

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ESTRUTURAS E***  
***CONSTRUÇÃO CIVIL***

**ESTUDO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE NANOSÍLICA  
SUBMETIDOS À AÇÃO COMBINADA DE CLORETOS E CO<sub>2</sub>**

**Mariane Oliveira dos Santos**

São Carlos  
2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL***

**ESTUDO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE NANOSÍLICA  
SUBMETIDOS À AÇÃO COMBINADA DE CLORETOS E CO<sub>2</sub>**

**Mariane Oliveira dos Santos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos

**Orientador:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos  
2019



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

---

## Folha de Aprovação

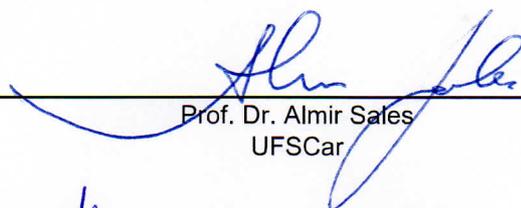
---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Mariane Oliveira dos Santos, realizada em 29/05/2019:



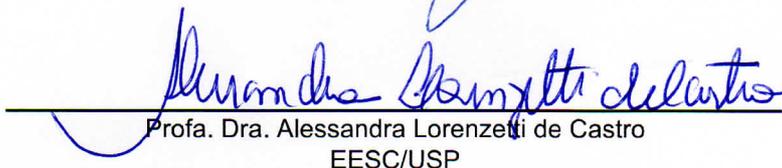
---

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira  
UFSCar



---

Prof. Dr. Almir Sales  
UFSCar



---

Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro  
EESC/USP

## *AGRADECIMENTOS*

---

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre iluminar meu caminho e fazer tudo isso ser possível.

Aos meus pais, Gerson e Maria, que me deram a oportunidade de estudar e chegar até aqui. À minha irmã Ana Paula que mesmo de longe me acompanhou durante toda essa jornada e sempre me ajudou quando precisei.

À minha orientadora, professora Fernanda Giannotti, por toda dedicação, paciência, compreensão, conhecimento repassado e pela tranquilidade como conduziu toda essa trajetória.

Aos professores Almir Sales, Daniel Vêras Ribeiro e Alessandra Lorenzetti de Castro, pelas valiosas contribuições que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Ao técnico de laboratório e amigo José Roberto, por toda dedicação, ajuda, apoio e companhia durante toda essa trajetória.

Aos amigos do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da UFSCar por toda a ajuda durante essa caminhada e pelos momentos de descontração que tornaram a jornada mais leve, especialmente ao Fernando com quem desenvolvi a maior parte desta pesquisa e com quem compartilhei a maior parte dos momentos desta caminhada.

Às empresas Dow Corning Silício do Brasil, Akzonobel e GCP Applied Technologies pelo fornecimento da sílica ativa, nanosílica e aditivo superplastificante utilizados nesta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SANTOS, M. O. **Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de cloretos e CO<sub>2</sub>**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

A corrosão de armaduras é uma das manifestações patológicas mais graves que podem afetar as estruturas de concreto armado, sendo os principais agentes agressivos iniciadores da corrosão os íons cloreto e o CO<sub>2</sub>. Os íons cloreto são capazes de ocasionar a corrosão mesmo em situações nas quais o concreto encontra-se alcalino e a ação do CO<sub>2</sub> resulta na carbonatação, que é a responsável pela despassivação das armaduras. O estudo desses agentes agressivos de modo isolado é amplamente explorado, existindo consenso nos resultados obtidos nas pesquisas experimentais. Porém, o estudo da ação combinada é algo mais recente e ainda não existe concordância nos resultados verificados, quanto a influência da ação conjunta desses agentes agressivos na durabilidade das estruturas de concreto armado. Paralelamente a esta questão, existe a necessidade de se obter estruturas de concreto mais duráveis e, para isso, uma das alternativas é a utilização de materiais suplementares ao concreto, entre as mais utilizadas pode-se citar a sílica ativa e mais recentemente, com o avanço da nanotecnologia, a nanosílica. Essas adições minerais promovem o efeito fíler e pozolânico na matriz cimentícia, resultando assim em uma maior durabilidade da estrutura de concreto. Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo principal de se avaliar o comportamento de concretos com a adição de nanosílica, quando submetidos à ação combinada dos íons cloreto e do CO<sub>2</sub>. Para isso, foram moldados corpos de prova cilíndricos de concreto, com traço 1:m=3,2 e em duas relações água/aglomerante, 0,40 e 0,56. Foram estudados concretos com a incorporação de 0%, 1%, 5% e 10% de nanosílica coloidal e 10% de sílica ativa. Utilizou-se aditivo superplastificante apenas nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 e o teor a ser utilizado foi determinado por meio de ensaio de consistência, sendo fixada em (230 ±10) mm. Os concretos foram submetidos primeiramente a ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade e, em ambos, os ensaios os melhores resultados foram apresentados pelos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40, sendo mais eficiente a utilização 10% de nanosílica em substituição ao cimento. Na sequência, os concretos foram submetidos aos ensaios de durabilidade, carbonatação acelerada e ataque por cloretos de forma isolada e combinada. Nos ensaios isolados de carbonatação acelerada, somente os concretos de relação água/agl igual a 0,56 apresentaram frente de carbonatação, o que ocorreu apenas após 140 dias de ensaio. O maior avanço da frente de carbonatação foi verificada no traço com a incorporação de 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa. Nos ensaios combinados, cloretos/ carbonatação acelerada, também só foi possível verificar a presença de frente de carbonatação nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56, porém isso ocorreu em menos tempo, após 84 dias em câmara de carbonatação. Sendo assim, pode-se concluir que os íons cloreto atuaram acelerando o processo de carbonatação dos concretos. Tanto nos ensaios isolados de cloretos como nos combinados, em ambas as relações água/aglomerante estudadas, a utilização de adições minerais levou a uma redução na profundidade de penetração dos íons cloreto, sendo a adição de 10% de nanosílica a mais eficiente. Comparando-se o ensaio isolado e o combinado, conclui-se que a CO<sub>2</sub> atuou contribuindo para um menor avanço dos íons cloreto nos concretos estudados.

*Palavras-chave:* concretos, durabilidade, nanosílica, carbonatação, íons cloreto, ação combinada.

SANTOS, M. O. **Study of concrete with addition of nanosilica subjected to the combined action of chlorides and CO<sub>2</sub>**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

Corrosion of reinforcement is one of the most severe pathological manifestations that can affect reinforced concrete structures, and the main aggressive agents of corrosion are chloride and CO<sub>2</sub>. Chlorine ions can cause corrosion even in situations in which the concrete is alkaline and the action of the CO<sub>2</sub> results in the carbonation, that is the responsible for the despassivation of reinforcement. The study of these aggressive agents in an isolated manner is widely exploited, existing consensus in the results obtained in the experimental research. However, the study of the combined action is something more recent and yet there is not agreement in the obtained results, as the influence of the conjoint action of these aggressive agents in the durability of the reinforced concrete structures. Concurrently with this question, there is the need of to attain more durable concrete structures and, for this, incorporations are made to the concrete. Among the most used additions one could mention the active silica and most recently, with the advance of the nanotechnology, the nanosilica. These additions promote the filling effect and pozzolanic effect in the cement matrix, resulting in a more durability of the concrete structure. This research was developed with the main objective of evaluating the behavior of the concretes with nanosilica addition, when subjected the combined action of the chloride ions and the CO<sub>2</sub>. To achieve this, concrete cylindrical specimens were molded, in two relations water/binder ratios, 0,40 and 0,56. Concretes with the incorporation of 0%, 1%, 5% and 10% of nanosilica colloidal and 10% of active silica were studied. It was used superplasticizer additive only in the concretes with relation water/binder ratio 0,40 and the content to be used was determined by means of a consistency test, being fixed in (230±10) mm. Firstly, the concretes were subjected to tests of resistance to compression and absorption of water by concrete capillarity and, in both, the better results were presented by the concretes with the relation equal to 0,40, with the most efficient use being 10% of nanosilica. Sequentially, the concretes were subjected to durability tests, CO action and the attack of chlorides in isolated and combined form. In the accelerated carbonation tests, only the concretes with water / agglomeration relation equals to 0.56 presented a carbonation front, which occurred after 140 days of testing. The greatest advance of the carbonation front was verified in the tracing with the incorporation of 1% of nanosilica and 10% of active silica. In the combined tests, of chloride/accelerated carbonation, it was possible to verify the presence of carbonation front only in the concretes with water / agglomeration relation equals to 0.56, however, the fact happened faster, after 84 days in carbonation chamber. Hence, it can be concluded that the chlorine ions acted accelerating the carbonation process of the concretes. Both in isolated chloride tests and in the combined ones, in all the water / agglomeration relations studied, the use of mineral additives led to a reduction in the penetration depth of chlorine ions, with the addition of 10% of nanosilica being the most efficient. Comparing the isolated and combined tests, it is concluded that the CO<sub>2</sub> acted contributing to a smaller advance of the chlorine ions in the concretes studie

*Key-words: concretes, durability, nanosilica, carbonation, ions chloride, combined action.*

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2-1 - Dimensão dos poros relacionados com os principais mecanismos de transporte. ....	21
Figura 2-2 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula. ....	25
Figura 2-3 - Demanda de SP para diferentes teores de nanosílica e sílica ativa em concretos com diferentes relações a/agl.....	26
Figura 2-4 - Hidratação do cimento puro (A) e do cimento com adição de nanopartículas (B) em tempos diferentes após a mistura.....	27
Figura 2-5 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanosílica em concretos e argamassas. ....	28
Figura 2-6 - Resistência à compressão de argamassas aos 1, 7 e 28 dias.....	29
Figura 2-7 - Coeficiente de migração de cloretos em concretos com e sem adição de nanosílica.....	30
Figura 2-8 - Profundidade de carbonatação aos 90 e 180 dias. ....	31
Figura 3-1 - Célula de corrosão eletroquímica. ....	34
Figura 3-2 - Diagrama de Pourbaix para o Fe a 25°C. ....	36
Figura 3-3 - Modelo simplificado de vida útil. ....	37
Figura 3-4 - Representação esquemática da corrosão na presença de cloretos: mecanismo de formação e propagação. ....	38
Figura 3-5 - Representação esquemática do processo de carbonatação.....	42
Figura 3-6 - Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo. ..	42
Figura 3-7 - Representação esquemática da difusão do CO <sub>2</sub> .....	44
Figura 4-1 - Etapas do programa experimental. ....	49
Figura 4-2 - Ensaio de Cone de Marsh. ....	53
Figura 4-3 - Ensaio de Miniabatimento: a) molde preenchido com a pasta e b) medição do diâmetro.....	54
Figura 4-4 - Ensaio de resistência à compressão dos concretos.....	57
Figura 4-5 - Ensaio de absorção de água por capilaridade dos concretos: a) corpos de prova em contato com a água e b) pesagem dos corpos de prova. ....	58
Figura 4-6 - Ataque por cloretos: a) período de molhagem e b) período de secagem. ....	59
Figura 4-7 - Idades de ensaio e tempo de ataque por cloretos. ....	59
Figura 4-8 - Esquema dos ciclos de molhagem e secagem. ....	60
Figura 4-9 - Câmara de carbonatação. ....	61
Figura 4-10 - Idades de ensaio e tempo de exposição ao CO <sub>2</sub> . ....	61
Figura 4-11 - Resumo dos ensaios combinados. ....	62
Figura 4-12 - Idade de ensaio e tempo de ataque de cloretos seguido pelo CO <sub>2</sub> .....	63
Figura 4-13 - Idade de ensaio e tempo de ataque do CO <sub>2</sub> seguido por cloretos. ....	64
Figura 5-1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo. ....	67
Figura 5-2 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo. ....	69
Figura 5-3 - Gráficos Log (T) x Teor de SP %. ....	73
Figura 5-4 - Curvas da área de espalhamento x tempo. ....	75
Figura 5-5 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,40.....	78
Figura 5-6 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,56.....	79
Figura 5-7 - Absorção de água por capilaridade dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 aos 28 dias.....	83
Figura 5-8 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 aos 28 dias.....	83
Figura 5-9 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização do ensaios de absorção de água pro capilaridade aos 28 dias: a) C40-REF; b) C40-1-0; c) C40-5-0; d) C40-10-0 e e) C40-1-10.....	85

Figura 5-10 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização do ensaios de absorção de água por capilaridade aos 28 dias: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10. ....	86
Figura 5-11- Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	87
Figura 5-12- Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 18 ciclos de ataque: a) C40-REF, b)C40-1-0, c)C40-5-0, d)C40-10-0 e e)C40-1-10. ....	88
Figura 5-13 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 após 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	90
Figura 5-14- Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante 0,56 após 18 ciclos de ataque: a) C56-REF, b)C56-1-0, c)C56-5-0, d)C56-10-0 e e)C56-1-10. ....	90
Figura 5-15 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no aos 196 dias: a) C40-REF; b) C40-1-0; c) C40-5-0; d) C40-10-0 e e) C40-1-10.....	92
Figura 5-16 - Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56.93	
Figura 5-17 - Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.....	94
Figura 5-18 - Frente de carbonatação após 18 ciclos de molhagem e secagem e 84 de carbonatação acelerada nos concretos de relação água aglomerante 0,40: a) C40-REF, b) C40-10-0 e c) C40-1-10. ....	95
Figura 5-19 - Frente de carbonatação após 18 ciclos de molhagem e secagem e 84 de carbonatação acelerada nos concretos de relação água aglomerante 0,56: a) C56-REF, b) C56-10-0 e c) C56-1-10. ....	96
Figura 5-20 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	97
Figura 5-21 - Penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 84 de carbonatação acelerada seguido por 18 ciclos de molhagem e secagem: a)C40-REF, b)C40-10-0 e c)C40-1-10. ....	98
Figura 5-22 - Profundidade de penetração dos íons cloreto nos concretos de relação água/aglomerante 0,56 após 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	99
Figura 5-23 - Penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 após 84 de carbonatação acelerada seguido por 18 ciclos de molhagem e secagem: a)C56-REF, b)C56-10-0 e c)C56-1-10. ....	100

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 - Classes de agressividade ambiental (CAA), conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).....	18
Tabela 2.2 - Parâmetros de projeto para concreto armado de acordo com as classes de agressividade ambiental (CAA), conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).....	18
Tabela 2.3 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado, conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). ....	20
Tabela 2.4 - Pesquisas recentes sobre a incorporação de nanosílica em matrizes cimentícias. ....	31
Tabela 3.1 - Teor máximo de íons cloreto para a proteção das armaduras de concreto, conforme NBR 12655:2015 (ABNT, 2015). ....	39
Tabela 3.2 - Quantidade de cloretos livres em relação a diversos teores de C <sub>3</sub> A (RASSHEEDUZZAFAR <i>et al apud</i> FIGUEIREDO, 2011) .....	40
Tabela 3.3 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995 apud FIGUEIREDO, 2005) .....	43
Tabela 3.4 - Classificação da agressividade do ambiente em função da concentração de CO <sub>2</sub> (HELENE, 1995). ....	44
Tabela 3.5 - Pesquisas recentes sobre a ação combinada dos cloretos e do CO <sub>2</sub> em materiais cimentícios. ....	51
Tabela 5.1 - Propriedades físicas do CP V ARI Plus.....	65
Tabela 5.2 - Propriedades químicas do CP V ARI Plus.....	66
Tabela 5.3 - Caracterização do agregado graúdo. ....	66
Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo. ....	67
Tabela 5.5 - Caracterização agregado miúdo .....	68
Tabela 5.6 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo. ....	68
Tabela 5.7 - Determinação da composição ideal entre os agregados. ....	69
Tabela 5.8 - Características físicas e químicas da sílica ativa.....	70
Tabela 5.9 - Principais características físicas e químicas da nanosílica.....	70
Tabela 5.10 - Propriedades do aditivo superplastificante. ....	71
Tabela 5.11 – Composição dos traços das pastas. ....	71
Tabela 5.12 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh.....	72
Tabela 5.13 - Áreas de espalhamento obtidas com o ensaio de Miniabatimento. ....	75
Tabela 5.14 - Composição dos traços de concreto e consistências obtidas. ....	76
Tabela 5.15 - Resistência à compressão dos concretos com 7 dias de idade.....	77
Tabela 5.16 - Resistência à compressão dos concretos com 28 dias de idade.....	77
Tabela 5.17 - Resistência à compressão com 63 dias de idade.....	78
Tabela 5.18 – Desenvolvimento da resistência à compressão (%) dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) aos 7, 28 e 63 dias. ....	80
Tabela 5.19 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) aos 7, 28 e 63 dias.....	80
Tabela 5.20 - Desenvolvimento de resistência à compressão (%) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 7, 28 e 63 dias. ....	81
Tabela 5.21 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 7, 28 e 63 dias.....	81
Tabela 5.22 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com 28 dias de idade. ....	82
Tabela 5.23 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,40.....	87
Tabela 5.24 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) após 8, 12 e 18 ciclos de secagem e molhagem....	89
Tabela 5.25 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,56.....	89

Tabela 5.26 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) após 8, 12 e 18 ciclos de secagem e molhagem. ....	91
Tabela 5.27 - Desenvolvimento da profundidade de carbonatação (%) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 140, 168 e 196 dias. ....	93
Tabela 5.28 - Teste de Tukey para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 aos 140, 168, e 196 dias de carbonatação acelerada em comparação com concreto referência (C56-REF). ....	94
Tabela 5.29 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,40, no ensaio combinado de 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	97
Tabela 5.30- Teste de Tukey para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) após 84 dias de carbonatação acelerada seguido por 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	98
Tabela 5.31 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,56, no ensaio combinado de 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	99
Tabela 5.32 - Teste de Tukey para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) após 84 dias de carbonatação acelerada seguido por 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem. ....	100
Tabela 5.33 - Comparativo da profundidade de penetração dos íons cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,40, após 18 ciclos de molhagem e secagem nos ensaios isolado e combinado. ....	101
Tabela 5.34 - Comparativo da profundidade de penetração dos íons cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,56, após 18 ciclos de molhagem e secagem nos ensaios isolado e combinado. ....	101

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
<b>2. DURABILIDADE DO CONCRETO .....</b>	<b>17</b>
2.1 A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO .....	20
2.2 A INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA E DA NANOSÍLICA.....	22
<b>3. CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO.....</b>	<b>34</b>
3.1 A AÇÃO DOS CLORETOS NO CONCRETO .....	37
3.1.1 FATORES INFLUENTES NA VELOCIDADE E PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO .....	40
3.2 AÇÃO DO CO <sub>2</sub> NO CONCRETO.....	41
3.3 A AÇÃO COMBINADA DOS ÍONS CLORETO E DO CO <sub>2</sub> .....	45
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>48</b>
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	50
4.1.1 CIMENTO PORTLAND.....	50
4.1.2 AGREGADO GRAÚDO .....	50
4.1.3 AGREGADO MIÚDO .....	51
4.1.4 SÍLICA ATIVA.....	51
4.1.5 NANOSÍLICA.....	51
4.1.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	51
4.1.7 ÁGUA.....	51
4.2 ENSAIOS REALIZADOS EM PASTA.....	52
4.2.1 CONE DE MARSH .....	52
4.2.2 MINIABATIMENTO.....	53
4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVA.....	54
4.4 ENSAIOS REALIZADOS EM CONCRETO.....	56
4.4.1 PROPRIEDADES MECÂNICA E FÍSICA.....	56
4.4.2 DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DOS CLORETOS E DO CO <sub>2</sub> .....	58
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....	64
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>65</b>

<b>5.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....</b>	<b>65</b>
5.1.1	CIMENTO.....	65
5.1.2	AGREGADO GRAÚDO .....	66
5.1.3	AGREGADO MIÚDO .....	68
5.1.4	COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDO E MIÚDO .....	69
5.1.5	SÍLICA ATIVA.....	70
5.1.6	NANOSÍLICA.....	70
5.1.7	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	71
<b>5.2</b>	<b>ENSAIOS EM PASTA.....</b>	<b>71</b>
5.2.1	CONE DE MARSH .....	71
5.2.2	MINIABATIMENTO.....	75
<b>5.3</b>	<b>DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS .....</b>	<b>76</b>
<b>5.4</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS EM CONCRETO.....</b>	<b>77</b>
5.4.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	77
5.4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	82
5.4.3	DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DOS CLORETOS E DO CO <sub>2</sub> .....	86
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>103</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	103
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>110</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é considerado o material de construção mais utilizado atualmente, sendo mais empregado do que o aço, o bloco cerâmico e a madeira. O principal fator que contribui para a preferência pelo concreto armado é a maior durabilidade de seus componentes, visto que o aço estaria protegido dos agentes agressivos presentes no ambiente pela camada de concreto (RIBEIRO, 2014).

A NBR 15575-1:2013 (ABNT, 2013) define durabilidade como a capacidade do edifício ou de seus sistemas em desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas, até um estado-limite de utilização. Além disso, a norma afirma que a durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe forem atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional.

