



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

CATARINA ACCIOLY ARY

**ESTUDO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS REDUTORES DE
PERMEABILIDADE NO CONCRETO**

FORTALEZA

2019

CATARINA ACCIOLY ARY

ESTUDO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS REDUTORES DE PERMEABILIDADE
NO CONCRETO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A1e Ary, Catarina Accioly.
Estudo do desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade no concreto / Catarina Accioly Ary. –
2019.
79 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. Aditivo redutor de permeabilidade. 2. Impermeabilização. 3. Porosidade. 4. Concreto. 5. Durabilidade.
I. Título.

CDD 620

CATARINA ACCIOLY ARY

ESTUDO DO DESEMPENHO DOS ADITIVOS REDUTORES DE PERMEABILIDADE
NO CONCRETO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 26/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Mylene Melo Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopolus
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me abençoado com o dom da vida e pelas suas bênçãos e proteção constante.

À minha família, por ser meu norte, direção e a minha certeza de que eu nunca vou estar sozinha. À minha mãe, que é exemplo de mãe, mulher, pessoa e engenheira, é quem me motiva a ser cada vez melhor e a quem eu devo tudo o que sou. Ao meu pai, por todo carinho e apoio transmitidos, obrigada por toda a segurança.

Agradeço também aos meus irmãos Camila, Calina e Cláudio e a minha avó Suzana por todo o apoio durante o período do trabalho.

Ao meu orientador, Professor Eduardo Cabral, pela oportunidade e confiança no meu potencial para a realização dessa pesquisa. À Professora Mylene Vieira, por toda a disponibilidade e prontidão para me ajudar todas as vezes que necessário.

Aos técnicos do laboratório de materiais de construção civil da UFC, Maurício e Helano, por me ajudarem diariamente com a realização de todos os ensaios, por todas as conversas e momentos de descontração. Agradeço também ao Manoel, Paulo Vitor e aos bolsistas de laboratório por toda a ajuda. Sem vocês nada disso seria possível, muito obrigada!

Às empresas que me apoiaram com a doação de amostras dos seus produtos para realização dos ensaios necessários.

Ao meu grupo de amigos que a UFC proporcionou e foram fundamentais para a conclusão dessa caminhada tão importante na minha vida. Em especial agradeço aos amigos Diego, Leonardo, Laís, Ana, Luciano, Priscila, Izabel e Filipe. Obrigada por terem facilitado essa caminhada e por terem sido apoio nos momentos difíceis, tenham certeza que sem vocês eu não teria chegado até aqui!

À minha amiga da vida, Thais, por todas as conversas, conselhos e por todo o apoio durante todas as fases da minha vida.

À Universidade Federal do Ceará pela oportunidade e por todos os anos vividos dentro desse campus tão maravilhoso.

A todos os professores que contribuíram para minha formação, por meio dos seus ensinamentos e conhecimentos transmitidos. Em especial a Professora Verônica, por ter facilitado a caminhada nesse ano de PG.

Obrigado a todos que de alguma forma contribuíram com a execução desse trabalho e com a minha formação. Hoje eu sou só gratidão! Obrigada.

RESUMO

Garantir a impermeabilidade do concreto figura como um dos principais sistemas de defesa contra qualquer processo físico-químico de deterioração. Nesse contexto, o uso de aditivos redutores de permeabilidade representa uma alternativa para melhorar a durabilidade para as estruturas em concreto armado. Os aditivos redutores de permeabilidade (PRA) podem ser classificados em duas categorias: aditivos redutores de permeabilidade sob condições hidrostáticas (PRAH) e sob condições não hidrostáticas (PRAN). Essa pesquisa tem como objetivo o estudo da influência dos dois tipos de aditivos (PRAH e PRAN) nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Para isso, amostras de cinco diferentes traços, sendo um traço referência (sem adições de PRA), dois traços com diferentes aditivos PRAH e outros dois traços com diferentes aditivos PRAN foram moldadas e ensaiadas. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, de absorção de água por imersão e por capilaridade, de penetração de água sob pressão, de resistividade elétrica volumétrica e de difusão de cloretos. Quanto às propriedades mecânicas, os resultados mostram que os aditivos PRA não alteram a resistência à compressão do concreto. Com relação aos ensaios de durabilidade, os resultados do ensaio de absorção por imersão indicam que os aditivos PRA não provocam alterações nos valores de absorção, tornando o ensaio inconclusivo sobre o desempenho dos aditivos. Para situações de penetração de água sob baixa pressão, como o ensaio de absorção por capilaridade, o aditivo PRAN se destacou na redução de absorção de água em relação ao traço referência, enquanto que para situações de incidência de água sob alta pressão, como o ensaio de penetração de água sob pressão, os aditivos PRAH tiveram uma redução de absorção mais significativa. Com relação à penetrabilidade de íons cloreto e à resistividade elétrica volumétrica, não existiu uma tendência relacionada ao tipo de aditivo, os resultados foram diferentes entre produtos, porém a relação entre os ensaios mostrou que um concreto mais resistivo é menos permissivo à passagem de íons cloreto (e de outros íons em geral). Por fim, foi feita uma comparação entre os resultados obtidos na pesquisa e os limites de permeabilidade admitidos pelo concreto da linha leste do metrô de Fortaleza, pode-se concluir que, baseado nos limites de absorção por capilaridade e por imersão, todos os traços estariam de acordo, porém, baseado nos limites de penetração de água sob pressão, nenhum dos traços estariam dentro dos limites estabelecidos.

Palavras-chave: Concreto. Impermeabilização. Durabilidade. Aditivo redutor de permeabilidade. Aditivo cristalizante. Aditivo hidrofugante.

ABSTRACT

Ensuring the impermeability of concrete should be the first line of the defense system against any deteriorating physicochemical process. In this context, the use of Permeability-Reducing Admixtures represents an alternative to guarantee greater durability for reinforced concrete structures. Permeability-Reducing Admixtures (PRA) can be classified into two categories: Permeability-Reducing Admixture for Hydrostatic conditions (PRAH) and non-hydrostatic conditions (PRAN). This research aims to study the influence of the two types of admixtures (PRAH and PRAN) on the mechanical and durability properties of concrete. Therefore, samples of five different traits, one reference mix composition (no PRA additions), two mix composition with different PRAH admixtures and two other mix composition with different PRAN admixtures were molded and tested. Tests of compressive strength, total immersion absorption, capillary water absorption, pressurized water penetration, volumetric electrical resistivity and resistance of concrete to chloride ion penetration were performed. As for mechanical properties, the results shows that PRA admixtures do not change the compressive strength of concrete. With regards to durability tests, the results of the total immersion absorption test indicate that PRA admixtures do not cause any changes in absorption values, making the test inconclusive about the performance of the admixtures. For low water pressure penetration situations, such as the capillary water absorption test, the PRAN admixture excelled in reducing water absorption over the reference mix composition, while for high water pressure incidence situations, such as the penetration of water under pressure test, PRAH admixtures had a more significant absorption reduction. Regarding the tests of penetrability of chloride ions and volumetric electrical resistivity, there was no trend related to the type of admixture, the results were different between products, but the correlation between the tests showed that a more resistive concrete is less permissive for the passage of chloride ions (and other ions in general). Finally, a comparison was made between the results obtained in the research and the minimum permeability limits allowed by the concrete of the eastern subway line of Fortaleza. Based on the capillarity and immersion absorption limits, all the mix compositions would be in agreement. However, based on the limits of water penetration under pressure, none of the mix compositions would be within the established limits.

Keywords: Concrete. Waterproofing. Durability. Permeability-reducing admixture. Crystalline admixtures. Water- repellent admixtures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e de desempenho das estruturas de concreto armado.	18
Figura 2 – Deterioração do concreto por reações químicas.....	22
Figura 3 – Fluxograma de metodologia desenvolvida no trabalho	34
Figura 4 – Processo de pesagem dos materiais. a) Balança utilizada no estudo, com precisão em gramas; b) Materiais pesados e separados por traço.....	39
Figura 5 – Moldagem dos CPs. a) Preparação das fôrmas; b) Colocação de concreto nas fôrmas; c) Uso de vibrador mecânico para vibração nos CPs; d) CPs moldados.....	41
Figura 6 - a) CPs desformados; b) CPs em cura.....	41
Figura 7 – Execução de ensaio de resistência a compressão. a) CPs retificados; b) CP na prensa hidráulica; c) CP rompido.	43
Figura 8- Etapas ensaio de absorção de água por imersão. a) CPs na estufa; b) CPs imersos em tanque com mergulhão para levar a água a ebulição	44
Figura 9 – Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	45
Figura 10 – Corpos de prova em ensaio de penetração de água sob pressão	46
Figura 11 – Aparelhagem do ensaio de penetrabilidade de cloretos	47
Figura 12 – Equipamento de ensaio Resipod Resistividade Volumétrica	49
Figura 13- Gráfico de comparação percentual relativa entre valores de resistência à compressão dos traços com aditivo quando comparados ao traço referência – Ensaio de resistência à compressão.....	51
Figura 14 - Relação gráfica da absorção de água por capilaridade (g/cm^2) por tempo.....	55
Figura 15 - Ascensão capilar máxima interna - Ensaio de absorção por capilaridade	56
Figura 16 – Ascensão capilar máxima interna - Ensaio de penetração de água sob pressão (Etapa 02)	58
Figura 17- Gráfico com variação percentual ascensão capilar média dos traços com aditivo em relação ao traço referência – Ensaio de penetração de água sob pressão	59
Figura 18- Comparação gráfica percentual de carga passante média dos traços com aditivo em relação ao traço referência.....	61
Figura 19- Comparação gráfica percentual do valor de resistividade entre traços - Ensaio de resistividade elétrica volumétrica	63
Figura 20 - Relação gráfica entre resultados dos ensaios de resistividade elétrica e de penetrabilidade de cloretos	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental	20
Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	20
Tabela 3 – Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal	20
Tabela 4 – Evolução do comportamento do concreto em função da elevação da temperatura ambiente	28
Tabela 5 – Características físicas dos agregados utilizados no estudo	35
Tabela 6 – Caracterização CP* V Apodi – Ensaio químicos (2019).....	35
Tabela 7- Caracterização CP* V Apodi – Ensaio físicos e mecânicos (2019).....	36
Tabela 8 – Características aditivo plastificante Miraset 30	37
Tabela 9 – Aditivos redutores de permeabilidade utilizados no estudo.....	38
Tabela 10 – Dosagem adotada para cada aditivo.....	39
Tabela 11 – Tabela de traços estudados nesta pesquisa	39
Tabela 12 - Ensaio realizados para esta pesquisa.....	42
Tabela 13 - Ensaio resistência à compressão	43
Tabela 14 - Ensaio de absorção de água por imersão	44
Tabela 15 – Ensaio de absorção de água por capilaridade	45
Tabela 16 – Ensaio de penetração de água sob pressão.....	46
Tabela 17 – Classificação proposta pela ASTM C 1202 (2012) para determinação do nível de penetrabilidade de íons cloreto no concreto.	48
Tabela 18 – Ensaio de penetrabilidade de cloretos.....	48
Tabela 19 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica.....	50
Tabela 20 – Resultado do ensaio resistência a compressão (07 dias).....	51
Tabela 21 – Resultado do ensaio resistência a compressão (28 dias).....	51
Tabela 22 – Resultados do ensaio de absorção por imersão.....	53
Tabela 23 – Valores de capilaridade do concreto medidos com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h de ensaio (g/cm ²).....	54
Tabela 24 – Variação de capilaridade dos traços com aditivo em relação ao traço de referência, para à medição realizada com 72 horas de ensaio (%)	55
Tabela 25 – Resultado da altura ascensão capilar máxima interna das amostras, com valor de média, desvio padrão e coeficiente de variância - Ensaio de absorção por capilaridade	56
Tabela 26 – Resultado da altura ascensão capilar máxima interna, com valor de média, desvio padrão e coeficiente de variância - Ensaio de penetração de água sob pressão	58

Tabela 27 - Carga passante medida (em Coulombs) para os diferentes traços - Ensaio de penetrabilidade de íons cloretos	60
Tabela 28 – Resultado ensaio resistividade elétrica volumétrica (Ωm).....	62
Tabela 29 - Comparação entre limites de permeabilidade admitidos pelo concreto da linha leste do metrô de Fortaleza e resultados obtidos nos ensaios realizados.....	65
Tabela 30 - Dimensões corpos de prova - Ensaio de absorção de água por capilaridade	77
Tabela 31 – Pesagem das amostras (g) - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	77
Tabela 32 – Pesagem das amostras (g) – Ensaio de absorção por imersão	78
Tabela 33 - Leituras individuais de resistividade - Ensaio resistividade volumétrica.....	79
Tabela 34 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de Resistividade Volumétrica	79
Tabela 35 - Cálculo da resistividade volumétrica.....	80
Tabela 36 - Leituras realizadas no ensaio de penetrabilidade de íons cloreto	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Água/Cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade americana de ensaios e materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
ACI	Instituto Americano de Concreto (<i>American Institute of Concrete</i>)
C ₃ A	Aluminato de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de Prova
CP*	Cimento Portland
DMC	Dimensão máxima característica
FCK	Resistência característica do concreto
MF	Módulo de finura
MPa	Mega Pascal
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma brasileira regulamentada pela ABNT
PRAs	Aditivos redutores de permeabilidade (<i>Permeability-Reducing Admixtures</i>)
PRAN	Aditivo de redução de permeabilidade para condições não hidrostáticas (<i>Permeability-Reducing Admixture for Non-hydrostatic conditions</i>)
PRAH	Aditivos de redução de permeabilidade para condições hidrostáticas (<i>Permeability-Reducing Admixture for Hydrostatic conditions</i>)
RS	Resistente à sulfato
Traço A	Traço referência + produto A
Traço B	Traço referência + produto B
Traço C	Traço referência + produto C
Traço D	Traço referência + produto D

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Durabilidade do concreto	17
2.1.1	<i>Agressividade ambiental</i>	19
2.1.2	<i>Mecanismos de degradação do concreto</i>	21
2.1.2.1	<i>Ataques Químicos</i>	22
2.1.2.1.1	<i>Ataque por Sulfatos</i>	23
2.1.2.1.2	<i>Ataque por cloretos</i>	24
2.1.2.1.3	<i>Ataque por CO₂ (Carbonatação)</i>	25
2.1.2.1.4	<i>Reações com agregados</i>	26
2.1.2.2	<i>Ataques Físicos</i>	27
2.1.2.3	<i>Ataques Biológicos</i>	27
2.1.2.4	<i>Ataques Mecânicos</i>	27
2.2	Aditivos para concreto	28
2.2.1	<i>Aditivos redutores de permeabilidade</i>	29
2.2.1.1	<i>Aditivos de redução de permeabilidade para condições hidrostáticas</i>	31
2.2.1.2	<i>Aditivos de redução de permeabilidade para condições não hidrostáticas</i>	32
3	MATERIAIS E MÉTODO	34
3.1	Materiais utilizados	35
3.1.1	<i>Agregados</i>	35
3.1.2	<i>Aglomerante (cimento)</i>	35
3.1.3	<i>Aditivos</i>	36
3.1.3.1	<i>Aditivo plastificante</i>	37
3.1.3.2	<i>Aditivos redutores de permeabilidade</i>	37
3.2	Definição dos traços	38
3.3	Preparo do concreto e moldagem dos corpos de prova	39
3.3.1	<i>Pesagem dos materiais</i>	39
3.3.2	<i>Execução do concreto</i>	40
3.3.3	<i>Moldagem dos corpos de prova e cura</i>	40
3.4	Execução ensaios	42
3.4.1	<i>Ensaio mecânicos</i>	42
3.4.1.1	<i>Resistência à compressão</i>	42
3.4.2	<i>Ensaio de durabilidade</i>	43
3.4.2.1	<i>Absorção de água por imersão</i>	43
3.4.2.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	45
3.4.2.3	<i>Penetração de água sob pressão</i>	45
3.4.2.4	<i>Penetrabilidade de cloretos</i>	47
3.4.2.5	<i>Resistividade elétrica volumétrica</i>	48
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
4.1	Resistência à compressão	50
4.2	Absorção de água por imersão	53

4.3	Absorção de água por capilaridade	54
4.4	Penetração de água sob pressão	57
4.5	Penetrabilidade de íons cloretos	60
4.6	Resistividade elétrica volumétrica	62
4.7	Relação entre resultados de resistividade elétrica volumétrica e penetrabilidade de íons cloretos.	64
4.8	Comparativo dos resultados encontrados nos ensaios de durabilidade com a especificação utilizada para o concreto na obra da linha leste do metrô da cidade de Fortaleza. 65	
5	CONCLUSÃO	66
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – RELATÓRIO DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (IDADE 7 DIAS)	75
	APÊNDICE B – RELATÓRIO DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (IDADE 28 DIAS)	76
	APÊNDICE C – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	77
	APÊNDICE D – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	78
	APÊNDICE E – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS – RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	79
	APÊNDICE F – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS – PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETOS	81

1 INTRODUÇÃO

Conhecido por unir a boa resistência à compressão do concreto com a boa resistência à tração do aço, a técnica do concreto armado traz como resultado um material econômico, de simples utilização, por não exigir uma mão de obra especializada, e versátil, uma vez que pode assumir diferentes formas, sendo, por isso, o concreto, um dos materiais mais consumidos na construção civil. Porém, apesar dos resultados satisfatórios quanto a desempenho, resistência e qualidade, o emprego do concreto armado demanda certa atenção durante as fases de dimensionamento e execução. O estudo do traço e da resistência, além da dosagem, manuseio e cura adequados podem ser responsáveis por otimizar a vida útil e o desempenho da estrutura (LAPA, 2008).

Uma das desvantagens que o concreto pode apresentar é a sua alta porosidade, a qual pode ser responsável por grande parte das manifestações patológicas comumente reportadas nas construções. Problemas como infiltrações, penetração de cloretos e carbonatação, causadas por diferentes agentes agressores que penetram na massa de cimento, podem ser responsáveis pelo comprometimento da estrutura e, conseqüentemente, pelo não-atendimento da vida útil de projeto estabelecida.

A entrada desses agentes agressores no concreto pode acontecer por mecanismos de absorção capilar, de permeabilidade e de difusão. De acordo com Sato (1998), “A taxa de transporte de agentes agressivos por meio da absorção e permeabilidade é governada pela taxa de penetração de água, pois somente através da umidade é que os agentes são transportados para o interior do concreto”.

Portanto, visando ao aumento da durabilidade do concreto armado e, conseqüentemente, à proteção da sua armadura, reduzir sua porosidade aparece como uma alternativa adequada para controle da entrada dos agentes agressivos, bem como para controle da umidade, a qual pode ser responsável pela deterioração do concreto.

