | 4                             |
|                               | 1,0%            |               | 91                             | 3                           | 26                                 | 5                             |
|                               | 2,0%            |               | 75                             | 6                           | 30                                 | 2                             |

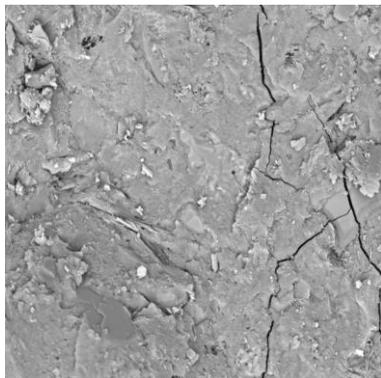
\* O concreto produzido com relação a/agl 0,25 e 15% de ACR apresentou baixa resistência, possivelmente por dosagem excessiva de ACR, portanto este teor de aditivo não foi utilizado no concreto com relação a/agl 0,32.

Fonte: Pilar (2017).

Foram feitas análises de imagens e composições químicas (MEV/EDS) das amostras de concreto após os 400 dias, para isso foi utilizado um microscópio HITACHI TM3030 (CERMAT/UFSC) com 15 kV e imagens de composição por elétrons retroespalhados. Para a composição química das amostras, foram realizadas análises de varredura de energia dispersiva (EDS), as amostras tiveram uma cobertura de ouro aplicada nas suas superfícies. As tabelas de 18 a 21 apresentam uma imagem e a composição química de amostras dos concretos produzidos com os aditivos estudados e um sem aditivo. Este ensaio foi realizado para se verificar se o uso dos aditivos alteraram as composições químicas da pasta de cimento Portland, sendo analisados

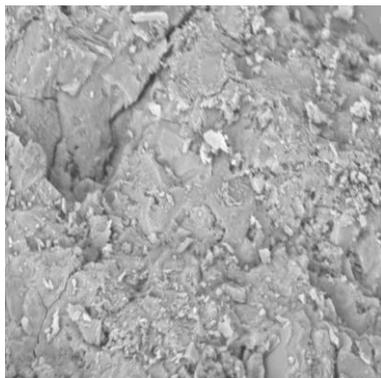
principalmente os elementos alumínio, silício e cálcio que ficaram bastante próximos entre os concretos.

Tabela 18- Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com relação água/aglomerante 0,25.



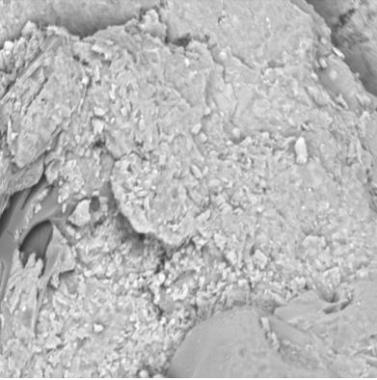
| Elemento químico | % em massa |
|------------------|------------|
| Magnésio         | 3,32       |
| Alumínio         | 3,01       |
| Silício          | 20,98      |
| Enxofre          | 2,68       |
| Potássio         | 3,44       |
| Cálcio           | 63,93      |
| Ferro            | 2,65       |

Tabela 19 - Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com aditivo compensador de retração e relação água/aglomerante 0,32.



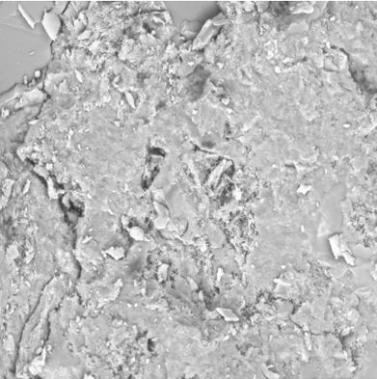
| Elemento químico | % em massa |
|------------------|------------|
| Magnésio         | 2,66       |
| Alumínio         | 3,22       |
| Silício          | 20,65      |
| Enxofre          | 3,16       |
| Potássio         | 5,14       |
| Cálcio           | 62,63      |
| Ferro            | 2,55       |

Tabela 20- Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com aditivo redutor de retração e relação água/aglomerante 0,32.



| Elemento químico | % em massa |
|------------------|------------|
| Magnésio         | 1,48       |
| Alumínio         | 0,89       |
| Silício          | 16,63      |
| Potássio         | 8,72       |
| Cálcio           | 72,28      |

Tabela 21- Imagem com ampliação de 1500x e composição química do concreto produzido com polímero superabsorvente e relação água/aglomerante 0,378.



| Elemento químico | % em massa |
|------------------|------------|
| Magnésio         | 2,42       |
| Alumínio         | 3,72       |
| Silício          | 22,70      |
| Enxofre          | 2,64       |
| Potássio         | 2,70       |
| Cálcio           | 62,16      |
| Ferro            | 3,67       |

### 3.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS

Os ensaios de ataque de cloretos, carbonatação acelerada, resistividade elétrica e permeabilidade em água dos concretos foram realizados no laboratório de materiais de construção (LMCC) do departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Santa Catarina, *campus* Florianópolis/SC. A tabela 22 demonstra os ensaios que foram executados, as idades dos concretos e o número de amostras de cada ensaio.

Tabela 22 – Resumo dos ensaios que serão executados.

| Ensaio                                      | Idade dos concretos* | Numero de amostras |
|---|----------------------|--------------------|
| Ataque de cloretos                          | > 400 dias           | 4                  |
| Carbonatação acelerada                      | > 400 dias           | 2                  |
| Resistividade elétrica aparente superficial | > 400 dias           | 2                  |
| Resistividade elétrica volumétrica          | > 400 dias           | 4                  |
| Permeabilidade em água                      | > 400 dias           | 2                  |

\* Os ensaios foram realizados ininterruptos após iniciados, como os concretos foram produzidos em dias diferentes houve pequena diferença entre as idades dos concretos.

Foram produzidas 15 misturas de concretos, sendo quatro diferentes relações água/aglomerantes sem aditivos mitigadores de retração (0,25, 0,295, 0,32 e 0,378), três teores de aditivo redutor de retração (0,5%, 1% e 2%) para os traços com água/aglomerante 0,25 e 0,32, dois teores de aditivo compensador de retração (5% e 10%) para os traços com água/aglomerantes 0,25 e 0,32, o teor de 15% de ACR foi utilizado apenas no traço 0,25, pois não foi possível moldar os corpos-de-prova do concreto com 15% de ACR com relação água/aglomerante 0,32. O teor de 0,04% de polímero superabsorvente foi utilizado no concreto com relação a/agl. 0,378, esta relação a/agl foi utilizada visando incorporar a água necessária para o polímero promover a cura interna a partir da relação a/c 0,32. Uma síntese das misturas pode ser visualizada pela tabela 23.

Tabela 23 – Misturas que serão estudadas no programa experimental

|                              |            | a/agl  |     |        |
|------------------------------|------------|--------|-----|--------|
| Concretos sem aditivos       |            | 0,25   |     |        |
| mitigadores de retração      |            | 0,295  |     |        |
|                              |            | 0,32   |     |        |
|                              |            | 0,378  |     |        |
|                              |            | Teores |     |        |
| Uso de ARR                   | a/ag 0,25  | 0,50%  | 1%  | 2,00%  |
|                              | a/ag 0,32  | 0,50%  | 1%  | 2,00%  |
|                              |            | Teores |     |        |
| Uso de ACR                   | a/ag 0,25  | 5,00%  | 10% | 15,00% |
|                              | a/ag 0,32  | 5,00%  | 10% |        |
|                              |            | Teor   |     |        |
| Uso polímero superabsorvente | a/ag 0,378 | 0,04%  |     |        |

### 3.2.1 Ensaio acelerado de penetração de cloretos

O ensaio acelerado de penetração de cloretos foi realizado com base na norma americana ASTM C 1202 (2012), este ensaio fornece a medida da resistência à penetração de cloretos. Os ensaios que foram realizados se diferenciam da norma ASTM C 1202 (2012) em três pontos: os eletrodos utilizados foram fabricados com telas de aço inox e fios de cobre, diferente da peça de cobre prescrita na norma; a voltagem e o tempo de ensaio foram de 18V e 20 horas, gerando os mesmo 360V.h do ensaio da norma ASTM C 1202 (2012), isso foi definido para que não houvesse aumento de temperatura durante o ensaio dos corpos de prova, o que poderia alterar os resultados; o volume das câmaras das células de migração tinham volume de aproximadamente um litro, para isto foi utilizado um prolongador que aumenta a capacidade das câmaras. Um sistema semelhante para a realização de ensaios de penetração acelerada de cloretos foi utilizado por Calçada (2004), que verificou que as correntes totais passantes pelo método ASTM C 1202 utilizando os 60V por 6h (360 V.h), quando a temperatura do ensaio era

controlada, deram muito próximos aos valores quando utilizados 12V por 30h (360 V.h).

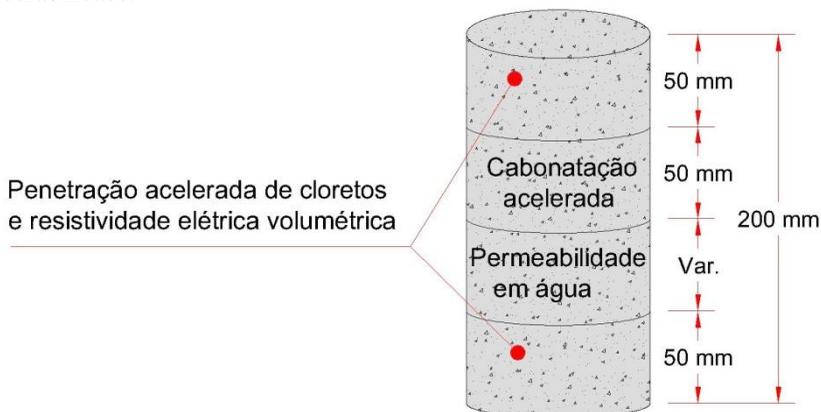
Integrando a corrente ao longo do tempo de ensaio chega-se a carga total passante em Coulombs, que será comparada entre os concretos ensaiados.

Os ensaios serão realizados em laboratório com temperaturas ambientes na faixa de  $27 \pm 3$  °C. A solução da câmara de migração catódica será composta por água destilada e concentração de 3% de NaCl, a solução da câmara anódica será composta por água destilada com concentração de 0,3Mol/l de NaOH, conforme ASTM C 1202 (2012).

Foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos de 10cm de diâmetro e altura de 20cm para cada traço, os corpos-de-prova foram mantidos em seus moldes por 24 horas em ambiente climatizado a 23°C, e após este período, foram desmoldados mantidos em câmara úmida de umidade relativa 100%, por pelo menos 400 dias.

Para realizar os ensaios, os corpos de prova cilíndricos de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, foram divididos com serra circular diamantada em corte úmido, perpendicularmente a sua altura conforme figura 34, portanto as composições dos corpos de prova do ensaio de migração de cloretos variam, pois foram retirados de alturas diferentes do cilindro, porém as diferenças dos resultados foram pequenas.

Figura 34- Divisão dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de durabilidade.



Os corpos de prova cortados tiveram a face lateral (perímetro do disco) impermeabilizada com resina de base epóxi, após isto foram

mantidos em câmara úmida dentro de baldes de água por no mínimo 20 dias visando uma maior saturação dos corpos-de-prova.

Foram ensaiados 4 corpos-de-prova para o ensaio de penetração acelerada de cloretos sendo dois pedaços da face superior dos corpos-de-prova e dois pedaços da face inferior dos corpos-de-prova.