A durabilidade das estruturas de concreto armado pode ser comprometida tanto devido a fatores externos quanto por causas internas ao concreto. Entre os fatores externos, pode-se citar o ataque dos agentes agressivos, como os cloretos, sulfatos, dióxido de carbono, bem como líquidos e gases industriais ou naturais (NEVILLE, 2015).

A corrosão de armaduras é uma das principais manifestações patológicas que prejudica a durabilidade das estruturas de concreto armado. Os agentes agressivos que em situações desfavoráveis podem levar a corrosão de armaduras são os íons cloreto e o  $\text{CO}_2$ . A penetração do  $\text{CO}_2$  no concreto faz com que o valor do pH da solução contida nos poros seja alterado, de um valor em torno de 12,5 para um valor próximo a 9, causando a destruição da camada de proteção sobre a armadura. Já cloretos, são capazes de despassivar a armadura mesmo em condições de pH extremamente elevado, e a despassivação da armaduras em ambas as situações favorecem a ocorrência da corrosão de armaduras (SILVA, 2006).

A ação desses agentes agressivos de modo isolado é algo amplamente estudado e apresenta concordância nos resultados obtidos nas pesquisas experimentais. Já o estudo da ação combinada dos íons cloreto e do  $\text{CO}_2$  é relativamente recente, começando a ser mais profundamente estudada a partir do ano 2000. Porém, ainda não existe consenso nos resultados obtidos sobre a influência da ação combinada desses agentes agressivos na durabilidade das estruturas de concreto armado (CAMACHO, 2015).

Com o objetivo de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto frente a ação dos agentes agressivos, são utilizadas adições aos materiais cimentícios. A sílica ativa é uma das adições mais utilizadas e apresenta efeito pozolânico e fíler, que promovem uma diminuição na porosidade, tornando a estrutura mais densa e compacta, o que dificulta a entrada dos agentes agressivos e, conseqüentemente, aumenta a durabilidade (VIEIRA et al., 2007).

Entre estudos mais recentes sobre concreto com adições, encontram-se pesquisas sobre o uso de nanomateriais e alguns dos compostos mais utilizados são: a nanosílica, nanocompósitos fotocatalíticos como o  $\text{TiO}_2$  e  $\text{CaCO}_3$  e nanoargilas (GÓMEZ-ZAMORANO; CASTILLO-LINTON, 2016). A utilização da nanosílica vem recebendo grande destaque nas pesquisas experimentais, visto que devido à nano-escala de suas partículas e, conseqüentemente, maior área superficial, apresenta atividade pozolânica ainda maior que a sílica ativa, além de apresentar efeito fíler (Li *et al.*, 2017b).

Uma grande quantidade de estudos recentes objetivam conhecer melhor a influência da adição de diferentes tipos de nanosílica em compostos cimentícios por meio de análises de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade (LI *et al.*, 2016; MASSANA *et al.*, 2018; JOSHAGHANI; MOEINI, 2017; SHARMA *et al.*, 2019).

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o efeito da ação combinada de cloretos e do  $\text{CO}_2$  em concretos com adição de nanosílica.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar o comportamento do concreto com adição de nanosílica quando submetido, isoladamente, ao ataque de cloretos e à carbonatação acelerada;
- Avaliar a influência da carbonatação na penetração de cloretos nos concretos estudados, por meio de ensaio de carbonatação acelerada e ensaio de profundidade de penetração de cloretos;
- Avaliar a influência do ataque de cloretos no avanço da frente de carbonatação nos concretos estudados, baseando-se nos ensaios de profundidade de penetração de íons cloreto e carbonatação acelerada;
- Determinar o teor ideal de nanosílica a ser utilizado em concretos no que diz respeito a durabilidade das estruturas de concreto armado frente a ação do  $\text{CO}_2$  e cloretos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A deterioração das estruturas de concreto ocorre fundamentalmente devido à alteração de suas propriedades mecânicas, físicas e químicas. Segundo Camacho (2015), a corrosão de armaduras é a principal causa da deterioração das estruturas de concreto armado, sendo desencadeada principalmente pela ação de cloretos e da carbonatação, desde que haja a presença de oxigênio e água.

A ação destes dois mecanismos de degradação, agindo de modo isolado, sobre as estruturas de concreto armado, já é algo constantemente estudado e apresenta certo consenso nos resultados obtidos pelas pesquisas experimentais. Entretanto, quando se trata da ação combinada de cloretos e da carbonatação na durabilidade das estruturas de concreto, ainda não há uma concordância entre os resultados verificados (MALHEIRO *et al.*, 2016).

Simultaneamente à questão da combinação dos agentes agressivos, existe a questão do aumento da durabilidade das estruturas de concreto e uma das alternativas que visa a produção de estruturas de concreto mais duráveis é a utilização das adições minerais. As adições minerais são materiais silicosos, finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades que podem variar de 10% a 70% da massa do material cimentício total. Com o uso de adições em concretos, em geral, ocorre melhora na resistência à fissuração térmica, o aumento na resistência mecânica e diminuição da permeabilidade, resultando em uma maior durabilidade ao ataque químico (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Entre as adições mais utilizadas tem-se a sílica ativa, e com o avanço da nanotecnologia, a nanosílica também passou a ser utilizada, ambas com efeitos físicos e pozolânicos. Segundo Pattali e Mathew (2017), a nanosílica vem se mostrando mais eficaz do que a sílica, no que diz respeito a permeabilidade e, conseqüentemente, a durabilidade do concreto. Porém, a nanosílica é um material novo, podendo ser encontrado de diversas maneiras, apresentando características que agem de diferentes maneiras na microestrutura do concreto e, portanto, precisa ser mais estudado.

Estudos com objetivo de conhecer melhor a influência da utilização de diferentes tipos de nanosílica em materiais cimentícios, por meio de análises de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade, vem sendo amplamente desenvolvidos.

Li *et al.* (2017b) estudaram o efeito do uso de nanosílica em pó, além da sílica ativa, na resistência mecânica de argamassas. Neto e Geyer (2017) estudaram o efeito do uso de aditivo superplastificante à base de policarboxilato modificado com nanosílica estabilizada na consistência e na resistência mecânica do concreto. Joshaghani e Moeini (2017) estudaram o efeito da adição de cinza do bagaço de cana de açúcar e de dois tipos de nanosílica, ambos produtos de sílica amorfa em solução coloidal, porém com propriedades diferentes, como área

superficial e teor de sílica presente no produto, nas propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas.

Quanto à ação combinada, Malheiro *et al.* (2014) estudaram a influência da ação combinada da carbonatação e dos cloretos em argamassas contendo 40% de cinza volante em substituição em massa ao cimento. Em pesquisas posteriores, Malheiro *et al.* (2016) estudaram a influência da carbonatação na penetração de cloretos em concretos sem adições, por meio de ensaio de migração de cloretos.

Camacho (2015) estudou a ação combinada em concretos com 100% de cimento Portland e 60% de cimento Portland + 40% de cinza volante, avaliando o coeficiente de difusão de cloretos em concretos carbonatados. Já Liu *et al.* (2017) estudaram o efeito da carbonatação no perfil de cloretos e o efeito do ataque por cloretos na taxa de carbonatação em concretos sem adições.

Neste contexto, é notória a importância tanto do estudo da adição de nanosílica em compostos cimentícios, quanto do estudo sobre a influência da ação combinada dos íons cloreto e do CO<sub>2</sub> na durabilidade das estruturas de concreto. Apesar da existência de uma grande quantidade de estudos sobre a incorporação da nanosílica em concretos, ainda existem características e fatores que precisam ser estudados. Além disso, quanto a ação combinada cloretos e do CO<sub>2</sub> sobre as estruturas de concreto, existem divergências nos resultados verificados. Quanto à ação combinada desses agentes agressivos em concretos com a adição de nanosílica, até o momento não foram encontradas pesquisas sobre o tema. Portanto, trata-se de uma lacuna atual no que diz respeito ao estudo da durabilidade de concretos, o que motiva e justifica este trabalho.

## 2. DURABILIDADE DO CONCRETO

Durante muito tempo, quando se falava em estruturas de concreto armado, a única característica importante era a resistência à compressão, sendo o concreto considerado durável apenas por apresentar boas resistências. O desenvolvimento da tecnologia do concreto se concentrava basicamente na obtenção de concretos de maiores resistências. Entretanto, diante de problemas de degradação das estruturas, o estudo da durabilidade começou a ganhar importância.

Com o avanço na teoria das estruturas e na tecnologia do concreto, as edificações tornaram-se cada vez mais esbeltas e econômicas. Com o progresso industrial e o crescimento das cidades, conseqüentemente ocorreu o aumento da poluição urbana e, com isso, os elementos estruturais passaram a ficar expostos a ambientes altamente prejudiciais. As estruturas que inicialmente eram consideradas com uma vida útil quase infinita, começaram a apresentar níveis de degradação superior aos desejados, apresentando problemas de durabilidade caracterizados pelo envelhecimento precoce das estruturas (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Além da definição de durabilidade apresentada pela NBR 15575-1:2013 (ABNT, 2013) já citada no texto, a NBR 6118:2004 (ABNT, 2014) define durabilidade como a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Portanto, as estruturas de concreto quando submetidas as condições ambientais previstas em projeto e quando utilizadas conforme definido durante a etapa de projeto deve manter sua estabilidade, segurança e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.

Já a norma americana ACI 201 define a durabilidade do concreto de cimento Portland como a sua capacidade em resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Portanto, um concreto poderá ser considerado durável se conservar suas características iniciais, qualidade e capacidade de uso quando submetido à ação do ambiente em que se encontra e condições de uso.

De acordo com essas definições, a durabilidade pode ser apontada como um parâmetro relativo às propriedades intrínsecas dos materiais que compõem uma estrutura, sendo consequência da interação entre: o ambiente, a estrutura de concreto e as condições de operação, manutenção e uso. Portanto uma mesma estrutura pode apresentar diferentes comportamentos dependendo da situação em que está inserida.

A NBR 6118:2014 estabelece alguns critérios que visam a durabilidade das estruturas de concreto em função do tipo de ambiente que a estrutura está inserida. A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto. Nos projetos de estruturas de concreto, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com a Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Classes de agressividade ambiental (CAA), conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).**

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 <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup> Industrial <sup>a,b</sup>	Grande
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a,c</sup> Respingos de maré	Elevado

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda para ambientes internos secos.

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

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

A classificação da agressividade ambiental, deve considerar o micro e macroclima atuantes sobre a edificação e as condições de exposição da estrutura. A partir da determinação da classe de agressividade ambiental a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) define alguns parâmetros para o projeto de estruturas de concreto armado (Tabela 2.2).

**Tabela 2.2 - Parâmetros de projeto para concreto armado de acordo com as classes de agressividade ambiental (CAA), conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).**

Parâmetros de projeto	Classe de agressividade ambiental			
	I	I	II	IV
Agressividade	Fraca	Moderada	Forte	Muito Forte
Classificação	Rural/Submersa	Urbana	Marinha/Industrial	Industrial/Respingos de Maré
Risco de Deterioração	Insignificante	Pequeno	Grande	Elevado
Relação a/c	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50
Classe do Concreto	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
Cobrimento – viga e pilar (mm)	25	30	40	50
Cobrimento – laje (mm)	20	25	35	45

A agressividade ambiental pode ser definida pelas condições climáticas no local, que definem as condições externas de umidade e temperatura e pela presença ou não de agentes

agressivos. A ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto armado pode ocorrer devido à agentes químicos, físicos e biológicos (ALMEIDA; SALES, 2014).

A ação dos agentes químicos nas estruturas de concreto armado, envolvem na grande maioria das vezes as interações químicas entre os agentes agressivos existentes da atmosfera e os constituintes da pasta de cimento. Já a ação dos agentes físicos pode ocorrer através da cristalização dos poros, carregamento estrutural e exposição a temperaturas extremas (congelamento e fogo), podendo levar a estrutura à fissuração, desgaste superficial ou perda de massa. Por fim, a ação dos agentes biológicos pode ocorrer pela presença de bactérias e fungos ou microrganismos, como cupins e roedores, sendo responsáveis pela biodeterioração das estruturas de concreto (ALMEIDA; SALES, 2014).

Segundo Possan (2004), a influência do ambiente sobre a estrutura de concreto pode ser reduzida pela dosagem adequada do concreto (resistência mecânica, água/cimento e consumo de cimento) ou pela camada de concreto de cobrimento.

A espessura da camada de cobrimento é um fator que reflete diretamente na durabilidade da estrutura, pois esta camada protege a armadura dos agentes agressivos, tanto quimicamente como fisicamente. Segundo Helene (1993), uma camada de cobrimento executada com um concreto com alta compacidade, sem ninhos, vazios ou excesso de exsudação e com teor de argamassa adequado, garante através da baixa permeabilidade, a proteção da armadura dos agentes agressivos externos.

A durabilidade do concreto depende muito da permeabilidade, ou seja, da facilidade com que os fluidos, líquidos e gases, conseguem penetrar e se movimentar na estrutura de concreto (NEVILLE, 2015). O transporte de fluidos no concreto depende de diversos fatores, entre eles a porosidade, distribuição do tamanho de poros, conectividade e tortuosidade. E esses fatores são dependentes de outros, como, a fração volumétrica dos materiais que compõem o concreto, a grau de hidratação do cimento e do processo produtivo que o concreto foi submetido (NEPOMUCENO, 2005).

Sendo assim, segundo Possan (2004), resumidamente pode-se afirmar que durabilidade das estruturas de concreto abrange desde a qualidade do concreto (materiais constituintes, definições de projeto e execução), o ambiente no qual a estrutura está inserida, as condições de uso que a estrutura está submetida até as manutenções e reparos realizados na edificação. Sendo que a durabilidade inadequada manifesta-se pela deterioração da estrutura.

## 2.1 A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Neville (2015) afirma que a durabilidade inadequada se manifesta pela deterioração e pode originar-se por fatores externos ou internos. Segundo o autor, as ações de deterioração podem ser:

- Físicas: causadas pelo efeito da alta temperatura, dilatação térmica e ciclos de gelo e degelo;
- Mecânicas: causados por impacto, abrasão, erosão ou cavitação e
- Químicas: causadas pela ação de íons agressivos, como cloretos, sulfatos e gás carbônico.

Além disso, Neville (2015) explica que os processos de deterioração químicos e físicos podem atuar de forma sinérgica e que raramente a deterioração de uma estrutura de concreto é decorrente de uma única causa.

A ABNT NBR 6118:2014 lista os principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado, dividindo-os em três grupos: os relativos ao concreto, os relativos à armadura e os relativos à estrutura propriamente dita, conforme mostrado na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado, conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).**

Mecanismos de deterioração do concreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lixiviação</li> <li>• Expansão por sulfato</li> <li>• Reação álcali-agregado</li> </ul>
Mecanismos de deterioração da armadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbonatação</li> <li>• Ação de cloretos</li> </ul>
Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ações mecânicas</li> <li>• Movimentações de origem térmica</li> <li>• Impactos</li> <li>• Ações cíclicas</li> <li>• Retração</li> <li>• Fluência</li> <li>• Relaxação</li> <li>• Demais ações atuantes sobre a estrutura.</li> </ul>

A água, pura ou com íons agressivos, o gás carbônico e o oxigênio são os fluidos mais importantes quando se fala em durabilidade. Esses fluidos podem movimenta-se no concreto de diversas formas, mas basicamente, o transporte depende da estrutura da pasta de cimento

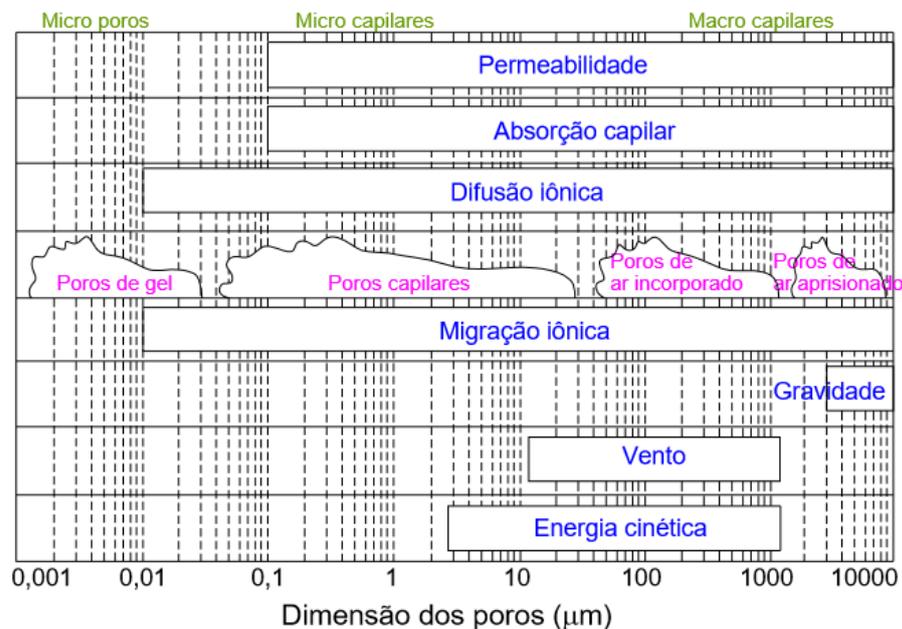
hidratada e a durabilidade resulta da facilidade com que esses fluidos penetram e se movimentam no interior do concreto (NEVILLE, 2015).

Mehta e Monteiro (2014) apresentam a água como um agente fundamental na criação e destruição de muitos materiais naturais, sendo apontado como ponto principal para a maioria dos problemas de durabilidade no concreto. Nos sólidos porosos, a água funciona como veículo para o transporte de íons agressivo, sendo assim, a fonte de processos químicos de degradação, além de ser a causadora de processos físicos de degradação.

O transporte de substâncias agressivas no concreto é dirigido por diversos mecanismos físico-químicos, tais mecanismos são dependentes de vários fatores, do fluxo da substância e sua concentração no local, das condições ambientais, da velocidade de renovação dos agentes agressivos, da estrutura e dimensões dos poros ou das microfissuras, do grau de saturação do sistema poroso e da temperatura. Os mecanismos mais importantes de transporte de massa no concreto são a permeabilidade, a difusão, a absorção capilar e a migração ou a combinação deles (SILVA, 2011).

O entendimento do mecanismo de transporte, bem como o tamanho, volume dos poros e sua continuidade são fatores determinantes na durabilidade das estruturas de concreto. Na Figura 2-1 apresenta-se a influência da dimensão dos poros nos diferentes mecanismos de transportes de fluidos no concreto.

**Figura 2-1 - Dimensão dos poros relacionados com os principais mecanismos de transporte.**



A porosidade pode ser definida como a proporção do volume total de poros, sendo essa proporção elevada e ocorrendo intercomunicação entre tais poros, a permeabilidade

também será elevada. Porém, se tais poros forem ineficazes para o transporte de fluidos, seja por descontinuidade ou qualquer outro fator, esse concreto passa a ser de baixa permeabilidade, mesmo apresentando alta porosidade (NEVILLE, 2015).

Segundo Paulon e Kirchheim (2011), o sistema de distribuição dos poros do concreto são influenciados pela dosagem do concreto (principalmente pela relação água/cimento), pela cura e pelos aditivos químicos e adições minerais.

Quanto menor a relação água/cimento, menor será a quantidade de poros vazios e a permeabilidade. Durante o avanço do processo de hidratação do cimento, os poros que anteriormente estavam preenchidos por água passam a ser ocupados parcialmente pelo gel resultante do processo de hidratação do cimento, que possui dimensões aproximadamente duas vezes maior que o volume do cimento não hidratado. Portanto, quanto menor a quantidade de água utilizada, menor será a quantidade de poros vazios após as reações de hidratação (NEVILLE, 2015).

A cura do concreto envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, como tempo, temperatura e umidade, a adoção de um procedimento adequado de cura é determinante para uma matriz cimentícia com menor volume de vazios (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O processo de cura é realizado com o objetivo de manter o concreto saturado, ou o mais próximo deste estado, até que o processo de hidratação esteja o mais avançado possível, ou seja, até que, os espaços que no estado fresco eram preenchidos por água, estejam ocupados pelos produtos de hidratação.

Os aditivos são produtos químicos que podem ser adicionados tanto ao cimento quanto à argamassa ou concreto com o objetivo de alterar uma ou mais propriedades das misturas cimentícias, o teor de aditivos químicos utilizado geralmente varia entre 0,05% e 5% em relação à massa de cimento. Podem ser classificados de acordo com a função que desempenham, como: incorporadores de ar, redutores de água, retardadores de pega, modificadores de reologia, inibidores de corrosão, redutores de retração, redutores de permeabilidade, inibidores de reação álcali-sílica, pigmentos, dentre outros (HARTMANN et al., 2011).