Sabendo dos danos que a água pode causar para a durabilidade estrutural e, por isso, considerando a necessidade de construir estruturas menos permeáveis e mais resistentes aos ataques dos agentes externos, Moreira (2016) afirma que “um grande número de pesquisadores tem estudado diferentes formas de produzir concretos com uma microestrutura mais densa, a partir do uso de relação água/cimento mais baixa, da incorporação de adições minerais e um aumento no consumo de Cimento Portland”.

Em contrapartida, Moreira (2016) acrescenta que “estas particularidades que os tornam tão vantajosos também trazem desvantagens, sendo a principal delas a formação de

fissuras em função dos diversos processos de retração”. A formação de fissuras no concreto é responsável pelo comprometimento da integridade estrutural, aumentando a permeabilidade e facilitando a difusão dos agentes externos no interior do concreto, de tal forma que apesar das vantagens que a diminuição da relação água/cimento pode trazer, suas desvantagens podem fazer com que essa técnica sozinha se torne inviável.

Assim, como meio alternativo para conter a porosidade e garantir a vida útil das edificações, temos a impermeabilização, a qual, de acordo com a NBR 9575 (ABNT 2010), pode ser definida como o “conjunto de operações e técnicas construtivas (serviços), compostos por uma ou mais camadas, que tem como finalidade proteger as estruturas contra a ação deletéria de fluidos, de vapores e da umidade”.

A técnica de impermeabilizar confere conforto aos usuários e pode ser encarada com uma das principais etapas da construção. Essa, a qual é capaz de proteger e ampliar a vida útil das construções, é fundamental para a garantia da estanqueidade e, de acordo com o Instituto Brasileiro de Impermeabilização (2018), “não há como garantir que uma estrutura seja durável sem que haja estanqueidade”. Portanto, sabendo da importância da durabilidade das estruturas em concreto armado, pode se considerar que a impermeabilidade do concreto deve ser a primeira linha do sistema de defesa contra qualquer processo físico-químico de deterioração (P.K. MEHTA, 1994).

Atualmente, na maioria das obras, a impermeabilização é realizada com produtos de base cimentícia, de base polimérica ou de base asfáltica, os quais atuam na formação de uma barreira superficial que age de forma a evitar a percolação de água ou de outras intempéries. Porém, esses materiais apresentam como desvantagem sua vulnerabilidade a deterioração causada por agentes agressores e aos agentes inerentes ao ambiente em geral, como a radiação ultravioleta (PEREIRA, 2018).

Dessa forma, o mercado visando à proteção das estruturas e o aumento da sua durabilidade, como também, buscando minimizar os problemas decorrentes da ação da água, apresenta como uma solução, já em uso nos dias atuais, a impermeabilização a partir da incorporação de aditivos ao concreto, os quais têm como objetivo a redução da permeabilidade do mesmo por meio de diferentes combinações químicas.

De acordo com o ACI 212.3R-10, os aditivos redutores de permeabilidade – *Permeability-Reducing Admixtures* (PRA) podem ser classificados em aditivos redutores de permeabilidade sob condições hidrostáticas - *Permeability-Reducing Admixtures for Hydrostatic Conditions* (PRAH), os quais buscam a impermeabilização a partir da cristalização dos poros e das capilaridades do concreto e os aditivos redutores de

permeabilidade sob condições não hidrostáticas - *Permeability-Reducing Admixtures for Non-Hydrostatic Conditions* (PRAN), os quais fecham os poros impedindo a circulação da água de forma superficial. Tais aditivos costumam ser uma solução eficaz para situações onde o objetivo principal é reduzir a passagem de água no interior da estrutura, atuando como uma ferramenta para melhorar a estanqueidade e a durabilidade do concreto.

1.1 Justificativa

Quando comparados aos sistemas de impermeabilização convencionais, os aditivos redutores de permeabilidade, de acordo com informações obtidas pelos fabricantes, figuram como uma solução benéfica em decorrência da sua eficiência de custo e de tempo. Visto isso, sua popularidade aumentou nas últimas duas décadas, porém, as informações com relação ao seu desempenho ficam limitadas as informações disponíveis nas respectivas fichas técnicas e dados de evidências experimentais. Dessa forma, por meio de ensaios mecânicos e de durabilidade, esse estudo busca analisar o real desempenho de diferentes aditivos (PRAH e PRAN) no concreto a partir da fixação de um traço referência, isolando a influência de outros fatores que possam afetar a permeabilidade das amostras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de aditivos redutores de permeabilidade nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar possíveis modificações na resistência à compressão do concreto resultantes da incorporação de aditivos PRAN e PRAH;
- b) Avaliar a influência dos aditivos PRAN e PRAH nas propriedades de durabilidade do concreto;
- c) Correlacionar e comparar os resultados obtidos de desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade com os limites de permeabilidade admitidos para o concreto da linha leste do metrô de Fortaleza.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Durabilidade do concreto

Para as construções em concreto armado, a resistência característica do concreto é uma propriedade diretamente ligada à segurança e à estabilidade estrutural. A execução do ensaio de resistência à compressão para controle do F_{CK} é importante, pois assegura o controle da qualidade esperada do concreto, podendo detectar possíveis desvios, seja com relação à dosagem, seja quanto a seus insumos. Detectado um desvio, soluções técnicas viáveis podem ser tomadas de modo a corrigir o problema, assegurando a vida útil da estrutura.

Apesar da segurança estrutural ser diretamente condicionada pela resistência do concreto adotada, a durabilidade do concreto também se configura como uma propriedade significativa para a manutenção de uma estrutura de forma saudável. Desse modo, assegurar que o concreto utilizado tenha baixo índice de porosidade e de permeabilidade é uma forma de garantir que as estruturas estarão menos susceptíveis ao transporte interno de água, de gases e de outros agentes agressivos que possam estar inseridos no ambiente, garantindo então uma menor degradação e, conseqüentemente, um concreto e uma edificação mais durável (SOUZA; RIPPER, 1998).

A quantidade de água no concreto e a relação de água/cimento adotada para o traço serão responsáveis por determinar características fundamentais do concreto como densidade, compacidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, além de sua resistência mecânica. Portanto, a dosagem da água é diretamente responsável pelos indicadores de qualidade do material, primeiro passo para a classificação de uma estrutura como durável ou não (SOUZA; RIPPER, 1998).

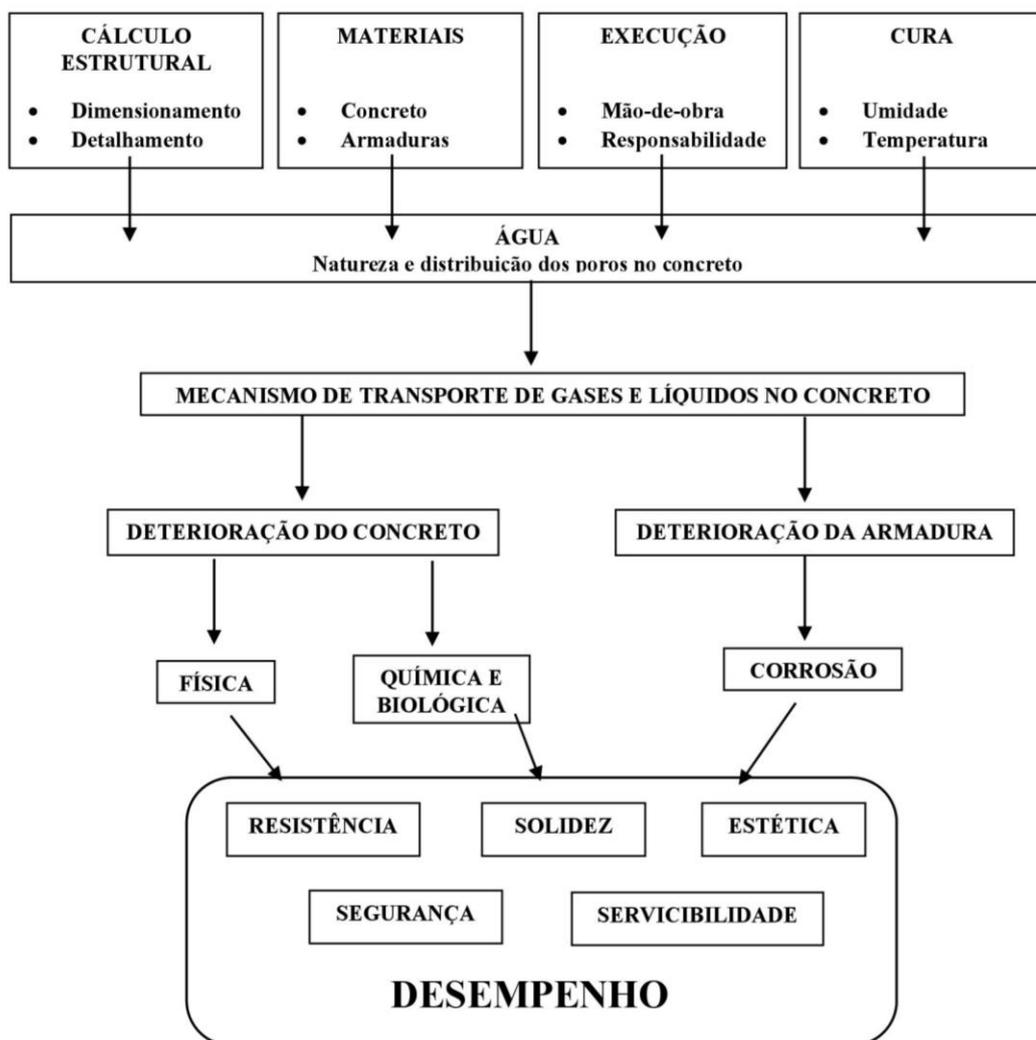
De acordo com Cascudo (2015), o conceito de durabilidade “passou de mera constatação daquilo que vence o tempo para algo que mantém seus aspectos funcionais e propriedades fundamentais ao longo do tempo”. O autor acrescenta que a durabilidade será “conquistada com a boa execução, com a definição correta e conforme os materiais e componentes de construção, e com um adequado uso e operação, que contemple as ações de manutenção preventiva e, quando necessária, corretiva”.

Portanto, a durabilidade pode ser entendida como a capacidade de determinado material ou produto em manter suas características funcionais, por determinado período de tempo, sem que sejam necessárias grandes manutenções ou grande reparações. Cascudo (2015) acrescenta que “o concreto durável aplicável a uma estrutura é aquele suficiente para alcançar

a vida útil estabelecida em projeto, o que significa considerar aspectos da agressividade do ambiente, ao mesmo tempo em que deverá ser economicamente viável e competitivo”.

Assim, visto que a garantia de uma estrutura durável depende de diversos fatores além da resistência característica do concreto, o controle da permeabilidade e da entrada dos agentes agressores faz parte dos requisitos indispensáveis para que as edificações estejam aptas a atingir a vida útil estabelecida, conforme representado na Figura 1, a qual ilustra o inter-relacionamento entre a durabilidade e o desempenho das estruturas.

Figura 1 – Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e de desempenho das estruturas de concreto armado.



Fonte: adaptado de SOUZA; RIPPER (1998)

2.1.1 *Agressividade ambiental*

São comuns as manifestações patológicas no concreto ocasionadas por ataque dos agentes agressivos presentes no meio ambiente. A interação entre esses agentes e a estrutura pode se dar por diferentes formas: pelo ar, pela água da chuva ou das marés e em condições de imersão (SOUZA, RIPPER, 1998).

Assim, sabendo que a estrutura pode ser comprometida em função do local no qual está inserida, pode-se afirmar que “a agressividade do meio é a responsável pela velocidade e intensidade da corrosão do concreto e da armadura, em função desta agressividade é que as novas exigências serão impostas à estrutura de concreto” (ALBUQUERQUE; OTOCH, 2005).

Dessa forma, como meio de controlar os danos causados pelo comportamento dos agentes agressores, tornou-se importante o desenvolvimento de documento regulador das classes de agressividade ambiental.

Segundo Marcelino (2008),

Estudos realizados a partir de 1980 fizeram com que a NBR 6118, editada em março de 2003, alterasse parâmetros importantes em função de fatores que até então eram desconsiderados durante o projeto e execução de uma estrutura, tais como microclima, agentes agressivos (CO_2 , íons cloreto), carbonatação e despassivação. Estes termos ainda são desconhecidos em boa parte pelo meio técnico e podem levar à corrosão das armaduras, uma das mais importantes patologias e responsável pelo envelhecimento precoce da estrutura, principalmente aquelas próximas ao mar e sujeitas ao efeito da brisa marinha, rica em íon cloreto e umidade ideal para corrosão.

A Tabela 1 apresenta as classes de agressividade ambiental segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). De acordo com a norma, tal classificação tem como base as ações físicas e químicas atuantes sobre as estruturas de concreto, desconsiderando ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica, retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental

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

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), sabendo qual a região onde a edificação estará inserida, e, conseqüentemente, sua classe de agressividade ambiental, visando concretos de alta durabilidade, fatores como espessura de cobrimento da armadura, resistência à compressão e dosagem do concreto (relação água e cimento) também serão determinados a partir do nível de agressividade do ambiente.

A Tabela 2 apresenta a correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto e a Tabela 3 mostra a relação entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

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

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

Tabela 3 – Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal

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

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

2.1.2 Mecanismos de degradação do concreto

Pode-se considerar que os mecanismos de degradação do concreto podem ser divididos em processos mecânicos, físicos, químicos, biológicos e eletromagnéticos. Geralmente, a deterioração da estrutura ocorre a partir de uma soma de fatores determinados a partir das propriedades físico-químicas do concreto e da forma como ele está exposto ao ambiente. Os processos de degradação podem ser responsáveis pelo comprometimento das funções estruturais e nem sempre podem ser vistos a olho nu (LAPA, 2008).

Dessa forma, ao se analisar uma estrutura de concreto e perceber que ela apresenta sinais de degradação como, por exemplo, fissurações, destacamento ou desagregação, pode se considerar que a estrutura está “doente” e que existe algo que deve ser corrigido para preservar sua segurança estrutural. Identificado o problema na estrutura, “é absolutamente necessário entender-se o porquê do surgimento e do desenvolvimento da doença, buscando esclarecer as causas, antes da prescrição e consequente aplicação do remédio necessário” (SOUZA; RIPPER, 2009).

Ainda segundo Souza e Ripper (2009), “O conhecimento das origens da deterioração é indispensável, não apenas para que se possa proceder aos reparos exigidos, mas também para se garantir que, após reparada, a estrutura não volte a se deteriorar. ”

As causas originárias dos problemas patológicos podem ser dos mais diferentes tipos. Fatores como deficiências de concretagem, deficiência dos escoramentos e fôrmas, erros de projeto, uso inadequado de determinados materiais e causas naturais – químicas, físicas, biológicas -, podem ser responsáveis pela degradação da estrutura. Na maioria dos casos, o problema originário não é apenas um, a soma de erros durante o processo construtivo é responsável pelo surgimento das manifestações patológicas que prejudicam o correto desempenho da edificação. (SOUZA; RIPPER, 2009)

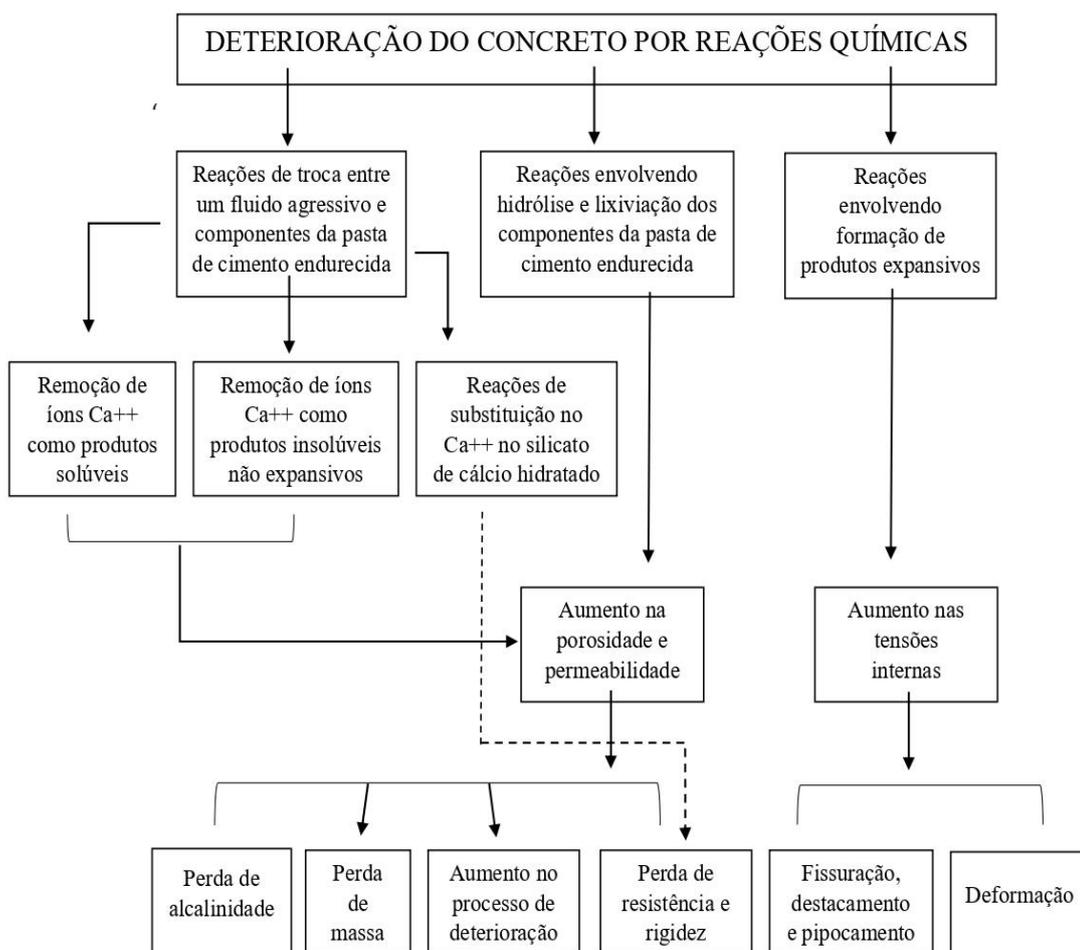
Considerando os casos de degradação causada pelos agentes agressores do ambiente, não importando qual seja a forma de interação, o ataque ao concreto é tão maior quanto for sua fissuração e sua porosidade, pois, quando a quantidade de vazios aumenta, pode-se considerar que o concreto fica “desprotegido” e o ataque por agentes químicos e físicos por dentro da massa de cimento fica facilitada, sendo responsável por causar danos diversos. Portanto, pode-se assumir que a qualidade do concreto está correlacionada à sua permissividade com relação ao transporte de certos íons, gases e líquidos através de seus poros. (ROQUE; MORENO JUNIOR, 2005).