Para obtenção da corrente passante através dos corpos-de-prova de concreto, foi feita a medição da tensão elétrica (V) em uma resistência elétrica de 1  $\Omega$  em série com a câmara de migração, o que possibilita a determinação através da Lei de Ohm (equação 15) da corrente que passa pela câmara.

$$U = R \times i$$

Equação 15

Sendo:

U – Diferença de potencial, cuja unidade é o Volts (V);

R – Resistência elétrica, cuja unidade é o Ohm ( $\Omega$ );

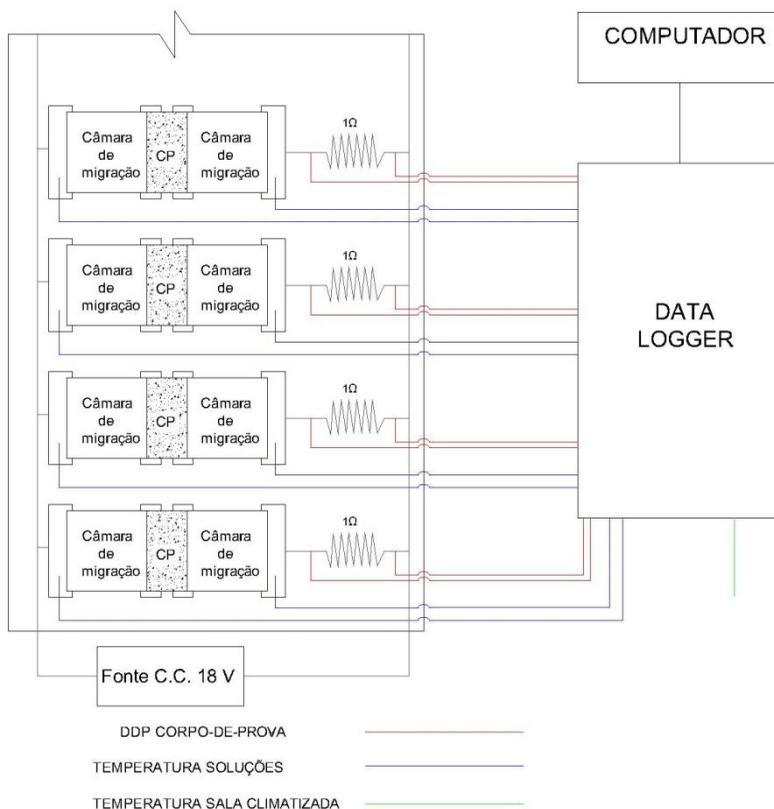
i – intensidade da corrente elétrica, cuja unidade é o Ampére (A).

As temperaturas foram monitoradas nas câmaras das soluções e no laboratório com termopares flexíveis tipo K. As extremidades dos termopares em contato com as soluções tiveram suas extremidades protegidas com tubos de ensaio de vidro.

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca Datataker para as leituras de tensão e temperatura, que foram coletadas a cada 5 minutos. Depois de terminados os ensaios as informações foram enviadas a um computador para armazenamento.

Na figura 35 apresenta-se um esquema do circuito desenvolvido, juntamente com o sistema de aquisição de dados utilizado.

Figura 35 – Instalação das câmaras de migração de cloreto.



Antes de cada ensaio o sistema foi testado com resistências de 120 ohms para validação das leituras recebidas no datataker e também foi verificado se a tensão de 18V era sendo aplicada em cada eletrodo das câmaras.

A sequência de montagem do aparato foi o seguinte: as células foram montadas na vertical, inicialmente se posicionou o eletrodo na câmara e colocou-se o prolongador, foi usado um anel de vedação para tubos de PVC para facilitar a vedação da célula na sua interface com o corpo de prova, por fim posicionou-se corpo de prova. O outro lado da célula foi montado da mesma forma, porém de forma inversa, após isso foram colocados tensores de aço com borrachas para fazer pressão no conjunto e deixa-lo estável.

Para a vedação da câmara foi utilizado silicone incolor de secagem rápida e para que os corpos-de-prova não perdessem umidade, foi colocado água nas câmaras após a secagem do silicone.

Em relação à interpretação dos resultados, a norma ASTM C 1202 (2012) apresenta uma classificação dos concretos ensaiados quanto à penetração de cloretos, em função da carga total passante, conforme tabela 24.

Tabela 24 – Penetração de íons cloreto em função da carga total passante.

| Penetração de íons cloreto | Carga total (Coulombs) |
|----------------------------|------------------------|
| Alta                       | >4000                  |
| Média                      | 2000 - 4000            |
| Baixa                      | 1000 - 2000            |
| Muito baixa                | 100 - 1000             |
| Negligenciável             | < 100                  |

Fonte: ASTM C 1202 (2012).

Após os ensaios de penetração acelerada de cloretos, uma das amostras de cada traço foi rompida à tração por compressão diametral e foi realizado a aspersão de uma solução de nitrato de prata com concentração de 0,1 mol/L na superfície exposta. A aspersão de nitrato de prata gera cloreto de prata em presença de cloretos livres e, óxido de prata na ausência de cloretos, é possível verificar a presença de cloretos pois o cloreto de prata apresenta uma cor esbranquiçada e o óxido de prata a cor marrom.

A determinação do teor de cloretos totais foi feito pelo método de cromatografia iônica conforme SM 4110-B por laboratório químico especializado, o equipamento utilizado foi um cromatografo 883 Basic IC Plus da Metrohm (figura 36), com coluna Metrosep A Supp 5 150/4.0 e taxa de injeção de 0,7 ml/min, a preparação das amostras foi realizada em meio ácido conforme ASTM C1152 (2012). As amostras foram retiradas com o auxílio de uma furadeira e broca de  $\varnothing = 10\text{mm}$ , foram extraídas amostras a 5mm e 10mm de profundidade, caso a análise colorimétrica por aspersão de nitrato de prata indicasse profundidades maiores de penetração de cloretos, seriam realizadas extrações até a profundidade indicada a cada 5mm, porém não houve indicações maiores que 1mm pela aspersão do nitrato de prata.

Figura 36 – Cromatografo 883 Basic IC Plus da Metrohm utilizado para determinação do teor total de cloretos.



Os pós extraídos foram secos em estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, posteriormente 2g de pó foi utilizados para extração ácida dos cloretos. Para extrair os cloretos do pó foi realizado o seguinte procedimento: em um béquer de 100 ml foi adicionado à amostra, 15 ml de água deionizada e 5 ml de ácido nítrico com concentração 1:1; a suspensão foi levada a aquecimento até a fervura com o béquer coberto por um vidro, o material fervido foi filtrado e o líquido filtrado foi acrescido de água deionizada até 35 ml.

A preparação das amostras e a análise do teor de cloretos foram realizadas pelo laboratório QMC de Florianópolis/SC, especializado em análises em químicas.

### 3.2.2 Carbonatação acelerada

Os corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação acelerada após a serragem foram secos em estufa a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 21 dias, visando a retirada da água livre dos poros, a diferença de massa entre os corpos de prova nos dois últimos dias foram menores que 0,5%. Os corpos-de-prova então ficaram 6 dias na sala que iriam ocorrer os ensaios, visando a redistribuição da umidade interna, com umidade relativa de  $70 \pm 5\%$  e temperatura de  $27 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por fim as superfícies superiores e inferiores (planas) dos corpos-de-prova foram impermeabilizadas com resina epóxi para que o dióxido de carbono penetre apenas nas laterais.

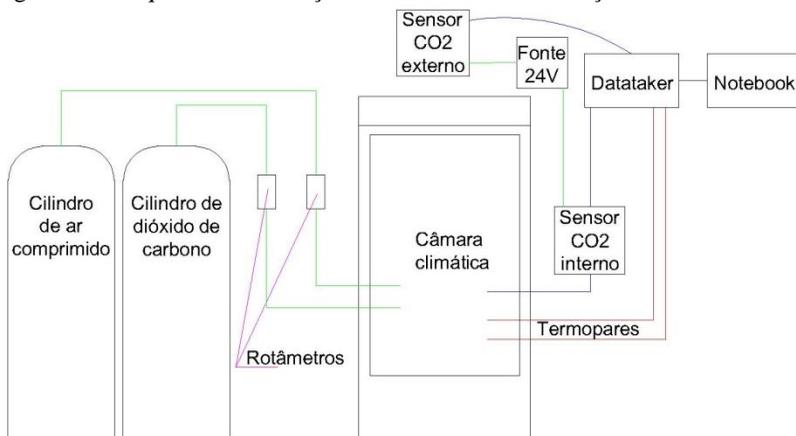
Os ensaios de carbonatação foram realizados em câmara climatizada a  $30 \pm 2$  °C e  $75 \pm 2$  % de umidade relativa do ar (figura 37). Conforme pode ser visto na tabela 5, boa parte das pesquisas utilizam valores entre 2 e 10% de concentração de CO<sub>2</sub> neste tipo de ensaio, portanto a concentração utilizada foi de  $6 \pm 0,5$  % de CO<sub>2</sub> e monitorada durante todo ensaio por um sensor de CO<sub>2</sub> da marca Vaisala, modelo GMT221 com visor e sensor de 0 a 20% de CO<sub>2</sub>. Termopares tipo K foram utilizados para acompanhar a temperatura interna da câmara de carbonatação. A vazão de dióxido de carbono e do ar comprimido era controlada por rotâmetros RMA-151-SSV da Dwyer com faixa de medição de 5 a 50 cc/minuto. A utilização do ar comprimido era necessária quando a concentração de CO<sub>2</sub> ultrapassava os 6%. Para segurança dos usuários do laboratório foi controlada a concentração de CO<sub>2</sub> do laboratório durante os ensaios com um sensor CDT-2-N40-LCD da Dwyer. Um desenho esquemático do sistema pode ser verificado na figura 38.

Os tempos de ensaio foram aos 60, 90 e 120 dias, aos 60 e 90 dias de ensaio os corpos-de-prova foram perfurados em três pontos com uma furadeira de bancada, o pó foi retirado com ar comprimido e foi aspergida solução de fenolftaleína na abertura para verificar a profundidade da penetração de CO<sub>2</sub>, o resultado foi calculado sendo a média das medidas das 3 profundidades. Aos 120 dias o corpo de prova foi rompido diametralmente, foi realizada a aspersão da fenolftaleína e foram feitas 16 medidas equidistantes com um paquímetro da frente de carbonatação, sendo 8 de cada lado, o resultado aos 120 dias foi calculado sendo a média das medidas.

Figura 37 – Câmara de carbonatação acelerada.



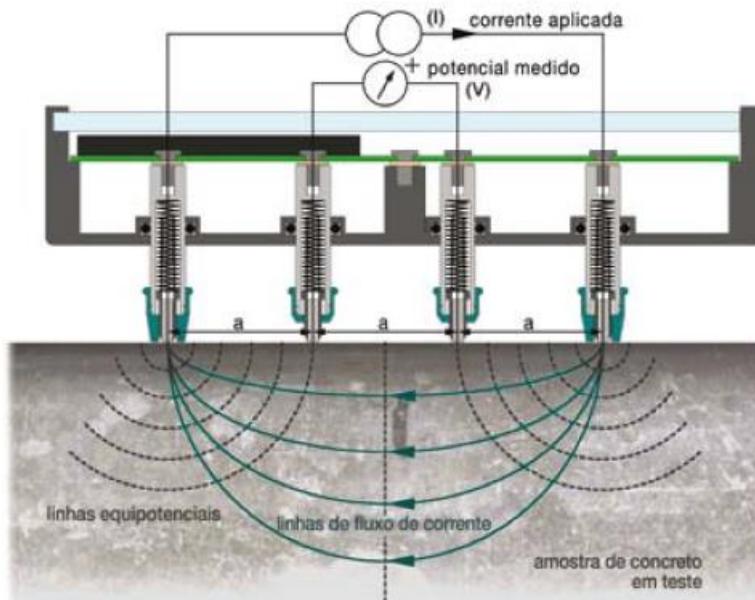
Figura 38 – Esquema da instalação da câmara de carbonatação acelerada.



### 3.2.3 Resistividade elétrica

O equipamento utilizado para verificar a resistividade elétrica aparente superficial dos concretos analisados foi o Resipod da Prosec, este equipamento é uma sonda Wenner de 4 pontos com espaçamento entre as sondas de 50mm, especialmente concebida para medir a resistividade elétrica do concreto através de um ensaio não destrutivo. O princípio de medição da sonda Wenner é a aplicação de uma corrente às duas sondas nas extremidades e a diferença de potencial é medida entre as duas sondas internas como pode ser verificado na figura 39. A leitura do equipamento se refere à resistividade elétrica do material em  $k\Omega\text{cm}$ , os valores apresentados no equipamento foram divididos por 2,7, pois o corpo de prova tinha dimensões de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, este coeficiente foi retirado da figura 17 conforme indicado por Morris *et al.* (1996). Esta sonda trabalha em frequência de 40Hz, amplitude da onda elétrica de 80V e o tipo de onda é quadrada.