## **2.2 A INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA E DA NANOSÍLICA**

A indústria de adições teve um grande crescimento nos últimos 50 anos, o que ocorreu devido ao reconhecimento de que as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido, podem ser modificadas através da utilização desses materiais. Atualmente as adições são vendidas em larga escala, em alguns países o percentual de concreto produzido com o acréscimo desse material fica em torno de 70 a 80% da produção total (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As adições minerais são materiais silicosos insolúveis finalmente moídos, provenientes de fontes naturais ou de subprodutos industriais, que são adicionados ao concreto em quantidades que variam de 10% a 70% da massa do material cimentício total, promovendo efeitos físicos e químicos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dal Molin (2011) classifica as adições minerais, de acordo com sua função físico-química, em três grupos:

- Materiais pozolânicos: são materiais silicosos ou sílico aluminosos que possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentantes, tais como a sílica ativa, a cinza da casca de arroz e o metacaulim;
- Materiais cimentantes: são materiais que não necessitam da presença do hidróxido de cálcio para formar compostos cimentantes, tais como escória granulada de alto-forno;
- Fíler: é um material finamente dividido que não possui atividade química, ou seja, sua função consiste basicamente em um efeito físico de empacotamento granulométrico, tais como, calcário, pó de quartzo e pó de pedra.

Mehta e Monteiro (2014) apontam benefícios do uso de adições em concreto, entre eles, melhor resistência à fissuração térmica, devido ao baixo calor de hidratação; aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros e o fortalecimento da zona de transição.

Entre as adições, a sílica ativa é uma das mais utilizadas atualmente para a produção de concretos. A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de produção de silício-metálico, insumo utilizado pelas indústrias de alumínio, química e eletrônica, e ferro-silício, insumo utilizado na produção de aços comuns. Suas partículas são mais finas do que as partículas de cimento Portland e de cinza volante, possuindo diâmetro médio de 0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$ , produzindo efeito químico, como também efeito fíler na microestrutura do concreto (DAL MOLIN, 2011).

O efeito químico produzidos pela sílica ativa ocorre devido à reação pozolânica que ocorre entre a sílica amorfa contida na sílica ativa e o hidróxido de cálcio que é produzido durante o processo de hidratação do cimento (NEVILLE, 2015). Durante a hidratação do cimento ocorre a produção de diversos compostos, entre eles, o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio. A sílica ativa quando adicionada ao concreto, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio para produzir uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado, composto que confere resistência ao concreto. O silicato de cálcio hidratado produzido pela reação pela reação química entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio, apresenta

características superiores que aquele produzido durante o processo de hidratação do cimento, resultando em um aumento da resistência à compressão e resistência química (SILVA, 2006).

Já o efeito fíler ocorre devido ao tamanho das partículas de sílica, que são extremamente finas, em geral 100 vezes menores do que as partículas de cimento, se alojarem muito próximas aos grãos de agregados, ou seja, na interface entre a pasta de cimento e o agregado (NEVILLE, 2015).

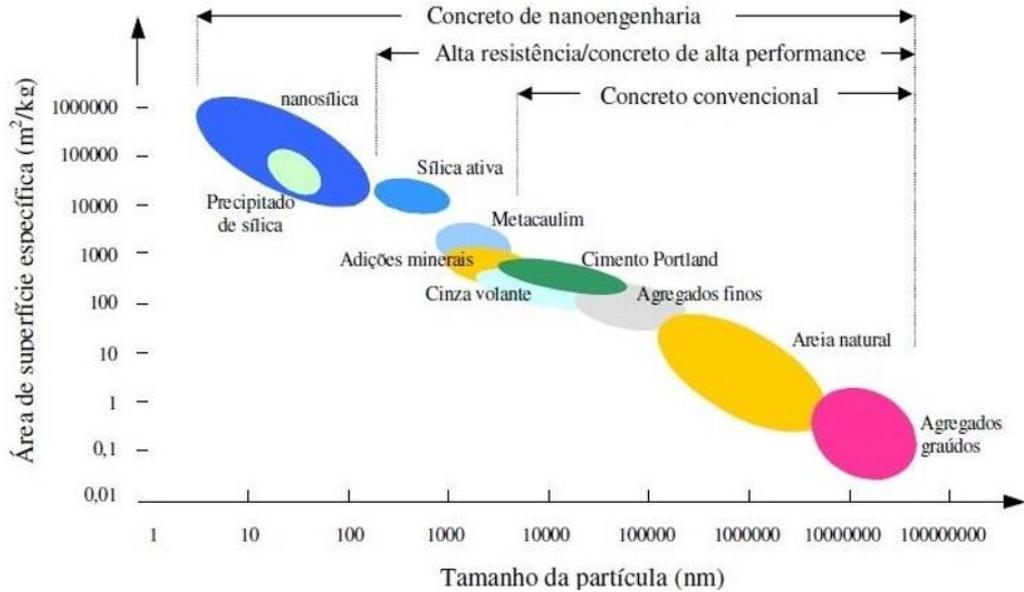
A combinação dos efeitos pozolânico e fíler da sílica ativa gera melhora da microestrutura dos materiais cimentícios, a porosidade e a permeabilidade são diminuídas, ocorrendo a densificação da pasta de cimento e melhora nas características da zona de transição. Portanto, a utilização da sílica melhora tanto as propriedades mecânicas quanto de durabilidade de concretos e argamassas. Recentemente, com o avanço da nanotecnologia, a incorporação da nanosílica em materiais cimentícios vem recebendo grande destaque nas pesquisas experimentais.

O termo nanosílica é utilizado para denominar as nanopartículas de sílica, que é o óxido de silício, cuja a fórmula química é  $\text{SiO}_2$ . A sílica pode ter origem mineral, biogênica ou sintética. Pode ser encontrada na natureza de forma abundante na sua forma mais estável, o quartzo, que é principal constituinte de areais e rochas, também pode ser encontrada em plantas como o arroz, bambu e cevada e em terras diatomáceas (ANDRADE, 2017).

A nanosílica, quando comparada a sílica, apresenta um percentual de sílica amorfa ainda mais elevado e partículas esféricas ainda menores, portanto possui potencial para superar os efeitos na sílica nos compostos cimentícios (NILI; EHSANI; SHABANI, 2010).

A nanosílica é um material mais fino do que a sílica e, portanto, apresenta maior área superficial e conseqüentemente, maior atividade pozolânica. Por serem mais finas do que o cimento, ambas mostram-se eficazes no preenchimento de vazios entre os grãos de cimento e no aumento da densidade de empacotamento dos materiais cimentícios, contribuindo para a melhora na microestrutura de pastas, argamassas e concretos (LI et al., 2017b). Na Figura 2-2 apresenta-se a relação entre o tamanho e a área superficial na sílica, nanosílica, cimento e outros materiais.

**Figura 2-2 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula.**

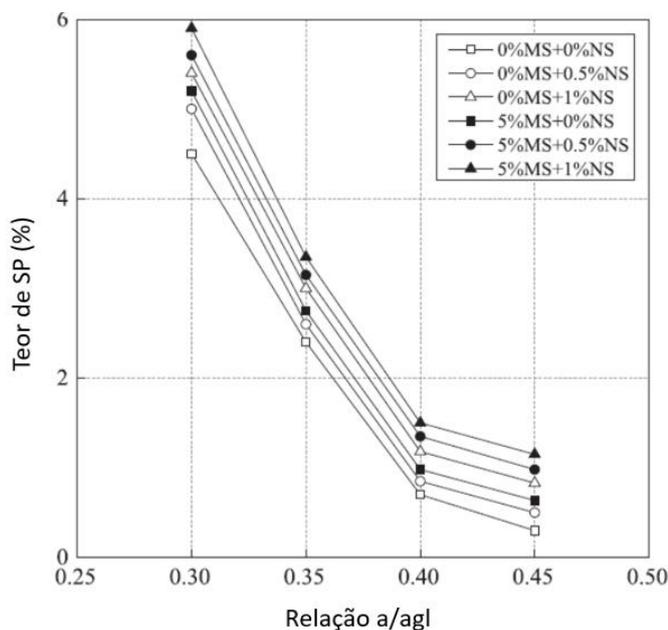


Fonte: SANCHEZ; SOBOLEV (2010)

As partículas de nanosílica possuem grande área superficial, quando comparada a sílica ativa, por apresentarem essa característica elas adsorvem maior quantidade de água, o que faz com que em situações onde a relação água/aglomerante é fixa, ocorra uma redução na consistência da mistura. A redução da consistência e conseqüentemente diminuição da trabalhabilidade pode ser compensada pela utilização de aditivos superplastificantes, que são aditivos redutores de água de alta eficiência e que ao envolver as partículas de cimento conferem carga negativa aos mesmos, gerando assim repulsão entre as partículas, diminuição da tensão superficial da água circundante e aumentando a fluidez (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Li et al. (2018) verificaram uma maior demanda de aditivo superplastificante com a adição de nanosílica e sílica ativa. A adição de 0,5% e 1% de nanosílica (NS) apresentou uma demanda por aditivo superplastificante similar a adição de 5% de sílica ativa (MS), deixando claro que a utilização da nanosílica causa grande diminuição na trabalhabilidade da mistura, que é compensada por um aumento no teor de aditivo superplastificante. A Figura 2-3 apresenta a demanda de aditivo superplastificante para diferentes teores de adição de nanosílica e sílica ativa em concretos de diferentes relações a/agl, de modo a manter as misturas com a mesma trabalhabilidade.

**Figura 2-3 - Demanda de SP para diferentes teores de nanosílica e sílica ativa em concretos com diferentes relações a/agl.**



Fonte: LI et al., 2018.

Li et al. (2017b) explicam que enquanto a sílica pode ser adicionada aos materiais cimentícios em quantidade que variam de 10 a 20% da massa total de cimento, a nanosílica deve ser adicionada em quantidades muito menores, em torno de 3%, devido ao seu alto custo, dificuldade de mistura e alta demanda de aditivo superplastificante, sendo seu efeito limitado pela pequena quantidade de material adicionado. Por esta razão, a utilização de combinada de nanosílica e sílica pode apresentar melhores resultados do que o uso desses materiais isoladamente. O estudo dos efeitos da incorporação de nanosílica em materiais cimentícios vem sendo aprofundado nos últimos anos, tanto de modo isolado como em conjunto com a sílica.

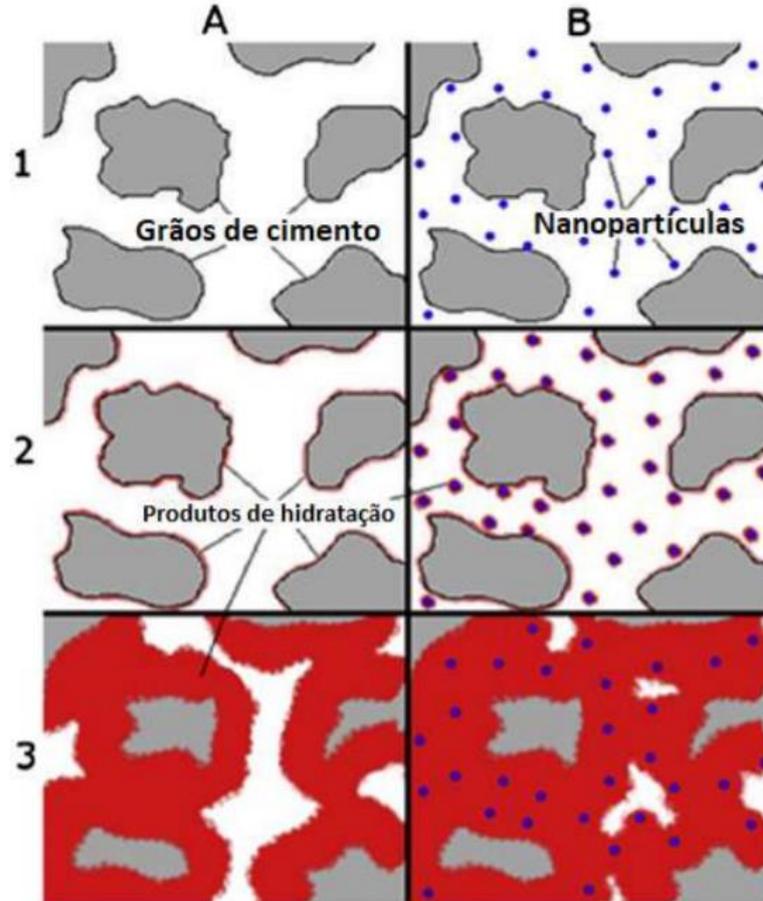
Além disso, Khaloo, Mobinil e Hosseini (2016) explicam que a utilização de altos teores de nanosílica, acima de 5% em substituição ao cimento, pode ser prejudicial as propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais cimentícios. Devido à elevada área superficial das partículas, a utilização de maiores quantidades do material pode aumentar a probabilidade de aglomeração e dificultar a dispersão das partículas de nanosílica nos compostos cimentícios.

A adição de nanosílica em argamassas e concretos acelera o processo de hidratação do cimento, promovendo dois efeitos nas matrizes cimentícias: efeito fíler, resultante de uma existência mais pontos de nucleação para a reação de hidratação do cimento e efeito pozolânico (RUPASINGHE et al., 2017).

Land e Stephan (2015) descrevem como ocorre o processo de hidratação do cimento puro (A) e com adição de nanopartículas (B). A adição de nanosílica acelera o processo de hidratação, pois suas partículas possuem grande área superficial e que são altamente

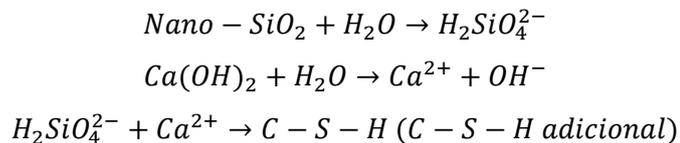
reativas, podendo atuar como pontos de nucleação e assim estimular as reações de hidratação na sua superfície.

**Figura 2-4 - Hidratação do cimento puro (A) e do cimento com adição de nanopartículas (B) em tempos diferentes após a mistura.**



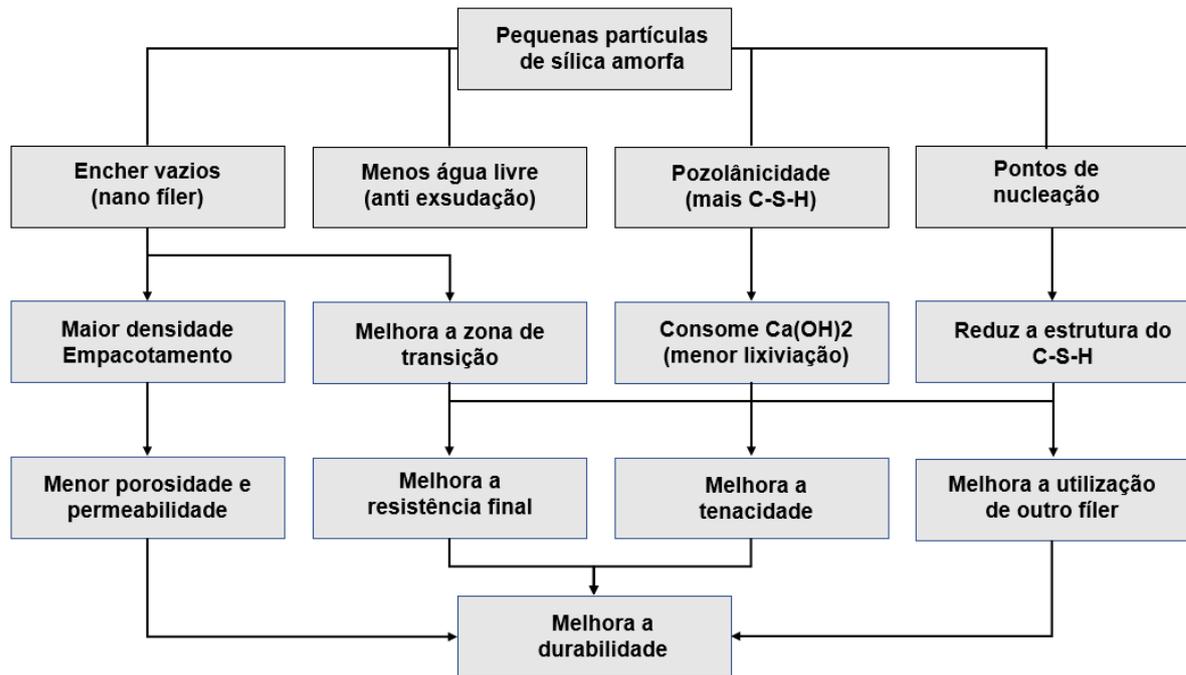
Fonte: LAND; STEPHAN, 2015.

Singh et al. (2013) explicam que nas reações pozolânicas, a nanosílica reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , formado durante o processo de hidratação do cimento e que pouco contribui no desenvolvimento da resistência do material cimentício, produzindo uma quantidade adicional de C-S-H, que é determinante para resistência e densidade da matriz cimentícia. As equações abaixo mostram como ocorre esse processo.



A Figura 2-5 apresenta os efeitos que segundo, Bianchi (2014) a adição de nanosílica promove aos compostos cimentícios

**Figura 2-5 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanosílica em concretos e argamassas.**



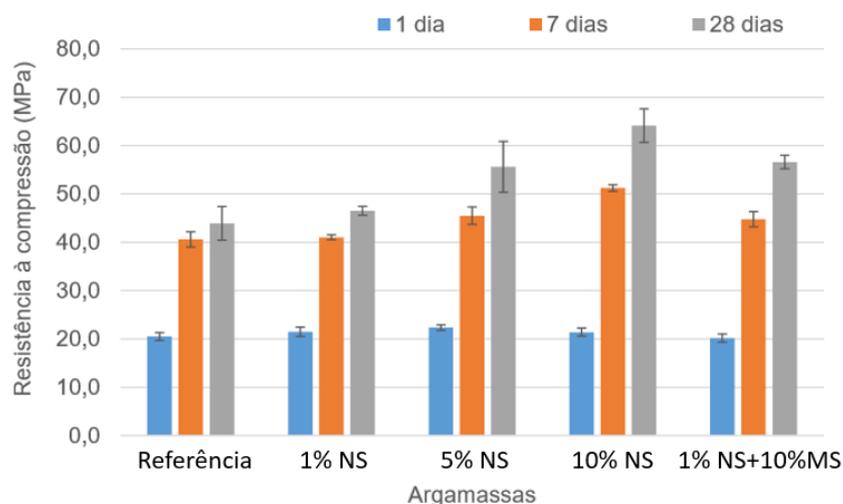
Fonte: BIANCHI, 2014.

Said et al. (2012) estudaram o efeito da incorporação de 3% e 6% de nanosílica coloidal em concretos constituídos apenas de cimento e em concretos com cimento e cinza volante e obteve melhora na resistência à compressão. Os melhores resultados foram verificados nos concretos com cinza volante e 6% de nanosílica, aos 7 dias o ganho de resistência foi de 14% se comparado ao concreto sem adição de nanosílica. Os autores atribuem a melhora nas propriedades mecânicas ao efeito fíler e pozolânico do material.

Isfahani et al., 2016 ao estudar a adição 0,5%, 1% e 1,5% de nanosílica, em concretos com três fatores água/aglomerante, obteve significativos ganhos de resistência apenas para o maior fator água/aglomerante, 0,65, aos 28 dias aumento da resistência com a adição 1,5% de nanosílica foi de 41% em comparação ao concreto referência, os autores atribuem o ganho de resistência à formação adicional de C-S-H devido à adição de nanosílica.

Schmalz (2018) estudou a influência da adição de 1%, 5% e 10% nanosílica coloidal (NS) e 10% de sílica (MS) em argamassas. Quanto as propriedades mecânicas, a adição de nanosílica contribuiu para o aumento da resistência a compressão e apresentou resultados ainda mais satisfatórios na redução dos coeficientes de absorção capilar das argamassas. Aos 28 dias, a adição de 10% de nanosílica gerou um aumento de 46% na resistência à compressão e uma queda de 28% no índice de absorção. A Figura 2-6 os resultados de resistência a compressão obtidos aos 1, 7 e 28 dias.

**Figura 2-6 - Resistência à compressão de argamassas aos 1, 7 e 28 dias.**



Fonte: SCHMALZ, 2018.

Contrapondo os resultados positivos da adição de nanosílica nas propriedades mecânicas citados, Rao, Silva e de Brito (2015) verificaram redução na resistência à compressão de argamassas autoadensáveis com a incorporação de nanosílica. Foram analisados os teores de adição de 0,75%, 1,50% e 3,00% de nanosílica coloidal e os resultados indicaram uma redução da resistência à compressão com o aumento do teor de nanosílica utilizado, sendo que aos 28 dias e utilização de 3,00% de nanosílica coloidal levou a uma queda de 12% em relação à mistura sem adição.