Podem ser citados como os tipos de ataques causados por agentes agressores ao concreto os ataques químicos, físicos, biológicos e mecânicos.

2.1.2.1 Ataques Químicos

Para obtenção de uma estrutura durável, estratégias para o controle dos ataques químicos à estrutura devem ser desenvolvidas. Ao penetrarem no concreto, os agentes químicos agressores do ambiente podem causar problemas como a expansão da massa de cimento, a qual terá como consequência direta o aparecimento de fissuração externa com consequente desagregação do concreto. Metha e Monteiro (1994) ilustram de forma esquemática a deterioração do concreto por meio das reações químicas, conforme representado na Figura 2.

Figura 2 – Deterioração do concreto por reações químicas



Fonte: adaptado de Metha e Monteiro (1994)

Os ataques químicos ao concreto são diretamente influenciados pela composição química da pasta de cimento. O controle dos poros na estrutura e das fissuras é indispensável para um concreto durável e uma estrutura saudável. Entre os mecanismos conhecidos de ataques químicos podem ser citados o ataque por sulfatos, por cloretos, por dióxido de carbono e as reações com agregados.

2.1.2.1.1 Ataque por Sulfatos

De acordo com Brandão (1998), pode-se considerar que os sulfatos são elementos muito agressivos. Quando no estado sólido, esses sais não são prejudiciais ao concreto, porém, quando em solução, os sulfatos de magnésio, cálcio, sódio, potássio e amônio podem reagir com a pasta de cimento endurecida e levar à total desagregação do concreto.

Brandão (1998, p. 57) acrescenta que,

O ataque se dá pelas reações dos sulfatos com o hidróxido de cálcio livre (CaOH_2) e com os aluminatos de cálcio hidratados (C_3A), resultantes da hidratação do cimento. Os produtos dessas reações, respectivamente o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e o sulfoaluminato de cálcio conhecido por etringita ou Sal de Candlot (...), cristalizam-se com a água num processo acompanhado por aumento de volume. Esta expansão é seguida de fissuração progressiva de configuração irregular, facilitando o acesso de novas soluções de sulfato.

Portanto, os sulfatos, quando em contato com o concreto, reduzem seu pH e reagem com compostos presentes no cimento dando origem a produtos expansivos, que acarretam para o concreto problemas como fissuração, descamação, amolecimento e desagregação da massa, ou seja, deixam a estrutura vulnerável e desprotegida contra ações externas.

Segundo Brandão (1998), “a velocidade com que se dá o ataque por sulfatos depende de diversos fatores, dentre eles: a concentração de sulfatos na solução, permeabilidade do concreto, tipo de cimento e a quantidade de água disponível para o processamento das reações”. O uso de cimentos resistentes a sulfatos (RS), pelo baixo teor de C_3A e a adição de pozolanas, que melhoram a densidade do concreto, são indicados para minimizar o ataque por sulfatos nas estruturas de concreto.

2.1.2.1.2 Ataque por cloretos

De acordo com Souza e Ripper (1998), “os cloretos podem ser adicionados involuntariamente ao concreto a partir da utilização de aditivos aceleradores do endurecimento, de agregados e de águas contaminadas, ou a partir de tratamentos de limpeza realizados com ácido muriático”.

Uma vez adicionados as estruturas de concreto, os cloretos atuam de forma severa. Os íons cloro têm sua ação mais efetiva em regiões litorâneas, devido à proximidade com as águas salinas do mar, as quais contêm diversos sais dissolvidos em concentrações altas. Segundo Brandão (1998), “a solução salina penetra no concreto e é transportada por efeito capilar até regiões acima da linha d’água, onde então ocorre a evaporação, seguida de cristalização dos sais nos poros do concreto, podendo resultar em degradação. Para que isso ocorra é preciso que o concreto seja permeável”.

O ataque por íons cloro ao concreto armado ataca o concreto e o aço. No concreto, o cloreto causa uma queda na alcalinidade, diminuindo o pH da massa, e, no aço, ele é responsável pela despassivação da camada protetora de forma acelerada, fato responsável por ocasionar o processo de ferrugem em pontos específicos da estrutura (LEITE; GIRARDI; HASTENPFLUG, 2018).

Quando em contato com o aço, o cloro não é completamente gasto e a reação do ferro com o íon cloro tende a formar novos íons constantemente, fato esse que torna o processo de corrosão contínuo, até que o cloro seja tirado completamente da superfície onde está a estrutura (LEITE; GIRARDI; HASTENPFLUG, 2018).

A corrosão das armaduras causa a diminuição da área de aço, e, conseqüentemente, a diminuição da capacidade resistente da armadura. Além dessa perda de resistência, se manifestam outros mecanismos de degradação decorrentes da corrosão do aço como a perda de aderência entre aço e concreto, a desagregação da camada de concreto envolvente da armadura – por expansão volumétrica das barras de aço – e a fissuração, consequência da desagregação do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998).

Como forma de evitar os ataques, deve-se priorizar uma cura bem-feita, como também a dosagem correta da relação água/cimento, pois, quanto menos permeável o concreto, menos esse estará suscetível aos agentes agressores externos. Fatores como as altas temperaturas e os altos níveis de fissuração são catalisadores para o processo e devem ser tratados. Sobre os tipos de cimento, priorizar o uso do cimento pozolânico e com baixo teor

de aluminato tricálcico e evitar o uso do cimento resistente a sulfatos, pois esse é ainda mais poroso (BRANDÃO, 1998).

2.1.2.1.3 Ataque por CO₂ (Carbonatação)

O dióxido de carbono (CO₂), presente nas atmosferas de grandes centros urbanos e áreas industriais, penetra as estruturas de concreto porosas e pode ser responsável por causar a manifestação patológica conhecida como carbonatação.

A carbonatação pode ser entendida como o resultado da ação dissolvente do dióxido de carbono na atmosfera sobre o cimento hidratado formando carbonato de cálcio (CaCO₃). O produto formado consome os álcalis existentes e quebra a camada passivadora do aço, ocasionando uma redução do pH do concreto, que passa de valores entre 12 e 13 para valores inferiores, como, por exemplo, 9 (LEITE; GIRARDI; HASTENPFLUG, 2018).

Dessa forma, a manifestação patológica, a qual é resultado da concentração de dióxido de carbono, umidade e oxigênio dentro do concreto, avança da superfície externa para dentro da estrutura. O processo começa a partir da formação de uma frente carbonatada, a qual, a depender do nível de umidade do ar, de quão permeável o concreto está e dos níveis da concentração de CO₂, vai lentamente evoluindo para o interior da massa de concreto até atingir as armaduras, onde acontece a quebra da película que “protege” o aço, deixando o material suscetível à corrosão (BRANDÃO, 1998).

Além da corrosão, entre as consequências diretas que podem ser citadas do processo de carbonatação estão a formação do carbonato de cálcio (decorrente da lixiviação do hidróxido de cálcio) e o surgimento de eflorescências. (LEITE; GIRARDI; HASTENPFLUG, 2018).

Entre as formas de impedir o fenômeno, podem ser citadas o controle da relação água/cimento no concreto (quanto mais permeável o concreto, mais suscetível esse é aos ataques); o controle da execução, com foco em cura bem-feita e concretagem sem vazios; evitar exposição do concreto ao CO₂; adotar um cobrimento adequado para a estrutura de acordo com a classe de agressividade ambiental e evitar o uso de cimento pozolânico, pois ele contribui para a diminuição do pH e, conseqüentemente, acelera o processo de carbonatação (BRANDÃO, 1998).

2.1.2.1.4 Reações com agregados

Os mecanismos de degradação podem afetar a pasta de cimento, como também podem prejudicar os agregados, comprometendo diretamente o desempenho do concreto. Enquanto algumas reações químicas dos agregados são benéficas, outras podem trazer danos ao concreto, como as expansões internas que acarretam a formação de fissuras e uma queda na resistência (BRANDÃO, 1998).

São diversos os tipos de reações químicas que podem acontecer com os agregados, porém, entre as que podem prejudicar o desempenho da estrutura, as mais frequentes envolvem os álcalis do cimento. Os álcalis (Na^+ e K^+), originados das reações de hidratação do cimento, quando em reação com alguns constituintes mineralógicos de agregados reativos reagem formando gel expansivo dentro do concreto.

O gel expande de forma considerável dentro da massa de cimento ocupando seus poros, fechando seus vazios e, conseqüentemente, causando um aumento de esforço interno, o que ocasiona fissurações na superfície da estrutura e, posteriormente, a desagregação do concreto, diminuindo sua resistência mecânica e seu módulo de elasticidade, além de torna-lo mais suscetível e livre a ataques externos (SOUZA, RIPPER, 1998).

“O concreto fissurado interna e externamente e deteriorado pode perder a durabilidade em grande velocidade, dependendo do tipo de exposição do elemento estrutural, das condições ambientais, da ação de águas agressivas (que penetram pelas fissuras e poros) e do contato da armadura com o ar” (SOUZA, RIPPER, 1998). No geral, a reação é demorada e para acontecer precisa simultaneamente da presença do agregado potencialmente reativo – sílica, silicato ou carbonato -, alto nível de umidade do ambiente e a presença de álcalis, com pH maiores que 7.

Como forma de evitar a manifestação patológica, primeiramente, deve ser evitada execução de construções onde existem agregados reativos no solo, pois não existem métodos de controle eficaz para sua reatividade, apenas métodos de prevenção. Porém, em casos que a única opção seja a construção em solos com esses agregados, deve-se priorizar cimentos com baixo teor de álcalis como CP* III e CP* IV ou cimentos com incorporações de escórias de alto forno e pozolanas. De acordo com Souza e Ripper (1998), “a adição de pozolanas, desde que em quantidades adequadas, pode inibir, ou mesmo evitar, a reação álcalis-agregado, e poderá ser um recurso, sempre que não for possível prevenir com a utilização de cimentos com baixo teor de álcalis”.

2.1.2.2 Ataques Físicos

Os ataques físicos ao concreto acontecem principalmente devido a alterações na temperatura, incidência de forte insolação, ventos e chuvas. Tais ataques podem ser responsáveis por alterar características de textura e de cor nas estruturas e podem acarretar na formação de fissuras. (SOUZA; RIPPER, 1998). A presença de fissuras, além de comprometer o aspecto estético da estrutura de concreto, afeta diretamente a sua durabilidade facilitando o ingresso de agentes agressivos presentes no meio ambiente

2.1.2.3 Ataques Biológicos

Em relação aos ataques biológicos ao concreto, podemos citar como principais os ataques causados pelo crescimento de raízes e pelo ataque dos micro-organismos. Por meio de pequenas falhas de concretagem, juntas de dilatação ou de eventuais fissuras presentes nas estruturas, as raízes podem penetrar na massa e achar um ambiente ideal para o seu desenvolvimento, causando um aumento de tensões internas com conseqüente desagregação do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998).

Sobre o ataque dos micro-organismos, Brandão (1998) afirma que, em locais onde existe uma grande quantidade de nutrientes, como as saídas de esgoto, pode acontecer uma grande proliferação de parasitas, a qual acarreta em um aumento do grau de saturação e, quando inseridos no concreto, esses organismos são responsáveis pelo aumento das forças internas, o que pode acarretar na fissuração.

2.1.2.4 Ataques Mecânicos

As ações mecânicas que causam danos ao concreto são ações que independem do corpo estrutural e podem ser, em grande parte das vezes, imprevisíveis. Fatores como choques entre veículos, os recalques das fundações nas edificações e acidentes, como os incêndios, caracterizam os ataques mecânicos e podem acarretar na deterioração do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998).

Em uma situação de incêndio, apesar de o fogo não se propagar rapidamente dentro do concreto, uma estrutura submetida a altas temperaturas por certo período de tempo pode ter sua resistência alterada. Esse fato pode ser explicado por uma expansão diferencial entre a massa de cimento e a barra de aço, pois o concreto tem uma expansão mais intensa que

a armadura quando em situação de incêndio, o que prejudica a aderência do conjunto concreto-aço e provoca a desintegração do mesmo. Dessa forma, estando o concreto desagregado, o aço fica desprotegido e diretamente exposto a ação do fogo (SOUZA; RIPPER, 1998).

Quanto maior a temperatura, maior o dano no concreto em situação de incêndio. A partir dos 600 °C, considera-se que a degradação do concreto acontece com o aumento das tensões internas dos agregados, ocasionando os danos à estrutura. A evolução do comportamento do concreto em função da temperatura, de acordo com Souza e Ripper (1998), é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Evolução do comportamento do concreto em função da elevação da temperatura ambiente

Temperatura em °C	Cor do concreto	Condição do concreto	Perda de resistência
0 a 200	Cinza	Não afetado	0%
300 a 600	Rosa	Razoavelmente bem	≤ 40%
600 a 900	Rosa e vermelho	Friável, com alta sucção de água	70%
900 a 1200	Cinza avermelhado	Friável	100%
> 1200	Amarelo	Decomposto	100%

Fonte: adaptado de SOUZA; RIPPER (1998)

2.2 Aditivos para concreto

O concreto é um material largamente empregado na construção civil e, de acordo com sua utilização, poderá requerer características específicas. Desse modo, para otimizar o desempenho do concreto nas diversas situações, podem ser adicionados produtos denominados de aditivos (PINHEIRO, 2019).

Os aditivos são produtos incorporados durante a produção de concreto e argamassas de cimento Portland com objetivo de alterar determinadas propriedades do material, estando entre elas a possibilidade de conferir maior trabalhabilidade ao concreto, a redução do consumo de cimento Portland e o aumento da durabilidade, por meio da inibição da corrosão das armaduras, do controle das reações álcali-agregado e dos ataques por sulfato e da diminuição da permeabilidade (FREITAS JR, 2013).

De acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011), existe uma vasta variedade de tipos de aditivos, estando entre eles os aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, incorporadores de ar, aceleradores de pega e/ou de resistência, retardadores de pega, entre

outros. Sendo o concreto um material de uso diverso, tais produtos têm como objetivo modificar as propriedades reológicas do concreto no estado fresco e endurecido, melhorando sua aplicação e desempenho.

Uma vez que a alta porosidade do concreto compromete diretamente sua durabilidade, o uso de aditivos redutores de permeabilidade controla o ingresso de agentes agressivos e, conseqüente, a deterioração das estruturas de concreto. Portanto, o uso de aditivos para redução de permeabilidade do concreto pode, somada a outros mecanismos, conferir à estrutura melhor desempenho estrutural e prolongamento de sua vida útil.

2.2.1 Aditivos redutores de permeabilidade

Sabendo que os aditivos são adicionados com o propósito de modificar e melhorar uma ou mais características do concreto e considerando a sua alta porosidade, a qual permite a penetração da água por meio dos poros, das microfissuras, da própria absorção capilar ou a partir de uma pressão hidrostática, a incorporação de um aditivo para redução da permeabilidade torna-se uma alternativa para proporcionar maior durabilidade e vida útil para as estruturas em concreto armado.

O relatório sobre aditivos químicos (*Report on Chemical Admixtures for Concrete ACI 212.3R-10, 2010*), publicado pelo Instituto Americano de Concreto, definiu que, a depender do fabricante, os aditivos químicos que atuam para redução da permeabilidade podem ser:

- a) Produtos químicos hidrofóbicos ou repelentes de água: são o maior grupo. Incluem materiais baseados em sabões e derivados de ácidos graxo de cadeia longa, óleos vegetais (sebos, materiais à base de soja e graxas), e petróleo (óleo mineral, parafina, ceras e emulsões a base de asfalto). Estes materiais são responsáveis por formar camada repelente de água ao longo dos poros do concreto, mas os poros permanecem abertos.
- b) Sólidos finamente divididos: Incluem os materiais inertes e agentes de enchimento quimicamente inativos (talco, bentonita, argila, resinas de hidrocarbonetos e de carvão) e de preenchimento quimicamente ativo (cal, silicatos e sílica coloidal). Estes materiais atuam no concreto como densificadores e restringem fisicamente a passagem de água através dos poros.
- c) Materiais cristalinos: Incluem os produtos químicos de propriedades ativas, sendo que a natureza hidrofílica destes materiais faz com que eles aumentem a

densidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ou faz com que formem depósitos (estruturas cristalinas) que bloqueiam os poros, resistindo à penetração de água.

Definidos pelo Instituto de Concreto Americano (ACI) como aditivos redutores de permeabilidade (*Permeability-Reducing Admixtures*) (PRA), esses podem ser classificados em duas categorias: aditivos redutores de permeabilidade sob condições hidrostáticas (*Permeability-Reducing Admixture for Hydrostatic conditions*) (PRAH) e aditivos redutores de permeabilidade sob condições não-hidrostáticas (*Permeability-Reducing Admixture for Non-hydrostatic conditions*) (PRAN) (ACI 212.3R-10). No Brasil, esses tipos de aditivos ainda não são regulamentados por norma.

Estruturas expostas à ação da umidade, dos sais e de água sob pressão hidrostática são indicadas para o uso do aditivo redutor de permeabilidade (PRA), cujo objetivo primordial é reduzir a passagem de água no interior do concreto. Porém, apesar dos efeitos positivos, a adição de um PRA pode ocasionar no concreto possíveis alterações nas suas resistências à compressão, resistência ao congelamento e ao degelo e retração. Nesse caso, a execução de ensaios para garantir a qualidade do concreto é essencial (ACI 212.3R-10).

Pode-se considerar que a escolha de qual categoria de PRA deve ser utilizado depende das condições de serviço da estrutura. No caso de condições não hidrostáticas, as quais podem ser definidas como situações em que existem poucos ou nenhum elemento estrutural submetido à pressão hidrostática, a forma de movimento da água é por meio de absorção capilar e, portanto, o aditivo hidrofóbico e repelente PRAN, na maior parte dos casos, é suficiente. Enquanto isso, para condições de serviço hidrostáticas, nas quais existem elementos estruturais submetidos a pressão hidrostática, pode se considerar que a forma de movimento da água e umidade para dentro do concreto é sob pressão, e, para esses casos, são recomendados os aditivos PRAH (ACI 212.3R-10).

Em resumo, podemos concluir que os produtos PRAH, conhecidos também como aditivos de cristalização integral, reduzem a penetração de água através do crescimento cristalino, devem funcionar sob pressão hidrostática e são adequados para construção impermeável e os produtos PRAN, os quais são conhecidos como aditivos hidrofugantes, reduzem a penetração por capilaridade da água através de hidrofugantes como gorduras e, mais recentemente, estearatos ou silicatos.