Figura 39 – Funcionamento da sonda Wenner.



Fonte: PROSEQ, 2013.

Os corpos de prova foram ensaiados logo após a retirada da câmara úmida, foram feitas oito medidas equidistantes nas faces arredondadas dos dois corpos de prova cilíndricos (10 x 20cm) de cada traço, a resistividade elétrica superficial foi calculada sendo a média destas medidas e corrigidas conforme indicam Morris *et al.*(1996. A temperatura do laboratório durante os ensaios variou de  $25 \pm 2$  °C.

Os ensaios de resistividade elétrica volumétrica foram conduzidos com o mesmo equipamento usado para medir a resistividade elétrica aparente superficial, o Resipod da PROSEQ. Foram acoplados garras de jacaré e cabos elétricos no Resipod, como pode ser visto na figura 40 e a outra extremidade em discos de aço inox de 2,5 cm de altura por 10 cm de diâmetro, conforme pode ser visto na figura 41. Dois cabos de uma das extremidades da sonda foram conectados a um dos discos metálicos e os outros dois da outra extremidade da sonda foram conectados ao outro disco metálico, possibilitando assim a passagem da corrente elétrica e a leitura da resistividade elétrica.

Figura 40 – Ligações elétricas no Resipod para o bulk test.



Figura 41 – Realização do bulk test.



Para isolar o aparato da superfície foram utilizados pedaços de borracha não condutores. As esponjas utilizadas foram antes de cada medida encharcadas em água, a soma das duas leituras de resistividade elétrica das esponjas eram em média 5,5 kΩcm.

Os corpos-de-prova ensaiados foram os mesmos do ensaio de cloretos, a resistividade elétrica volumétrica do concreto foi calculada com as equações 16 e 17 conforme indicado pelo fabricante do Resipod.

$$R_{\text{cilindro}} = R_{\text{medido}} - R_{\text{esponja superior}} - R_{\text{esponja inferior}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$R_{\text{cilindro}}$  : o valor utilizado no cálculo da resistividade elétrica volumétrica (kΩcm)

$R_{\text{medido}}$  : a medida apresentada pelo resipod (kΩcm)

$R_{\text{esponja superior}}$ : a medida apresentada pela esponja que fica em cima do corpo de prova (kΩcm)

$R_{\text{esponja inferior}}$ : a medida apresentada pela esponja que fica em baixo do corpo de prova (kΩcm)

A resistividade elétrica volumétrica ( $\rho$ ) é então dada pela equação 16, conforme indicado pelo fabricante do equipamento para as sondas com espaçamentos de 5cm.

$$\rho = K \times R_{\text{cilindro}} \div 31,4$$

Equação 17

Onde K é a relação da área pela altura da amostra.

### 3.2.4 Permeabilidade em água

A permeabilidade em água foi realizada conforme a norma ASTM C642-13, para determinação da densidade e porcentagem de vazios no concreto, os procedimentos da norma são os seguintes:

Determinação da massa seca, secar o concreto em estufa a  $110 \pm 5$  °C, por no mínimo 24 horas, deixar o concreto esfriar a temperatura de 20 a 25°C em dessecador e determinar a sua massa, se houver dúvidas se o concreto está totalmente seco, seca-se novamente na estufa até a diferença de massa ser de no máximo 0,5%.

Determinação da massa saturada, imergir o concreto em água a aproximadamente 21°C por no mínimo 48 horas ou até que duas medidas de massa apresentem um acréscimo não maior que 0,5% em 24 horas, secar a superfície do concreto com uma toalha antes da pesagem.

Determinação da massa saturada após ebulição, após o procedimento utilizado para a determinação da massa saturada, ferver o concreto em um recipiente cheio de água por 5 horas. Deixar o espécime resfriar naturalmente por não menos que 14 horas até chegar a temperatura de 20 a 25 °C, secar a superfície do concreto com uma toalha antes da pesagem.

Determinação da massa aparente imersa, suspender o concreto por um fio após imersão e fervência, determinar a massa aparente em água.

Com estes dados foram calculados a densidade aparente e o volume de poros permeáveis.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

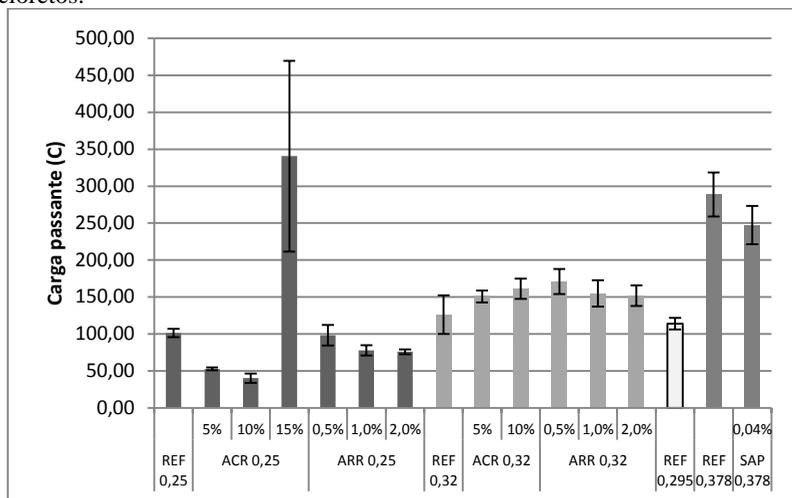
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios executados no programa experimental.

Os resultados estão divididos conforme o tipo de ensaio e de estudo. Foram utilizadas as seguintes nomenclaturas conforme o aditivo utilizado no concreto: ARR – Aditivo Redutor de Retração; ACR – Aditivo Compensador de Retração; SAP - Polímero Superabsorvente e REF – Concreto Referência sem aditivo mitigador de retração.

### 4.1 PENETRAÇÃO DE CLORETOS

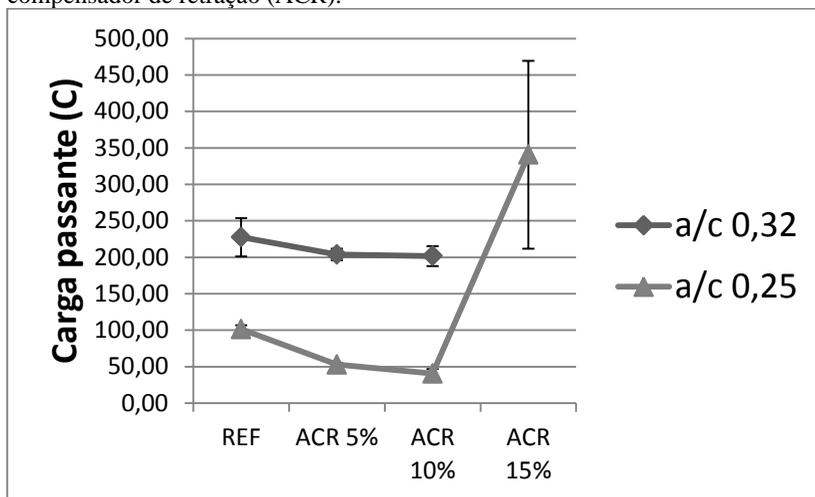
A média dos valores de carga passante e os valores da dispersão de um desvio padrão podem ser observadas na figura 42, para este ensaio quanto menor for a quantidade de carga passante melhor é o concreto frente à penetração dos íons cloreto. Ao analisar os resultados, percebe-se que os concretos de relação  $a/agl$  0,25 com aditivos mitigadores de retração tiveram valores de cargas passantes menores, indicando que os aditivos melhoraram o desempenho destes concretos quanto a penetração de cloretos, porém o concreto com 15% de aditivo compensador de retração não seguiu este padrão. Os concretos produzidos com aditivos mitigadores de retração com relação  $a/agl$  0,32 obtiveram valores ligeiramente maiores que a referência, porém analisando a dispersão dos resultados não houve diferenças significativas. O uso do polímero superabsorvente também não produziu diferenças significativas nos resultados de penetração de cloretos, quando comparado com o concreto referência.

Figura 42 - Valores de carga passante no ensaio acelerado de penetração de cloretos.



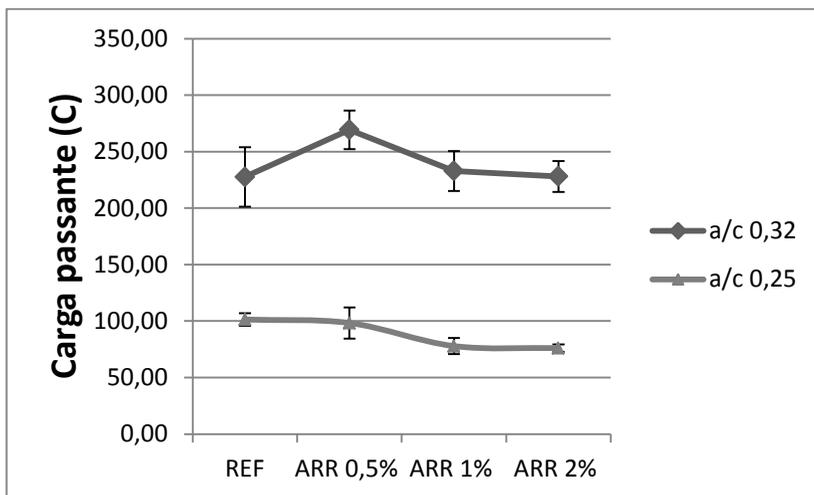
Os efeitos do uso do aditivo compensador de retração (ACR) podem ser visualizados na figura 43, são mostradas as médias e os valores da dispersão de um desvio padrão. Para os teores de 5 e 10% houve queda na corrente passante, indicando que o uso destes teores melhoram o desempenho do concreto frente ao ingresso dos íons cloreto, porém o uso de 15% de ACR demonstrou ser excessivo e diminuiu o desempenho do concreto. A melhora do desempenho destes concretos pode ter ocorrido pela diminuição da porosidade na interface entre a matriz cimentícia e os agregados, possivelmente causada pela maior quantidade de etringita presente quando se utiliza este tipo de aditivo. Mehta & Monteiro (1986) estudaram o efeito do uso de cimentos tipo K na interface agregado/matriz utilizando microscopia eletrônica e difração de raios-X, chegando a conclusão que a alta concentração de etringita e o refinamento do hidróxido de cálcio na zona de transição explica porque, em uma mesma relação água/cimento, os concretos produzidos com cimento expansivo tem resistências mecânicas maiores que os produzidos com cimento Portland.

Figura 43 – Valores de carga passante dos concretos produzidos com aditivo compensador de retração (ACR).



Os efeitos do uso do aditivo redutor de retração (ARR) podem ser visualizados na figura 44, são mostradas as médias e os valores da dispersão de um desvio padrão. O teor de 0,5% para o concreto com relação a/agl 0,25 e os teores de 1 e 2% para os concretos com relação a/agl 0,32 não alteraram o valor da carga passante, indicando que seu uso não alterou o desempenho destes concretos frente ao ingresso dos íons cloreto. Para os teores de 1 e 2% nos concretos com relação a/agl 0,25 houve diminuição da corrente total passante, indicando uma melhora em seu desempenho, porém para o teor de 0,5% no concreto com relação a/agl 0,32 houve um aumento da carga, indicando a diminuição de desempenho do concreto frente ao ingresso dos íons cloreto. Portanto não houve um padrão claro dos efeitos deste aditivo no concreto, porém deve-se destacar a melhora no desempenho nos teores de 1 e 2% para os concretos com menor relação a/agl e que o uso deste aditivo não alterou em grandes proporções os resultados.

Figura 44 - Valores de carga passante dos concretos produzidos com aditivo redutor de retração (ARR).