Schmalz, Ferreira e Quarcione (2017) analisaram o efeito da utilização 1,7%, 1,9%, 2,1%, 2,5% e 3,0% de nanosílica dispersa em um aditivo plastificante à base de policarboxilato e 10% de sílica ativa em argamassas, por meio de ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade. A utilização de nanosílica isoladamente, não apresentou resultados satisfatórios nas propriedades analisadas, sendo verificados valores de resistência à compressão inferiores ao traço referência, já com a utilização combinada de nanosílica e sílica ativa, os resultados foram melhores, a adição de 10% de sílica ativa em conjunto 2,5% de nanosílica gerou, aos 28 dias um ganho de resistência de aproximadamente 14%.

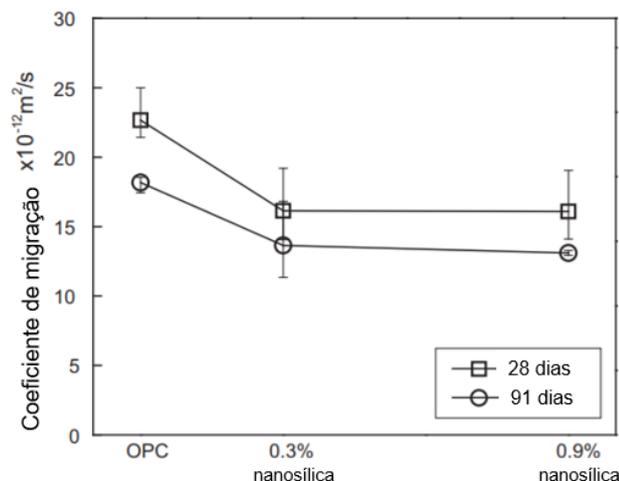
Já quanto a durabilidade dos materiais cimentícios, Li et al. (2017a) estudaram o efeito combinado na sílica ativa e da nanosílica, em pó com partículas com tamanho variando de 5 a 20nm, na durabilidade de argamassas e concluíram que a adição de sílica e/ou nanosílica é eficaz no o aumento da durabilidade. Analisando-se a resistência das argamassas ao ataque por sulfatos e à carbonatação, a adição de 1% de nanosílica apresentou resultados similares aos encontrados com a utilização de 10% de sílica, enquanto que na resistência aos íons cloreto, a utilização de 1%, 2% de nanosílica mostrou-se menos eficaz em comparação a adição de 10% de sílica. Por fim, concluiu-se que para um melhor preenchimento de vazios,

densidade de compactação dos materiais e maior densidade da microestrutura da pasta de cimento a nanosílica deve ser utilizada de forma combinada com a sílica ativa.

Khaloo, Mobini e Hosseini (2016) estudaram o efeito da adição de dois tipos de nanosílica (com diferentes valores de superfície específica) em concretos de alta resistência. Por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, ao se comparar os concretos com adição em relação ao concreto referência, foi possível verificar a diminuição do diâmetro médio dos poros e da porosidade total. Comparando-se a adição de 1,5% das nanosílica estudadas, pode-se perceber que os concretos com a adição da nanosílica de menor área específica foram as que apresentaram menor porosidade. Os autores atribuem esse resultado à maior tendência de aglomeração da nanosílica de maior área superficial específica.

Du, Du e Liu (2014) estudaram a influência da adição de 0,3% e 0,9% de nanosílica em pó na durabilidade de concretos. Por meio do ensaio de migração de cloretos, aos 28 dias, foi possível verificar uma redução no coeficiente de migração de 28,7% e 29% para 0,3% e 0,9% de adição, respectivamente. Como pode ser percebido, a adição de 0,9% não promoveu uma melhora proporcional na redução do coeficiente de migração. Os autores atribuem este resultado a aglomeração das partículas de nanosílica, prejudicando a ação da nanosílica na resistência à penetração dos cloretos. A Figura 2-7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de migração de cloretos aos 28 e 91 dias. Os autores acreditam que a melhora na resistência aos agentes agressivos seja decorrente dos efeitos fíler e pozolânico desses materiais, gerando assim, uma melhora na microestrutura das argamassas.

**Figura 2-7 - Coeficiente de migração de cloretos em concretos com e sem adição de nanosílica.**

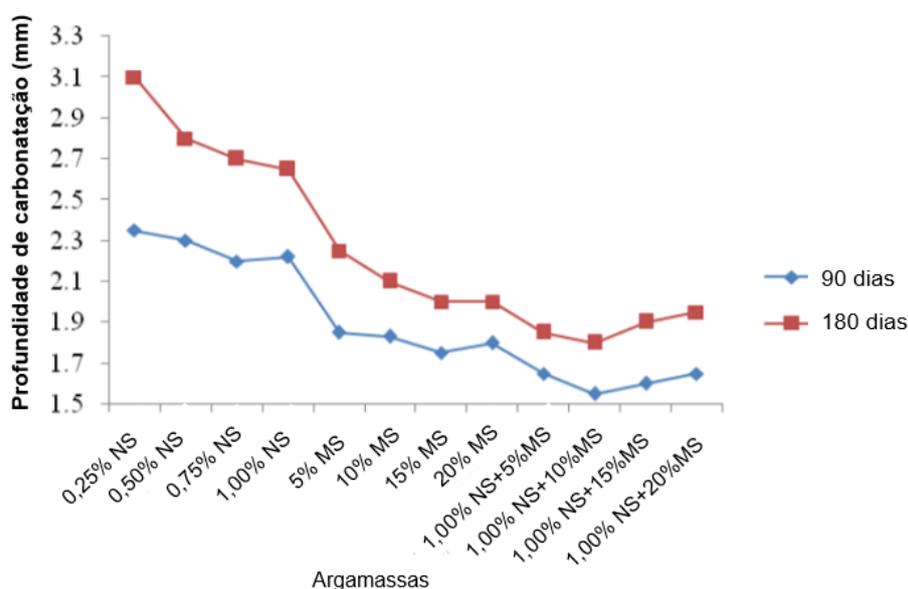


Fonte: DU; DU; LIU, 2014.

Garg, Bansal e Aggarwal (2016) estudaram influência da adição de 0,50%, 0,75%, 1,00% e 1,25% de nanosílica coloidal e 5%, 10%, 15% e 20% de sílica ativa (MS) na

penetração de cloretos e na carbonatação. A utilização das adições contribuiu para uma maior resistência dos corpos de prova aos agentes agressivos, no entanto, resultados mais significativos foram obtidos com uso combinado das adições. Quanto à penetração de cloretos os melhores resultados foram obtidos com a adição de 1% de nanosilica e 15% de sílica ativa, levando a redução de 28%, 28%, 30% e 32%, aos 28, 56, 90 e 180 dias, respectivamente, no teor de penetração de cloretos, se comparado à argamassa referência. Quanto à carbonatação, os resultados mais significativos também foram obtidos com a mesma combinação de teores de adições. Os resultados obtidos aos 90 e 180 dias de ensaio estão apresentados na Figura 2-8.

**Figura 2-8 - Profundidade de carbonatação aos 90 e 180 dias.**



Fonte: GARG; BANSAL; AGGARWAL, 2016.

Além das pesquisas já citadas sobre a incorporação de nanosilica em matrizes cimentícias, existem muitas outras desenvolvidas recentemente. A Figura 2-4 apresenta uma relação de pesquisas realizadas a partir de 2016 sobre a adição desse material.

**Tabela 2.4 - Pesquisas recentes sobre a incorporação de nanosilica em matrizes cimentícias.**

Autores	Título do trabalho	Tipo de nanosilica	Teores estudados (%)
Gómez-Zamorano e Castillo-Linton (2016)	Modificação das propriedades de matrizes cimentícias através da adição de partículas de nanosilica	Dispersa em solução aquosa	0; 0,3; 1 e 5
Mendoza-Reales, Sierra-Gallego e Tobón (2016)	As propriedades mecânicas de argamassas de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono e nanosilica: um estudo experimental	Dispersa em solução aquosa	0; 3,5; 6,5 e 9,5

**Tabela 2.4 - Pesquisas recentes sobre a incorporação de nanosílica em matrizes cimentícias (continuação).**

<b>Autores</b>	<b>Título do trabalho</b>	<b>Tipo de nanosílica</b>	<b>Teores estudados (%)</b>
Kavkani, Mortezaei e Naghizadeh (2016)	O efeito do metacaulim, da sílica ativa e da nanosílica nas propriedades mecânicas e na microestrutura da argamassa de cimento	Não informado	0; 0,8; 1,5; 3 e 5
Chithra, Kumar e Chinnaraju, (2016)	O efeito da nanosílica coloidal na trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto de alto desempenho com escória de cobre utilizado parcialmente como agregado miúdo	Coloidal dispersa em solução aquosa	0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 e 3
Naskar e Chakraborty (2016)	O efeito dos nano materiais em concreto geopolimérico	Coloidal	0,75; 3 e 6
Ehsani, Nili e Shaabani (2017)	O efeito da nanosílica no desenvolvimento da resistência à compressão e na absorção de água de pastas de cimento e concretos contendo cinzas volantes	Em pó	0; 1,5; 3; 5 e 7,5
Xu, Wang e Zuo (2017)	Efeitos modificadores da nanosílica na zona de transição do concreto: uma abordagem multiescalar	Coloidal dispersa em solução aquosa	0 e 1
Naresh e Dadapeer (2017)	Um estudo sobre as propriedades do concreto de alto desempenho utilizando nanomateriais	Não informado	0; 1; 1,5; 2 e 2,5
Hendi et al., (2017)	Efeitos simultâneos da microsílica e da nanosílica em concretos alto-adensáveis em um meio com ácido sulfúrico	Coloidal dispersa em solução aquosa	0; 0,3, 1 e 2
Arel e Thomas (2017)	Os efeitos da adição de nano e micropartículas na durabilidade e propriedades mecânicas de argamassas expostas ataque interno e externo de sulfatos	Não informado	0; 2; 4 e 8
Flores et al. (2017)	Performance de pastas de cimento Portland contendo nanosílica e diferentes tipos de sílica	Coloidal dispersa em solução aquosa	0 e 2,5
Massana et al. (2018)	Influência da adição de nano e microsílica na durabilidade de concreto autoadensável de alto desempenho.	Coloidal dispersa em solução aquosa	0; 2,5; 5 e 7,5
Li et al. (2018)	Uso combinado de microsílica e nanosílica no concreto: demanda de superplastificante, eficiência cimentante e efeito sinérgico.	Em pó	0; 0,5 e 1
Ramezani pour e Moeini (2018)	Propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de revestimento de escórias ativas alcalinas contendo nanosílica e sílica ativa	Em pó	0; 2 e 4

Como pode ser observado, existem diferentes formas de nanosílica disponíveis no mercado, e analisando-se os resultados obtidos por outros pesquisadores, pode-se concluir que ainda não existe consenso sobre a real influência da nanosílica nas propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos compostos cimentícios. Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de concretos de cimento Portland com adição de uma solução aquosa de nanosílica coloidal por meio de ensaios de propriedades mecânicas e físicas e como também de durabilidade.

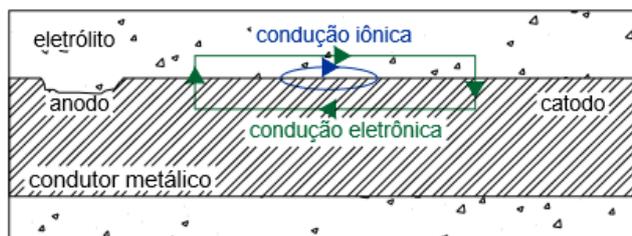
# 3. CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO

Resumidamente, a corrosão é um processo espontâneo no qual o material tende a retornar ao seu estado de menor energia, que é seu estado mais estável. Na natureza os metais geralmente são encontrados na forma de compostos, como óxidos e hidróxidos. Com o processo metalúrgico, os metais passam para o estado metálico, porém ao entrarem em contato com o ambiente, espontaneamente, iniciam a transformação do estado metálico para o estado composto, que é seu estado de menor energia (SOUSA, 2014).

O processo corrosivo é caracterizado pela dissolução do material devido às reações químicas de redução e oxidação, sendo um fenômeno de superfície. Já a corrosão da armadura de aço de uma estrutura de concreto armado é um processo diferente, caracterizado pela existência de um fluxo de elétrons e íons entre regiões catódicas e anódicas, sendo um processo eletroquímico (SOUSA, 2014). A Figura 3-1, apresenta resumidamente como ocorre o processo de corrosão eletroquímica. Segundo Silva (2006), para que o processo de corrosão eletroquímica ocorra, são necessários 4 elementos:

- Condutor: é a própria armadura de aço;
- Água: funciona perfeitamente como eletrólito, permitindo a movimentação dos íons ao longo das regiões anódicas e catódicas;
- Oxigênio: é necessário para que ocorra a formação dos produtos de corrosão (óxido/ hidróxido de ferro);
- Diferença de potencial: é necessária para que ocorra a formação das regiões anódicas e catódicas

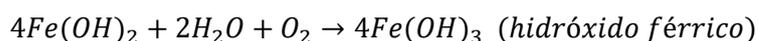
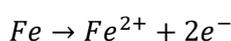
**Figura 3-1 - Célula de corrosão eletroquímica.**



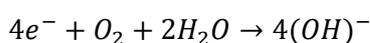
Fonte: SILVA, 2006.

Neville (2015) explica que quando há uma diferença de potencial ao longo do aço no concreto, forma-se uma célula eletroquímica. Então, passam a existir uma região anódica e uma região catódica, que são conectadas pela água de poros da pasta de cimento endurecida (eletrólito). Além disso, o autor explica as reações envolvidas no processo de corrosão, os íons ferrosos positivamente carregados,  $Fe^{2+}$ , no ânodo passam para a solução, os elétrons livres,  $e^-$ , chegam até o cátodo e são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combinam-se com a água e o oxigênio, resultando em íons hidroxila ( $OH^-$ ). As hidroxilas formadas combinam-se com os íons ferrosos, formando hidróxido ferroso, que posteriormente por oxidação transforma-se em hidróxido férrico (ferrugem). As reações que ocorrem durante o processo de corrosão são apresentadas a seguir:

Reações anódicas:



Reações catódicas:



Os produtos gerados durante o processo de corrosão são diferentes tipos de óxidos e hidróxidos de ferro que passam a ocupar, no interior da estrutura de concreto, volumes de 3 a 10 vezes maiores quando comparado ao volume inicial da armadura de aço, podendo gerar tensões interna superiores a 15MPa (CASCUDO; HELENE 1999 apud CASCUDO, 2005).

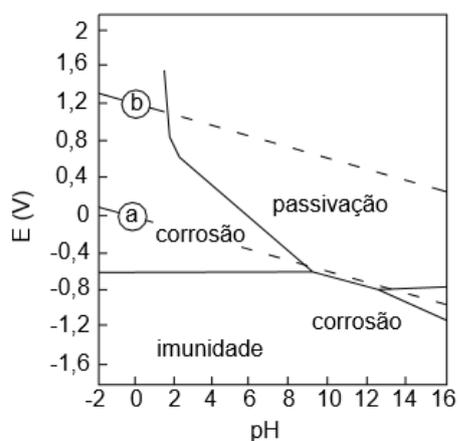
Os produtos de corrosão, geram esforços no concreto na direção radial das barras, consequentemente esses esforços produzem tensões de tração e tais tensões resultam na fissuração da estrutura. As fissuras situam-se na direção paralela à armadura de aço corroída e apresentam aberturas que vão evoluindo com o decorrer do processo de corrosão, sendo por isso denominadas fissuras ativas. A evolução das fissuras resulta no lascamento do concreto e por fim no destacamento da camada de cobrimento (CASCUDO, 2005).

Para que o processo de corrosão aconteça é necessário que agentes agressivos capazes de despassivar o aço, percorram a camada de concreto de cobrimento e cheguem até a armadura em concentrações suficientes para romper a camada passivadora do aço (RIBEIRO; CUNHA, 2014). A camada passivadora do aço é uma fina película de óxido estável fortemente aderida à superfície do aço que atua como elemento protetor da armadura (SILVA, 2006).

De acordo com Sato apud Helene (1993), a camada passivadora trata-se de um filme transparente, fino, aderente e estável, sendo composta por duas camadas de óxido, sendo uma interna na qual predomina o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e outra externa, de  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  e com espessura variando de  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$  a  $10^{-1}$   $\mu\text{m}$ .

A proteção conferida ao aço pela película passivadora é garantida pela alta alcalinidade do concreto e um adequado potencial eletroquímico. Na Figura 3-2 é apresentado o diagrama de Pourbaix para o ferro em meio aquoso, que mostra as condições de pH e potencial nas quais o ferro pode encontrar-se em três condições distintas, corrosão, passivação e imunidade.

**Figura 3-2 - Diagrama de Pourbaix para o Fe a 25°C.**



Fonte: POURBAIX, 1974 apud SILVA, 2006.

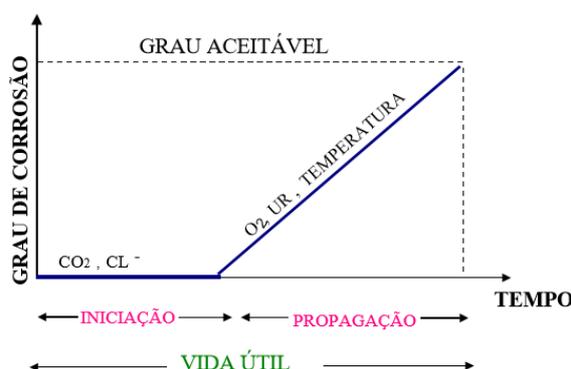
A zona de imunidade corresponde à região do diagrama onde o aço não reage com o meio, independente da natureza do meio ser ácida, neutra ou alcalina. O aço encontra-se nessa zona quando é submetido à técnica de proteção catódica. A zona de passivação corresponde à região em que são observadas as películas passivadoras de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . A zona de corrosão corresponde àquela onde há condições necessárias para que ocorra a corrosão do aço. As linhas tracejadas indicam regiões de estabilidade da água, acima delas o oxigênio é liberado e abaixo o hidrogênio é liberado (HELENE, 1993).

A quebra da película passiva é um fenômeno que ocorre rapidamente e em uma escala muito pequena, dificultando a observação direta desse fenômeno, o que torna mais difícil a explicação de como ocorre o mecanismo de ruptura do filme passivo. Na literatura três mecanismos principais são apresentados para tentar explicar como ocorre a ruptura da camada de proteção, sendo eles: mecanismo de migração iônica através do filme passivo, mecanismo de ruptura mecânica e o mecanismo de adsorção (SOUSA, 2014).

O tempo de vida útil das estruturas, associados ao fenômeno da corrosão, é geralmente baseado no modelo proposto por Tuutti (1982), o qual é caracterizado por dois períodos, iniciação e propagação (Figura 3-3).

O período de iniciação corresponde ao tempo que os agentes agressivos levam para atravessar a camada de concreto de cobrimento, atingirem a armadura e provocarem a despassivação. O período de propagação é definido como o tempo de acumulação da deterioração até chegar a um nível aceitável (RIBEIRO, 2014).

**Figura 3-3 - Modelo simplificado de vida útil.**



Fonte: TUUTTI, 1982.

De acordo com Cascudo (2005), para que o processo de corrosão tenha início, é determinante a despassivação do aço, sendo dois fatores determinantes para que isso ocorra: presença de íons cloreto acima do teor crítico e a diminuição da alcalinidade do concreto. A propagação é dependente do teor de oxigênio, umidade relativa e temperatura.

### 3.1 A AÇÃO DOS CLORETOS NO CONCRETO

A corrosão de armaduras provocada pela ação dos íons cloreto é um dos problemas mais graves que podem afetar uma estrutura de concreto armado. A corrosão também pode ser provocada por outros fatores, que atuam reduzindo a alcalinidade do concreto, como carbonatação ou exposição das estruturas a ambientes ácidos, no entanto os íons cloreto podem despassivar a armadura mesmo em condições de alta alcalinidade do concreto (SILVA, 2006).

Figueiredo (2011) explica que os íons cloreto podem chegar até o interior do concreto de diversas formas:

- Utilização de aditivos aceleradores de pega que contêm CaCl<sub>2</sub>;
- Impurezas dos agregados e da água de amassamento;
- Atmosfera marinha (maresia);

- Água do mar;
- Utilização de sais de degelo e
- Procedimentos industriais como o branqueamento da celulosa e papel.

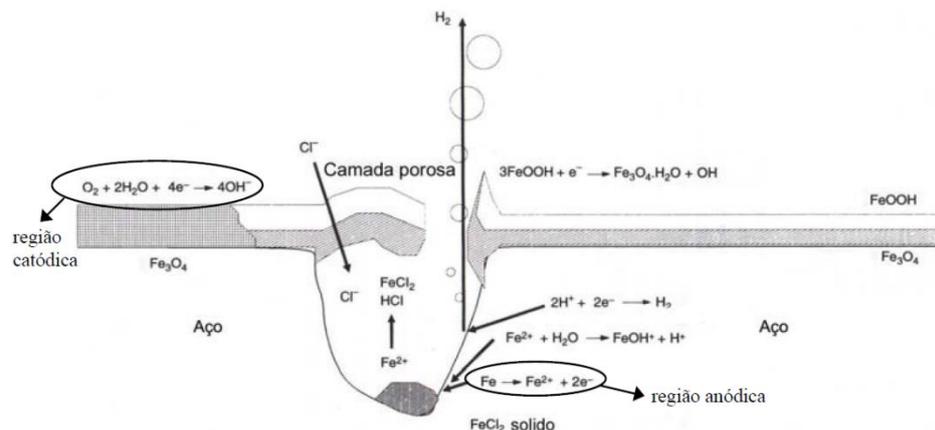
O autor também apresenta as diferentes formas que os íons cloreto podem ser encontrados no concreto:

- Quimicamente combinados com as fases alumino-ferríticas para formar cloroaluminatos;
- Adsorvidos fisicamente na superfície dos poros capilares e
- Livres da solução contida nos poros do concreto.