2.2.1.1 Aditivos de redução de permeabilidade para condições hidrostáticas

De acordo com o ACI (ACI 212.32-10), o aditivo redutor de permeabilidade sob condições hidrostáticas, também conhecido como aditivo de cristalização integral, é um material que objetiva, por meio da formação de uma estrutura cristalina insolúvel, responsável pelo preenchimento dos poros e capilares do concreto, bloquear a passagem de água ou de outros agentes agressivos da atmosfera para o interior do material.

Tais aditivos são misturas hidrofílicas cristalinas que contém componentes ativos, os quais reagem com a água e com as partículas do cimento no concreto, dando origem a silicato de cálcio hidratado e/ou precipitados (depósitos cristalinos) que se tornam parte permanente da massa de concreto (ACI 212.32-10).

Os PRAHs inseridos no concreto atuam de tal forma que um elemento estrutural que tenha esse aditivo em sua composição possa resistir à água sob pressão hidrostática, sendo essa capacidade de resistência dependente de quanto os poros foram bloqueados e da estabilidade dos depósitos cristalinos sob pressão (MOREIRA, 2016).

O concreto com adição do cristalizante integral pode também ser conhecido como um tipo de concreto auto cicatrizante, pois, o concreto com o aditivo, segundo Takagi (2019), “possui capacidade de auto cicatrização autônoma, potencializadora do mecanismo de colmatação natural do concreto, por meio de um aditivo cristalino que ativa os componentes presentes na dosagem do concreto, como os cimentos e as adições minerais”.

Exclusivamente indicado para estruturas de concreto, o aditivo PRAH, diferente de outros sistemas de impermeabilização, é vantajoso porque se torna parte da estrutura de concreto, o que implica dizer que ele não pode ser rasgado, furado e nem retirado da superfície. Portanto, a aplicação de um PRAH é permanente e a formação cristalina não se danifica em condições normais (PEREIRA; NASCIMENTO, 2017).

Esse tipo de adição ao concreto geralmente é recomendado para locais de difícil acesso para manutenção como poços de elevador, cortinas de subsolos ou fundações/estruturas enterradas, locais onde a umidade é excessiva e está sempre presente, dificultando manutenções futuras que possam vir a ser necessárias (ACI 212.3R-10).

O aditivo PRAH, de acordo com Takagi (2019), tem como principal função reduzir o ingresso de águas agressivas e colmatar pequenas fissuras. Com isso, reduzem substancialmente o risco de reações deletérias (reação álcali-agregado, sulfatos, carbonatação e cloretos) que dependem da presença de água.

De acordo com Flores *et al.* (2015), a presença de água é necessária para formação dos depósitos cristalinos, os quais se tornam parte integrante do concreto. Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008) acrescentam que quando não existe interação com a água, os cristais permanecem dormentes, sendo reativados quando na presença da água e, então, conservando a proteção do concreto.

O uso dos aditivos PRAH no concreto apresenta vantagens tais como, a capacidade de resistir à pressão positiva e negativa da água, a alta resistência a substâncias agressivas inseridas no ambiente, a dispensa do uso de primer e a não necessidade de uma regularização prévia da superfície (pois é adicionado ao concreto durante sua fabricação), a contribuição no selamento de fissuras (com aberturas entre 0,4 e 0,5 mm) e a permissão de saída do vapor d'água, entre outras.

De acordo com Takagi, Almeida Junior e Oliveira (2004), esse tipo de aditivo já tem um histórico de uso em grandes obras nacionais como, por exemplo, a estação de tratamento de esgotos Alegria, no Rio de Janeiro e o complexo viário Ayrton Senna, em São Paulo e em obras internacionais como, por exemplo, a fábrica General Motors, nos Estados Unidos e o *Stadium* Austrália, na Austrália.

2.2.1.2 Aditivos de redução de permeabilidade para condições não hidrostáticas

Os aditivos redutores de permeabilidade para condições não hidrostáticas têm como função principal a proteção das estruturas de concreto armado do ataque de agentes agressivos no concreto, bem como da entrada de líquidos e vapores d'água (MEDEIROS; GOMES; HELENE, 2006).

Conhecidos também como aditivos hidrofugantes, os PRANs atuam na redução da permeabilidade do concreto, a partir do preenchimento dos vazios dos materiais e revestimento interno dos poros (ACI 212.3R-10). Segundo Moreira (2016), “misturas hidrofugantes do concreto são misturas integradas que alteram a superfície do concreto de modo que ele se torne repelente à água, ou menos ‘molhável’”.

Os aditivos hidrofugantes atuam por meio da formação de uma camada fina repelente de água dentro dos poros e dos espaços vazios no concreto, alterando o ângulo de contato entre a parede do capilar e a superfície da água e, conseqüentemente, evitando a penetração da água (RIXOM; MAILVAGANAM, 1999).

Moreira (2016) acrescenta que essa propriedade do concreto de repelir a água é eficiente quando a pressão aplicada não é alta, como por exemplo em casos de precipitação e

ascensão capilar, evitando a entrada de água na superfície e reduzindo a molhabilidade, o que confirma a indicação do aditivo para condições não-hidrostáticas.

Os produtos de impregnação hidrófoba que estão no mercado são todos sílico-orgânicos, e podem ser divididos em três categorias, sendo elas os silanos ou trialcóxialkilsilanos; os siloxanos oligoméricos; os siloxanos poliméricos e as resinas de silicone. De acordo com Medeiros, Gomes e Helene (2006), “as várias classes dos compostos se diferenciam, entre outras coisas, pelo tamanho das moléculas, a reatividade e a solubilidade em água e nos solventes orgânicos”. Os autores ainda indicam que atualmente, os mais utilizados na prática são em geral silanos, siloxanos oligoméricos e misturas destes dois compostos.

O processo de impermeabilização com hidrofugantes ocorre a partir da inserção de silanos, siloxanos e substâncias similares dentro dos poros do concreto, formando uma camada hidrófuga, que inibe a penetração de água e agentes agressores diversos, porém, sem impedir a “respiração” do concreto e a entrada e saída de vapor d’água.

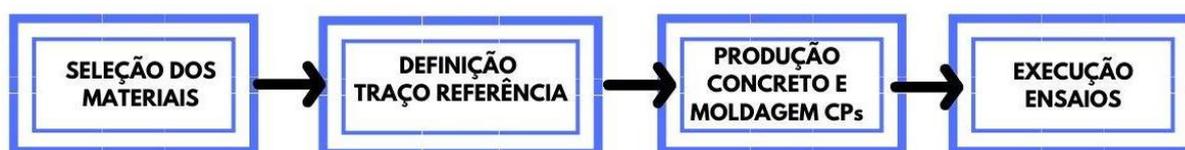
O uso de aditivos PRANs nas estruturas de concreto apresenta vantagens tais como, a capacidade de resistir à pressão positiva e negativa da água; a não alteração nos tempos de pega e de cura dos concretos; o efeito de repelência permanente; a boa durabilidade, o fácil manuseio, entre outros.

Em contrapartida, Ramachadran (1995) afirma que os aditivos hidrofóbicos são pouco eficientes para revestir completamente e de forma uniforme todos os poros, e, considerando a presença de espaços vazios de maior dimensão, em um ensaio de permeabilidade, o concreto pode suportar apenas alguns centímetros de pressão. Santana e Aleixo (2017) acrescentam que, considerando essa como sendo uma impermeabilização rígida, a mesma não suporta movimentações da estrutura, e, portanto, na presença de trincas ou fissuras, os efeitos do aditivo são ineficazes.

3 MATERIAIS E MÉTODO

A presente seção tem como finalidade apresentar o método e os materiais adotados durante o processo experimental. Primeiramente, realizou-se a caracterização de todos os materiais utilizados na pesquisa e em seguida, definidas as etapas a serem seguidas, realizou-se a descrição de cada parte do processo, bem como a forma como as etapas foram sucedidas, compreendendo desde a etapa de seleção dos materiais até a descrição dos ensaios realizados. De forma esquemática, a Figura 3 ilustra o fluxograma relacionando as etapas principais do processo.

Figura 3 – Fluxograma de metodologia desenvolvida no trabalho



Fonte: O Autor (2019).

O seguimento das etapas descritas no fluxograma representa a forma como a pesquisa foi dividida para tornar possível a análise do comportamento dos aditivos redutores de permeabilidade (PRA), quando inseridos no concreto, com relação a características mecânicas e de durabilidade.

Os ensaios foram realizados com cinco diferentes traços, sendo um traço de referência (sem aditivo) e quatro traços com a mesma dosagem referência e adição de quatro diferentes aditivos PRAs. O objetivo é analisar as propriedades dos concretos com aditivos quando comparadas com o concreto sem aditivo.

Como já citado anteriormente, os aditivos redutores de permeabilidade ainda não são normatizados no Brasil e a gama de pesquisas sobre o assunto ainda não é tão extensa. Para execução do estudo, publicações de autores como Medeiros, Gomes e Helene (2006), Moreira (2016) e Sombrio (2019) serviram de referência por trazerem pesquisas nesse mesmo domínio.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Agregados

O estudo foi desenvolvido com agregados semelhantes aos utilizados por Brasileiro (2018), os quais estão caracterizados na Tabela 05. Brasileiro (2018) especifica que os agregados utilizados, graúdo e miúdo, artificiais de origem fonolítico, foram provenientes da britagem da mesma rocha e que a areia fina utilizada teve origem natural não especificada.

Tabela 5 – Características físicas dos agregados utilizados no estudo

Agregado	DMC (mm)	MF	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)
Agregado graúdo	9,5	5,37	2,51	0,9
Agregado miúdo	4,75	3,31	2,48	1,3
Areia fina	1,18	1,74	2,62	2

Fonte: Adaptado de BRASILEIRO (2018)

3.1.2 Aglomerante (cimento)

O aglomerante utilizado no estudo foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP* V – ARI). As características químicas (Tabela 6) e características físicas e mecânicas (Tabela 7) do CP* V - ARI foram fornecidas pelo fabricante. A escolha do cimento foi feita considerando que esse é um cimento mais puro, por ter um baixo teor de adições minerais e, portanto, não interfere na análise da influência dos aditivos nas propriedades estudadas.

Tabela 6 – Caracterização CP* V Apodi – Ensaio químicos (2019)

Ensaio Químicos				
Ensaio	NBR N	Unidade	Resultados	Especificação Norma NBR 16697
Perda ao Fogo - PF	NM 18	%	3,890	≤ 6,5
Óxido de Magnésio - MgO	NM 11-2	%	4,160	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₂	NM 16	%	3,300	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel - RI	NM 15	%	1,220	≤ 3,5

Fonte: Boletim de certificado de qualidade CP V ARI Apodi (2019).

Tabela 7- Caracterização CP* V Apodi – Ensaios físicos e mecânicos (2019)

Ensaios Físicos e Mecânicos				
Ensaio	NBR N	Unidade	Resultados	Especificação Norma NBR 16697
Área específica (Blaine)	16372	cm ² /g	4575,000	Não aplicável
Massa específica	16605	g/cm ³	3,070	Não aplicável
Finura - Resíduo na peneira de 0,075mm (#200)	11579	%	0,300	≤ 6,0
Finura - Resíduo na peneira de 0,032mm (#400)	12826	%	4,800	Não aplicável
Água de consistência	16606	%	28,400	Não aplicável
Início de pega	16607	min	105,000	≥ 60
Fim de pega	16607	min	165,000	≤ 600
Expansibilidade de Le Chatelier - A Quente	11582	min	0,070	≤ 5,0
Resistência à compressão (MPa) - NBR 7215				
Idade	Média	Resultados		
1	28,100	≥ 14,0 MPa		
3	36,500	≥ 24,0 MPa		
7	41,400	≥ 34,0 MPa		
28	48,500	----		

Fonte: Boletim de certificado de qualidade CP V ARI Apodi (2019).

3.1.3 Aditivos

Para a produção do concreto, foram utilizadas duas diferentes categorias de aditivo. A primeira categoria consiste em um aditivo plastificante, o qual foi inserido nos cinco traços de concreto para estudo.

O segundo tipo de aditivo é o aditivo redutor de permeabilidade do concreto, o qual é o próprio objeto de estudo do trabalho. Considerando que serão estudados quatro diferentes tipos de PRA, quatro traços receberam os diferentes produtos e apenas um dos traços ficou sem nenhum aditivo PRA, servindo de traço referência.

3.1.3.1 Aditivo plastificante

Os aditivos plastificantes são indicados para “todas as situações em que se deseje obter um concreto de melhor qualidade, maior durabilidade, e onde atmosferas agressivas, tais como a presença de cloretos, exijam um concreto de menor porosidade, que venha a proteger de forma mais eficiente as armaduras” (SILVA, 2014).

Portanto, visando a obtenção de um concreto durável, em todos os traços houve a inclusão do aditivo Mira Set 30, aditivo plastificante poli funcional redutor de água, cujas características estão representadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características aditivo plastificante Miraset 30

Produto	Descrição do Produto	Aspecto/Cor	Dosagem recomendada	Massa específica (g/cm³)
Mira set 30	Especialmente desenvolvido para aplicação em temperatura ambiente elevada com elevado poder dispersante	Líquido marrom escuro	0,6 a 1,0%	1,150 - 1,210

Fonte: Ficha técnica do MIRA SET 30

3.1.3.2 Aditivos redutores de permeabilidade

Considerando os produtos disponíveis no mercado, foi feita uma análise daqueles que tem como foco a redução da permeabilidade do concreto, tendo como consequência direta o controle da entrada de água e de agentes agressores dentro do concreto, com consequente aumento de sua durabilidade.

Entre os materiais disponíveis, foram selecionados quatro produtos para estudo, sendo entre eles dois aditivos que atuam por meio da cristalização dos poros, aditivos PRA para condições hidrostáticas, e dois aditivos que atuam por meio da hidrofugação capilar, aditivos PRA para condições não hidrostáticas.

Os nomes dos produtos não serão citados e durante o trabalho serão tratados como produto A, B, C e D, os quais estão brevemente descritos na Tabela 9. É válido ressaltar que a tabela foi preenchida com base nas informações contidas nas fichas técnicas dos materiais. Considerando que o produto D é o único que não continha sua base química especificada na ficha técnica, o fabricante foi questionado sobre sua descrição, mas a informação não foi fornecida.

Tabela 9 – Aditivos redutores de permeabilidade utilizados no estudo

Produto	Classificação	Mistura	Descrição do fabricante
Produto A	PRAN - condições não hidrostáticas	Monocomponente (em pó)	Base química: Silano
Produto B	PRAH - condições hidrostáticas	Monocomponente (em pó)	Base química: cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico
Produto C	PRAH - condições hidrostáticas	Monocomponente (em pó)	Base química: Cimento Portland, areia de sílica e compostos químicos ativos.
Produto D	PRAN - condições não hidrostáticas	Monocomponente (líquido)	(Informação não fornecida na ficha técnica)

Fonte: O Autor (2019).

3.2 Definição dos traços

Para desenvolvimento do estudo, foram utilizados cinco diferentes traços. Considerando que serão estudados quatro aditivos, serão adotados um traço de referência (sem aditivo) e quatro traços com os aditivos redutores de permeabilidade, conforme representados abaixo.

- a) Concreto sem aditivo – Traço Referência (sem aditivo);
- b) Concreto + produto A – Traço A (PRA sob condições não hidrostáticas);
- c) Concreto + produto B – Traço B (PRA sob condições hidrostáticas);
- d) Concreto + produto C – Traço C (PRA sob condições hidrostáticas);
- e) Concreto + produto D – Traço D (PRA sob condições não hidrostáticas);

Assumindo que o trabalho visa à comparação dos diferentes produtos nas mesmas condições, e, considerando que parte das fichas técnicas dos produtos adotados para estudo não tem definido de forma explícita qual a dosagem de referência, com consentimento das empresas envolvidas, adotou-se para todas as amostras a porcentagem de 0,8% em relação ao peso do cimento (Tabela 10).

Em seguida, a Tabela 11 resume os cinco traços utilizados na pesquisa. É válido ressaltar que o traço referência foi adotado com base em um estudo anteriormente realizado na Universidade Federal do Ceará por Melo (2017).

Tabela 10 – Dosagem adotada para cada aditivo

Produto	Dosagem (% massa cimento)
Produto A	0,8
Produto B	0,8
Produto C	0,8
Produto D	0,8

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 11 – Tabela de traços estudados nesta pesquisa

	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Areia	Água	Aditivo Plastificante	Aditivo redutor de permeabilidade
Traço Referência	1,000	0,800	2,120	2,390	0,540	0,010	0,000
Traço A	1,000	0,800	2,120	2,390	0,540	0,010	0,008
Traço B	1,000	0,800	2,120	2,390	0,540	0,010	0,008
Traço C	1,000	0,800	2,120	2,390	0,540	0,010	0,008
Traço D	1,000	0,800	2,120	2,390	0,540	0,010	0,008

Fonte: O Autor (2019)

3.3 Preparo do concreto e moldagem dos corpos de prova

3.3.1 Pesagem dos materiais

Definidos os materiais e os traços, os materiais foram pesados em balança com precisão de gramas. Após pesados, os materiais foram colocados separadamente em recipientes, como representado na Figura 4.

Figura 4 – Processo de pesagem dos materiais. a) Balança utilizada no estudo, com precisão em gramas; b) Materiais pesados e separados por traço.



Fonte: O Autor (2019).

3.3.2 Execução do concreto

A execução de todos os traços de concreto ocorreu no mesmo dia, somando cinco betonadas, ou seja, uma para cada um dos traços referidos. Todo o processo de execução do concreto, desde a pesagem até a moldagem dos corpos de prova, aconteceu no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), na Universidade Federal do Ceará e foi acompanhado pelo responsável técnico do laboratório.

Para todas as betonadas, além de seguido o mesmo traço referência, os materiais foram colocados na betoneira na mesma sequência. Os primeiros materiais a serem colocados foram os agregados (graúdos e miúdos) seguidos de metade da quantidade de água de amassamento, e então a betoneira foi ligada durante 1 minuto. Após isso, foi colocado o cimento e a betoneira foi religada por mais 1 minuto. Por último foram colocados a areia, o restante da água e o aditivo plastificante e a betoneira tornou a funcionar por um período aproximado de 3 minutos.

Nos traços que tiveram inseridos os aditivos redutores de permeabilidade, particularmente para os produtos B, C e D, o aditivo foi adicionado a água de amassamento, como instruído na ficha técnica. Para o produto A, carecendo de informação na ficha técnica e conforme instruído pelo responsável da empresa – que acompanhou o processo de moldagem dos CPs -, o produto foi adicionado após o concreto já finalizado e foi então misturado na betoneira.

3.3.3 Moldagem dos corpos de prova e cura

O processo de moldagem dos corpos de prova (representado na Figura 5) foi realizado de acordo com o método proposto pela NBR 5738 (ABNT 2015). Foram utilizadas fôrmas cilíndricas, com dimensões de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. O adensamento do concreto nos moldes foi feito com auxílio de um vibrador mecânico.