A figura 45 mostra as médias e os valores da dispersão de um desvio padrão para os concretos sem aditivos mitigadores de retração, pode-se verificar que os resultados dos concretos com relações a/agl 0,25, 0,295 e 0,32 obtiveram valores bastante próximos, com o valor de carga passante crescendo com o aumento da relação a/agl, o concreto com relação a/agl 0,378 obteve um valor 1,84 vezes maior que o concreto com relação 0,25. Portanto quanto maior a relação a/agl maior será a penetração dos íons cloreto devido a maior porosidade presente nos concretos com maiores relações a/agl.

Figura 45 - Valores de carga passante dos concretos para diferentes relações a/agl.

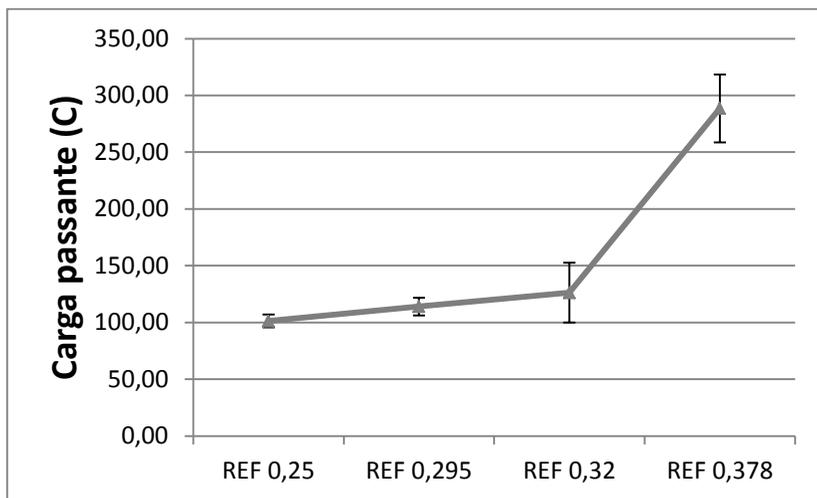


Tabela 25 – Penetrabilidade do íon cloreto conforme carga passante.

| Aditivo mitigador de retração | Teor de aditivo | Relação a/agl | Carga passante (C) | Penetrabilidade de íons cloreto (ASTM C 1202) |
|-------------------------------|-----------------|---------------|--------------------|---|
| NENHUM                        |                 | 0,25          | 101,36             | Muito baixa                                   |
|                               |                 | 0,295         | 114,04             | Muito baixa                                   |
|                               |                 | 0,32          | 126,26             | Muito baixa                                   |
|                               |                 | 0,378         | 288,59             | Muito baixa                                   |
| SAP                           | 0,04%           | 0,378         | 247,38             | Muito baixa                                   |
| ACR                           | 5%              |               | 52,94              | Negligenciável                                |
|                               | 10%             | 0,25          | 40,49              | Negligenciável                                |
|                               | 15%             |               | 340,59             | Muito baixa                                   |
|                               | 5%              | 0,32          | 150,85             | Muito baixa                                   |
|                               | 10%             |               | 161,25             | Muito baixa                                   |
| ARR                           | 0,50%           |               | 98,33              | Negligenciável                                |
|                               | 1,00%           | 0,25          | 77,90              | Negligenciável                                |
|                               | 2,00%           |               | 76,12              | Negligenciável                                |
|                               | 0,50%           |               | 170,97             | Muito baixa                                   |
|                               | 1,00%           | 0,32          | 154,98             | Muito baixa                                   |
|                               | 2,00%           |               | 151,92             | Muito baixa                                   |

Comparando os resultados com os limites preconizados pela ASTM C 1202/2012 (tabela 25), nota-se que as amostras com relações a/agl 0,25 expressam em sua maioria penetrabilidade negligenciável do íon cloreto, os demais concretos se situam na categoria de penetrabilidade muito baixa dos íons cloretos, demonstrando que os concretos estudados são bastante resistentes a penetração dos íons cloreto.

Nos ensaios realizados não houveram grandes variações dos valores de corrente passante medidos entre os quatro corpos de prova, também não foi verificado aumento expressivo de temperatura. Como não houve aumento de temperatura das soluções o patamar das correntes passantes foi estável. Como exemplo deste comportamento a figura 46 e 47 demonstram as medidas de temperatura das soluções e da corrente passante, respectivamente, do ensaio realizado nos quatro corpos de prova do concreto com relação a/c 0,25 sem aditivos mitigadores de retração.

Figura 46 – Temperaturas das soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e cloreto de sódio (NaCl) durante o ensaio de penetração acelerada de cloreto nos quatro corpos de prova (P1 a P4), do concreto com relação a/c 0,25 sem aditivo mitigador de retração.

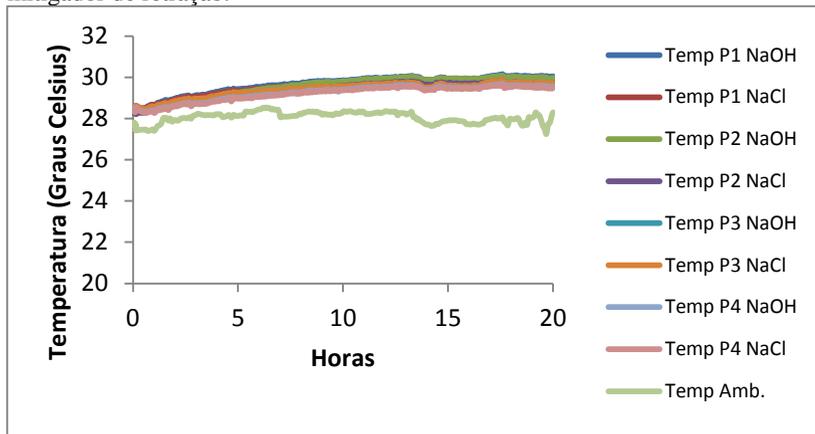
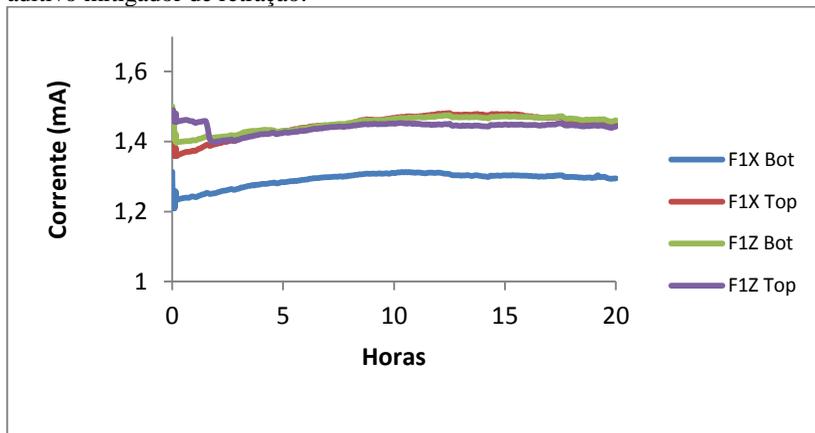


Figura 47 – Corrente passante durante o ensaio de penetração acelerada de cloretos nos quatro corpos de prova do concreto com relação a/c 0,25 sem aditivo mitigador de retração.



Como não houveram variações consideráveis nas medidas de corrente passante, constatou-se que ao multiplicar a média das correntes iniciais pelo tempo do ensaio (72.000 segundos) obtém-se valores muito próximos dos resultados do ensaio completo, conforme pode ser verificado na figura 48, onde as barras da esquerda são os valores

medidos no ensaio e as barras da direita são os valores das cargas iniciais extrapoladas para todo o tempo de ensaio. Portanto uma opção para tornar mais rápidos os ensaios é a realização da medição das cargas passantes iniciais, que poderia ser realizada por poucos minutos, e extrapolação destas cargas iniciais para o restante do tempo de ensaio, isto para ensaios que utilizem baixas diferenças de potencial e que não apresentem aumento de temperatura.

Figura 48 – Correntes passantes na média dos ensaios realizados e na extrapolação das médias das cargas iniciais.

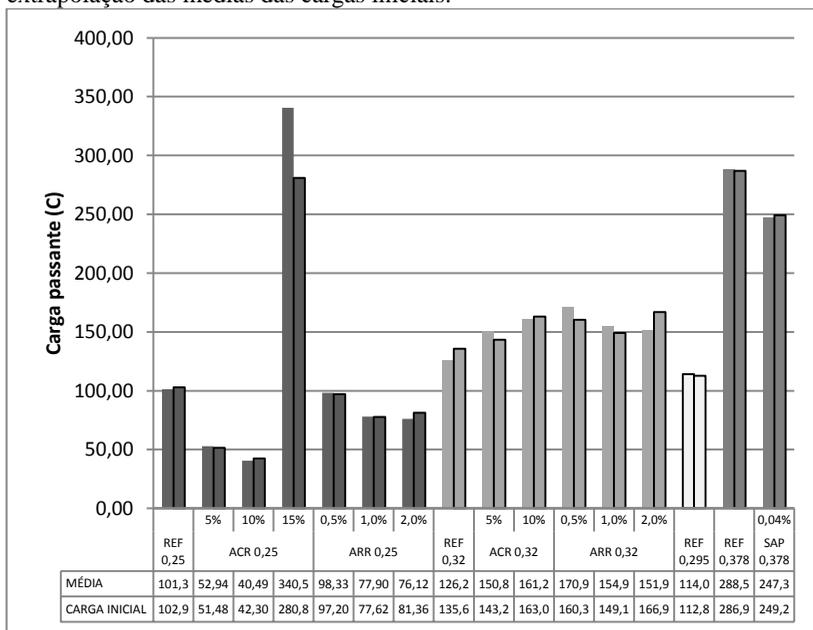
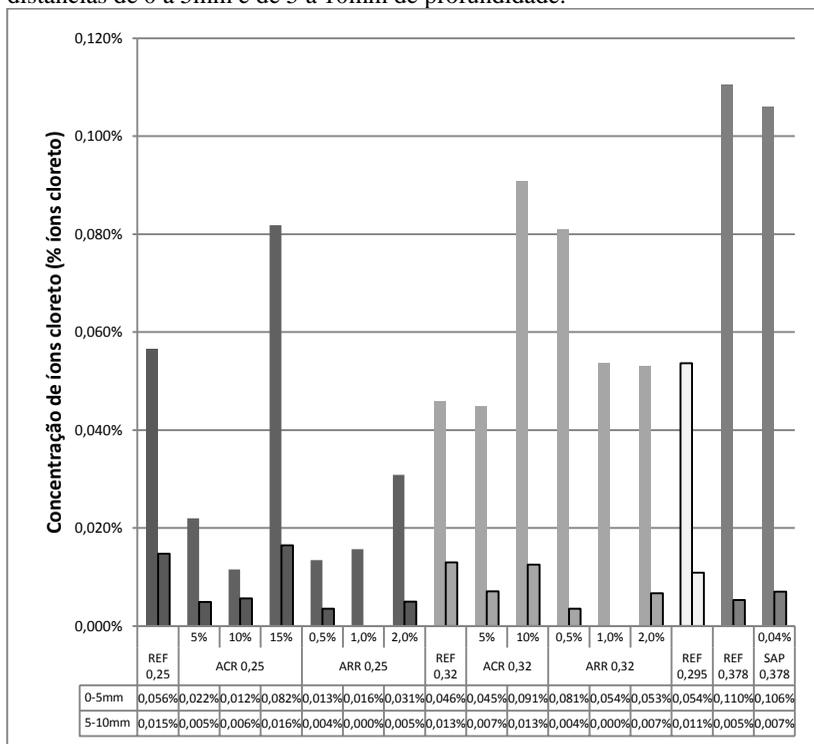


Figura 49 – Concentrações de íons cloreto (% íons cloreto no concreto) nas distâncias de 0 a 5mm e de 5 a 10mm de profundidade.



A figura 49 mostra os valores das concentrações de íons cloreto, em relação à massa de concreto, nas distâncias de 0 a 5 mm (barras da esquerda) e de 5 a 10mm (barras da direita) de profundidade, nos corpos de prova ensaiados nos ensaios acelerados de penetração de cloretos. Analisando os resultados, percebe-se que para os concretos de relação a/agl 0,25 o uso dos aditivos redutores e compensadores a penetração dos íons cloreto diminuíram a entrada de cloretos, indicando que os aditivos melhoraram o desempenho destes concretos quanto a penetração de cloretos, porém o concreto com 15% de aditivo compensador de retração não seguiu este padrão.