Almeida e Sales (2014) afirmam que por maior que seja a capacidade do concreto de combinar-se quimicamente e adsorver os íons cloreto, sempre haverá um estado de equilíbrio entre essas três formas, no qual sempre algum teor de cloretos livres. Os íons cloreto livres são os que resultam efetivamente no processo de corrosão, isso, se sua concentração estiver acima do valor crítico.

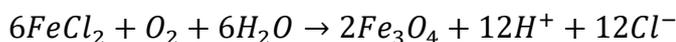
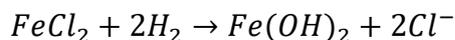
Os íons cloreto atacam a armadura de forma pontual, gerando uma corrosão localizada, também denominada corrosão por pite (Figura 3-4). A corrosão por pite caracteriza-se pela formação de uma cavidade com elevada relação entre comprimento e diâmetro, que é o pite. Na corrosão localizada a perda de massa ocorre em regiões específicas, ou seja, o ataque ocorre em pequenas áreas da superfície do metal, enquanto o restante do material metálico permanece intacto, sendo a perda de massa inferior à causada pela corrosão uniforme. Por outro lado, a corrosão localizada, além da perda de massa causa efeitos altamente prejudiciais ao material metálico (SOUSA, 2014).

**Figura 3-4 - Representação esquemática da corrosão na presença de cloretos: mecanismo de formação e propagação.**



Fonte: BROOMFIELD apud SILVA, 2006.

As reações que ocorrem entre os íons cloreto e a armadura de aço são as seguintes (THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998):



Percebe-se nas equações que o íon cloreto sempre aparece de forma livre, ficando assim, disponível para dar continuidade ao processo de corrosão.

Os cloretos na forma de cristal sólido não representam riscos para as estruturas, visto que nesse estado apresenta dimensões superiores aos dos poros do concreto, no entanto, eles podem depositar-se na superfície do concreto por impactação e por meio da chuva os cristais podem ser dissolvidos e transportados para o interior do concreto. Os íons cloreto podem penetrar na estrutura através dos seguintes mecanismos: absorção capilar, difusão, permeabilidade ou migração (HELENE, 1993).

A ocorrência da corrosão por cloretos depende da concentração de íons cloreto livres nos poros do concreto. Existe um valor limite de concentração desses íons, no qual eles são capazes de romper a camada passivante e dar início ao processo de corrosão de armaduras. A NBR 12665:2015 (ABNT, 2015) determina o teor máximo de concentração de cloreto no concreto endurecido, de modo a proteger as armaduras do concreto. Os valores apresentados pela norma estão descritos na Tabela 3.1

**Tabela 3.1 - Teor máximo de íons cloreto para a proteção das armaduras de concreto, conforme NBR 12655:2015 (ABNT, 2015).**

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl <sup>-</sup> ) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

### 3.1.1 FATORES INFLUENTES NA VELOCIDADE E PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO

A velocidade e a profundidade de penetração dos íons cloreto são influenciados por diversos fatores, tais como o tipo de cimento, relação água cimento, carbonatação, grau de saturação dos poros, existência de fissuras e a temperatura.

Quanto ao tipo de cimento, a quantidade de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) existente é determinante na intensidade da corrosão, pois os íons cloreto reagem com o  $C_3A$ , formando um sal insolúvel, o cloroaluminato de cálcio hidratado (sal de Friedel). Esse sal insolúvel reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto, conseqüentemente, aumenta a resistência à corrosão.

Rasheduzzafar et al. (1990) estudaram cimentos com diferentes teores de  $C_3A$  e concluíram que o tempo de iniciação da corrosão é significativamente influenciado pela quantidade de  $C_3A$  presente no cimento (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2 - Quantidade de cloretos livres em relação a diversos teores de  $C_3A$  (RASSHEEDUZZAFAR et al apud FIGUEIREDO, 2011)**

Teor de $C_3A$ (%)	Teor de cloretos livres (%)	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2	86	Referência
9	58	1,75 vezes
11	51	1,93 vezes
14	33	2,45 vezes

A relação água/cimento é determinante para microestrutura das matrizes cimentícias, pois influencia na porosidade, na forma, no volume e no tamanho dos poros, sendo assim, controla a penetração dos íons cloreto, quanto maior a relação água cimento, maior será a penetração de cloretos (FIGUEIREDO, 2011).

O concreto carbonatado não possui a mesma capacidade de combinar cloretos que um concreto não-carbonatado. Com o processo de carbonatação, parte dos íons cloreto que encontravam-se de maneira combinada passam a condição livre, o que pode fazer com que o teor de íons cloreto livres atinja o valor crítico e rompa a camada de proteção (FIGUEIREDO, 2011). Por outro lado, a carbonatação diminui a porosidade do concreto o que pode dificultar o ingresso dos íons cloreto.

Quanto ao grau de saturação dos poros, o transporte dos íons cloreto ocorre somente na presença de água, a penetração pode ocorrer por meio da difusão, absorção capilar e migração de íons (FIGUEIREDO, 2005)

A existência de fissuras facilita a entrada dos íons cloreto, do gás carbônico e do oxigênio, portanto o aparecimento de fissuras é preocupante em relação à corrosão de

armaduras. Segundo Figueiredo (2005) a velocidade com que os íons cloreto penetram na estrutura depende da abertura das fissuras e também da qualidade do concreto utilizado.

A temperatura influencia na velocidade de corrosão de duas maneiras. O aumento da temperatura estimula a mobilidade das moléculas o que favorece o transporte das mesmas para o interior do concreto. Já com a queda de temperatura, pode ocorrer a condensação e conseqüentemente, aumento da umidade do material (FIGUEIREDO, 2011).

### 3.2 AÇÃO DO CO<sub>2</sub> NO CONCRETO

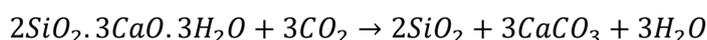
Isoladamente, a carbonatação modifica a microestrutura e altera o pH do concreto. Segundo Pauletti et al., (2007) a carbonatação é um fenômeno físico-químico resultante das reações entre os compostos hidratados do cimento e o CO<sub>2</sub> existente na atmosfera.

Montenon et al., (2002) apresenta o processo de carbonatação em 4 etapas, sendo elas:

1. Difusão do CO<sub>2</sub> para o interior do concreto;
2. Dissolução do CO<sub>2</sub> na solução de poros do concreto e reação com o hidróxido de cálcio.



3. Reação com silicatos e aluminatos

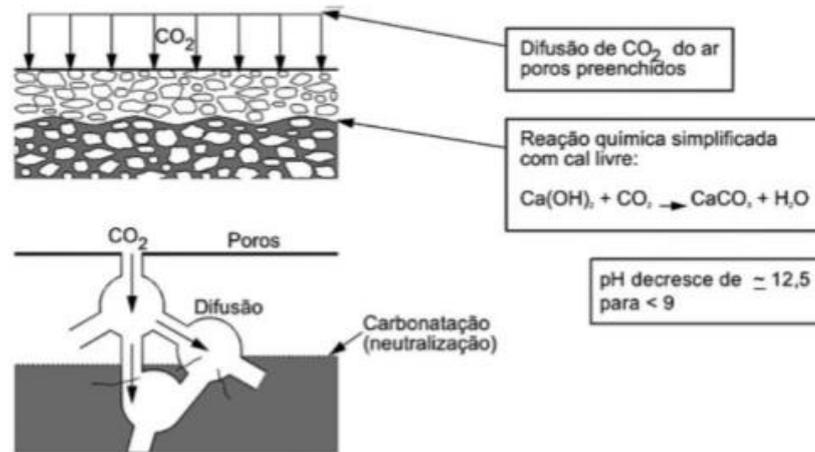


4. Produção de carbonato de cálcio e água.

O carbonato de cálcio formado durante o processo de carbonatação, tem uma solubilidade muito baixa e precipita dentro dos poros, reduzindo a porosidade da matriz cimentícia, conseqüentemente, formando uma barreira ao avanço da frente de carbonatação. Portanto, a precipitação do carbonato de cálcio tende a diminuir a velocidade do avanço da frente de carbonatação.

A Figura 3-5 apresenta resumidamente como ocorre o processo de carbonatação, devido à penetração do CO<sub>2</sub>.

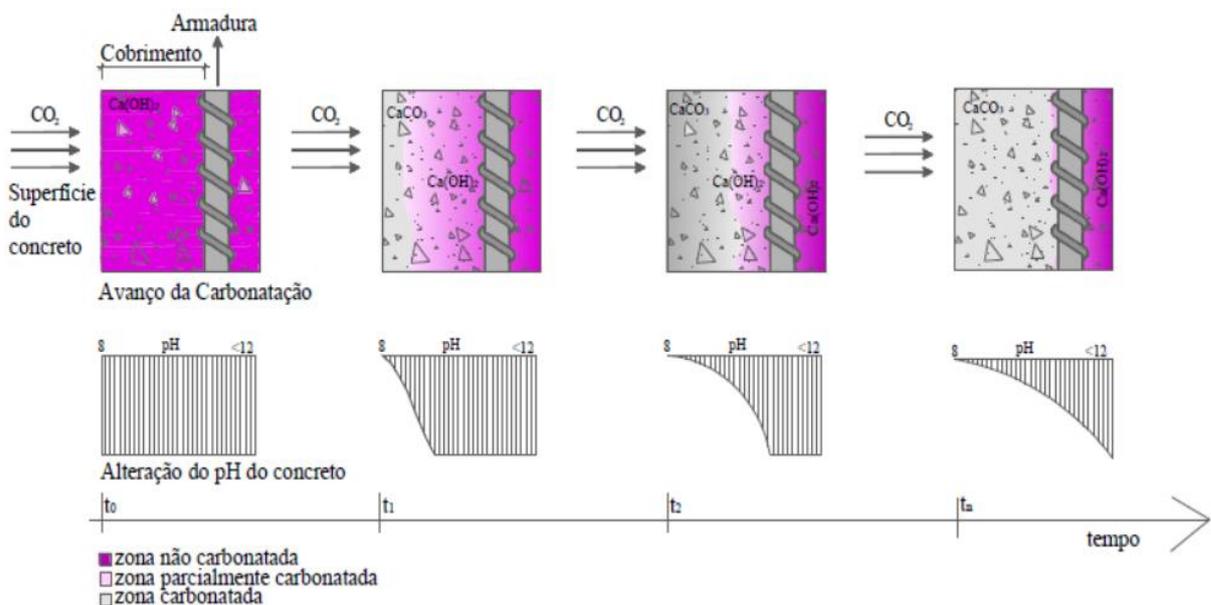
**Figura 3-5 - Representação esquemática do processo de carbonatação.**



Fonte: CASCUDO; CARASEK, 2011.

A carbonatação não gera a deterioração do concreto, mas gera consequências severas à estrutura. No que diz respeito à durabilidade, a consequência mais significativa é a redução do pH da água de poros da pasta de cimento endurecida (Figura 3-6). A carbonatação faz com que o pH que inicialmente encontra-se entre 12,6 e 13,5 caia para valores próximo de 9 (NEVILLE, 2015).

**Figura 3-6 - Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.**



Fonte: POSSAN, 2010.

O mecanismo de transporte atuante na penetração do  $\text{CO}_2$  no concreto é a difusão, causada por um gradiente de concentração do gás carbônico no ambiente externo e no interior do concreto. A carbonatação inicia-se a partir da superfície e avança para o interior do concreto, formando uma frente de carbonatação, que divide duas áreas com pH muito distintos

e ao alcançar as armaduras, gera sua desp passivação, dando início ao processo de corrosão (FIGUEIREDO, 2005). A corrosão gerada pela carbonatação é denominada uniforme, correndo de forma generalizada e uniforme em toda a extensão da armadura (RIBEIRO; CUNHA, 2014).

A velocidade e a profundidade de carbonatação são dependentes de fatores ambientais e características do concreto no estado endurecido, conforme apresentado na Tabela 3.3

**Tabela 3.3 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995 apud FIGUEIREDO, 2005)**

	<b>Fatores Condicionantes</b>	<b>Características Influenciadas</b>
<b>Condições de Exposição</b>	Concentração de CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mecanismo físico-químico</li> <li>• Velocidade de carbonatação</li> </ul>
	Umidade relativa do ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grau de saturação dos poros</li> <li>• Velocidade de carbonatação</li> </ul>
	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de carbonatação</li> </ul>
<b>Características do concreto</b>	Composição química do cimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidade da pasta carbonatada</li> </ul>
	- Características do clínquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reserva alcalina</li> </ul>
	- Teor de adições	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidade</li> </ul>
	Traço	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidade</li> </ul>
	Qualidade de execução	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidade</li> </ul>
	- Defeitos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grau de hidratação</li> </ul>
	- Cuidados com a cura	

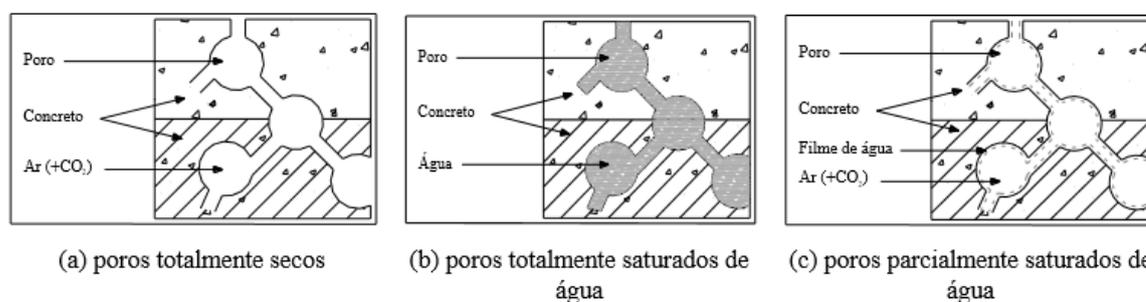
Segundo Figueiredo (2005) quanto maior concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente, maior será a velocidade de carbonatação, principalmente em concretos com elevado fator água/cimento. A concentração de CO<sub>2</sub> varia de acordo com o ambiente, conforme mostrado na Tabela 3.4. Neville (2015) afirma que a ação do CO<sub>2</sub> ocorre mesmo em um ambiente com baixa concentrações, como no ambiente rural, no qual a concentração é cerca de 0,03% em volume.

**Tabela 3.4 - Classificação da agressividade do ambiente em função da concentração de CO<sub>2</sub> (HELENE, 1995).**

Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras		
Classe de agressividade	Macro-clima	CO <sub>2</sub> no ambiente (%)
I	Atmosfera rural	≤ 0,3
II	Urbana	≤ 0,3
III	Marinha ou industrial	≥ 0,3
IV	Polos industriais	> 0,3

A umidade é um fator fundamental no avanço da frente de carbonatação no concreto, pois a água possui papel crucial neste processo. Quando os poros do concreto estão secos, Figura 3-7.(a), o CO<sub>2</sub> penetra sem dificuldades, porém a reação de carbonatação não ocorre sem a presença de água. Nos poros saturados, Figura 3-7(b), o CO<sub>2</sub> consegue penetrar, porém, a frente de carbonatação é freada devido à baixa velocidade de difusão deste gás na água. Por fim, quando os poros estão parcialmente preenchidos por água, Figura 3-7(c), a frente de carbonatação avança, visto que existe água e a possibilidade de difusão do CO<sub>2</sub> (FIGUEIREDO, 2005)

**Figura 3-7 - Representação esquemática da difusão do CO<sub>2</sub>.**



Fonte: BAKKER, 1988 apud POSSAN, 2011.

Não existe um consenso entre os pesquisadores, quanto ao teor exato de umidade relativa que leva à um maior avanço da frente de carbonatação. Papadakis, Fardis e Vayenas (1992), afirmam que a umidade ideal para um maior avanço da frente de carbonatação está entre 50% e 60%, enquanto que Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995) apontar teores entre 40% e 80% como ideais.

No que se refere a temperatura, a mesma funciona como catalizadora de reações químicas, geralmente ocorre um aumento na velocidade das reações químicas à medida que ocorre um aumento da temperatura (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Quanto as características do concreto, o tipo de cimento apresenta grande influência no avanço da frente de carbonatação, visto que a quantidade disponível de compostos alcalinos para reagir com o CO<sub>2</sub> depende do tipo de cimento utilizado (FIGUEIREDO, 2005).

A relação água/cimento, está diretamente ligada à porosidade da pasta de cimento hidratada, portanto apresenta grande influência na profundidade de carbonatação. Assim como ocorre na penetração dos íons cloreto, quanto maior o fator água/cimento, maior será a porosidade e a permeabilidade, facilitando assim a difusão do  $\text{CO}_2$  no concreto.

Quanto as condições de cura, quanto maior o tempo e mais bem realizado o método empregado, maior será o grau de hidratação do cimento, resultando em menor porosidade e permeabilidade, portanto menor será a frente de carbonatação (FIGUEIREDO, 2005). Segundo Cascudo e Carasek (2011) a boa cura contribui para consolidar a pasta de cimento e qualificar o concreto, criando uma capa superficial compacta e bem consolidada na região do revestimento, portanto a cura é uma ferramenta essencial para que se possa garantir a durabilidade da estrutura frente à carbonatação.

A utilização de adições minerais promove dois efeitos opostos em relação a carbonatação. Ocorre alteração da matriz cimentícia, por efeito fíler e pozzolânico, resultando no refinamento dos poros, e conseqüentemente no retardo da frente de carbonatação. Porém, dependendo do teor e quantidade de adição, o consumo de hidróxido de cálcio, pode reduzir o pH da solução dos poros do concreto, promovendo uma redução da capacidade de proteção da pasta de cimento, mediante à carbonatação (CASCUDO; CARASEK, 2011).

A existência de fissuras na estrutura também influencia na velocidade que o  $\text{CO}_2$  ingressa no concreto. Concretos com a presença de fissuras, contribuem para uma maior velocidade e profundidade de carbonatação, além de proporcionar a existência de uma maior área de contato (CAMACHO, 2015).

### **3.3 A AÇÃO COMBINADA DE OS ÍONS CLORETO E DO $\text{CO}_2$**

A corrosão de armaduras é um dos principais causadores da degradação das estruturas de concreto armado. O  $\text{CO}_2$  e os íons cloreto são apontados como os principais agentes agressivos responsáveis pela corrosão de armaduras (MALHEIRO et al., 2016).

A influência da ação isolada tanto dos íons cloreto quanto da carbonatação na durabilidade das estruturas de concreto armado é algo que vem sendo amplamente estudado e os resultados alcançados apresentam certo consenso. Já o estudo da ação combinada desses mecanismos de degradação é algo mais recente, alcançando maior visibilidade a partir do ano 2000, porém os resultados obtidos nas pesquisas experimentais desenvolvidas ainda não permitiram alcançar um consenso sobre o assunto (CAMACHO, 2015).

Em certas condições de exposição ambiental a ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos pode ocorrer. No ambiente marinho, nas chamadas zona atmosférica,

zona de respingos e outras áreas nas quais a umidade permita a ocorrência de carbonatação, a ação conjunta desses agentes agressivos pode ser significativa (COSTA; APPLETON, 2001). A ação combinada também pode ocorrer em pilares de pontes e no concreto utilizado para revestimento de túneis de regiões frias em que utiliza-se sal, que contém grande quantidade de íons cloreto, durante o inverno para derreter o gelo (AVELDAÑO; ORTEGA, 2011).

A carbonatação influencia no transporte dos íons cloreto significativamente, muitos estudos têm sido realizados para se conhecer melhor essa influência. De acordo com os resultados encontrados, é complicado afirmar se a carbonatação irá acelerar ou desacelerar o processo de corrosão devido aos íons cloreto (ZHU *et al.*, 2016). Durante o processo de carbonatação, o CO<sub>2</sub> reage com os produtos da hidratação do cimento o que resulta em uma diminuição da alcalinidade, a qual é responsável pela iniciação da corrosão. Simultaneamente, os produtos da carbonatação ocupam um espaço maior do que os produtos da hidratação do cimento consumidos durante esse processo, o que resulta em uma diminuição da permeabilidade do concreto, o que dificultaria a entrada dos íons cloreto. Por outro lado, a carbonatação pode resultar na retração da pasta de cimento hidratada, o que resultará em uma maior permeabilidade do concreto. Além disso, alguns autores afirmam que o processo de carbonatação aumenta o teor de íons cloreto livres, ou seja, o processo de corrosão por íons cloreto será facilitado (WANG *et al.*, 2017).