Figura 5 – Moldagem dos CPs. a) Preparação das fôrmas; b) Colocação de concreto nas fôrmas; c) Uso de vibrador mecânico para vibração nos CPs; d) CPs moldados.



Fonte: O Autor (2019)

Moldados os CPs, esses ficaram no local de moldagem por um período de 48 horas e foram então desformados, como ilustrado na Figura 6. Analisou-se que o processo de cura para desforma foi retardado e acredita-se que um possível excesso de aditivo plastificante foi a causa principal. Apesar disso, o retardo de pega não causou danos à resistência do corpo de prova após desformado.

Desformados todos os CPs, esses foram colocados em cura e ficaram submersos durante um período de 28 dias (Figura 6). O processo de cura foi feito de acordo com o proposto pela NBR 5738 (ABNT 2015).

Figura 6 - a) CPs desformados; b) CPs em cura.



Fonte: O Autor (2019)

3.4 Execução ensaios

Assumindo que o objetivo do trabalho consiste no estudo de aditivos para redução da permeabilidade do concreto, a definição dos ensaios foi feita a partir da necessidade de avaliar o desempenho dos produtos com relação a permissividade para entrada de água e/ou de agentes externos. Podemos considerar que um bom desempenho pressupõe uma alta impermeabilidade, pois, dessa forma, a durabilidade do concreto será maior.

Além dos ensaios de durabilidade, foi realizado o ensaio mecânico de resistência à compressão com o objetivo de analisar se, a partir da adição dos produtos, a resistência do concreto teria alguma alteração, o que não é desejável. A Tabela 12 apresenta os ensaios mecânicos e de durabilidade definidos para o estudo, bem como as normas de referência de cada ensaio.

Tabela 12 - Ensaios realizados para esta pesquisa

Tipo de ensaio	Ensaio realizado	Norma referência
Mecânico	Resistência a compressão	NBR 5739 (ABNT 2018)
	Absorção de água por imersão	NBR 9778 (ABNT 2005)
	Absorção de água por capilaridade	NBR 9779 (ABNT 2012)
Durabilidade	Penetração de água sob pressão	NBR 10787 (ABNT 2011)
	Penetrabilidade de cloretos	ASTM C 1202:2012
	Resistividade elétrica volumétrica	NBR 9204 (ABNT 2012)

Fonte: O Autor (2019)

3.4.1 Ensaios mecânicos

3.4.1.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto proporciona às estruturas segurança e estabilidade estrutural. A execução do ensaio para fins de controle tecnológico permite, além de verificar se o concreto executado está de acordo com as especificações de projeto, identificar eventuais variações na qualidade do concreto utilizado, prevenindo danos maiores.

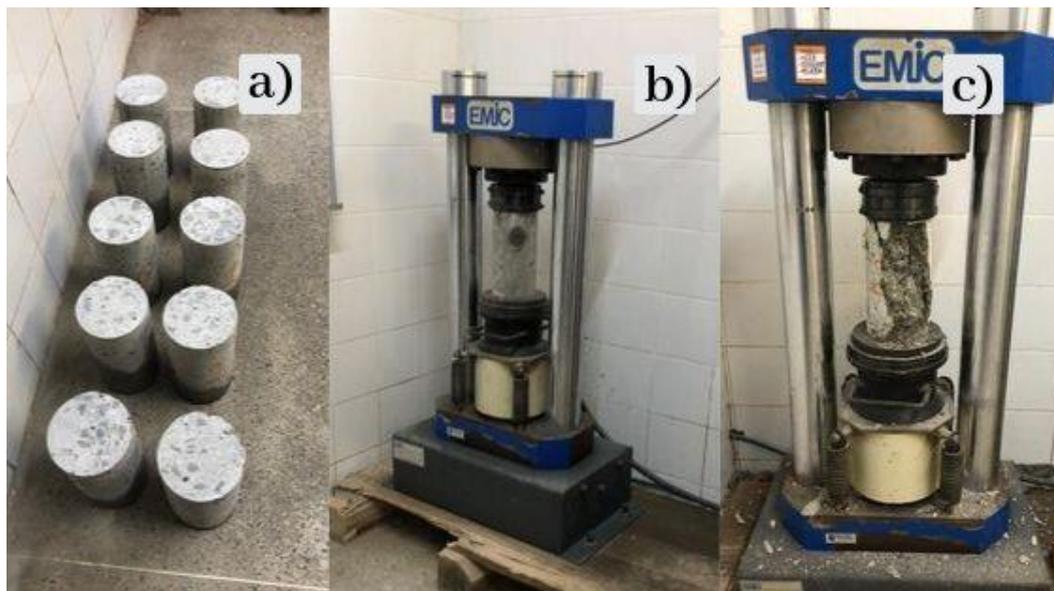
A Tabela 13 relaciona a quantidade de corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão, bem como a idade de ensaio dos CPs. Detalhe do ensaio de resistência a compressão está apresentado na Figura 7. Os ensaios foram realizados conforme indicado pela NBR 5739 (ABNT 2018) com o uso de uma prensa hidráulica EMIC PCE 100.

Tabela 13 - Ensaio resistência à compressão

Ensaio	Quantidade CPs por traço	Quantidade CPs total	Idade CPs
Resistência a compressão	2	10	7 dias
Resistência a compressão	2	10	28 dias

Fonte: O Autor (2019)

Figura 7 – Execução de ensaio de resistência a compressão. a) CPs retificados; b) CP na prensa hidráulica; c) CP rompido.



Fonte: O Autor (2019)

3.4.2 Ensaios de durabilidade

3.4.2.1 Absorção de água por imersão

Conforme indicado pela NBR 9778 (ABNT 2005), a absorção de água por imersão é um “processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso”. Dessa forma, como visto anteriormente, sabendo que a penetração de água no concreto pode ser responsável pelo comprometimento da sua vida útil, a durabilidade estrutural é diretamente determinada pelo controle da entrada da água no concreto.

O ensaio de absorção de água por imersão, o qual também fornece valores de índice de vazios e de massa específica, foi realizado conforme indicado pela NBR 9778 (ABNT 2005). Sombrio (2019) afirma que enquanto o ensaio de absorção por capilaridade é

realizado para analisar a penetração da água pelos poros capilares, o ensaio de absorção por imersão “é utilizado para obtenção de índices relacionados com os vazios do sólido, ou seja, a porosidade acessível à água dentro da matriz do concreto”.

O método de ensaio consiste na pesagem das amostras em situações distintas, sendo a primeira delas uma pesagem da amostra seca, após passar 72 horas em estufa à temperatura de (105 ± 5) °C. Em seguida, após imersa por 72 horas em água, é feita um registro da massa com auxílio de balança hidrostática e um outro registro da massa da amostra saturada. A partir das massas, conforme indicado pela NBR 9778 (ABNT 2005), são feitos os cálculos para determinação dos resultados.

Os dados referentes a quantidade de corpos de prova utilizados no ensaio, bem como a idade de realização dos ensaios de absorção de água por imersão, estão representados na **Erro! Autoreferência de indicador não válida**. Detalhes do ensaio estão representados na Figura 8.

Tabela 14 - Ensaio de absorção de água por imersão

Ensaio	Quantidade CPs por traço	Quantidade CPs total	Idade CPs
Absorção de água por imersão	2	10	28 dias

Fonte: O Autor (2019)

Figura 8- Etapas ensaio de absorção de água por imersão. a) CPs na estufa; b) CPs imersos em tanque com mergulhão para levar a água a ebulição



Fonte: O Autor (2019)

3.4.2.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme indicado pela NBR 9779 (ABNT 2012). A execução do ensaio consiste na colocação das amostras em recipiente preenchido com nível de água constante em 5 ± 1 mm acima da face apoiada dos corpos de prova.

Para determinar o valor de absorção de água por capilaridade, conforme indicado pela NBR 9779 (ABNT 2012), antes do início do ensaio foram pesadas as amostras secas. Em seguida, com o ensaio em andamento, foram realizadas pesagem das massas saturadas dos CPs com 3, 6, 24, 48 e 72 horas de ensaio. A Figura 9 ilustra detalhe do ensaio de absorção de água por capilaridade. Os dados referentes a quantidade de corpos de prova utilizados no ensaio, bem como a idade dos CPs, estão representados na Tabela 15.

Figura 9 – Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 15 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

Ensaio	Quantidade CPs por traço	Quantidade CPs total	Idade CPs
Absorção de água por capilaridade	3	15	28 dias

Fonte: O Autor (2019)

3.4.2.3 Penetração de água sob pressão

O ensaio de penetração de água sob pressão foi realizado conforme indicado pela NBR 10787 (ABNT 2011). A metodologia de ensaio consiste em fixar o corpo de prova entre dois perfis metálicos, mantendo a superfície inferior em contato com a água sob pressões crescentes. Primeiramente, 48 horas à pressão de $(0,1 \pm 0,01)$ MPa, em seguida 24 horas à pressão de $(0,3 \pm 0,03)$ MPa e para finalizar 24 horas à pressão de $(0,7 \pm 0,07)$ MPa. É válido ressaltar que os CPs foram retirados da água 48 horas antes do início da realização do ensaio.

Considerando que a NBR especifica o mínimo de três corpos de prova para cada traço, e assumindo a impossibilidade de ensaiar quinze corpos de prova simultaneamente na câmara de ensaio utilizada (ver Figura 10), optou-se por ensaiar um corpo de prova de cada traço em três idades diferentes (com diferença de uma semana entre elas, contando a partir dos vinte e oito dias), para que fossem mantidas condições iguais para todos os CPs. Os dados referentes a quantidade de corpos de prova utilizados no ensaio, bem como a idade dos CPs, estão representados na Tabela 16.

Figura 10 – Corpos de prova em ensaio de penetração de água sob pressão



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 16 – Ensaio de penetração de água sob pressão

Ensaio	Quantidade CPs por traço	Quantidade CPs total	Idade CPs
Penetração de água sob pressão - CP 01	1	5	28 dias
Penetração de água sob pressão - CP 02	1	5	35 dias
Penetração de água sob pressão - CP 03	1	5	42 dias

Fonte: O Autor (2019)

3.4.2.4 Penetrabilidade de cloretos

O ensaio de penetrabilidade de cloretos foi realizado conforme indicado pela norma ASTM C 1202:2012 – *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. O método de ensaio consiste em fixar uma fatia de concreto, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, entre duas células, estando uma preenchida com solução aquosa com 3% de cloreto de sódio (NaCl) e conectada ao terminal negativo da fonte de alimentação e a outra com solução aquosa 0,3N de hidróxido de sódio (NaOH) conectada ao terminal positivo da fonte de alimentação. A aparelhagem do ensaio está ilustrada na Figura 11.

Figura 11 – Aparelhagem do ensaio de penetrabilidade de cloretos



Fonte: O Autor (2019)

A determinação da penetração de íons cloretos no concreto é feita mediante a medição da carga passante (em Coulombs) na amostra de concreto, submetida a uma tensão de $60 \pm 0,1$ volts durante um período de 6 horas. As medições foram realizadas a cada trinta minutos. A análise qualitativa seguiu a classificação de penetrabilidade de íons cloretos da ASTM C 1202 (2012), conforme exposto na Tabela 17.

Tabela 17 – Classificação proposta pela ASTM C 1202 (2012) para determinação do nível de penetrabilidade de íons cloreto no concreto.

Penetrabilidade de íons cloreto	Carga passante (Coulombs - C)
Alta	$C > 4000$
Moderada	$2000 < C < 4000$
Baixa	$1000 < C < 2000$
Muito baixa	$100 < C < 1000$
Desprezível	$C < 100$

Fonte: ASTM C 1202 (2012).

O ensaio foi realizado com os CPs de um traço a cada dia, sendo quatro fatias de amostras para cada traço. As amostras dos CPs a serem ensaiados em sequência permaneceram em cura úmida até a idade dos ensaios (Tabela 18).

Tabela 18 – Ensaio de penetrabilidade de cloretos

Ensaio	Quantidade CPs por traço	Quantidade CPs total	Idade CPs
Penetrabilidade de cloretos (Traço referência)	2	10	72 dias
Penetrabilidade de cloretos (Traço A)	2	10	73 dias
Penetrabilidade de cloretos (Traço B)	2	10	74 dias
Penetrabilidade de cloretos (Traço C)	2	10	75 dias
Penetrabilidade de cloretos (Traço D)	2	10	76 dias

Fonte: O Autor (2019)

3.4.2.5 Resistividade elétrica volumétrica

Podemos definir a resistividade elétrica do concreto como sendo uma “propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica” (JESUS, 2018). De acordo com Costa e Azzi (2017), a resistividade possibilita, através do mapeamento dos pontos mais porosos do concreto, avaliar a vida útil da estrutura e uma maior quantidade de poros pressupõe uma maior probabilidade de surgimento de manifestações patológicas, as quais podem prejudicar a durabilidade estrutural. Portanto, o quanto um concreto é resistivo é inversamente proporcional ao quanto ele é condutivo, e, consequentemente, um alto valor de resistividade elétrica representa um menor valor de permeabilidade estrutural.

O ensaio de resistividade elétrica volumétrica foi realizado seguindo o especificado pelo manual de uso do fabricante do equipamento utilizado, o Resipod

Resistividade Volumétrica, representado na Figura 12. A execução do ensaio consiste na ligação de cabos às placas de medição com elementos de espuma condutora, os quais fazem o contato elétrico com o cilindro, a fim de determinar a resistividade volumétrica real do cilindro em teste. É válido ressaltar que as resistências dos elementos de espuma variam com a pressão aplicada.

Figura 12 – Equipamento de ensaio Resipod Resistividade Volumétrica



Fonte: O Autor (2019)

Realizadas as leituras de resistência do elemento de espuma inferior e superior, como também a medição da resistividade medida do cilindro, obtém-se o valor da resistência do cilindro a partir da subtração, sobre o valor de resistividade medida do cilindro, das resistências inferior e superior da espuma.

Conforme indicado e especificado no manual, obtida a resistência do cilindro e aplicado o fator de correção, obtém-se a resistência do cilindro corrigida a partir da formulação estabelecida. A resistividade volumétrica pode ser obtida através da multiplicação entre o fator “R” corrigido e “K”, o qual corresponde à divisão entre a área superficial e o comprimento do corpo de prova.

Para esse estudo, finalizada a cura submersa de 28 dias, as amostras a serem ensaiadas foram colocadas em estufa por 24 horas com temperatura de 100 graus, partindo do pressuposto que a saturação do CP prejudicaria os valores encontrados no ensaio. Porém, ao serem retirados da estufa, os CPs inteiramente secos e com seus poros bem abertos apresentaram um valor de resistividade muito baixo, o qual não era possível de ser medido

pelo equipamento de ensaio. Dessa forma, optou-se por saturá-los novamente durante 24 horas e então coloca-los em estufa, sob temperatura de 50 graus, durante o período de 5 horas. Após esse processo, realizou-se o ensaio.

Os dados referentes à quantidade de corpos de prova utilizados no ensaio, bem como a idade dos CPs na data dos ensaios, estão representados na Tabela 19. Todas as amostras dos cinco traços foram ensaiadas no mesmo dia.

Tabela 19 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica

Ensaio	Quantidade CPs por traço	Quantidade CPs total	Idade CPs
Resistividade elétrica volumétrica	3	15	31 dias

Fonte: O Autor (2019).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo, foram apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados conforme descrito no item anterior. A análise foi feita por meio de tabelas e gráficos relacionando as variações dos resultados encontrados para os traços com aditivos quando comparados aos resultados encontrados para o traço de referência.

Por fim, foi feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios e os limites de permeabilidade referenciados no documento de especificação adotado para o concreto da linha leste do metrô de Fortaleza. O documento especifica os limites de permeabilidade admitidos de acordo com alguns ensaios realizados nesse estudo. O objetivo da análise comparativa é verificar, para uma situação prática, se os aditivos testados estariam aptos a atender as condições de permeabilidade requisitadas.

4.1 Resistência à compressão

O ensaio foi realizado com o objetivo de analisar se os aditivos redutores de permeabilidade podem alterar a resistência à compressão do concreto. Os resultados obtidos a partir do rompimento das amostras nas idades de 7 e de 28 dias estão representados, respectivamente, nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – Resultado do ensaio resistência a compressão (07 dias)

Resistência a compressão - Idade 07 DIAS	CP 01 (MPa)	CP 02 (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Traço Referência	36,79	35,66	36,225	0,799	2,2%
Traço A	36,73	38,70	37,715	1,393	3,7%
Traço B	33,46	30,17	31,815	2,326	7,3%
Traço C	33,39	29,22	31,305	2,949	9,4%
Traço D	34,98	38,35	36,665	2,383	6,5%

Fonte: O Autor (2019)

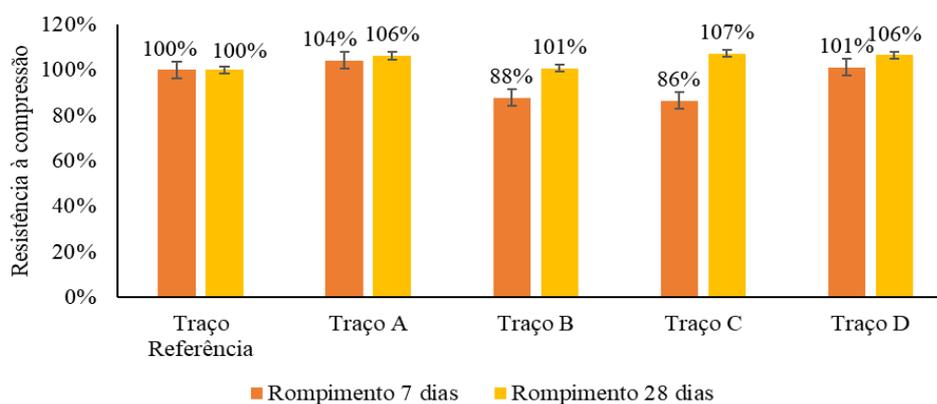
Tabela 21 – Resultado do ensaio resistência a compressão (28 dias)

Resistência a compressão - Idade 28 DIAS	CP 01 (MPa)	CP 02 (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Traço Referência	40,78	39,33	40,055	1,025	2,6%
Traço A	45,69	39,41	42,550	4,441	10,4%
Traço B	42,13	38,57	40,350	2,517	6,2%
Traço C	44,77	41,12	42,945	2,581	6,0%
Traço D	41,51	43,79	42,650	1,612	3,8%

Fonte: O Autor (2019)

A partir dos dados apresentados nas tabelas acima, formulou-se o gráfico relacionando as variações percentuais entre os valores médios de resistência à compressão dos traços com aditivos quando comparados com o traço de referência (Figura 13). Para facilitar a visualização dos resultados, fixou-se o valor de 100% para a resistência do traço referência nas idades de 7 e de 28 dias

Figura 13- Gráfico de comparação percentual relativa entre valores de resistência à compressão dos traços com aditivo quando comparados ao traço referência – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: O Autor (2019)

A partir da análise do gráfico (ver Figura 13), pode-se concluir que, para a idade de 07 dias, os aditivos referentes aos traços B e C provocaram uma queda de resistência de mais de 10% quando comparados ao traço referência, enquanto os aditivos dos traços A e D não provocaram grandes alterações. Porém, na idade de 28 dias, com o aumento do grau de hidratação, todos os traços que continham aditivos tiveram um bom desempenho quando comparados ao traço de referência, tendo o traço D alcançado um acréscimo de 7% de resistência.