A maioria dos concretos produzidos com aditivos mitigadores de retração com relação a/agl 0,32 obtiveram valores ligeiramente maiores que a referência, porém o uso de 10% de aditivo compensador de retração e 0,5% de aditivo redutor de retração apresentaram valores expressivamente maiores que a referência.

O uso do polímero superabsorvente apresentou valor próximo ao da referência, não alterando muito o resultado.

Nos concretos sem aditivos mitigadores de retração pode-se verificar que os resultados dos concretos com relações a/agl 0,25, 0,32 e 0,295 obtiveram resultados bastante próximos, porém o concreto com relação a/agl 0,378 obteve um valor 195% maior que o concreto com relação 0,25, indicando que quanto maior a relação a/agl maior foi a penetração dos íons cloreto.

Ao comparar os resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos e da concentração que efetivamente penetrou no concreto pode-se verificar a grande semelhança nas tendências dos resultados, indicando que o ensaio acelerado de penetração de cloretos é um excelente ensaio para se verificar a resistência do concreto à penetração de cloretos.

Os baixos valores de concentração das amostras retiradas de 5 a 10mm indicam que a maior parte dos íons cloretos que ingressaram no concreto estavam na faixa de 0 a 5mm.

Normalmente a marcação da penetração de cloretos ao aspergir a solução de nitrato de prata, mudança da cor clara para a escura, ficava próxima a um milímetro, isso demonstra a pequena concentração de íons cloretos que penetraram nos concretos. Em alguns casos não foi possível verificar a mudança de cor que a aspersão de nitrato de prata provoca, portanto esta técnica para concretos de alto desempenho, para o ensaio de penetração acelerado de cloretos realizado, não é eficaz. Estes resultados estão próximos dos resultados obtidos por Calçada (2004).

## 4.2 CARBONATAÇÃO ACELERADA

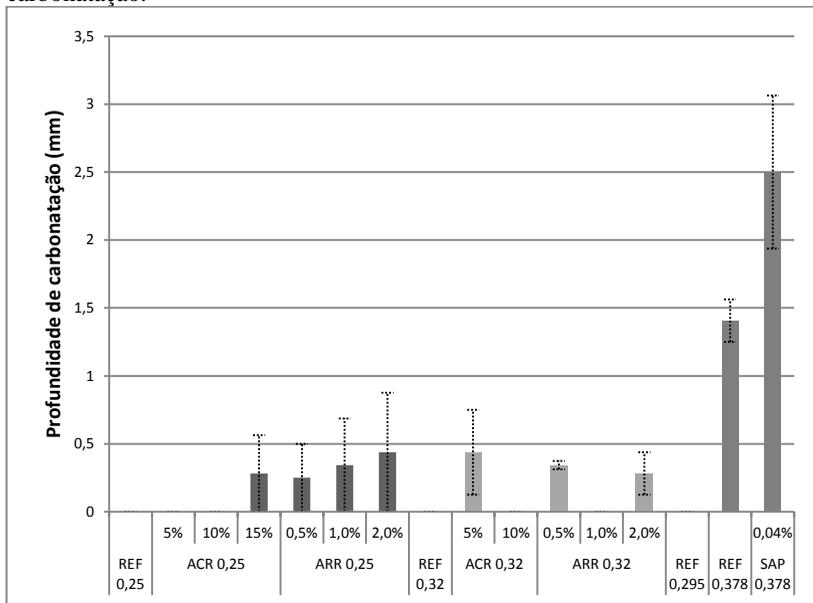
Todos os resultados de 60 e 90 dias apresentaram resultados nulos, porém aos 120 dias quando os corpos de prova foram rompidos diametralmente verificaram-se pontos de carbonatação, porém mesmo nos corpos de prova que foi possível medir a profundidade de carbonatação haviam muitos pontos da face exposta sem carbonatação, a figura 50 mostra um dos corpos de prova do concreto com as maiores medidas de carbonatação como exemplo disto.

Figura 50 – Ensaio colorimétrico com aspersão de solução de fenolftaleína no concreto dosado com SAP.



A média dos 32 pontos verificados (16 de cada corpo de prova) e os valores médios apresentados dos dois corpos de prova de cada traço, podem ser verificados na figura 51.

Figura 51 – Profundidade de carbonatação aos 120 dias de câmara acelerada de carbonatação.



Entre os concretos com relações a/agl 0,25 e 0,32 apenas os que foram produzidos com aditivos mitigadores de retração apresentaram carbonatação, mas dentre estes como a profundidade da frente de carbonatação não passou dos 0,5mm aos 120 dias, que é um tempo muito prolongado de ensaio acelerado, pode-se dizer que estes aditivos não afetam o desempenho destes concretos em relação à carbonatação. Os concretos que foram produzidos com relação a/agl de 0,378 apresentaram as maiores frentes de carbonatação, o uso do polímero super-absorvente aumentou em 77% a carbonatação em relação ao concreto sem o aditivo.

Dentre os concretos sem aditivos mitigadores de retração, os produzidos com relações a/agl 0,25, 0,295 e 0,32 não apresentaram carbonatação aos 120 dias, porém o concreto produzido com relação a/agl 0,378 apresentou frente de carbonatação apreciável.

Os resultados encontrados estão próximos dos resultados de Kulakowski (2002), sendo que em seus ensaios os concretos produzidos com relações água/cimento entre 0,3 e 0,45 apresentaram nenhuma ou muito pouca carbonatação, portanto ressalta-se que aos 120 dias em câmara de carbonatação a 6% de concentração de dióxido de carbono os

concretos estudados apresentaram resultados de nenhuma ou baixíssima carbonatação.

### 4.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

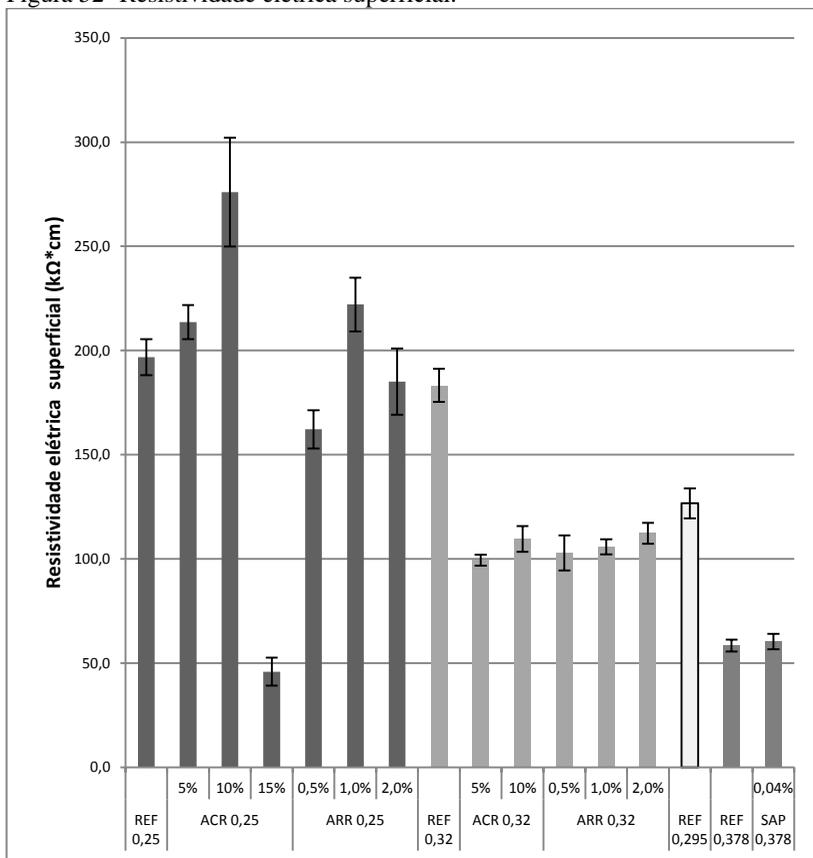
#### 4.3.1 Resistividade elétrica superficial

A figura 52 mostra a média dos valores resistividade elétrica superficial e os valores da dispersão de um desvio padrão, para este ensaio quanto maior for a resistividade elétrica do concreto melhor será a sua capacidade de resistir a penetração de agentes agressivos. Ao analisar os resultados, percebe-se que os concretos de relação  $a/agl$  0,25 produzidos com aditivo compensador de retração obtiveram valores maiores de resistividade elétrica, exceto o concreto com 15% de ACR, já o uso de aditivo redutor de retração teve resultados variados, onde para o teor de 0,5% a resistividade elétrica diminuiu, para o teor de 1,0% houve um aumento e o uso de 2,0% não alterou significativamente a resistividade elétrica.

Os concretos produzidos com aditivos mitigadores de retração e com relação  $a/agl$  0,32 obtiveram valores menores que o concreto sem aditivos, indicando que o uso destes aditivos para esta relação  $a/agl$  prejudica a resistividade elétrica do concreto.

O uso do polímero super-absorvente não produziu diferenças significativas nos resultados de resistividade elétrica.

Figura 52- Resistividade elétrica superficial.



Entre os concretos sem aditivos mitigadores de retração pode-se verificar que concretos com relações a/agl 0,25 e 0,32 obtiveram valores próximos, a tendência seria o concreto com relação a/agl 0,295 também ficar próximo, porém este apresentou um valor menor. O concreto referencia com relação a/agl 0,378 obteve um valor 70% menor que o concreto com relação 0,25, indicando que quanto maior a relação a/agl menor será a resistividade elétrica do concreto.

Segundo a tabela 26 apenas o concreto produzido com 10% de aditivo compensador de retração e com relação a/c 0,25 está na faixa de penetração de cloretos negligenciável (maior que 270 kΩcm), todos os outros concretos estão na faixa de muito baixa penetração de íons cloreto. Ao se comparar com os valores de carga total passante dos

ensaios de penetração de cloretos realizados percebe-se que esta tabela está mais restritiva que a ASTM 1202-12, pois conforme a tabela da ASTM 1202-12 cinco dos concretos produzidos estão na faixa de penetração negligenciável de íons cloreto, enquanto que na tabela de Pilvar *et al.* apenas um dos concretos foi classificado desta maneira.

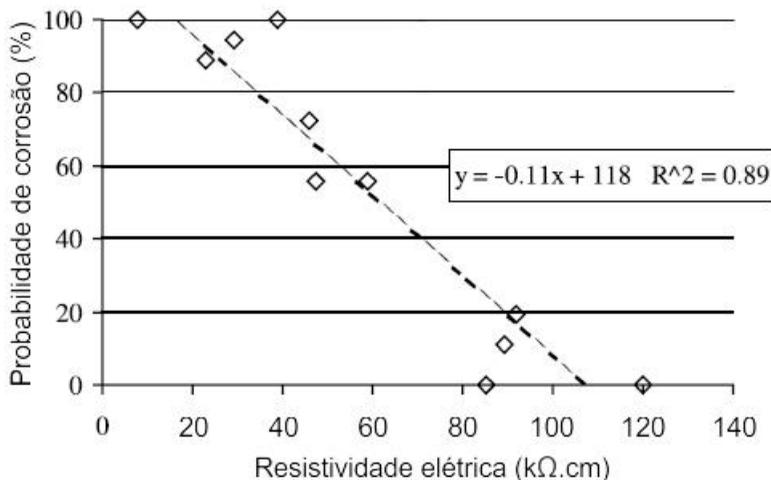
Tabela 26 – Classificação de concretos em relação a penetração de íons cloreto no RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) e resistividade elétrica aparente superficial.

| Penetração de íons cloreto | Carga total (Coulombs) | Resistividade elétrica superficial (kΩcm) |
|----------------------------|------------------------|---|
| Alta                       | >4000                  | <14                                       |
| Média                      | 2000 - 4000            | 14-25                                     |
| Baixa                      | 1000 - 2000            | 25-43                                     |
| Muito baixa                | 100 - 1000             | 43-270                                    |
| Negligenciável             | < 100                  | >270                                      |

Fonte: adaptado de Pilvar *et al.* (2015).