A penetração dos íons cloreto também influencia no avanço da frente de carbonatação. O ingresso dos íons cloreto pode atuar diminuindo a profundidade de carbonatação, visto que íons cloreto preenchem parcialmente os poros devido a cristalização do sal e além disso, apresentam comportamento higroscópico, que resulta em uma película de água no interior dos poros (MALHEIRO *et al.*, 2015).

A maioria das pesquisas experimentais sobre a ação combinada dos íons cloreto e da carbonatação foca no efeito da carbonatação na penetração dos cloretos em matrizes cimentícias, por considerar a corrosão por íons cloreto mais agressiva do que a provocada pela carbonatação. Sendo assim, por seu papel supostamente secundário, existem poucas pesquisas que objetivam compreender o efeito da ação dos íons cloreto no avanço da frente de carbonatação (MALHEIRO *et al.*, 2015).

Wang *et al.*, 2017 estudaram a influência da carbonatação na penetração e distribuição dos íons cloreto. Para isso foram comparados resultados da exposição isolada e combinada aos agentes agressivos. Foram estudados três tipos de concreto com fator água/aglomerante de 0,55, o primeiro com 100% de cimento Portland, o segundo com 70% de cimento Portland e 30% de cinza volante e o terceiro com 85% de cimento Portland, 10% de cinza volante e

5% de sílica ativa. Sendo o período de cura de 55 dias, dos quais 6 dias foram de cura imersa e 49 dias de cura ao ar.

Os perfis de cloretos nas três condições estudadas foram comparados, o efeito da carbonatação foi quantificado por meio do consumo de hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), permeabilidade ao ar e coeficiente de migração de cloretos. A duração máxima da carbonatação e do ataque de nos três regimes de exposição foi de três meses. O ataque por íons cloreto isolado foi realizado em um período máximo de três meses. Os ataques combinados foram realizados durante 6 meses, sendo 3 meses de cada tipo de ataque. Para o ataque isolado as propriedades foram analisadas ao final de cada mês e para o combinado, combinando-se um mês do ataque inicial, com um, dois e três meses do ataque final e, assim, sucessivamente até que todas as possíveis combinações de três meses de ataque inicial e três meses de ataque final fossem contempladas.

Após o final de cada período, duas amostras cilíndricas foram removidas do ambiente de exposição e amostras de pó foram retiradas de diferentes profundidades desses corpos de prova para verificação do pH e do teor de cloretos existente em diferentes profundidades. Os resultados indicaram que a influência da carbonatação no ingresso de cloretos é dependente da sequência que ocorrem os ataques. Quando os concretos são sujeitos à exposição aos cloretos seguida da carbonatação, os íons cloreto são redistribuídos durante o período de carbonatação e, como essa redistribuição ocorre, é dependente do período de carbonatação e do tipo de aglomerante, mas geralmente a carbonatação de concretos já contaminados por íons cloreto resulta na liberação dos íons cloreto combinados, resultando em uma maior profundidade de penetração dos íons cloreto. Já quando o concreto carbonatado é exposto aos íons cloreto, também ocorre um aumento na profundidade de penetração de cloretos, porém por outro motivo, possivelmente pela existência de microfissuras próximas à superfície induzidas pela carbonatação. Por fim, concluiu-se que a combinação dos agentes agressivos,  $\text{CO}_2$  e íons cloreto, afeta negativamente a vida útil das estruturas de concreto.

Malheiro *et al.*, (2014) também estudaram a influência da carbonatação na penetração dos íons cloreto. Nesse trabalho experimental foram moldados corpos de prova em argamassa, nas dimensões de  $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$ , utilizando cimento Portland e fator água/cimento 0,56, que foram mantidos em cura úmida por dois períodos distintos, 28 e 90 dias.

Após o período de cura, foi aplicada pintura bi-componente de base epóxi, de modo a permitir a penetração dos agentes agressivos por apenas uma face. Finalizada a pintura, os corpos de prova foram mantidos 4 dias em ambiente de laboratório para secagem. Depois de finalizada a secagem os corpos de prova foram submetidos à ciclos de molhagem e secagem. Os corpos de prova que permaneceram em cura por 28 dias foram mantidos em ensaio durante 8 ciclos, ou seja, 56 dias. Desses corpos de prova, metade foi submetido ao ciclo de

1 dia de solução contendo NaCl (concentração de 3,5%), 1 dia em secagem em ambiente de laboratório (O<sub>2</sub>) e 5 dias em câmara de carbonatação (20°C, 55%HR e 4% de CO<sub>2</sub>). A segunda metade foi exposta ao ciclo de 1 dia em solução contendo NaCl e 6 dias em ambiente de laboratório para secagem. A profundidade de carbonatação alcançada com estes ciclos foi relativamente baixa, por este motivo os ciclos foram alterados para os corpos de prova que permaneceram 90 dias em cura. Os corpos de prova submetidos a 90 dias de cura permaneceram em ensaio durante 8 ciclos (56 dias) e 12 ciclos (168 dias). Metade dos corpos de prova foi submetido ao ciclo de 2 dias em solução com NaCl e 12 dias em câmara de carbonatação. Já a outra metade foi exposto a 2 dias em solução e 12 dias em ambiente de laboratório.

Analisando-se os resultados, pode-se concluir que no que diz respeito aos cloretos, o comportamento dos perfis foi muito semelhante, independentemente do tempo de cura e do período de ensaio. Como esperado, a diferença encontrada foi no teor de cloretos, os corpos de prova submetidos a um maior tempo de ensaio apresentaram um teor de cloretos mais elevado.

A presença da carbonatação exerceu influência na penetração dos íons cloreto. Independente do período de cura e de ensaio, a penetração de cloretos alcançada na situação combinada de ataque por cloretos e CO<sub>2</sub> foi menor do que a verificada na situação onde ocorreu apenas a exposição aos íons cloreto. A carbonatação agiu reduzindo a concentração superficial de cloretos e a quantidade de cloretos totais presente ao longo da profundidade dos corpos de prova. Além disso, foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade e permeabilidade à água, nos corpos de prova que permaneceram 90 dias em cura, e os menores coeficientes foram alcançados pelas amostras carbonatadas. Os resultados verificados podem ser explicados pela mudança na microestrutura da matriz cimentícia gerada pela carbonatação que culminam na densificação dos poros e conseqüentemente na redução da permeabilidade.

Como pode ser percebido, os perfis de cloreto obtidos por Malheiro et al., (2014) mostram um comportamento oposto ao verificado por Wang et al., (2017). Deixando claro que há uma falta de consenso sobre a real influência do CO<sub>2</sub> na penetração dos íons cloreto. Se por um lado a carbonatação resulta em um aumento da quantidade de íons cloreto livres, facilitando o ingresso, por outro a ação do CO<sub>2</sub> gera um densificação dos poros, reduzindo a permeabilidade, dificultado assim a penetração dos agentes agressivos.

Liu et al., (2016) estudaram o efeito combinado da carbonatação e do ingresso de cloretos na durabilidade de concretos com adição de cinza volante. Foram moldados corpos de prova de 100mm x 100mm x 100mm, utilizando fator água/aglomerante de 0,47 e com três teores de cinza volante, 0%, 15% e 30%, substituindo o cimento em massa e que foram mantidos em cura úmida por 28 dias. Após o período de cura, as faces dos corpos de prova

foram revestidas com resina epóxi, exceto a face superior, para permitir a entrada unidirecional dos agentes agressivos.

Após o tratamento superficial, os corpos de prova foram divididos em quatro grupos, representando diferentes condições de exposição. O primeiro grupo foi submetido somente ao ataque pelos íons cloreto, o segundo grupo, foi submetido ao ataque combinado, iniciando com a carbonatação e finalizando com o ataque por cloretos, o terceiro foi exposto somente à carbonatação e o quarto foi submetido ao ataque combinado, mas neste caso, iniciando com a exposição aos íons cloreto e posteriormente à carbonatação.

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado durante 28 dias, com uma concentração de 20% de CO<sub>2</sub>, temperatura de 35 ± 2°C e umidade relativa de 70 ± 2%. Para avaliação do efeito da carbonatação na alteração da alcalinidade, foi feita a medição do pH através de amostras de pó e também, utilizou-se fenolftaleína. O ensaio de ataque de íons cloreto também foi realizado por 28 dias, os corpos de prova foram colocados em uma câmara onde gotículas contendo cloretos eram pulverizadas no ambiente para simular a condição encontrada na atmosfera do ambiente marinho. A câmara foi mantida com 35 ± 2°C de temperatura e 70 ± 2% e a solução utilizada continha 50g de NaCl por litro de água destilada. Para avaliação da penetração de cloretos, amostras de pó foram retiradas de diferentes profundidades e quantidade de íons cloreto foi medida.

Os resultados demonstraram que a carbonatação afeta significativamente o ingresso dos íons cloreto, reduzindo a capacidade de fixação dos íons cloreto e, portanto, acelerando a taxa de difusão dos íons cloreto, chegando assim ao mesmo resultado verificado por Wang et al., (2017). Por outro lado, analisando-se o processo inverso, a influência dos íons cloreto no avanço da frente de carbonatação, percebeu-se que a taxa de carbonatação do concreto com cinza volante é menor na presença dos cloretos, tal fato pode ser explicado pelo possível preenchimento parcial dos poros do concreto com a precipitação de cristais de cloreto.

Malheiro et al., (2014b) estudaram a influência dos íons cloreto no avanço da frente de carbonatação em argamassas com cinzas volantes. Foram moldados corpos de prova cúbicos de 50mm x 50mm x 50mm, com 40% de cinza volante, fator água/aglomerante 0,52 e foram mantidos em cura úmida por 90 dias. Após o período de cura, aplicou-se pintura bi-componente de base epóxi nas faces dos corpos de prova, exceto uma, para que houvesse penetração unidirecional dos agentes agressivos.

Finalizado o processo de pintura os corpos de prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 56 e 168 dias. Metade dos corpos de prova foi submetida a 2 dias de imersão em solução contendo 3,5% de NaCl e 12 dias em câmara de carbonatação à 20°C, 55% de umidade relativa e 4% de CO<sub>2</sub>. O restante dos corpos de prova foi mantido 2 dias em água destilada e 12 dias em câmara de carbonatação.

Terminado o período de ensaio, a frente de carbonatação foi determinada com a utilização de solução de fenolftaleína. Os corpos de prova foram rompidos, a solução aspergida e foi feita a medida da frente de carbonatação. Além disso, foi realizado ensaio de absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao oxigênio e feitas análises microscópicas pontuais.

Analisando-se os resultados obtidos, percebe-se que independente do tempo de ensaio, os íons cloreto atuaram reduzindo a profundidade de carbonatação. Nos dois períodos de ensaio a redução de frente de carbonatação foi de aproximadamente 30% no ensaio combinado, quando comparado ao ensaio isolado. Quanto ao ensaio de absorção de água por capilaridade, verificou-se que, independente do tempo de ensaio, os corpos de prova submetidos ao ataque combinado foram os que apresentaram menores coeficientes de absorção capilar. No que diz respeito à permeabilidade ao oxigênio, os corpos de prova expostos ao ensaio combinado foram os que apresentaram menor permeabilidade.

Analisando-se os resultados obtidos, fica claro que o avanço da frente de carbonatação em argamassas com cinza volante é influenciada pelos íons cloreto. A presença de cloretos atuou reduzindo a profundidade de carbonatação. Segundo os autores, tal resultado pode ser explicado muito possivelmente pela colmatação parcial dos poros e também pela capacidade de o sal cristalizar, promovendo uma barreira física nos poros. Para se verificar a existência de sal na fase de secagem dos corpos de prova submetidos ao ataque combinado, foi realizada análise microscópica. Com a análise microscópica foi possível verificar a presença de uma estrutura cristalina junto à parede dos poros, que pode estar relacionada com a cristalização do sal durante a fase de secagem dos corpos de prova, o que fortalece a ideia de que ocorre o bloqueamento dos poros. Além disso, o sal apresenta caráter higroscópico, sua capacidade de reter água aumenta a umidade no interior da argamassa, o que também pode vir a dificultar o avanço da carbonatação.

Além das pesquisas detalhadas anteriormente, existem outras recentes que buscam entender melhor a ação combinada dos cloretos e do CO<sub>2</sub> em matrizes cimentícias. Na Tabela 3.5 são apresentados alguns trabalhos.

Tabela 3.5 - Pesquisas recentes sobre a ação combinada dos cloretos e do CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios.

Referência	Material	a/agl	Adições	Agentes agressivos e concentrações utilizadas	Metodologia de agressão
Camacho et al. (2016)	Concreto	0,5	cinza volante	CO <sub>2</sub> (4%) e NaCl (10%)	1/2 meses em CO <sub>2</sub> + ensaio de migração de cloretos
					1/2 meses em LAB* + ensaio de migração de cloretos
Ye et al. (2016)	Concreto	0,45	Escória de alto forno e cinza volante	NaCl (15%)	4 dias em solução de NaCl+ 2 dias de secagem + 2 dias em LAB (2/4/6/8/10 ciclos)
				NaCl (15%) e CO <sub>2</sub> (20 ± 3%)	4 dias em solução de NaCl+ 2 dias de secagem + 2 dias em CO <sub>2</sub> (2/4/6/8/10 ciclos)
				NaCl (15%) e CO <sub>2</sub> (20 ± 3%)	4 dias em solução de NaCl+ 2 dias de secagem + 4 dias em CO <sub>2</sub> (2/4/6/8 e 10 ciclos)
Liu et al. (2016b)	Concreto	0,35 e 0,47	-	CO <sub>2</sub> (20 ± 3%)	365 dias em CO <sub>2</sub> (corpos de prova moldados com areia de rio)
				NaCl (1%) e CO <sub>2</sub> (20 ± 3%)	365 dias em CO <sub>2</sub> (corpos de prova moldados com areia de região marinha lavada)
				NaCl (5%) e CO <sub>2</sub> (20 ± 3%)	365 dias em CO <sub>2</sub> (corpos de prova moldados com areia de região marinha)
Zhang e Shao (2016)	Concreto	0,4	cinza volante	NaCl (3,5%)	3 dias em solução de NaCl + 4 dias em LAB (50 semanas)
				NaCl (3,5%) e CO <sub>2</sub> (10%)	3 dias em solução com NaCl + 1 dia em LAB + 3 dias em CO <sub>2</sub> (50 semanas)
Jang et al. (2016)	Argamassa	0,5	Escória de alto forno e cinza volante	NaCl (10%)	4 semanas em solução de NaCl + 4 semanas em LAB (3 ciclos)
				NaCl (10%) e CO <sub>2</sub> (5%)	4 semanas em solução de NaCl + 4 semanas de CO <sub>2</sub> (3 ciclos)
Backus e McPolin (2016)	Concreto	0,5	Escória granulada de alto forno moída	NaCl (2%)	1 dia em solução de NaCl +13 dias em LAB (4/8/12/24/48 semanas)
				NaCl (2%) e CO <sub>2</sub> (5%)	1 dia em solução de NaCl +13 dias em CO <sub>2</sub> (4/8/12/24/48 semanas)

Tabela 3.5 - Pesquisas recentes sobre a ação combinada dos cloretos e do CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios (continuação).

Referência	Material	a/agl	Adições	Agentes agressivos e concentrações utilizadas	Metodologia de agressão
Chang (2017)	Pasta	0,30; 0,40; 0,50; 0,60 e 0,70	Escória de alto forno e cinza volante	CO <sub>2</sub> (20%) e NaCl (3,5%)	14/28/56 dias de CO <sub>2</sub> + 112 dias em solução de NaCl
				NaCl (3,5%) e CO <sub>2</sub> (20%)	112 dias em solução de NaCl + 14/28/56 dias de CO <sub>2</sub>
				CO <sub>2</sub> (20%)	14/28/56 dias de CO <sub>2</sub>
Jin et al. (2018)	Concreto	0,35; 0,45 e 0,55	Escória granulada de alto forno e cinza volante	NaCl (1mol/L)	28 dias de CO <sub>2</sub> + 6/12/18 semanas em solução de NaCl
				CO <sub>2</sub> (20 ± 2%) e NaCl (1mol/L)	28 dias LAB + 6/12/18 semanas em solução de NaCl
Raphaele, Camões e Meira (2018)	Concreto	0,40; 0,50 e 0,60	-	CO <sub>2</sub> (4%) e NaCl (10%)	6 meses em CO <sub>2</sub> + ensaio de migração de cloretos
				NaCl (10%)	6 meses em LAB + ensaio de migração de cloretos
Chang, Mu e Feng (2018)	Pasta e argamassa	0,40; 0,50; 0,60 e 0,70	Escória de alto forno	NaCl (3,5%)	4/8/12 semanas em solução de NaCl
				NaCl (3,5%)	1 dia em solução de NaCl + 6 dias em LAB (4,8 e 12 ciclos)
				NaCl (3,5%) e CO <sub>2</sub> (20%)	1 dia em solução de NaCl + 6 dias em CO <sub>2</sub> (4, 8 e 12 ciclos)
				NaCl (3,5%) e CO <sub>2</sub> (20%)	4/8/12 semanas em CO <sub>2</sub>

OBS: LAB = ambiente de laboratório, CO<sub>2</sub> = ensaio de carbonatação acelerada, NaCl = ataque por cloretos.

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para verificar a influência da adição de nanosílica em concretos submetidos a ação combinada dos íons cloreto e do CO<sub>2</sub> e assim, alcançar os objetivos propostos para este trabalho, o programa experimental visa analisar o efeito da adição da nanosílica e o seu efeito combinado com a sílica ativa nas propriedades mecânicas e física dos concretos estudados, e também a sua durabilidade frente a penetração dos íons cloreto e do CO<sub>2</sub>, de modo isolado e de modo combinado.

Esta pesquisa relaciona-se com trabalhos já realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Sendo assim, diversos parâmetros adotados nesta pesquisa foram baseados no trabalho desenvolvido por Schmalz (2018) que estudou a influência da incorporação de nanosílica em argamassas submetidas ao ataque por sulfatos. Além disso, essa pesquisa foi desenvolvida em conjunto com Pereira (2019), que estudou a utilização de nanosílica em concretos expostos à carbonatação isolada em diferentes condições. Os ensaios de caracterização química e física dos materiais, ensaios em pasta, ensaios de caracterização física e mecânica dos concretos e os ensaios de carbonatação acelerada isolada apresentados neste trabalho foram realizados em conjunto com Pereira (2019).

O presente trabalho foi dividido em 4 etapas: caracterização dos materiais, ensaios em pasta, definição dos traços e ensaios em concreto. A Figura 4-1 descreve os ensaios realizados em cada uma delas.

Na primeira etapa realizou-se a caracterização física e química dos materiais utilizados nos concretos estudados: cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo, sílica ativa, nanosílica e aditivo superplastificante. Finalizada a primeira etapa, realizaram-se ensaios em pasta no estado fresco com o objetivo de se verificar a compatibilidade entre os materiais utilizados, principalmente entre cimento, nanosílica e sílica ativa com o aditivo superplastificante escolhido para ser utilizado. Na terceira etapa foram definidos os traços a serem utilizados, com base em Schmalz (2018), e por meio dos ensaios em concreto no estado fresco. Foi realizada a verificação da consistência dos concretos e definido o teor de aditivo superplastificante necessário em cada um dos traços de fator água/aglomerante igual

a 0,40. Destaca-se que para a relação água/aglomerante igual a 0,56, não foi utilizado o aditivo superplastificante.

Posteriormente, iniciou-se a quarta etapa, na qual foram avaliados os concretos no estado endurecido. Inicialmente realizou-se a caracterização física e mecânica dos concretos, por meio de ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. Sequencialmente realizaram-se os ensaios de durabilidade frente a ação dos cloretos e do CO<sub>2</sub>, de modo isolado e de modo combinado.

**Figura 4-1 - Etapas do programa experimental.**



Para verificação da durabilidade frente ao ataque de cloretos, foram realizados ciclos de molhagem e secagem em solução contendo cloreto de sódio e frente ao ataque do CO<sub>2</sub>, foram realizados ensaios de carbonatação acelerada. Os ensaios de durabilidade com os ataques isolados foram realizados em todos os tipos de concretos estudados. Já para os ataques combinados, foram selecionados três tipos de concretos para serem analisados, baseando-se nos melhores resultados de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade dos concretos.

Para verificar a influência da nanosílica nas características dos concretos, foram adicionados quatro teores de nanosílica nas misturas: 0%, 1%, 5% e 10% em relação à massa de aglomerante, sendo a substituição feita em massa, e a incorporação de sílica ativa no teor

de 10%, sendo essa substituição feita em volume. O traço foi mantido fixo para todas as misturas em 1:3,20 (cimento: agregados). Os concretos foram moldados com duas relações água/aglomerante: 0,40 e 0,56.