Dessa forma, considerando que todos os traços apresentaram um aumento percentual de resistência para a idade de 28 dias, pode-se concluir que os aditivos redutores de permeabilidade não causam alterações significativas na resistência à compressão do concreto. A não alteração de resistência pode ser explicada a partir do fato de que os aditivos redutores de permeabilidade não influem na qualidade dos materiais que compõem o traço, na qualidade do concreto ou na relação água/cimento. Os aditivos são produtos inseridos no concreto com o único objetivo de reduzir a permeabilidade e, assim, conferir uma maior durabilidade a estrutura.

Os resultados obtidos se aproximam das pesquisas realizadas por Moreira (2016), a qual, a partir de relação a/c igual a 0,45 e teor de aditivo de 0,8% em relação à massa de cimento, obteve acréscimo de resistência de até 4% (28 dias). Sombrio (2018) também obteve resultado semelhante, para relação a/c de 0,45 e dosagem de aditivo de 0,8%, teve ganho de apenas 1% de resistência.

Hassani *et al.* (2017) observaram redução de 0,5% e aumento de 11% na resistência à compressão aos 28 dias, em concretos (a/c igual a 0,6), com o uso de 1% de aditivo, PRAN e PRAH respectivamente, em relação ao peso de cimento. Pazderka e Hájková (2016) estudaram a influência de dois tipos de aditivos PRAH (2% em relação ao peso de cimento) em concretos. Os resultados demonstraram que valores da resistência à compressão do concreto aos 28 dias foram idênticos ao concreto de referência (sem aditivo).

De acordo com Pazderka e Hájková (2016), em geral os fabricantes de aditivos PRAH declaram que esses produtos não diminuem, mas podem aumentar levemente a resistência à compressão do concreto. Calvo et al. (2019) observou que o uso de 0,3% (em peso de cimento) de aditivo PRAH em concreto, aumentou a resistência à compressão do concreto em 19,5% quando comparado com o traço de referência (sem aditivo), permitindo também a redução do fator a/c de 0.55 para 0.51 para um mesmo slump.

Os apêndices A e B trazem os relatórios fornecidos pelo equipamento utilizado no ensaio com os valores dos resultados obtidos, bem como a relação gráfica entre o desempenho dos CPs para os rompimentos nas idades de 7 e de 28 dias, respectivamente.

4.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão possibilita, além da determinação da porcentagem de absorção por cada traço, a determinação do índice de vazios das amostras e as características físicas, sendo elas massa específica seca, saturada e real. Seguindo a metodologia de cálculo proposta pela NBR 9778 (ABNT 2005), os valores encontrados para absorção de água e índice de vazios, bem como as massas específicas, estão representados na Tabela 22. O Apêndice D traz os valores brutos das pesagens realizadas.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de absorção por imersão

	Absorção	Índice de vazios	Massa específica amostra seca	Massa específica amostra saturada	Massa específica amostra real
Traço Referência	5,37%	12,12%	2,26	2,38	2,57
Traço A	5,50%	12,31%	2,24	2,36	2,55
Traço B	5,81%	12,79%	2,20	2,33	2,52
Traço C	5,53%	12,31%	2,22	2,35	2,54
Traço D	5,28%	11,73%	2,22	2,34	2,51

Fonte: O Autor (2019)

A partir do apresentado na Tabela 22, podemos concluir que os aditivos redutores de permeabilidade não causaram nenhuma alteração significativa na capacidade do concreto de absorver água quando em situação de imersão direta. Os valores encontrados para absorção e para índice de vazios de todos os traços se assemelham bastante, apresentando uma variação mínima, impossibilitando a conclusão quanto a eficácia dos aditivos redutores de permeabilidade. De acordo com Neville (2016), os valores de absorção por imersão não são um parâmetro ideal para definição da qualidade do concreto, pois o processo de secagem das amostras pode ser responsável por causar variações nos valores obtidos.

Trabalhos anteriormente realizados por Medeiros, Gomes e Helene (2006), os quais estudaram os PRAs sob condições não hidrostáticas, obtiveram valores semelhantes a esse estudo. Os autores, a partir de relação água/cimento de 0,52 e dosagem do agente ativo

de 22% em massa, obtiveram redução de aproximadamente 0,25% para a idade de 24 dias. Sombrio (2018), que estudou os PRAs sob condições hidrostáticas, para uma relação a/c de 0,70 e dosagem de aditivo de 0,8%, apresentou apenas 3% de diminuição na absorção.

4.3 Absorção de água por capilaridade

O valor da capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (ABNT 2012), é determinado a partir de uma relação entre a massa de água adsorvida e a área da seção transversal de cada corpo de prova. Os valores encontrados para a capilaridade de cada uma das amostras estão representados na Tabela 23. Os valores brutos das pesagens realizadas durante o ensaio estão representados no Apêndice C.

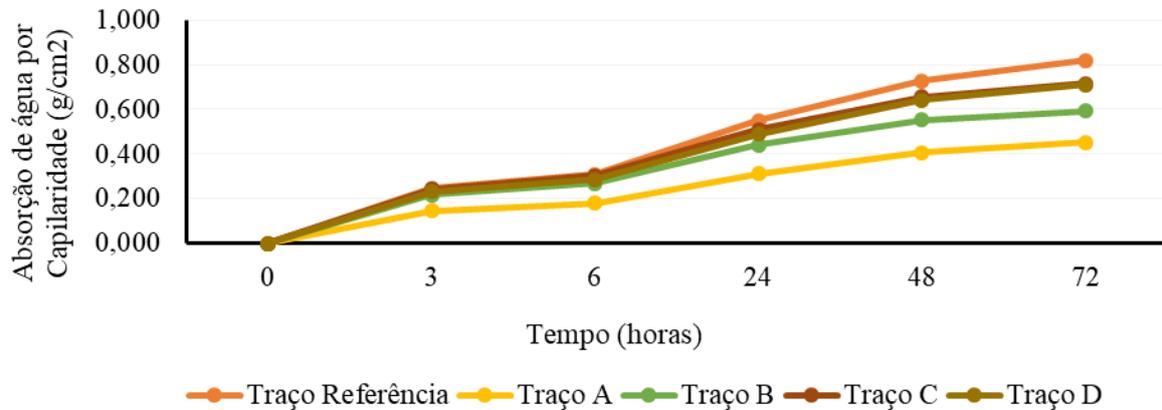
Tabela 23 – Valores de capilaridade do concreto medidos com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h de ensaio (g/cm²)

		Área da seção transversal (cm ²)	C Msat (3h)	C Msat (6h)	C Msat (24h)	C Msat (48h)	C Msat (72h)
Traço Referência	CP 01	77,319	0,269	0,337	0,590	0,783	0,881
	CP 02	75,815	0,244	0,308	0,545	0,722	0,813
	CP 03	79,833	0,224	0,284	0,512	0,680	0,765
Traço A	CP 01	76,496	0,153	0,187	0,311	0,393	0,428
	CP 02	78,116	0,147	0,176	0,315	0,415	0,467
	CP 03	77,772	0,138	0,175	0,314	0,414	0,464
Traço B	CP 01	76,977	0,210	0,263	0,430	0,535	0,579
	CP 02	75,753	0,221	0,267	0,415	0,514	0,546
	CP 03	76,341	0,221	0,274	0,480	0,604	0,652
Traço C	CP 01	76,853	0,248	0,313	0,523	0,672	0,741
	CP 02	76,047	0,243	0,307	0,537	0,689	0,742
	CP 03	75,507	0,235	0,288	0,472	0,602	0,663
Traço D	CP 01	76,884	0,215	0,265	0,437	0,577	0,643
	CP 02	75,722	0,232	0,293	0,544	0,719	0,803
	CP 03	75,892	0,244	0,301	0,483	0,628	0,688

Fonte: O Autor (2019)

A partir dos resultados obtidos, formulou-se o gráfico relacionando as capilaridades médias dos traços, nos diferentes períodos de medição (Figura 14). Na Tabela 24, as porcentagens do valor de absorção por capilaridade (72 horas) em relação ao traço referência (72 horas) são apresentadas. Optou-se por analisar a influência da capilaridade para o último tempo de ensaio por ser a situação mais crítica, considerando que as amostras ficaram em contato com a água por três dias seguidos (72 horas).

Figura 14 - Relação gráfica da absorção de água por capilaridade (g/cm^2) por tempo



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 24 – Variação de capilaridade dos traços com aditivo em relação ao traço de referência, para à medição realizada com 72 horas de ensaio (%)

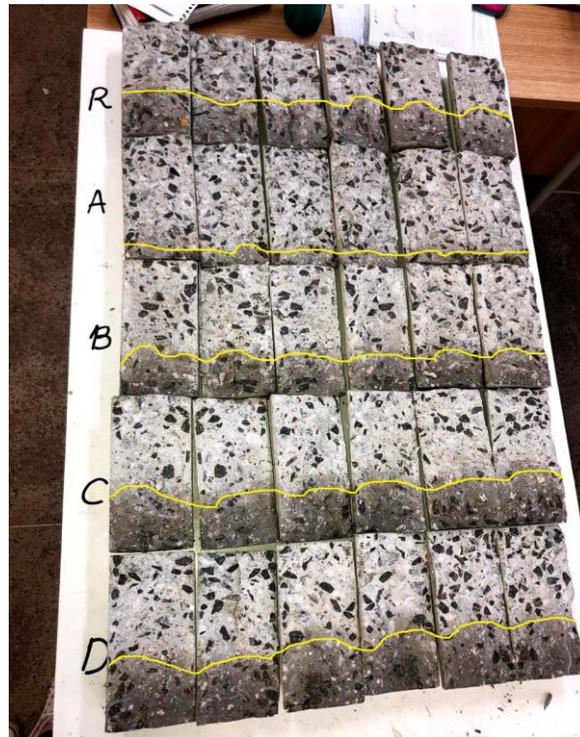
	Capilaridade (72h) (g/cm^2)	% em relação à Traço Referência
Traço Referência	0,820	-
Traço A	0,453	55%
Traço B	0,593	72%
Traço C	0,715	87%
Traço D	0,711	87%

Fonte: O Autor (2019)

Feitas as análises, pode-se observar que ao fim do ensaio todos os traços com aditivos apresentaram uma diminuição de absorção em relação ao traço referência. Esta tendência é especialmente observada no traço A o qual apresentou uma redução percentual de absorção de capilaridade de mais de 40%.

Em continuação ao ensaio, conforme indicado pela NBR 9779 (ABNT 2012), os CPs foram rompidos diametralmente, conforme ilustrado na Figura 15, para a determinação da máxima ascensão capilar atingida no interior do corpo de prova. Os valores da máxima ascensão capilar estão representados na Tabela 25.

Figura 15 - Ascensão capilar máxima interna - Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 25 – Resultado da altura ascensão capilar máxima interna das amostras, com valor de média, desvio padrão e coeficiente de variância - Ensaio de absorção por capilaridade

		H água (mm)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	% em relação à Traço Referência
Traço Referência	CP 01	76,000				
	CP 02	83,000	79,667	3,512	4%	-
	CP 03	80,000				
Traço A	CP 01	22,000				
	CP 02	31,000	33,667	13,204	39%	42%
	CP 03	48,000				
Traço B	CP 01	61,000				
	CP 02	63,000	67,000	8,718	13%	84%
	CP 03	77,000				
Traço C	CP 01	67,000				
	CP 02	70,000	68,000	1,732	3%	85%
	CP 03	67,000				
Traço D	CP 01	69,000				
	CP 02	83,000	72,333	9,452	13%	91%
	CP 03	65,000				

Fonte: O Autor (2019)

De forma semelhante ao já analisado com relação à absorção capilar, o traço A apresentou um valor de ascensão capilar 60% menor que o traço de referência, enquanto os outros traços tiveram uma diminuição percentual de cerca de apenas 10%. Assume-se que o resultado do ensaio é vantajoso para o aditivo PRAN (traço A) pois esse tipo de aditivo tem seu melhor desempenho quando submetido ao mecanismo de absorção capilar, onde os aditivos conseguem atuar a partir do bloqueio da entrada de água pela superfície, devido à baixa pressão hidrostática.

O traço D, apesar de possuir o mesmo tipo de aditivo, teve um desempenho significativamente inferior ao traço A. Por carência de informação na ficha técnica e por desconhecimento da empresa fabricante, não se obteve a composição química do aditivo D, fato que dificulta a análise conclusiva sobre qual é o fator causador decisivo para a diferença marcante entre os resultados.

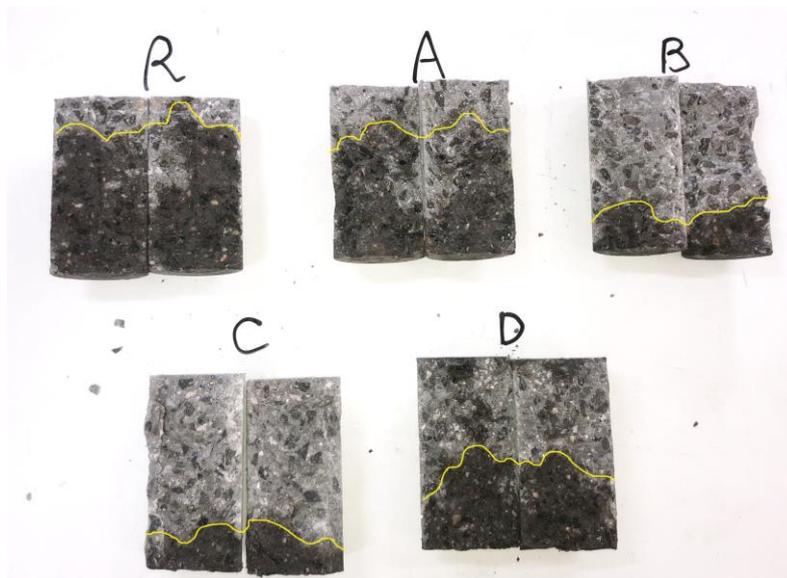
A tendência dos resultados desse trabalho referente aos percentuais de absorção por capilaridade obtidos e valores de ascensão capilar interna, estão de acordo com os resultados obtidos nos estudos de Medeiros, Gomes e Helene (2006), no que se refere ao uso de PRANs em concretos. Para o ensaio realizado pelos autores em questão, a diminuição de absorção foi na ordem de 50%, resultado semelhante ao obtido nesse trabalho para o traço A o qual também teve a adição do aditivo hidrofugante.

Para os aditivos redutores de permeabilidade sob condições hidrostáticas, pode ser citado o trabalho de Sombrio (2018), o qual, para uma dosagem de aditivo cristalizante de 0,8%, encontrou valor médio de redução de absorção por capilaridade na ordem de 11%, valor semelhante ao desempenhado pelo traço C, o qual também possui esse aditivo. O traço B, o qual também tem um aditivo cristalizante em sua composição, teve um desempenho melhor, mas ainda inferior ao desempenho do hidrofugante de superfície (traço A). Takagi (2013) também observou uma redução de 19,5% no valor de absorção, para uma dosagem com 2,5% de aditivo.

4.4 Penetração de água sob pressão

Conforme especificado pela NBR 10787 (ABNT 2011), para cada traço, ao fim do ciclo de cinco dias, assim como realizado para o ensaio de absorção por capilaridade, os CPs foram rompidos diametralmente, conforme representado na Figura 16, e registrou-se a altura da ascensão capilar atingida no interior de cada corpo de prova, conforme representado na Tabela 26.

Figura 16 – Ascensão capilar máxima interna - Ensaio de penetração de água sob pressão (Etapa 02)



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 26 – Resultado da altura ascensão capilar máxima interna, com valor de média, desvio padrão e coeficiente de variância - Ensaio de penetração de água sob pressão

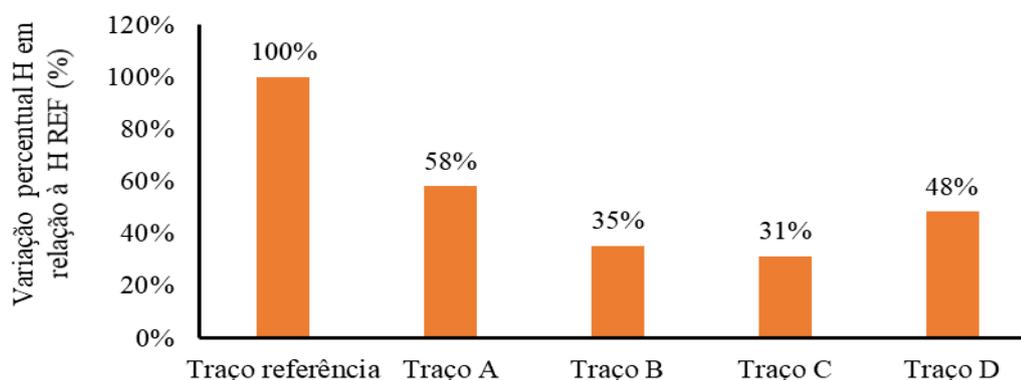
	H água (mm)					
	Etapa 01 (28 dias) (mm)	Etapa 02 (35 dias) (mm)	Etapa 03 (42 dias) (mm)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)
Traço referência	195	162	194	184	19	10%
Traço A	130	160	31	107	68	63%
Traço B	83	68	44	65	20	30%
Traço C	73	55	45	58	14	25%
Traço D	149	85	33	89	58	65%

Fonte: O Autor (2019)

A partir dos valores medidos das alturas de ascensão capilar de cada um dos traços, analisou-se que a idade das amostras pode ser considerada um fator relevante para o desempenho dos hidrofugantes (A e D), visto que o desempenho dos aditivos cristalizantes (B e C) teve uma redução linear de ascensão capilar com o passar das idades, enquanto os aditivos hidrofugantes tiveram uma redução considerável na ascensão capilar apenas alcançados os 42 dias. Sugere-se o estudo do aditivo em outras idades para conclusão sobre a eficiência da idade das amostras no desempenho do aditivo PRAN.