Polder (2006) estudou o efeito da resistividade elétrica na probabilidade de corrosão de uma estrutura de concreto armado, os concretos foram produzidos com relações a/c de 0,40 a 0,55. Os concretos foram expostos por 20 semanas à ciclos de molhagem e secagem em soluções de NaCl, a probabilidade de corrosão dos concretos foi estipulada na porcentagem de barras que apresentaram corrosão após os ciclos de molhagem e secagem, estas barras estavam a 30 mm da face exposta. Conforme pode ser visto na figura 53 a probabilidade de corrosão dos concretos com resistividades maiores que 90 kΩcm é de menos de 20%, chegando próximo de zero quando a resistividade é próxima a 110 kΩcm. Os concretos aqui estudados, conforme o estudo de Polder (2006) possuem probabilidade quase nula de corrosão, pois a maioria teve valores de resistividade elétrica próximos a 110 kΩcm.

Figura 53 – Probabilidade de corrosão após 20 semanas de ciclos de molhagem e secagem, em função da resistividade dos concretos, água/cimento de 0,40, 0,45 e 0,55.



Fonte: Adaptado de Polder (2006).

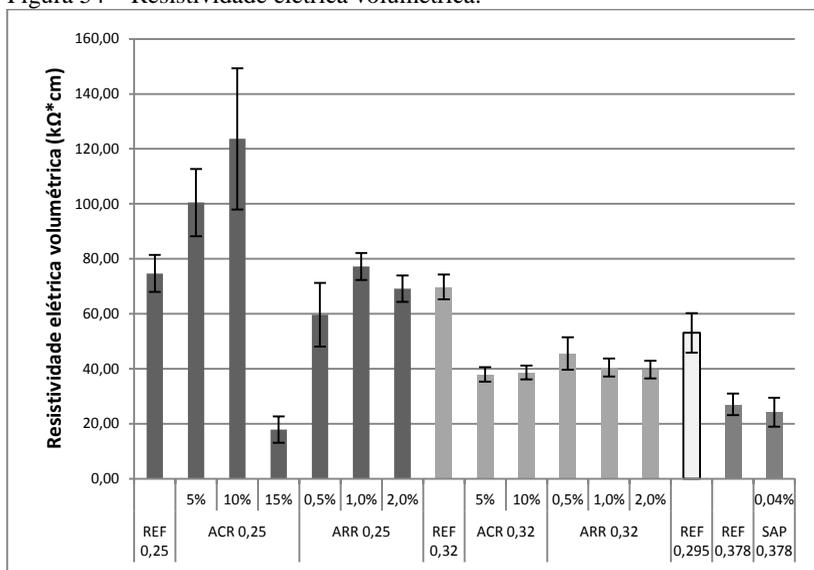
#### 4.3.2 Resistividade elétrica volumétrica

A figura 54 mostra a média dos valores resistividade elétrica volumétrica e os valores da dispersão de um desvio padrão. Ao analisar os resultados, percebe-se que para os concretos de relação  $a/agl$  0,25 produzidos com aditivo compensador de retração obtiveram valores maiores de resistividade elétrica, exceto o concreto com 15% de ACR, já o uso de aditivo redutor de retração teve resultados variados, onde para o teor de 0,5% a resistividade elétrica diminuiu, para o teor de 1,0% houve um aumento e o uso de 2,0% não alterou significativamente a resistividade elétrica.

Os concretos produzidos com aditivos mitigadores de retração e com relação  $a/agl$  0,32 obtiveram valores menores que o concreto sem aditivos, indicando que o uso destes aditivos para esta relação  $a/agl$  prejudica a resistividade elétrica do concreto.

O uso do polímero super-absorvente não produziu diferenças significativas nos resultados de resistividade elétrica.

Figura 54 – Resistividade elétrica volumétrica.



Entre os concretos referência pode-se verificar que concretos com relações a/agl 0,25 e 0,32 obtiveram valores próximos, a tendência seria o concreto com relação a/agl 0,295 também ficar próximo, porém este apresentou um valor menor. O concreto referência com relação a/agl 0,378 obteve um valor 63% menor que o concreto com relação 0,25, indicando que quanto maior a relação a/agl menor será a resistividade elétrica do concreto.

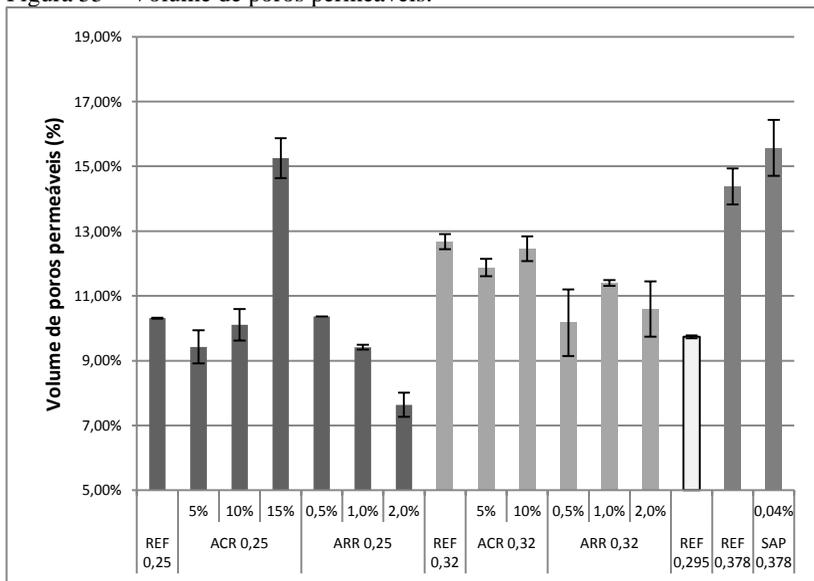
#### 4.4 PERMEABILIDADE EM ÁGUA

A figura 55 mostra a média do volume de poros permeáveis e os valores da dispersão de um desvio padrão. Para os concretos com relação a/agl 0,25 o uso do aditivo compensador de retração não alterou a porosidade do concreto quando comparado à referência, a não ser para o teor de 15%, já o uso de 1,0% e 2,0% de aditivo redutor de retração diminuiu a porosidade do concreto.

Para os concretos com relação a/agl 0,32 o uso de aditivo compensador de retração não alterou a porosidade quando comparado ao referência, já para os três teores de aditivo redutor de retração houve diminuição da porosidade.

O uso do polímero super-absorvente aumentou a porosidade do concreto.

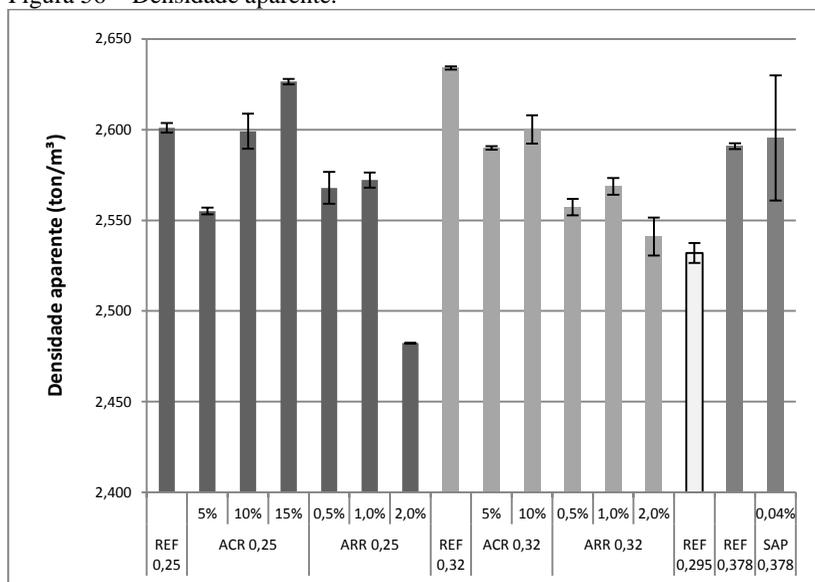
Figura 55 – Volume de poros permeáveis.



Entre os concretos referência os de relação a/agl 0,25 e 0,295 tiveram valores próximos de porosidade, o de relação a/agl 0,32 teve valores maiores seguido do concreto com relação a/agl 0,378, indicando que quanto maior a relação a/agl maior a porosidade do concreto.

A figura 56 mostra a média das densidades e os valores da dispersão de um desvio padrão. Os valores de densidade ficaram todos próximos, visto que utilizaram os mesmos materiais em sua composição.

Figura 56 – Densidade aparente.



#### 4.5 ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS REALIZADOS

A correlação é uma medida de relação entre duas variáveis. Um dos coeficientes de correlação mais utilizados é o de Person que mede o grau de correlação entre duas variáveis. Este coeficiente varia de menos um até um, onde o valor menos um significa uma correlação negativa perfeita entre duas variáveis e o valor um significa uma correlação positiva perfeita, já o valor zero significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson é chamado de coeficiente de determinação ( $r^2$ ). É a medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra, portanto quanto mais próximo de 1 estiver o coeficiente de determinação, melhor será o grau de explicação da variação de uma variável em termos da outra variável.

O estudo sobre as correlações entre os resultados obtidos foi realizado entre todas as variáveis, serão mostradas as correlações mais significativas, onde a tendência entre os valores foram maiores.

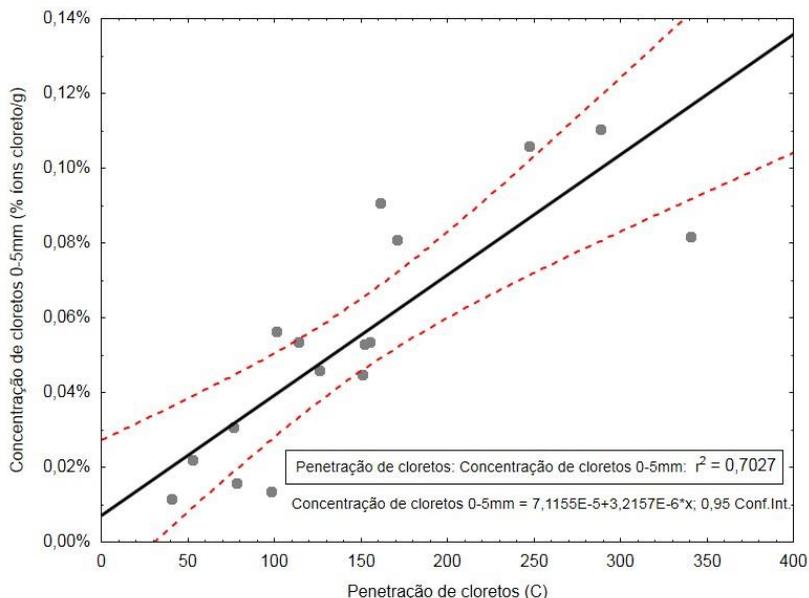
Foram avaliadas as correlações entre os parâmetros de penetração de cloretos com a concentração de cloretos de 0 a 5 mm, resistividade elétrica superficial, volume de poros permeáveis e com a resistência a compressão, além disso, também foi verificada a correlação entre a resistividade elétrica superficial com a resistividade elétrica volumétrica.

O programa computacional utilizado para realizar as correlações foi o STATISTICA (programa de análise de dados), versão 10, da StatSoft (2011).

#### **4.5.1 Correlação entre a penetração de cloretos e a concentração de cloretos de 0 a 5 mm**

Observa-se na figura 57 que a penetração de cloretos e a concentração de cloretos de 0 a 5 mm tem uma correlação significativa ( $r^2 = 0,7027$ ) e que são diretamente proporcionais. Portanto isto indica que o ensaio de penetração de cloretos é eficiente para medir a qualidade dos concretos frente a penetração dos íons cloreto, sem que sejam necessárias análises químicas e demorados ensaios de difusão, pois quanto maior o valor de corrente total passante maior a quantidade íons cloreto que ingressaram no concreto.

Figura 57 – Correlação entre penetração de cloretos e concentração de cloretos de 0 a 5mm.