Estão sendo estudados vários traços de pastas e concretos. Assim, para um melhor entendimento, estes são nomeados da seguinte maneira mR-N-S, sendo:

m:	Tipo de mistura	C:	Concreto / P:	Pasta
R:	Relação a/agl	40:	0,40 / 50:	0,50
N:	Nanosílica	Teor (%)	de substituição de aglomerante (em massa)	
S:	Sílica Ativa	Teor (%)	de substituição de cimento (em volume)	

Sendo assim, um traço denominado C40-1-10 se refere a um concreto com relação a/agl de 0,40, teor de nanosílica de 1% e de sílica ativa de 10%. Os traços referência são identificados pelo tipo de mistura, relação a/agl, seguido de REF: mR-REF.

## 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

### 4.1.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado nessa pesquisa é o CP V ARI, fabricado pela Holcim do Brasil S/A e sua caracterização física e química foi realizado com base na NBR 16697:2018 (ABNT, 2018) no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

### 4.1.2 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado é natural e de origem basáltica, sendo comercializado na região de São Carlos. O agregado foi caracterizado por meio dos seguintes ensaios:

- Massa específica – NBR NM 53:2009;
- Massa unitária seca e solta – NBR NM 45:2006;
- Massa unitária compactada – NBR NM 45:2006;
- Absorção de água – NBR NM 53:2009,
- Material pulverulento – NBR NM 46:2003;
- Determinação da composição granulométrica – NBR NM 248:2001.

#### **4.1.3 AGREGADO MIÚDO**

A areia utilizada é de origem natural, quartzosa, encontrada da região de São Carlos e foi caracterizada pelos seguintes ensaios:

- Massa específica – NBR NM 52:2009;
- Massa unitária seca e solta – NBR NM 45:2006;
- Massa unitária compactada – NBR NM 45:2006;
- Absorção de água – NBR NM 30:2001;
- Material pulverulento – NBR NM 46:2003
- Determinação da composição granulométrica – NBR NM 248:2001.

#### **4.1.4 SÍLICA ATIVA**

A sílica ativa utilizada nesta pesquisa foi fabricada pela Dow Corning Silício do Brasil, sendo a caracterização química e física fornecida pelo fabricante.

#### **4.1.5 NANOSÍLICA**

A nanosílica utilizada neste trabalho é uma solução aquosa de sílica coloidal, denominada Levasil CB 8 e comercializada pela AkzoNobel. As características físicas e químicas foram fornecidas pelo fabricante.

#### **4.1.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE**

Utilizou-se o aditivo superplastificante ADVA CAST 585, à base de policarboxilato, fabricado pela *GCP Applied Technologies*, as especificações foram fornecidas pelo fabricante.

#### **4.1.7 ÁGUA**

A água utilizada é proveniente da rede de abastecimento de São Carlos, exceto a água utilizada na solução de cloreto de sódio para realização dos ciclos de molhagem e secagem, neste caso, utilizou-se água deionizada.

## 4.2 ENSAIOS REALIZADOS EM PASTA

Para a verificação da compatibilidade entre o cimento, aditivo superplastificante, sílica ativa e nanosílica utilizados nas misturas estudadas nesta pesquisa, foram realizados os ensaios de Cone de Marsh e Miniabatimento. Os ensaios em pasta foram realizados apenas para a relação água/aglomerante igual a 0,40, pois, para a relação água/aglomerante igual a 0,56, a consistência foi atingida, sem necessidade de utilizar o aditivo superplastificante.

### 4.2.1 CONE DE MARSH

Por meio do ensaio do Cone de Marsh foi possível determinar o ponto de saturação do aditivo superplastificante, ou seja, o teor a partir do qual o efeito do aditivo na mistura não é mais significativo e também avaliar o comportamento das pastas quanto à fluidez com o passar do tempo. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7681:2013 (ABNT, 2013).

No total foram ensaiadas 5 composições de pasta e para cada uma delas variou-se o aditivo superplastificante em 4 teores:

- Cimento + aditivo SP (0,1% a 0,5%) + água (Referência);
- Cimento + 1% de nanosílica + aditivo SP (0,3% a 0,7%) + água;
- Cimento + 5% de nanosílica + aditivo SP (1,0% a 1,4%) + água;
- Cimento + 10% de nanosílica + aditivo SP (1,9% a 2,3%) + água e
- Cimento + 1% de nanosílica + 10% de sílica ativa + aditivo SP (0,7% a 1,1%) + água.

Para a confecção das pastas foi seguido o procedimento:

- Umedecer a cuba e adicionar o cimento, 50% do aditivo superplastificante e 90% da água;
- Ligar a batedeira e deixar bater por 1 minuto em velocidade baixa;
- Desligar a batedeira e raspar as laterais e fundo por 1 minuto;
- Ligar a batedeira e bater por 1 minuto em velocidade baixa;
- Desligar a batedeira e raspar novamente as laterais e o fundo, adicionar o restante do aditivo e o restante da água por 1 minuto;
- Ligar a batedeira, bater por 30 segundos em velocidade baixa, adicionar a nanosílica e aumentar a velocidade, deixar bater por 2 minutos e 30 segundos.

Para a realização do ensaio, foram necessários os seguintes materiais: funil metálico, proveta graduada e cronômetro. Para o ensaio foi seguido o seguinte procedimento:

- Umedecer o funil e obstruir sua saída;
- Despejar cerca de 1 litro de pasta;
- Liberar a saída do funil;
- Cronometrar o tempo necessário para que a pasta alcance a marca de 500ml na proveta;

A pasta deve ser despejada no funil no tempo de 10 minutos após o contato do cimento com a água (Figura 4-2). Para cada pasta estudada variou-se o teor de aditivo superplastificante e com os tempos (T) de escoamento de 500 ml de pasta foi gerada uma curva do log (T) pelo teor de aditivo utilizado.

**Figura 4-2 - Ensaio de cone de Marsh.**



Plotada as curvas, o ponto de saturação do aditivo superplastificante foi encontrado, por meio do método de AFREM proposto por De Larrard *et al.* (1997). Tal método afirma que o ponto de saturação do aditivo é aquele onde uma reta com inclinação 2:5 tangencia a curva gerada.

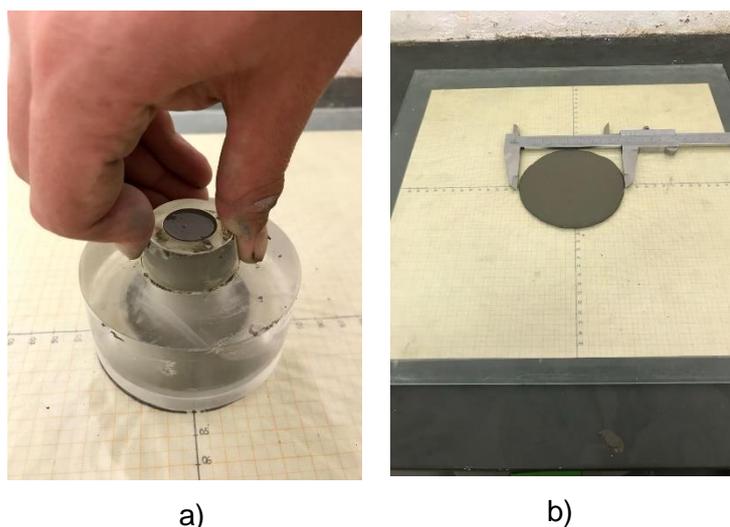
#### **4.2.2 MINIABATIMENTO**

Após encontrado o teor ótimo de aditivo superplastificante a ser utilizado nas pastas, por meio do ensaio de Cone de Marsh, foi realizado o ensaio de Miniabatimento. Os mesmos traços ensaiados no Cone de Marsh foram submetidos ao ensaio de Miniabatimento, mas

neste segundo ensaio, utilizou-se apenas o teor ótimo de aditivo superplastificante de cada traço, definido no anteriormente. Este ensaio é realizado com o objetivo de verificar a perda de consistência das misturas com o decorrer do tempo.

Para a realização do Miniabatimento foram necessários os seguintes materiais: molde tronco-cônico, placa de vidro nivelada e paquímetro. O procedimento de mistura foi o mesmo descrito para o ensaio de Cone de Marsh. O molde tronco-cônico foi colocado sobre a placa de vidro nivelada e preenchido com a pasta de cimento, o excesso de material retirado e, então o molde foi levantado suavemente na vertical, fazendo com que a mistura se espalhasse sobre a placa. Após o espalhamento, com o auxílio de um paquímetro, foram feitas duas medidas do diâmetro de espalhamento e, com esses valores calculou-se o diâmetro médio e a área de espalhamento (Figura 4-3). O ensaio foi realizado após 10, 30, 40 e 60 minutos do contato da água com o cimento.

**Figura 4-3 - Ensaio de miniabatimento: a) molde preenchido com a pasta e b) medição do diâmetro.**



### 4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVA

Para a definição das misturas a serem estudadas, estabeleceu-se: o traço, a relação água/aglomerante e os teores de substituição de sílica ativa e nanosílica a serem utilizados.

A quantidade de aditivo superplastificante utilizada em cada traço foi definida por meio da verificação da consistência dos concretos, sendo adotada consistência de  $(230 \pm 10)$  mm. Sendo assim, foram testados diferentes teores de aditivo superplastificante até se obter o valor especificado. Para a realização do ensaio utilizou-se a NBR 13276:2016 (ABNT:2016) que descreve o procedimento para determinação do índice de consistência de argamassas. A utilização da norma de argamassas para definição da consistência de concretos é justificada pelo diâmetro máximo característico do agregado graúdo utilizado, ser de 9,5 mm.

Para realização do ensaio de consistência foram necessários: mesa para índice de consistência, molde tronco-cônico, soquete metálico, paquímetro e régua metálica. Para a execução do ensaio foi seguido o seguinte procedimento especificado pela norma:

- Limpar o tampo da mesa para índice de consistência e o molde tronco-cônico com pano umedecido;
- Encher o molde tronco-cônico, colocado no centro na mesa (uma pessoa deve segurar o molde enquanto outra enche o molde), em três camadas aproximadamente iguais, aplicar em cada uma delas respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, se necessário completar o molde com mais concreto;
- Realizar o rasamento do concreto passando uma régua metálica rente à borda do molde, com movimentos de vai-e-vem em toda superfície;
- Eliminar qualquer partícula em volta do molde;
- Retirar o molde lentamente e na vertical;
- Acionar a manivela da mesa para índice de consistência, de modo que a mesa suba e caia 30 vezes em 30 segundos de maneira uniforme;
- Medir com paquímetro o espalhamento da mistura, deve-se realizar medidas em 3 diâmetros;
- O índice de consistência do concreto corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros.

Após a definição dos teores de aditivo superplastificante a serem utilizados, foram moldados os corpos de prova. Para todos os ensaios realizados, moldaram-se corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura em argamassadeira. O seguinte procedimento de mistura foi adotado para as moldagens:

- Umedecer a cuba, adicionar a areia e ligar a argamassadeira;
- Adicionar 90% de água e bater por 1 minuto;
- Desligar argamassadeira, raspar as laterais e o fundo durante 30 segundos;
- Ligar a argamassadeira, adicionar o cimento ou cimento + sílica (previamente misturados), bater por 1 minuto;
- Desligar a argamassadeira e repetir o procedimento de raspagem durante 30 segundos;

- Ligar a argamassadeira e adicionar o aditivo superplastificante e o restante da água, bater por 1 minuto;
- Desligar a argamassadeira e raspar novamente durante 30 segundos;
- Ligar e bater durante 2 minutos;
- Adicionar a nanosílica e bater por 2 minutos;
- Desligar, raspar novamente e adicionar o agregado graúdo durante 30 segundos;
- Ligar e bater 1 minuto.

Após mistura, os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 7215:1996 (ABNT, 1996) e mantidos em ambiente de laboratório por 1 dia, cobertos por plástico filme, com temperatura próxima aos 25 °C e com umidade relativa de aproximadamente 60%. Após um dia em ambiente de laboratório, as amostras foram desmoldadas e mantidas em câmara úmida até a idade prevista nos ensaios.

## **4.4 ENSAIOS REALIZADOS EM CONCRETO**

### **4.4.1 PROPRIEDADES MECÂNICA E FÍSICA**

#### **4.4.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme a NBR 5739:2007 (ABNT:2007) nas idades de 7, 28 e 63 dias. Para cada idade foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, que foram mantidos em câmara úmida até a data de ensaio. Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram retificados para permitir uma distribuição uniforme da carga.

**Figura 4-4 - Ensaio de resistência à compressão dos concretos.**



#### 4.4.1.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 dias, seguindo as especificações da NBR 9779:2012 (ABNT, 2012).

Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura de cada traço, que permaneceram em cura úmida até atingir a idade de ensaio. Aos 28 dias, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e colocados em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  para secagem, onde permaneceram até alcançarem massa constante e, então foram pesados. Após pesagem, os corpos de prova colocados em recipientes com água, sobre suporte metálico, a lâmina de água foi mantida abaixo do limite de 5 mm da face inferior do corpo de prova (Figura 4-5a).

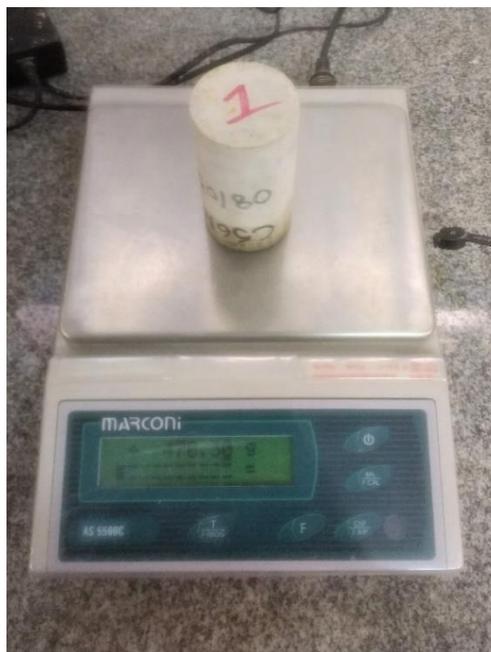
A temperatura do ambiente foi mantida em  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  durante todo o período de ensaio que foi de 72h. No decorrer do ensaio foram sendo realizadas pesagens para se determinar o índice de absorção dos concretos, os corpos de prova foram pesados após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h do contato com a água (Figura 4-5b)

Finalizado o período de ensaio, os corpos de prova foram rompidos como no ensaio de tração por compressão diametral, e com auxílio de um paquímetro foi feita a medida da ascensão capilar máxima em cada amostra.

**Figura 4-5 - Ensaio de absorção de água por capilaridade dos concretos: a) corpos de prova em contato com a água e b) pesagem dos corpos de prova.**



a)



b)

#### **4.4.2 DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DOS CLORETOS E DO CO<sub>2</sub>**

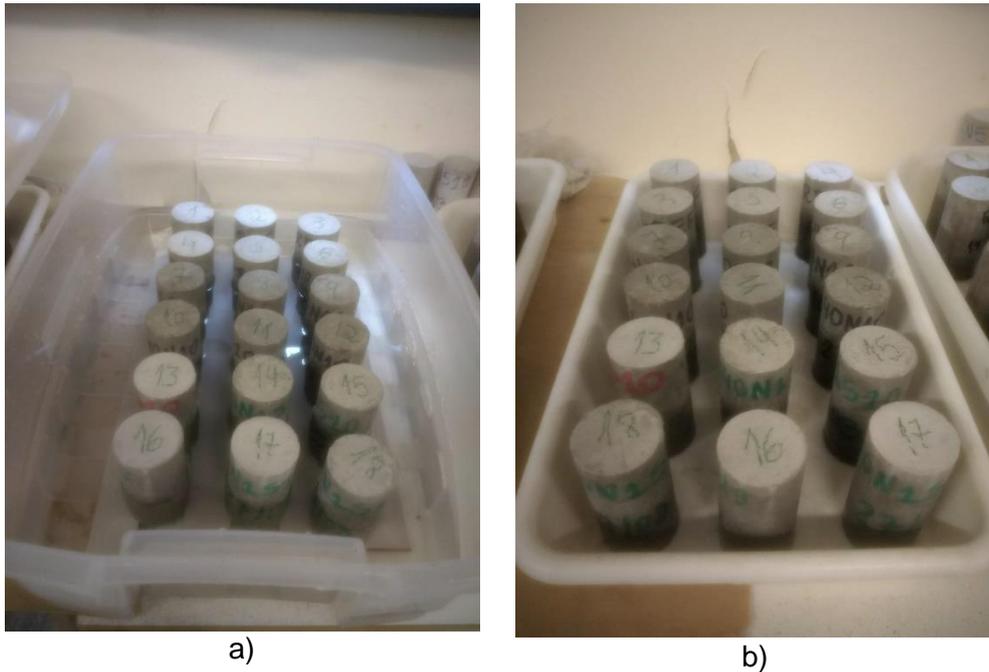
Para a avaliação da durabilidade dos concretos frente a ação dos íons cloreto e do CO<sub>2</sub>, o programa experimental foi dividido da seguinte maneira:

- Ensaio de penetração de cloretos;
- Ensaio de carbonatação acelerada;
- Ensaio combinados: carbonatação/cloretos e cloretos/carbonatação.

##### **4.4.2.1 DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

O ensaio de determinação da frente de penetração de cloretos foi realizado por meio de ciclos de molhagem e secagem das amostras em solução contendo 3,5% de NaCl. Os corpos de prova foram submetidos a 8, 12 e 18 ciclos de secagem e molhagem (Figura 4-6), correspondente a 56, 84 e 126 dias de ataque. Ao final dos ciclos realizou-se a medida da profundidade de penetração dos cloretos.

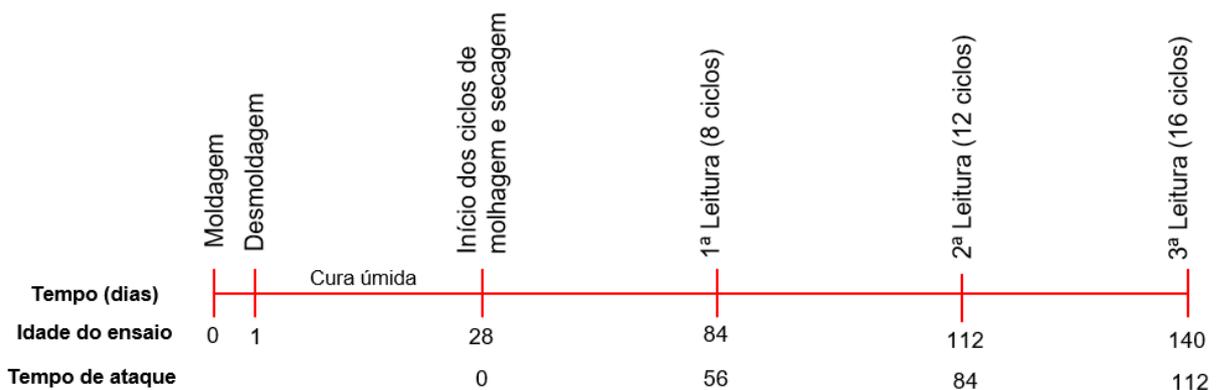
**Figura 4-6 - Ataque por cloretos: a) período de molhagem e b) período de secagem.**



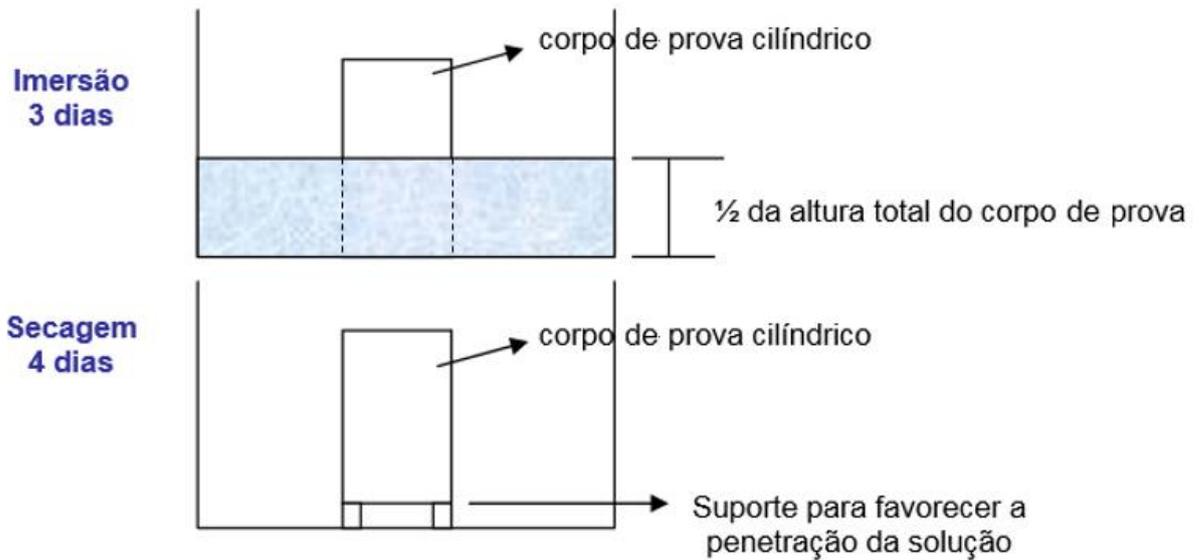
A medida da profundidade de penetração dos cloretos foi determinada a do método colorimétrico de aspersão de uma solução de nitrato de prata com concentração de 0,1M.