Em seguida, estabeleceu-se o gráfico (representado na Figura 17) relacionando a variação percentual do valor médio de altura de ascensão capilar de cada traço em relação ao traço de referência, o qual teve sua porcentagem fixada em 100% para facilitar visualização dos resultados.

Figura 17- Gráfico com variação percentual ascensão capilar média dos traços com aditivo em relação ao traço referência – Ensaio de penetração de água sob pressão



Fonte: O Autor (2019)

A partir da análise, pode-se concluir que os quatro aditivos utilizados no estudo provocaram uma redução considerável na ascensão capilar sob alta pressão, porém, os aditivos redutores de permeabilidade sob condições hidrostáticas se destacaram na redução da penetração de água sob pressão, tendo o traço C obtido uma diminuição percentual média de ascensão capilar de 69% em relação ao traço referência.

Assume-se que o resultado do ensaio é mais significativo para os aditivos PRAH (produtos B e C) pois esse tipo de aditivo atua resistindo à alta pressão hidrostática, podendo ela ser positiva ou negativa, por meio da formação de uma estrutura cristalina insolúvel, a qual se torna responsável por preencher os poros e capilares do concreto. Os aditivos PRAN, produtos A e D, de acordo com a literatura, são pouco eficientes quando a pressão da água existente é alta.

O resultado obtido no ensaio pode ser confirmado pela pesquisa de Takagi (2013), o qual, a partir de um teor de 2,5% do PRA sob condições hidrostáticas e relação água/cimento igual a 0,6, obteve uma redução de permeabilidade na ordem de 13%. Calvo et al. (2019) observou redução em torno de 50% na permeabilidade sob pressão em concreto com o uso de 0,35% de aditivo PRAH, quando comparado com o concreto de referência (sem aditivo). A análise das modificações do aditivo na microestrutura do concreto detectou que a

redução da permeabilidade não está atribuída a uma mudança da porosidade ou distribuição dos poros pelo uso do aditivo no traço, mas a reações de hidratação envolvendo as partículas do aditivo na presença de água. Entretanto, Moreira (2016) não obteve um comportamento semelhante ao obtido nessa pesquisa. Em seu estudo, a partir de uma dosagem de 0,8% e adotando o CPV ARI, não apresentou melhorias significativas na permeabilidade do concreto.

4.5 Penetrabilidade de íons cloretos

Realizado o ensaio de penetrabilidade de íons cloretos e feitos os cálculos conforme indicado pela ASTM C 1202:2012, obteve-se o valor da carga total que passa pelo corpo de prova para cada um dos traços, cujos valores médios, bem como desvio padrão e coeficiente de variância, estão representados na Tabela 27. Os resultados dos valores brutos das medições de tensão feitas em cada um dos traços estão representados no apêndice F.

Tabela 27 - Carga passante medida (em Coulombs) para os diferentes traços - Ensaio de penetrabilidade de íons cloretos

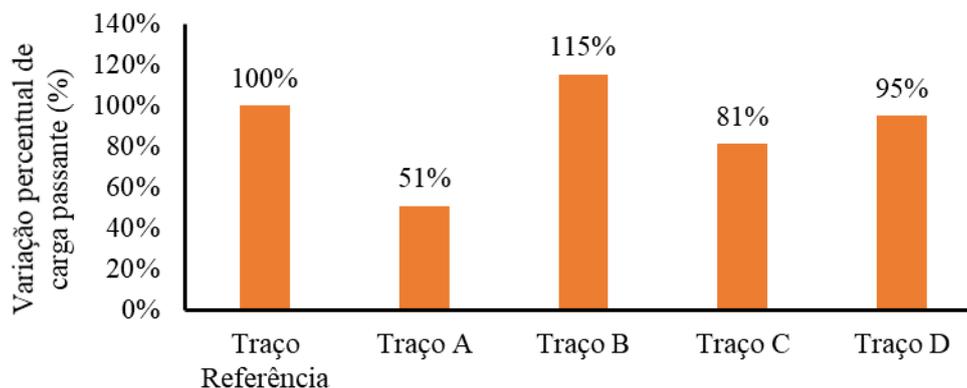
	C Médio	DV	CV (%)
Traço Referência	4866,75	200,22	0,04
Traço A	2479,50	235,32	0,09
Traço B	5609,25	418,50	0,07
Traço C	3955,50	473,76	0,12
Traço D	4621,50	258,82	0,06

Fonte: O Autor (2019)

Do ponto de vista da classificação proposta pela ASTM C 1202:2012, a qual especifica que um intervalo de carga passante entre $2000 < C < 4000$ significa uma penetrabilidade moderada, pode-se classificar os traços A e C como traços de nível moderado quanto a penetrabilidade de íons cloretos, enquanto os traços de referência, traço B e traço D são classificados como traços de penetrabilidade alta ($C > 4000$).

Em seguida, a partir dos resultados médios obtidos, estabeleceu-se o gráfico (Figura 18) com a comparação percentual de carga passante na amostra dos traços com aditivo em relação ao traço de referência, o qual teve sua porcentagem fixada em 100% para facilitar visualização dos resultados.

Figura 18- Comparação gráfica percentual de carga passante média dos traços com aditivo em relação ao traço referência



Fonte: O Autor (2019)

Dessa forma, a partir da análise gráfica, pode-se concluir que aditivos com a mesma composição química, como o traço B e o traço C, apresentaram comportamentos significativamente diferentes, tendo o traço B provocado um aumento de carga passante de 15%, enquanto o traço C provocou uma queda de 19%. Os traços A e D obtiveram uma redução carga passante em relação ao traço de referência, com ênfase para o traço A o qual obteve melhor desempenho no ensaio, alcançando quase 50% de diminuição de penetração de íons cloreto.

Pesquisas como a de Medeiros (2008) e Helene *et al.* (2018) propõe resultados diferentes. Para Medeiros (2008), que testou diferentes tipos de aditivos, entre eles hidrofugantes a base de silano-siloxano, como o produto inserido no traço A a redução de carga passante foi significativa para todos os traços testados. O autor utilizou cimento CP II-E.

Para Helene *et al.* (2018), os quais realizaram o ensaio com diferentes relações água/cimento e a dosagem do aditivo cristalizante em 2%, todos as amostras ensaiadas sofreram uma diminuição na passagem de cloretos. Os autores utilizaram CP III.

Considerando a discrepância entre os resultados obtidos para os aditivos, bem como a incongruência com os resultados obtidos por pesquisas semelhantes, o ensaio foi refeito como forma de assegurar os valores obtidos, mas não foram obtidas diferenças nos números encontrados. As amostras foram ensaiadas com 28 dias e novamente com 72 dias (resultados representados nesse trabalho). A empresa referente ao traço B foi contactada em busca de uma possível explicação sobre o seu desempenho, mas não se obteve retorno.

Alguns autores defendem que o ensaio de penetrabilidade de cloretos é impreciso. Stanish, Hooton e Thomas (1997) afirmam que para esse método acelerado de ensaio, não é a permeabilidade que está sendo medida e sim o movimento de todos os íons, não apenas dos

íons cloreto, o que pode afetar o resultado do teste (a carga total aprovada). Ramezianpour *et al.* (2010) acrescenta que devido à alta voltagem aplicada durante o teste (60 V) e duração relativamente longa (6 h), a temperatura das amostras aumenta, causando o aumento da carga total de passagem, podendo aumentar os danos a microestrutura e alterar a composição química das soluções de poros.

Dessa forma, como estudo posterior, sugere-se analisar a forma como os aditivos reagem a altas temperaturas, com foco para o aditivo referente ao traço B, bem como se algum elemento de sua composição química sofreu modificações que comprometeu o desempenho na resistência a passagem de íons cloretos.

4.6 Resistividade elétrica volumétrica

Considerando que a resistividade elétrica pode ser entendida como uma medida da oposição de um material ao fluxo da corrente elétrica, podemos considerar que, quanto mais baixa for a resistividade da amostra, mais permeável ele será, pois, a carga elétrica conseguirá passar com mais facilidade. Portanto, o valor da resistividade é inversamente proporcional ao valor da permeabilidade.

Os valores encontrados para resistividade volumétrica, como também a média, desvio padrão e coeficiente de variância, estão representados na Tabela 28. Os valores brutos das medições realizadas no ensaio estão no apêndice E.

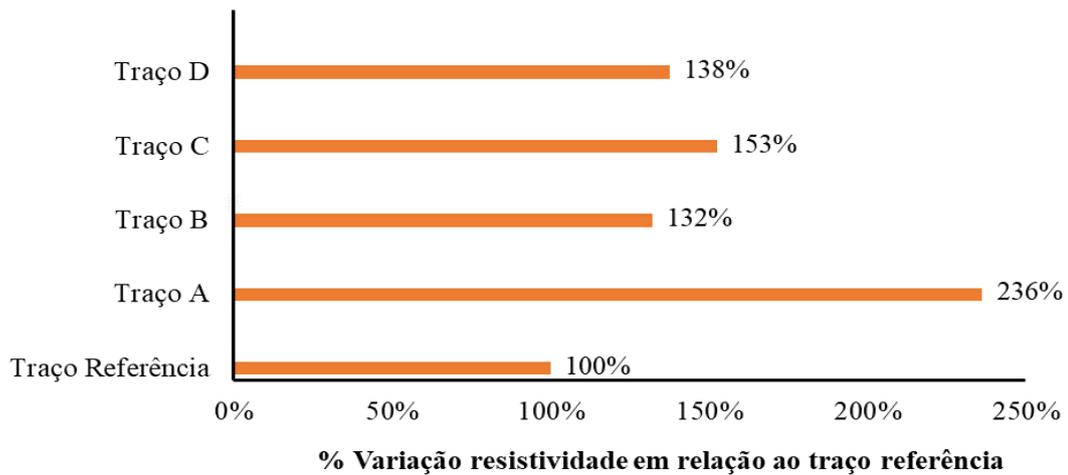
Tabela 28 – Resultado ensaio resistividade elétrica volumétrica (Ωm)

		Resistividade volumétrica (Ωm)	Média (Ωm)	DP (Ωm)	CV (%)
Traço Referência	CP 01	4,747	5,485	0,639	12%
	CP 02	5,841			
	CP 03	5,866			
Traço B	CP 01	15,119	12,962	2,436	19%
	CP 02	10,320			
	CP 03	13,446			
Traço C	CP 01	8,728	7,251	1,540	21%
	CP 02	5,654			
	CP 03	7,371			
Traço D	CP 01	7,879	8,367	0,521	6%
	CP 02	8,305			
	CP 03	8,917			
Traço E	CP 01	7,867	7,543	0,600	8%
	CP 02	6,850			
	CP 03	7,912			

Fonte: O Autor (2019)

A partir do exposto, estabeleceu-se uma comparação percentual do valor de resistividade média dos traços com aditivo em relação ao traço de referência, representada na Figura 19. Foi fixada a variação percentual do traço de referência em 100% para facilitar entendimento dos resultados.

Figura 19- Comparação gráfica percentual do valor de resistividade entre traços - Ensaio de resistividade elétrica volumétrica



Fonte: O Autor (2019)

Dessa forma, podemos concluir que, conforme esperado, o traço referência apresenta menor resistividade e, portanto, uma maior permeabilidade, enquanto o traço A alcançou um acréscimo de resistividade de mais de 200% e, portanto, uma diminuição direta significativa de permeabilidade do traço. Os outros traços, B, C e D tiveram um aumento na resistividade de, respectivamente, 32%, 53% e 38%.

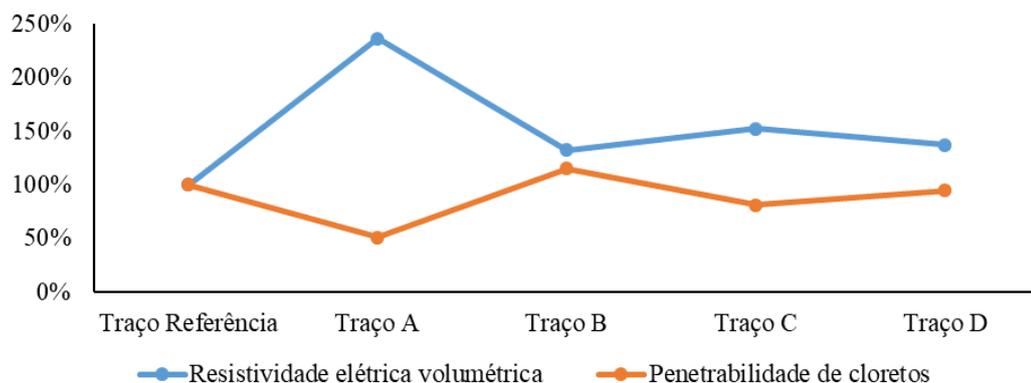
Conforme comentado no item respectivo a aditivos redutores de permeabilidade sob condições hidrostáticas (item 2.2.1.1), os aditivos PRAHs (traço B e C) tem seu melhor desempenho diretamente relacionado à presença de água, pois é assim que os cristais conseguem se formar para que, então, possam tornar-se barreira para a entrada de agentes agressores externos. Considerando que os CPs foram colocados em estufa antes do ensaio, atribui-se esse fator como possível causa para o desempenho inferior do PRAH com relação ao aditivo PRAN (traço A).

4.7 Relação entre resultados de resistividade elétrica volumétrica e penetrabilidade de íons cloretos.

A resistividade elétrica e a condutividade são propriedades do concreto que interferem diretamente na sua durabilidade. De acordo com Ramezaniapour *et al.* (2010), a resistividade elétrica representa íons em movimento, como íons cloreto, na solução de poros e, portanto, se a resistividade elétrica for alta, o movimento dos íons cloreto deve ser lento e, conseqüentemente, a taxa de corrosão será mais baixa e a durabilidade da estrutura será maior.

Dessa forma, segue ilustrado na Figura 20 uma relação percentual gráfica dos resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica e de penetrabilidade de íons cloreto. As porcentagens ilustradas para os traços com aditivo foram calculadas em função dos valores obtidos para o traço referência, o qual teve seus valores fixados em 100% para facilitar visualização de resultados.

Figura 20 - Relação gráfica entre resultados dos ensaios de resistividade elétrica e de penetrabilidade de cloretos



Fonte: O Autor (2019)

Os resultados das curvas (Figura 20) demonstram que esse estudo está de acordo com a tendência proposta por Ramezaniapour *et al.* (2010). Podemos observar que o traço A apresenta o maior valor de resistividade e o menor valor de penetrabilidade, sendo essa proporção inversa entre resultados dos ensaios seguida da mesma forma para os outros traços. Dessa forma, seguindo o proposto pelos autores, entre os aditivos testados, o aditivo referente ao traço A proporciona uma menor taxa de corrosão para estrutura, com conseqüente aumento de durabilidade.

4.8 Comparativo dos resultados encontrados nos ensaios de durabilidade com a especificação utilizada para o concreto na obra da linha leste do metrô da cidade de Fortaleza.

Buscando avaliar se, caso submetidos a uma situação prática, os desempenhos dos aditivos no concreto seriam considerados satisfatórios, adotaram-se como referenciais admitidos de permeabilidade os limites especificados para o concreto utilizado na obra da linha leste do metrô de Fortaleza. Para o concreto do metrô, foram especificados limites para os ensaios de absorção (por imersão e por capilaridade) e para o ensaio de penetração de água sob pressão. A Tabela 29 relaciona os limites admitidos bem como os resultados obtidos nos ensaios realizados nesse trabalho. Não foram disponibilizadas informações com relação aos materiais utilizados no concreto ou o traço adotado.

Tabela 29 - Comparação entre limites de permeabilidade admitidos pelo concreto da linha leste do metrô de Fortaleza e resultados obtidos nos ensaios realizados

Limite admitido		Resultados ensaios				
Linha leste - Metrô Fortaleza		Traço Referência	Traço A	Traço B	Traço C	Traço D
Absorção de água por imersão	$\leq 8\%$	5,37%	5,50%	5,81%	5,53%	5,28%
Absorção de água por capilaridade	$\leq 8 \text{ cm}$	7,97	3,37	6,70	6,80	7,23
Penetração de água sob pressão	$\leq 5 \text{ cm}$	18,37	10,70	6,50	5,77	8,90

Fonte: O Autor (2019)

Portanto, comparando os resultados encontrados nos ensaios realizados com os valores admitidos para o metrô, pode-se analisar que para os limites dos ensaios de absorção, por imersão e por capilaridade, os cinco traços (inclusive o traço de referência) seriam aceitos dentro dos critérios estabelecidos. Porém, para o ensaio de penetração de água sob pressão, nenhum dos traços, e, conseqüentemente, nenhum dos aditivos estudados obedece ao critério máximo de altura de ascensão capilar.

Conforme observado anteriormente nos resultados de cada ensaio, os ensaios de absorção por imersão não trazem resultados significativos para o estudo, já que, apesar da incorporação do aditivo redutor de permeabilidade, não podem ser percebidas grandes alterações em relação aos valores de absorção do traço referência. Com relação ao ensaio de absorção por capilaridade, conclui-se que esse é um ensaio superficial e que, portanto, não garante a proteção integral do concreto e, portanto, com base nos resultados do ensaio de penetração de água sob pressão, para os limites admitidos para o metrô, na dosagem estabelecida dos aditivos nesse trabalho, nenhum aditivo seria aprovado para a obra.

5 CONCLUSÃO

As conclusões desse trabalho são referentes ao estudo do desempenho de aditivos redutores de permeabilidade, sob condições hidrostáticas (PRAH) e sob condições não hidrostáticas (PRAN), quando submetidos a ensaios mecânicos e de durabilidade. Portanto, a partir dos experimentos realizados com os diferentes tipos de aditivos e dos resultados obtidos, foi possível concluir os seguintes pontos:

- ✓ A inserção de aditivos redutores de permeabilidade no concreto não interfere na resistência à compressão dos concretos estudados. A performance mecânica dos concretos pode ser atribuída aos processos de cura e reações de hidratação ao longo das idades dos ensaios.
- ✓ O ensaio de absorção por imersão não trouxe resultados quantitativos significativos sobre o desempenho dos aditivos, visto que todos os cinco traços, incluindo o traço de referência (sem aditivo), apresentaram valores muito próximos de absorção, entre 5 e 6%, e de índice de vazios, em média 12%.
- ✓ O aditivo PRAN (traço A) teve um melhor desempenho nos ensaios de absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica volumétrica e penetrabilidade de íons cloreto. Sobre o desempenho do produto D, quando comparado aos resultados obtidos pelo aditivo testado da mesma categoria (aditivo A), conclui-se que esse teve desempenho inferior ao esperado. Não foram disponibilizadas maiores informações sobre o produto e sua composição química pela empresa fabricante. Supõe-se que seu resultado divergente possa ser explicado por se tratar de uma composição química com

outra base, que não silano-siloxano, ou que o aditivo possa trabalhar melhor se testado com uma dosagem maior do que a utilizada (0,8% do consumo de cimento).