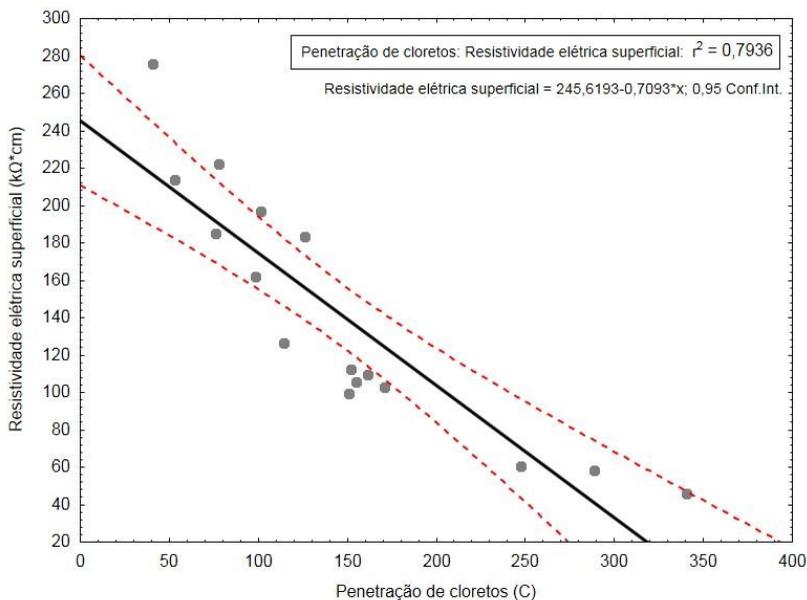


#### 4.5.2 Correlação entre a penetração de cloretos e a resistividade elétrica superficial

A figura 58 indica a correlação inversamente proporcional ( $r^2 = 0,7936$ ) da penetração de íons cloreto com a resistividade elétrica superficial, ou seja, quanto menor a quantidade passante de carga elétrica maior a resistividade do concreto. Isso é esperado porque a resistividade elétrica mede a resistência do concreto ao fluxo de uma corrente elétrica, portanto quanto maior a resistividade elétrica superficial do concreto menor será a corrente que irá passar, gerando menores valores de carga total passante.

Como o ensaio de resistividade elétrica superficial é muito mais rápido e pode ser feito nos locais das concretagens, é uma boa opção para se verificar a qualidade do concreto frente ao ingresso de íons cloreto para os concretos.

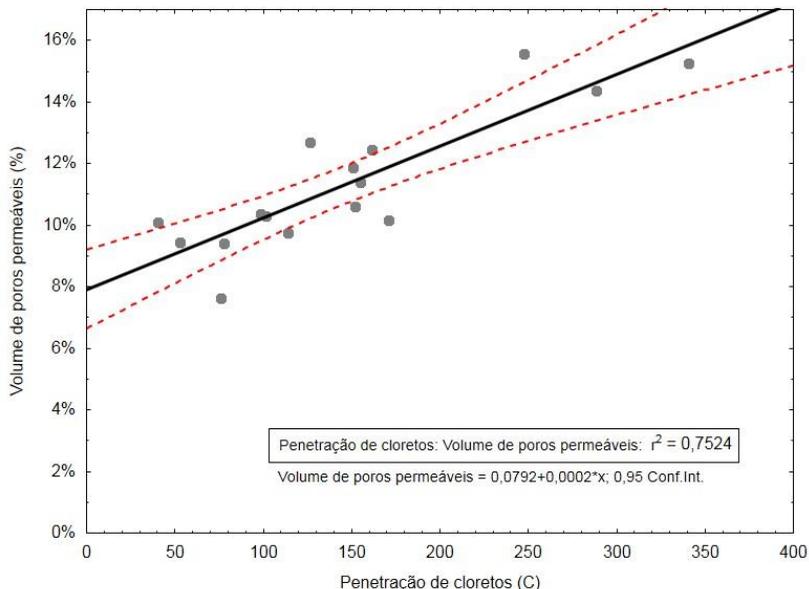
Figura 58 - Correlação entre penetração de cloretos e resistividade elétrica superficial.



#### 4.5.3 Correlação entre a penetração de cloretos e o volume de poros permeáveis

O volume de poros permeáveis dá uma boa indicação da qualidade do concreto frente aos íons cloreto, a força desta correlação diretamente proporcional é considerável ( $r^2=0,7524$ ) para os concretos analisados, portanto quanto maior o volume de poros permeáveis maior será a facilidade dos íons cloreto difundir no concreto (Figura 59). Esta relação direta já era esperada, pois a menor quantidades de vazios indica uma rede de poros mais refinada, portanto os íons cloreto são obrigados a difundir em uma rede de poros mais tortuosa e desconectada.

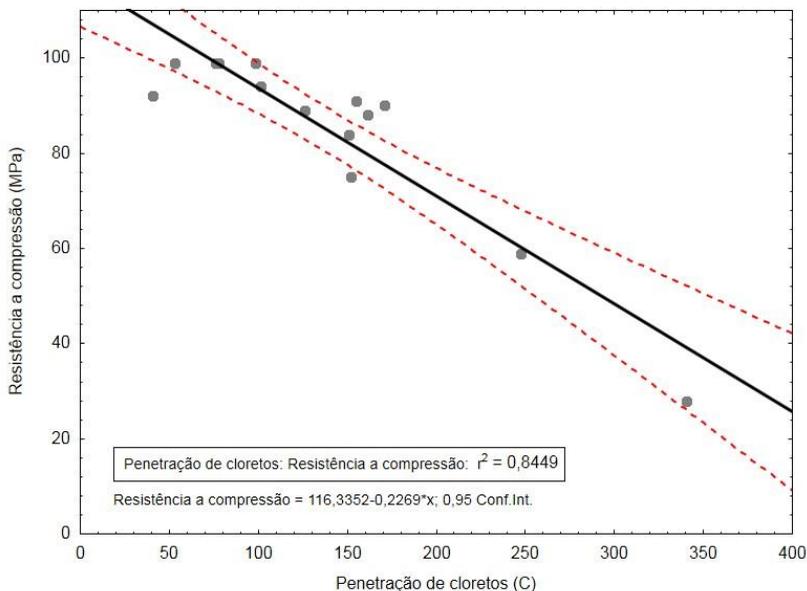
Figura 59 - Correlação entre penetração de cloretos e volume de poros permeáveis.



#### 4.5.4 Correlação entre a penetração de cloretos e a resistência a compressão

Na figura 60 pode-se observar a forte correlação inversamente proporcional ( $r^2= 0,8449$ ) entre a penetração de íons cloreto e a resistência à compressão, segundo Mehta e Monteiro (2008) os macroporos afetam a resistência do concreto, portanto quanto maior a resistência do concreto menor a quantidade de macroporos, consequentemente maior a dificuldade da penetração dos íons cloretos.

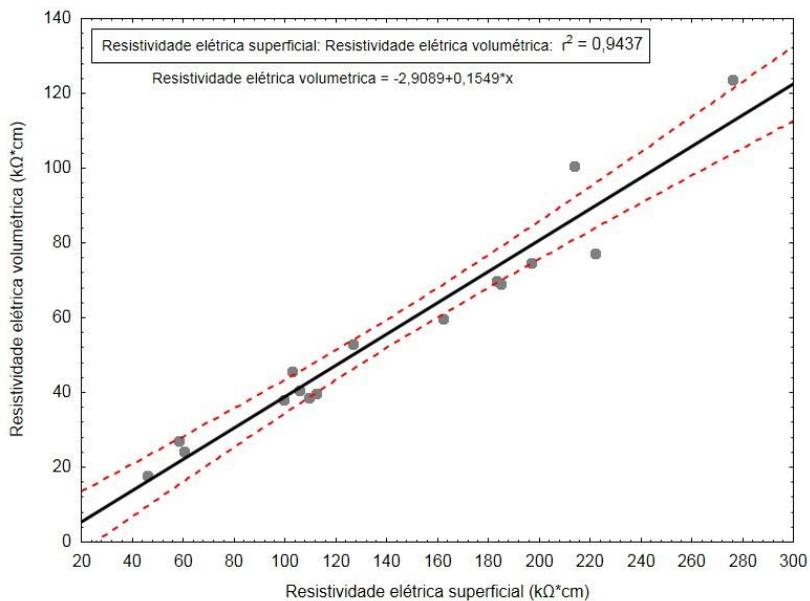
Figura 60 - Correlação entre penetração de cloretos e resistência a compressão.



#### 4.5.5 Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistividade elétrica volumétrica

A figura 61 mostra a forte correlação diretamente proporcional entre as resistividades elétrica superficial e volumétrica ( $r^2 = 0,9437$ ), os dois ensaios medem a resistividade elétrica de maneiras diferentes, a superficial emite uma corrente na superfície do concreto e faz as leituras da resistividade, a volumétrica faz a leitura da corrente que passa em todo volume do corpo de prova, a grande força entre as variáveis demonstra que ambos são eficientes em demonstrar a capacidade do concreto em resistir a passagem de corrente elétrica.

Figura 61 - Correlação entre resistividade elétrica superficial e resistividade elétrica volumétrica.





## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo estão apresentadas as principais conclusões, obtidas neste trabalho.

Em relação aos resultados de penetração de cloretos, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, todos os concretos analisados apresentaram penetrabilidade de íons cloreto muito baixa ou negligenciável, conforme ASTM C 1202/2012. Os resultados da análise de concentração de cloretos nos 5 primeiros milímetros das amostras de concreto demonstraram uma boa correlação com os resultados de penetração de cloretos ( $r^2=0,7027$ ), portanto a carga passante pelo ensaio de penetração acelerada de cloretos realmente indica a maior ou menor capacidade de entrada dos íons cloreto nos concretos.

O ensaio de penetração acelerada de cloretos pode ter seu tempo drasticamente reduzido de 20 horas para apenas 10 minutos, isso pode ser feito ao se extrapolar a carga que passa pelo corpo de prova durante estes 10 minutos, para as 20 horas do ensaio. Desta forma o resultado da carga total passante será muito próximo do valor caso o ensaio seja realizado por completo.

O ensaio de carbonatação acelerada também demonstra a qualidade dos concretos analisados quanto a durabilidade, onde houve na maior parte destes pouquíssima ou nenhuma carbonatação, sendo que apenas os concretos produzidos com relações a/agl 0,378 apresentaram frente de carbonatação maior que 1mm após os 120 dias de carbonatação acelerada.

Com os resultados obtidos de resistividade elétrica pode-se verificar a grande relação desta com a carga total passante do ensaio de penetração de cloretos ( $r^2=0,7936$ ), desta forma o ensaio de resistividade elétrica superficial (que é um ensaio muito rápido e não destrutivo) é um excelente parâmetro para se verificar a durabilidade do concreto. Uma simples verificação da resistividade elétrica nos corpos-de-prova antes do ensaio de resistência a compressão já seria um bom indicativo de durabilidade dos concretos, o que pode ser uma boa prática para os laboratórios de concreto.

A resistividade elétrica volumétrica, assim como a resistividade elétrica superficial, é um ótimo parâmetro para se verificar a durabilidade das estruturas de concreto, porém é menos prática. A grande relação entre as resistividade elétricas ( $r^2=0,9437$ ) demonstra que ambas demonstram bem a capacidade do concreto em resistir a passagem de uma corrente elétrica.

O ensaio de permeabilidade em água demonstrou ser um bom parâmetro de durabilidade, sendo que sua relação com a penetração de cloretos foi considerável ( $r^2=0,7524$ ), onde se verificou que quanto maior o volume de poros permeáveis maior será a penetração de cloretos. Os valores de densidade dos concretos ficaram muito próximos, não indicando, portanto, a qualidade dos concretos em relação à durabilidade.

A redução da tensão superficial provocada pelo uso do aditivo redutor de retração, a expansão gerada nas primeiras idades pelo uso do aditivo compensador de retração e o efeito de cura interna do uso do polímero superabsorvente não alteraram significativamente os parâmetros de durabilidade dos concretos estudados, portanto, estes podem ser utilizados em estruturas de concreto que necessitem de elevada durabilidade. Isso pode ser explicado pela pouca influência na porosidade quando do uso destes aditivos.

Ficou evidenciado que o teor de 15% de aditivo compensador de retração atuou de modo a reduzir os parâmetros de durabilidade, de tal forma que inviabiliza o emprego desse teor em concretos que necessitem de alta durabilidade. Isto pode estar relacionado à formação excessiva de etringita nestes concretos.

Observou-se que relação água/aglomerante é um dos fatores mais importantes no proporcionamento dos concretos quando se busca uma alta durabilidade, pois ele afeta diretamente na estrutura dos poros que por sua vez tem grande influência na penetração de agentes agressivos.

Desse modo, conclui-se que é possível dosar concretos autoadensáveis de alto desempenho com os aditivos mitigadores de retração estudados, sem perda de desempenho nos parâmetros de durabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- \_\_\_\_. **ASTM C642-13**. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. PA: ASTM International, 2013.
- \_\_\_\_. **ASTM C845-96**. Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement. PA: ASTM International, 1996.
- \_\_\_\_. **ASTM C1152-12**. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. PA: ASTM International, 2012.
- \_\_\_\_. **ASTM C1202-12**. Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. PA: ASTM International, 2012.
- \_\_\_\_. **NBR 5733**. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro. 1991.
- \_\_\_\_. **NBR 6118**: Projetos de Estruturas de Concreto. Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_. **NBR 15823-1:6**: Concreto auto-adensável. Rio de Janeiro, 2010.
- ABREU, Aguida G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- AÏTCIN, P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review, **Cement & Concrete Composites**, Volume 25, pg 409-420. 2003.
- AÏTCIN, P.C. **Binders for durable and sustainable concrete**. Taylor & Francis Group. London and New York. 2008.

AÏTCIN, P.C. **High-Performance Concrete**. Modern Concrete Technology 5. E&FN SPON. Canada. 2004.

American Concrete Institute – **ACI Committee 201-08**. Guide to Durable Concrete. 2008.

American Concrete Institute – **ACI Committee 222-01**. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. 2001.

American Concrete Institute – **ACI Committee 223-77**. Recommended Practice for the use of Shrinkage-Compensating Concrete. 1977.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements, **Cement and Concrete Research**, Volume 23, pg 724-742. 1993.

ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; d'ANDREA, R. Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices, **Journal of Nuclear Materials**, Volume 412, pg 209-216. 2011.

BASHEER, L.; BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 19, pg 682-690. 2005.

BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking, **Cement & Concrete Composites**, Volume 26, pg 677-685. 2004.

BENTZ, D.P. Curing with Shrinkage-Reducing Admixtures: Beyond Drying Shrinkage Reduction. **Concrete International**, v.27 (10), pg.55-60. 2005.

BERKE, N. S.; HICKS, M. C. Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data. In: CHACKER, V. **Corrosion forms and control of infrastructure**. Philadelphia: ASTM STP 1137, 1992. p. 207-231.

BOROSNYÓI, A. Long term durability performance and mechanical properties of high performance concretes with combined use of supplementary cementing materials, **Construction and Building Materials**, Volume 112, pg 307-324. 2016.

BOUNY, V. B.; CAPRA, B.; LAURENS S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Editores, J. P. Ollivier e A. Vichot. 1o Edicao. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2014. p. 255-326.

CALÇADA, Luciana M. L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.

CASCUDO, O.; CASAREK, H. Ações da Carbonatação no Concreto. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 01. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 849-886.

CHATTERJI, S. Transportation of ions through cement based materials. Part 1 fundamental equations and basic measurement techniques, **Cement and Concrete Research**, Volume 24, pg 907-912. 1994.

CUI, H; TANG, W; LIU, W; DONG, Z; XING. Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms, **Construction and Building Materials**, Volume 93, pg 522-527. 2015.

DEBOODT, T.; FU, T.; IDEKER, J. H. Durability assessment of high-performance concrete with SRAs and FLWAs, **Cement and Concrete Composites**, Volume 57, pg 94-101. 2015.

DINIZ, J. Z .F.; FERNANDES J. F.; KUPERMAN S. C. Retração e Fluência. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 01. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 673-703.

ELZBIETA J. R. The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes, **Construction and Building Materials**, Volume 38, pg 1204-1210, 2013

FIGUEIREDO, E. P. Ação dos Cloretos no Concreto. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 01. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 887-902.

FIGUEIREDO, E. P.; NETO, G. N. A.; ALMEIDA, P. A. O. Monitoração de Estruturas de Concreto. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 02. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 1233-1282.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 01. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 347-380.

HASHOLT, M. T.; JENSEN, O. M. Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers, **Cement & Concrete Composites**, Volume 55, pg 290-297. 2015.

HELENE, P. R. L.; MEDEIROS, M. H. F; BORBA, A. Y.; HOPPE, J. F. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas, **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, Volume 65, n. 4, pg 475-481. 2012.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction, **Cement and Concrete Research**, Volume 17, pg 489-504. 1987.

HOFFMANN, Anelise T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

HOLT, E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage, **Cement & Concrete Composites**, Volume 26, pg 521-530. 2004.

JALAL, M.; POULADKHAN, A.; HARANDI, O. F.; JAFARI, D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 94, pg 90-104. 2015.

JANG, S. Y.; KIM, B. S.; OH, B. H. Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests, **Cement and Concrete Research**, Volume 41, pg 9-19. 2011.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background, **Cement and Concrete Research**, Volume 31, pg 647-654. 2001.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials II. Experimental observations, **Cement and Concrete Research**, Volume 32, pg 973-978. 2002.

JIANG, C; GU, X; ZHANG, W; ZOU, W. Modeling of carbonation in tensile zone of plain concrete beams damaged by cyclic loading, **Construction and Building Materials**, Volume 77, pg 479-488. 2015.

KIRCHHEIM, Ana P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

KROPP, J.; HILSDORF, H. K. Performance Criteria for Concrete Durability, in: state-of-the-art report prepared by the RILEM technical committee 116-PCD, RILEM report 12. Editora E & FN Spon, Nova York. 2005.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 23, pg 1189-1195. 2009.

KULAKOWSKI, M. P; **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

LEEMANN, A; NYGAARD, P; KAUFMANN, J; LOSER, R. Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete, **Cement & Concrete Composites**, Volume 62, pg 33-43. 2015.

LOPES, Anne N. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

MAIA, L.; FIGUEIRAS, H.; NUNES, S.; AZENHA, M.; FIGUEIRAS, J. Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions, **Construction and Building Materials**, Volume 35, pg 304-312. 2012.

MCCARTER, W. J. A parametric study of the impedance characteristics of cement-aggregate systems during early hydration, **Cement and Concrete Research**, Volume 24, pg 1097-1110. 1994.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia.** Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 01. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 773-808.

MELO NETO, A.A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETE: MICROSTRUCTURE, PROPERTIES, AND MATERIALS.** 3ª Ed. Nova Iorque: Mcgraw Hill Professional, 2006.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. The transition zone between aggregate and type K expansive cement. **Cement and Concrete Research**, Volume 16, pg. 111-114. 1986.

MORA-RUANCHO, J.; GETTU, R.; AGUADO, A. Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 39, pg 141-146. 2009.

MORENO, F. P.; WU, Y. Y.; LIU, Y. Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time, **Construction and Building Materials**, Volume 48, pg 874-882. 2013.

MORRIS, W.; MORENO, E. I.; SAGUÉS, A. A. Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe, **Cement and Concrete Research**, Volume 26, pg 1779-1787. 1996.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5ª Edição. Londres-UK. Editora Pearson, 2011.

OLSSON, N.; BARAGHEL-BOUNY, V.; NILSSON, L. O.; THIERY, M. Non-saturated ion diffusion in concrete - A new approach to evaluate conductivity measurements, **Cement & Concrete Composites**, Volume 40, pg 40-47. 2013.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel, **Cement and Concrete Research**, Volume 16, pg 79-86. 1986.

PARK, S. S.; KWON, S. J.; JUNG, S. H. Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation, Volume 29, pg 183-192. 2012.

PAULETTI, Cristiane. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

PILAR, Ronaldo. **Avaliação nos estados fresco e endurecido de concretos autoadensáveis de alto desempenho com aditivos redutor e compensador de retração**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.

PILVAR, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAJAIE, H. New method development for evaluation concrete chloride ion permeability, **Construction and Building Materials**, Volume 93, pg 790-797. 2015.

PINA, F. B. C. Resistência à carbonatação de argamassas de reparação para estruturas em betão armado, estudo de argamassas cimentícias e cimentícias modificadas com polímeros. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa - PT.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation, **Construction and Building Materials**, Volume 15, pg 125-131. 2001.

POLDER, R. B. Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity, **Cement and Concrete Research**, Volume 24, pg 427-435. 2002.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 20, pg 858-865. 2006.

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

POURSAEE, A.; HANSSON, C. M. The influence of longitudinal cracks on the corrosion protection afforded reinforcing steel in high performance concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 38, pg 1098-1105. 2008.

RAISDORFER, Janderson W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

RAMAZANIANPOUR, A. A.; MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume, **Cement & Concrete Composites**, Volume 17, pg 125-133. 1995.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength, **Construction and Building Materials**, Volume 25, pg 2472-2479. 2011.

REPETTE, W. L. Concreto Autoadensável. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 02. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 1769-1806.

REPETTE, W. L. Concretos para Fins Especiais e de Última Geração. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 02. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 1807-1842.

RICHARDSON, D.; TUNG, Y.; TOBIAS, D.; HINDI, R. An experimental study of bridge deck cracking using type K-cement, **Construction and Building Materials**, Volume 52, pg 366-374. 2014.

RILEM 2000. Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion - Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **TC 154-EMC**. 2000. POLDER, R. Madrid-ES. In: *Materials and Structures*, vol 33. p. 603-611.

ROMANO, Fátima S. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

SABET, F. A.; LIBRE, N. A.; SHEKARCHI, M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash, **Construction and Building Materials**, Volume 44, pg 175-184. 2013.

SALIBA, J.; ROZIÈRE, E.; GRONDIN, F.; LOUKILI, A. Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage, **Cement & Concrete Composites**, Volume 33, pg 209-217. 2011.

SALVOLDI, B. G.; BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. G. Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation, **Construction and Building Materials**, Volume 85, pg 30-37. 2015.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability, **Construction and Building Materials**, Volume 73, pg 434-441. 2014.

SILVA, Fernanda G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.

SONG, H.W.; KWON, S. J. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, **Cement and Concrete Research**, Volume 37, pg 909-915. 2007.

TAYLOR, H. F. W., **Cement chemistry.** 2ª ed., London: Thomas Telford Publishing, 1997.

THANGAVEL, K; RENGASWAMY, N. S. Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete, **Cement & Concrete Composites**, Volume 20, pg 283-292. 1998.

TORRES, Ariela S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

TORRES-LUQUE, M.; BASTIDAS-ARTEAGA, E.; SCHOEFS, F.; SÁNCHEZ-SILVA, M.; OSMA, J. F. Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges, **Construction and Building Materials**, Volume 68, pg 68-81. 2014.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: **Concreto – Ciência e Tecnologia**. Editor, Geraldo C. Isaia. 1o Edicao, v. 02. Editora Ibracon. Sao Paulo. 2011. p. 1283-1326

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. 1ª Edição. Estocolmo-SE. Editora Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VITALI, Maria R. V. **Efeito do distanciamento ao mar da contaminação do concreto por cloretos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.

WEERDT, K.; COLOMBO, A.; COPPOLA, L.; JUSTNES, H.; GEIKER M. R. Impact of the associated cation on chloride binding of Portland cement paste, **Cement and Concrete Research**, Volume 68, pg 196-202. 2015.

YILDIRIM, H.; ILICA, T.; SENGUL, O. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration, **Construction and Building Materials**, Volume 25, pg 1282-1288. 2011.

YOON, S.; ÇOPUROGLU, O.; PARK, B. Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, **Atmospheric Environment**, Volume 41, pg 7274-7285. 2007.

ZHANG, T.; GJORV, O. E. An electrochemical method for accelerated testing of chloride diffusivity in concrete, **Cement and Concrete Research**, Volume 24, pg 1534-1548. 1994.