- ✓ Para o ensaio de absorção por capilaridade, o traço A obteve uma redução de absorção de água na ordem de 45% em relação a absorção do traço de referência. Os outros traços, incluindo o traço D (possui aditivo PRAN), não tiveram desempenho significativo, com uma redução de absorção média para o traço B de 28% e para os traços C e D de 13% apenas. Com relação à altura de ascensão capilar, o desempenho das amostras é semelhante ao obtido pela absorção, o traço A obteve redução de 58%, traços B e C na ordem de 15% e traço D apenas 9%.
- ✓ Para a variável resistividade elétrica volumétrica, o traço A alcançou um acréscimo de resistividade de 238% e os outros traços, B, C e D tiveram um aumento na resistividade de, respectivamente, 32%, 53% e 38%. Ressalta-se que amostras com aditivos cristalizantes (traço B e C), previamente secas em estufa, tem seu melhor desempenho diretamente relacionado à presença de água, pois é como os cristais conseguem se formar e, então, impedir a entrada de agentes agressores externos. Considerando que essas estavam secas, acredita-se que os cristais não se formaram por completo, prejudicando seu desempenho.
- ✓ Os aditivos PRAH (traços B e C) tiveram um melhor desempenho no ensaio de penetração de água sob pressão. Por esse se tratar de um ensaio com alta pressão hidrostática, requer que o aditivo possa trabalhar sob essas condições, sendo esses os aditivos B e C, os quais conseguiram, em relação ao traço de referência, uma redução de penetração de, respectivamente, 65% e 69%. Os traços A e D tiveram uma redução de, respectivamente, 42% e 52%.
- ✓ Ainda sobre o ensaio de penetração de água sob pressão, analisou-se que a idade das amostras pode interferir para o desempenho dos hidrofugantes (A e D), visto que o desempenho dos aditivos cristalizantes (B e C) sofreu uma redução linear com o passar das idades e os aditivos hidrofugantes tiveram uma redução de absorção capilar considerável apenas com 42 dias. Porém, visto que só foram ensaiadas amostras até os 42 dias, a influência da idade se

torna inconclusiva para esse trabalho. Sugere-se o estudo do aditivo em outras idades.

- ✓ Para o ensaio de penetrabilidade de íons cloretos, o ensaio é inconclusivo sobre qual tipo de aditivo tem um desempenho melhor, visto que produtos de composição semelhante tiveram comportamentos variados. O traço B obteve um aumento de carga passante de 15%, enquanto o traço C provocou uma queda de 19%. Os traços A e D obtiveram uma redução de carga passante em relação ao traço de referência, com ênfase para o traço A o qual obteve melhor desempenho no ensaio, alcançando quase 50% de diminuição de penetração de íons cloreto. Sugere-se estudar a microscopia dos aditivos para entender porque eles se comportam de formas diferentes, apesar de possuírem a mesma composição química.
- ✓ Ainda sobre o ensaio de penetrabilidade de íons cloretos, segundo os limites de classificação propostos pela ASTM C 1202-12, pode-se classificar os traços A e C como traços de nível moderado quanto a penetrabilidade de íons cloretos, enquanto os traços de referência, traço B e traço D são classificados como traços de penetrabilidade alta ($C > 4000$).
- ✓ Segundo a relação proposta entre os resultados de resistividade elétrica e o movimento dos íons cloreto por Ramezaniapour *et al.* (2010), a partir dos resultados obtidos nos ensaios, conclui-se que o aditivo referente ao traço A é o aditivo que pode proporcionar uma menor taxa de corrosão para estrutura, com conseqüente aumento de durabilidade.
- ✓ Com relação aos limites de permeabilidade admitidos pelo concreto do metrô de Fortaleza, pode-se concluir que baseado nos limites de absorção, por capilaridade e por imersão, todos os traços seriam aprovados. Porém, baseado nos limites de penetração de água sob pressão, nenhum dos traços seria aprovado, tendo o traço C alcançado a menor penetração média, 5,8 cm, e o limite máximo admitido é de 5 cm.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para continuação desse estudo, sugere-se para trabalhos futuros:

- a) Avaliar a influência da incorporação dos aditivos redutores de permeabilidade na microestrutura do concreto e nos mecanismos de transporte;
- b) Analisar se as metodologias propostas pelas NBRs de referência dos ensaios realizados são satisfatórias para avaliar os aditivos redutores de permeabilidade, com ênfase para as idades de ensaios indicadas.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. T.; OTOCH, S. **Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de Fortaleza.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47. 2005, Olinda. Anais... Olinda: IBRACON, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202.** Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ACI Committee 212, Report on Chemical Admixtures for Concrete (**ACI 212.3R-10**), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2010), pp. 46-50

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

_____. **NBR 5739:** Concreto - ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 9204:** Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9575:** Impermeabilização – seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10787:** Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

AZZI, Sarah Silva; COSTA, Josiane Moraes. **Comparação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto em cimento Portland CPIV.** 2017

BRANDÃO, Ana Maria. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado:** Aspectos relativos ao projeto. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, [S. l.], 1998. Disponível em: http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1998ME_AnaMariadaSilvaBrandao.pdf. Acesso em: 2 out. 2019.

BRASILEIRO, Francisca. **Utilização de cinzas de termelétrica na confecção de blocos de concreto para alvenaria**. 2018. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2018

CALVO, José Luis García *et al.*, **Improvement of the Concrete Permeability by Using Hydrophilic Blended Additive**, (2019), doi: [10.3390/ma12152384](https://doi.org/10.3390/ma12152384)

CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. **Requisitos de projeto, normalização e execução para estruturas com longa vida útil**. In: Revista Concreto & Construções. Ed. IBRACON. n. 79. São Paulo, 2015.

FLORES, M. R *et al.* **Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments**. *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 1-11, 2015.

FREITAS JR, José de Almendra. **Aditivos para Concreto**. Paraná, [2013]. Disponível em: http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/1/15/TC031_Aditivos_.pdf. Acesso em: 23 maio 2019.

HELENE, Paulo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. rev. São Paulo: PINI, 1992. 218 p.

HELENE, P. *et al.* **Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 11, n. 3, p. 544-563, May 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000300007>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO. **Porque impermeabilizar?** [s. l.], 2018. Disponível em: <http://ibibrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/01/Porque-impermeabilizar.pdf>. Acesso em: 23 out. 2019.

INSTRUÇÕES de operação – Teste de durabilidade do concreto. Resipod Family. Proceq SA, Suíça, 2017.

JESUS, Lourdimine Santos de. **A resistividade elétrica do concreto e a sua correlação com a durabilidade das estruturas**. In: Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE. n. 1. Brasília, 2018.

LAPA, José. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2008.

LEITE, H. R.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. **Durabilidade do Concreto: Análise dos Requisitos dos Materiais Constituintes**. Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana n.8 (2018) pp. 14-25

MARCELINO, Norton Walter. **Durabilidade das estruturas de concreto armado**. Santa Catarina, 30 out. 2008. Disponível em: <http://www.crea-sc.org.br/portal/index.php?cmd=artigos-detalle&id=84#.XVcDBOhKjIU>. Acesso em: 16 ago. 2019.

MEDEIROS, Marcelo; GOMES, Thais; HELENE, Paulo. **Hidrofugantes de superfície: Estudo da capacidade de barrar o ingresso de água no concreto.** Universidade de São Paulo, [S. l.], 2006.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de et al. **Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato.** *Matéria (Rio J.)* [online]. 2015, vol.20, n.1, pp.145-159. ISSN 1517-7076. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0015>.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/T.3.2008.tde-20072009-174802. Acesso em: 2019-10-16.
MELO, Clereston. **Influência de adição e substituição de cinza in natura de termelétrica na resistência à compressão do concreto.** 2017. Monografia (Bacharel em Construção Civil) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1994 Ed.:PINI. ISBN.: 85-7266-040-2. Português, p. 573

MOREIRA, M. M. (2016). **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – Contribuição aos processos de autocicatrização.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-16A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 162p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OURIVES, C. N.; BILESKY, P. C.; YOKOYAMA, C. M. **Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do Concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador. Anais...Salvador, Ed. IBRACON, 2008.

PAZDERKA, Jirí; HÁJKOVÁ, Eva. **Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete.** Czech Technical University in Prague, 2016.
<https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306>

PEREIRA, Barbara. **Avaliação de desempenho de concretos no estado fresco com a incorporação de aditivo cristalizante.** 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/prefix/13255/1/21484906.pdf>. Acesso em: 2 out. 2019.

PEREIRA, Bárbara; NASCIMENTO, Raissa. **Os efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.** 2017. Relatório final de pesquisa (Iniciação científica de Pós-Graduação e Pesquisa) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, [S. l.], 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.5102/pic.n2.2016.5527>. Disponível em: <https://www.publicacoesacademicas.uniceub.br/pic/article/view/5527>. Acesso em: 2 out. 2019.

PINHEIRO, Igor. **Os principais aditivos utilizados no concreto**. [S. l.], 15 mar. 2019. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/os-principais-aditivos-utilizados-no-concreto-2/>. Acesso em: 25 out. 2019.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology**. Park Ridge NJ: second edition Noyes Publications, 1995. 1153 pp

RAMEZANIANPOUR, A.A. *et al.*, **Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength**, Constr. Build. Mater. 25 (2011) 2472–2479, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>

RIXOM, R.; MAILVAGANAM, P. **Chemical admixtures for concrete**. London: Third edition E. and F. N. Spon, 1999.

ROQUE, J. A.; MORENO JUNIOR, A. L. **Considerações sobre vida útil do concreto**. In: 1 ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 2005, São Carlos.

SANTANA, Bruna; ALEIXO, Isabella. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes**. 2017. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica (Pós-Graduação) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, [S. l.], 2017.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SATO, N.M.N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. 163PTESE (Pós-graduação em engenharia civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/viewFile/18231/7059>

SILVA, Luiz Carlos Thiers. **Dicas de construção - Aditivos**. [S. l.], 2004. Disponível em: <https://www.sitengenharia.com.br/diversosaditivos.htm>. Acesso em: 23 out. 2019.

SOMBRIÓ, César. **Efeito do aditivo cristalizante na rede capilar em concretos usinados**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2019.

SOUZA, Vicente Custodio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, [2009].

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review**. 1998. Department of Civil Engineering - University of Toronto, 1998.

TAKAGI, E. M.; JUNIOR, W. A.; OLIVEIRA, F. S. **Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado.** 46º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, 2004.

TAKAGI, Emilio Minoru. **Aditivo cristalino para a impermeabilização integral por cristalização de estruturas de concreto de pontes** . [S. l.], abr/jun 2019.

TAKAGI, Emilio Minoru. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino.** 2013. 130 f. Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

VISCALDI, Diego; SILVA, Bruno. **Análise do concreto submetido a ataque por sulfato de ferro em áreas degradadas pela mineração do carvão,** [S. l.], 2014

**APÊNDICE C – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS – ABSORÇÃO DE
ÁGUA POR CAPILARIDADE**

Tabela 30 - Dimensões corpos de prova - Ensaio de absorção de água por capilaridade

		Diâmetro (mm)	Altura (L) (mm)	Área da seção transversal (cm²)
Traço Referência	CP 01	99,220	193,910	77,319
	CP 02	98,250	194,610	75,815
	CP 03	100,820	192,330	79,833
Traço A	CP 01	98,690	195,520	76,496
	CP 02	99,730	194,920	78,116
	CP 03	99,510	194,790	77,772
Traço B	CP 01	99,000	192,020	76,977
	CP 02	98,210	192,330	75,753
	CP 03	98,590	192,210	76,341
Traço C	CP 01	98,920	192,180	76,853
	CP 02	98,400	192,080	76,047
	CP 03	98,050	191,920	75,507
Traço D	CP 01	98,940	190,700	76,884
	CP 02	98,190	190,350	75,722
	CP 03	98,300	190,530	75,892

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 31 – Pesagem das amostras (g) - Ensaio de absorção de água por capilaridade

		Massa seca (g)	Massa saturada (3h)	Massa saturada (6h)	Massa saturada (24h)	Massa saturada (48h)	Massa saturada (72h)
Traço Referência	CP 01	3281,03	3301,83	3307,08	3326,67	3341,54	3349,14
	CP 02	3316,40	3334,90	3339,76	3357,71	3371,11	3378,02
	CP 03	3347,97	3365,85	3370,63	3388,88	3402,23	3409,07
Traço A	CP 01	3409,69	3421,40	3423,97	3433,49	3439,73	3442,42
	CP 02	3417,11	3428,56	3430,85	3441,69	3449,50	3453,58
	CP 03	3365,15	3375,87	3378,78	3389,55	3397,37	3401,26
Traço B	CP 01	3340,06	3356,20	3360,33	3373,18	3381,25	3384,66
	CP 02	3299,03	3315,80	3319,29	3330,43	3337,96	3340,40
	CP 03	3269,85	3286,75	3290,73	3306,46	3315,98	3319,65
Traço C	CP 01	3297,05	3316,13	3321,12	3337,25	3348,73	3354,00
	CP 02	3280,11	3298,59	3303,42	3320,91	3332,48	3336,50
	CP 03	3266,65	3284,37	3288,36	3302,26	3312,10	3316,70
Traço D	CP 01	3308,69	3325,24	3329,03	3342,26	3353,06	3358,14
	CP 02	3234,58	3252,15	3256,73	3275,81	3289,04	3295,37
	CP 03	3283,90	3302,44	3306,74	3320,57	3331,57	3336,11

Fonte: O Autor (2019)

**APÊNDICE D – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS – ABSORÇÃO DE
ÁGUA POR IMERSÃO**

Tabela 32 – Pesagem das amostras (g) – Ensaio de absorção por imersão

		Massa seca (Ms) (g)	Massa balança hidrostática (Mi) (g)	Massa saturada (Msat) (g)
Traço Referência	CP 01	3350,290	2029,000	3523,000
	CP 02	3381,350	2082,000	3570,000
Traço A	CP 01	3367,660	2046,000	3554,000
	CP 02	3446,550	2098,000	3635,000
Traço B	CP 01	3330,160	2008,000	3520,000
	CP 02	3323,940	2008,000	3521,000
Traço C	CP 01	3375,230	2044,000	3566,000
	CP 02	3335,420	2021,000	3516,000
Traço D	CP 01	3384,140	2032,000	3555,000
	CP 02	3360,480	2030,000	3546,000

Fonte: O Autor (2019)

APÊNDICE E – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS – RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA

Tabela 33 - Leituras individuais de resistividade - Ensaio resistividade volumétrica

		R superior	R inferior	R medido	R cilindro
Traço Referência	CP 01	1,600	0,000	39,000	37,400
	CP 02	2,100	0,000	49,200	47,100
	CP 03	1,900	0,000	46,300	44,400
Traço B	CP 01	1,500	0,000	122,900	121,400
	CP 02	1,600	0,000	82,500	80,900
	CP 03	1,600	0,000	107,400	105,800
Traço C	CP 01	3,000	0,000	71,400	68,400
	CP 02	3,000	0,000	48,100	45,100
	CP 03	3,400	0,000	61,700	58,300
Traço D	CP 01	3,500	0,000	65,400	61,900
	CP 02	2,700	0,000	68,600	65,900
	CP 03	2,700	0,000	73,900	71,200
Traço E	CP 01	2,300	0,000	63,600	61,300
	CP 02	3,000	0,000	57,100	54,100
	CP 03	3,400	0,000	65,800	62,400

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 34 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de Resistividade Volumétrica

		Diâmetro (cm)	Altura (cm) (L)	Área (cm²)	K (A/L) (cm)
Traço Referência	CP 01	9,922	19,391	77,319	3,987
	CP 02	9,825	19,461	75,815	3,896
	CP 03	10,082	19,233	79,833	4,151
Traço B	CP 01	9,869	19,552	76,496	3,912
	CP 02	9,973	19,492	78,116	4,008
	CP 03	9,951	19,479	77,772	3,993
Traço C	CP 01	9,900	19,202	76,977	4,009
	CP 02	9,821	19,233	75,753	3,939
	CP 03	9,859	19,221	76,341	3,972
Traço D	CP 01	9,892	19,218	76,853	3,999
	CP 02	9,840	19,208	76,047	3,959
	CP 03	9,805	19,192	75,507	3,934
Traço E	CP 01	9,894	19,070	76,884	4,032
	CP 02	9,819	19,035	75,722	3,978
	CP 03	9,830	19,053	75,892	3,983

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 35 - Cálculo da resistividade volumétrica

		R cilindro	$2\pi a$	R corrigido	Resistividade volumétrica
Traço Referência	CP 01	37,400	31,416	1,190	4,747
	CP 02	47,100	31,416	1,499	5,841
	CP 03	44,400	31,416	1,413	5,866
Traço B	CP 01	121,400	31,416	3,864	15,119
	CP 02	80,900	31,416	2,575	10,320
	CP 03	105,800	31,416	3,368	13,446
Traço C	CP 01	68,400	31,416	2,177	8,728
	CP 02	45,100	31,416	1,436	5,654
	CP 03	58,300	31,416	1,856	7,371
Traço D	CP 01	61,900	31,416	1,970	7,879
	CP 02	65,900	31,416	2,098	8,305
	CP 03	71,200	31,416	2,266	8,917
Traço E	CP 01	61,300	31,416	1,951	7,867
	CP 02	54,100	31,416	1,722	6,850
	CP 03	62,400	31,416	1,986	7,912

Fonte: O Autor (2019)

**APÊNDICE F – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS –
PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETOS**

Tabela 36 - Leituras realizadas no ensaio de penetrabilidade de íons cloreto

Traço Referência													
I0	I30	I60	I90	I120	I150	I180	I210	I240	I270	I300	I330	I360	
R1.1	0,18	0,20	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27
R1.2	0,17	0,19	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24
R2.1	0,17	0,19	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
R2.2	0,18	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26

Traço A													
I0	I30	I60	I90	I120	I150	I180	I210	I240	I270	I300	I330	I360	
A1.1	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
A1.2	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
A2.1	0,08	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
A2.2	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

Traço B													
I0	I30	I60	I90	I120	I150	I180	I210	I240	I270	I300	I330	I360	
B1.1	0,19	0,23	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,33	0,33
B1.2	0,17	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30
B2.1	0,19	0,22	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29
B2.2	0,18	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26

Traço C													
I0	I30	I60	I90	I120	I150	I180	I210	I240	I270	I300	I330	I360	
C1.1	0,16	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
C1.2	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
C2.1	0,16	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
C2.2	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

Traço D													
I0	I30	I60	I90	I120	I150	I180	I210	I240	I270	I300	I330	I360	
D1.1	0,17	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
D1.2	0,16	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
D2.1	0,16	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22
D2.2	0,17	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22

Fonte: O Autor (2019)