Finalizado o período de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e deixados em ambiente de laboratório durante 4 dias e, então colocados em um recipiente contendo solução de 3,5% de NaCl, onde as amostras ficam parcialmente imersas durante 3 dias. Após período de imersão, era realizada a secagem durante 4 dias novamente e, assim, foram realizados os ciclos de molhagem e secagem sucessivamente até a data de ensaio (Figura 4-7). Na Figura 4-8 apresenta-se um esquema de como foram feitos os ciclos de molhagem e secagem.

**Figura 4-7 - Idades de ensaio e tempo de ataque por cloretos.**



**Figura 4-8 - Esquema dos ciclos de molhagem e secagem.**



Fonte: SILVA, 2006.

Finalizado o período de ensaio, as amostras foram rompidas à tração por compressão diametral e foi feita a aspersão da solução de nitrato de prata. Após algumas horas, com o auxílio de um paquímetro, foram realizadas as leituras da profundidade de penetração de cloretos. Finalizados os 8, 12 e 18 ciclos, as medidas da profundidade de penetração de cloretos foram realizadas nas duas metades do corpo de prova rompido, sendo determinadas 6 leituras em cada face e, então calculou-se a média dos resultados obtidos.

#### 4.4.2.2 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

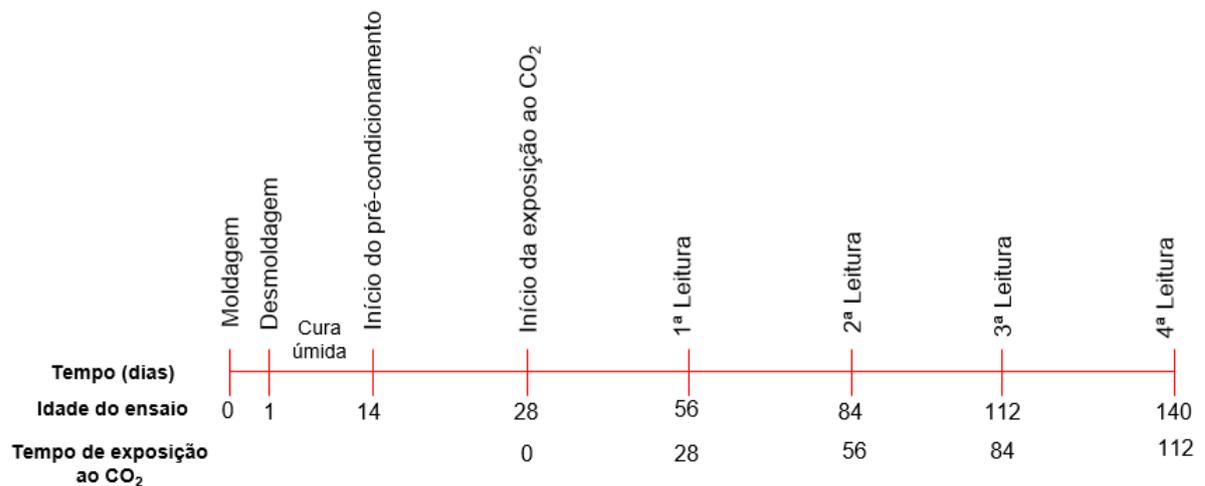
Para realização do ensaio de carbonatação acelerada, utilizou-se uma câmara de carbonatação, com concentração de  $(15 \pm 2)\%$  de  $\text{CO}_2$ , umidade relativa entre 70% e 80% e temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  (Figura 4-9).

**Figura 4-9 - Câmara de carbonatação.**



As medidas das frentes de carbonatação foram realizadas por meio do indicador químico, solução de fenolftaleína, após 28, 56, 84 e 112 dias de exposição ao  $\text{CO}_2$ . Os corpos de prova foram moldados, no dia seguinte desmoldados e, então, mantidos em câmara úmida por 14 dias. Ao completar os 14 dias de cura úmida os corpos de prova foram submetidos a 14 dias de pré-condicionamento em ambiente de laboratório. Finalizado esse período, iniciou-se a exposição ao  $\text{CO}_2$  (Figura 4-10). Destaca-se que durante o período de pré-condicionamento, não foi feito o controle da perda de umidade dos corpos de prova por meio de pesagens.

**Figura 4-10 - Idades de ensaio e tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$ .**



Completado o tempo de exposição estipulado, os corpos de provas foram rompidos à tração por compressão diametral e, então foi feita a aspensão da fenolftaleína e com auxílio de um paquímetro é feita a medida da frente de carbonatação.

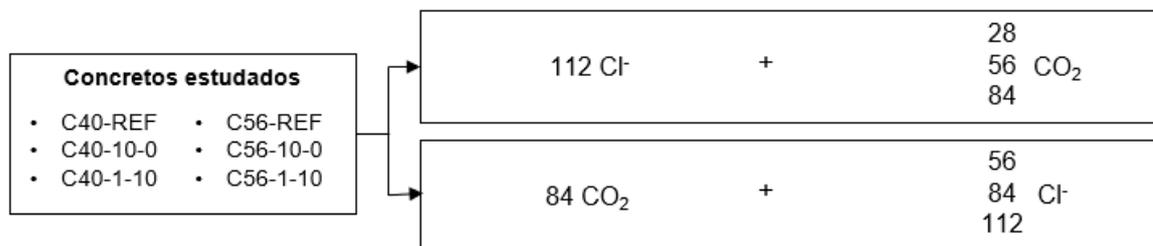
#### 4.4.2.3 ENSAIOS COMBINADOS

Os ensaios combinados foram executados de duas maneiras, alternando-se o ataque inicial e o ataque final. O primeiro ensaio combinado consistiu, inicialmente, na exposição dos corpos de prova ao ataque por cloretos por 112 dias, por meio dos ciclos de molhagem e secagem, e então as amostras foram colocadas na câmara de carbonatação por 28, 56 e 84 dias. O processo inverso também foi realizado, no qual as amostras foram expostas primeiramente, ao CO<sub>2</sub> por 84 dias, e em seguida, aos cloretos por 56, 84 e 112 dias.

Os ensaios combinados foram realizados com o objetivo de se avaliar a influência do ataque inicial no ataque final, ou seja, avaliar a influência do carbonatação na profundidade de penetração de cloretos e também avaliar a influência dos cloretos no avanço da frente de carbonatação.

Para a avaliação da durabilidade dos concretos diante da ação combinada do CO<sub>2</sub> e dos cloretos, foram selecionados 3 tipos de mistura de cada relação água/aglomerante: o referênci, o com 10% de nanosílica e o com 1% de nanosílica e 10% de sílica. Os concretos a serem submetidos ao ensaio combinado foram escolhidos com base nos resultados dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, sendo selecionados os 3 traços com os melhores resultados. A Figura 4-11 apresenta resumidamente como foram realizados os ensaios combinados.

**Figura 4-11 - Resumo dos ensaios combinados.**

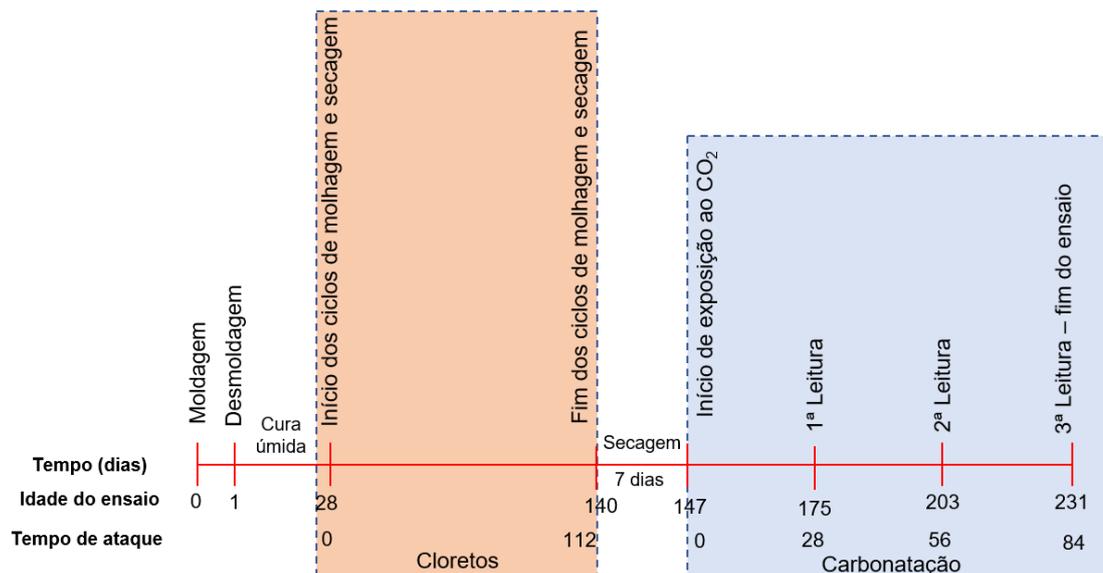


##### a) Ataque por cloretos seguido de carbonatação acelerada

As amostras foram moldadas, desmoldadas e submetidas a cura da mesma maneira efetuada no ensaio isolado de penetração de cloretos. Finalizado o período de cura os corpos de prova são deixados em ambiente de laboratório por 4 dias e então colocados em solução contendo 3,5% de NaCl por 3 dias, assim como está sendo feito com as amostras do ensaio

isolado. Os ciclos de molhagem e secagem foram finalizados aos 112 dias (16 ciclos) de ataque e então, iniciou-se o ensaio de carbonatação acelerada por 28, 56 e 84 dias. Ao final dos ciclos de molhagem e secagem os corpos de prova foram deixados em ambiente de laboratório por 7 dias para secagem, antes de serem colocados na câmara carbonatação. Durante os 7 dias de secagem não foi realizado controle da constância de massa dos corpos de prova. Terminados os períodos de exposição ao CO<sub>2</sub> as amostras foram rompidas e realizou-se a aspersão de fenolftaleína para verificação da frente de carbonatação. A Figura 4-12 apresenta resumidamente como foi realizado esse ensaio.

**Figura 4-12 - Idade de ensaio e tempo de ataque de cloretos seguido pelo CO<sub>2</sub>.**

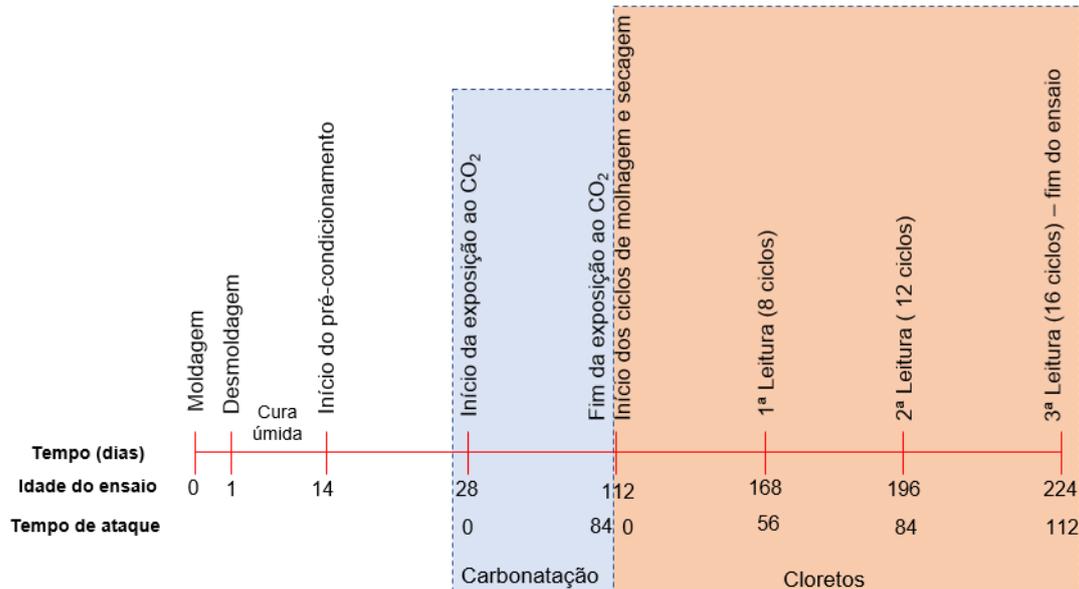


#### b) Carbonatação seguida do ataque por cloretos

Os corpos de prova foram moldados, desmoldados, submetidos a cura e ao período de pré-condicionamento seguindo o mesmo procedimento realizado no ensaio isolado de carbonatação acelerada. Após o período de pré-condicionamento, as amostras foram colocadas na câmara de carbonatação onde permaneceram por 84 dias, finalizado esse período iniciaram-se os ciclos de molhagem e secagem por 56, 84 e 112 dias. Deve-se ressaltar que durante o período de pré-condicionamento não foi feita a checagem da massa dos corpos de prova, portanto não foi verificado se ao final os 14 dias as amostras haviam alcançado constância de massa.

A Figura 4-13 apresenta um esquema de como foi realizado este ensaio. Concluído o período de ataque por cloretos, os corpos de prova foram rompidos, e feita a aspersão da solução de nitrato de prata, sendo realizada a profundidade de penetração dos cloretos, como explicado no item 4.4.2.1.

**Figura 4-13 - Idade de ensaio e tempo de ataque do CO<sub>2</sub> seguido por cloretos.**



#### 4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade foram tratados estaticamente através de Análise de Variância (ANOVA) e posteriormente submetidos ao teste de Tukey.

Inicialmente foi feita a Análise de Variância para se verificar a existência de diferenças significativas entre os resultados obtidos. Nos casos onde encontram-se diferenças significativas foi realizado o teste de Tukey. Resumidamente, a ANOVA consiste em testar duas hipóteses:

- Hipótese Nula (H<sub>0</sub>): não existe diferença significativa entre as médias;
- Hipótese Alternativa (H<sub>1</sub>): há pelo menos uma diferença significativa entre elas.

Uma das formas de concluir esse teste é comparando o p-valor com o  $\alpha$  (nível de significância adotado no início da análise)

- Se  $p\text{-valor} \geq \alpha$ , aceita-se H<sub>0</sub> (não há diferenças significativas)
- Se  $p\text{-valor} < \alpha$ , rejeita-se H<sub>0</sub> (há diferenças significativas)

Após a ANOVA, realizou-se o teste de Tukey para os casos onde H<sub>0</sub> foi rejeitado, testando-se as médias amostrais duas a duas para se verificar entre quais médias existem diferenças significativas.

A ANOVA e o teste de Tukey foram realizados com nível de significância  $\alpha = 5\%$  e utilizando-se o software OriginLab.

# 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização dos materiais, ensaios em pasta, definição dos traços de concreto, ensaios de caracterização dos concretos e a avaliação de sua durabilidade frente ao ataque combinado e isolado de cloretos e CO<sub>2</sub>.

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 5.1.1 CIMENTO

As características físicas e químicas do cimento CP V ARI utilizado neste trabalho estão apresentadas na Tabela 5.1 e Tabela 5.2, respectivamente e certificam que o material está em conformidade com o especificado pela NBR 16697:2018 (ABNT, 2018).

**Tabela 5.1 - Propriedades físicas do CP V ARI Plus.**

Características e propriedades		Valores obtidos	Limites NBR 16697:2018
Massa específica (NBR NM 23)		3,12 g/cm <sup>3</sup>	**
Início de pega (NBR NM 65)		135 min	> 120 min
Fim de pega (NBR NM 65)		210 min	< 600 min
Água para pasta de consistência normal		31,5 %	**
Finura	Retido 75 µm (#200)	0,1 %	> 6,0 %
	Área específica*	473 m <sup>2</sup> /kg	< 300 m <sup>2</sup> /kg
Resistência à compressão (f <sub>ci</sub> )	1 dia	27,5 MPa	> 14,0 MPa
	3 dias	42,0 MPa	> 24,0 MPa
	7 dias	48,7 MPa	> 34,0 MPa
	28 dias	52,2 MPa	**

\* Determinada a partir do método de Blaine.

\*\* Valores Limites não especificados pela NBR 16697:2018

**Tabela 5.2 - Propriedades químicas do CP V ARI Plus**

<b>Componentes</b>	<b>Valores Obtidos (% em massa)</b>	<b>Limites NBR 16697:2018 (% em massa)</b>
Perda ao fogo (PF)	3,79	< 4,5%
Anidrido silícico (SiO <sub>2</sub> )	19,17	*
Óxido de cálcio (CaO)	63,97	*
Óxido de magnésio (MgO)	0,61	< 6,5%
Óxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,21	*
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,03	*
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	2,84	< 3,5%
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,06	*
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,61	*
Equivalente alcalino (em Na <sub>2</sub> O)	0,46 <sup>1</sup>	*
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,76	*
Resíduo insolúvel (RI)	0,85	< 1,0%
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	2,38	< 3,0%

\* A NBR 5733:1991 não estabelece valores limites.

<sup>1</sup> A NBR 15577:2008 limita o teor de Equivalente alcalino (em Na<sub>2</sub>O) em 0,6%.

### 5.1.2 AGREGADO GRAÚDO

Os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização do agregado graúdo estão apresentados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 - Caracterização do agregado graúdo.**

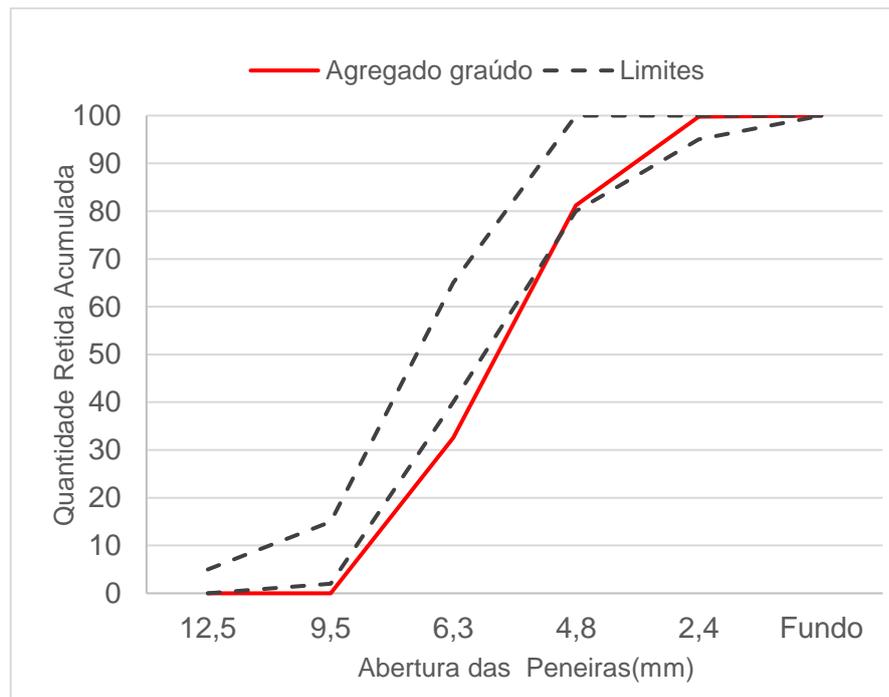
<b>Características</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Valores obtidos</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53:2009	2,77
Massa unitária seca e solta (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45:2006	1422,32
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45:2006	1568,72
Absorção de água (%)	NBR NM 53:2009	2,26
Material pulverulento (%)	NBR NM 46:2003	1,00

Os resultados do ensaio de distribuição granulométrica do agregado graúdo estão apresentados na Tabela 5.4. e a curva de distribuição granulométrica na Figura 5-1.

**Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.**

Peneira	% Retida	% Retida Acumulada
12,5	0,00	0,00
11,2	0,00	0,00
9,5	0,00	0,00
8,0	3,12	3,12
6,3	29,47	32,58
5,6	16,88	49,47
4,8	31,75	81,22
4,0	13,05	94,27
3,4	2,82	97,09
2,8	2,40	99,49
2,4	0,30	99,79
2,0	0,08	99,88
1,7	0,02	99,90
1,4	0,01	99,90
1,2	0,00	99,91
Fundo	0,09	100,00

**Figura 5-1- Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.**



O agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica de 9,5mm, módulo de finura de 5,81 e curva granulométrica um pouco abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para a zona 4,75/12,5.

### 5.1.3 AGREGADO MIÚDO

Os ensaios realizados com agregado miúdo apresentaram os resultados contidos na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 - Caracterização agregado miúdo**

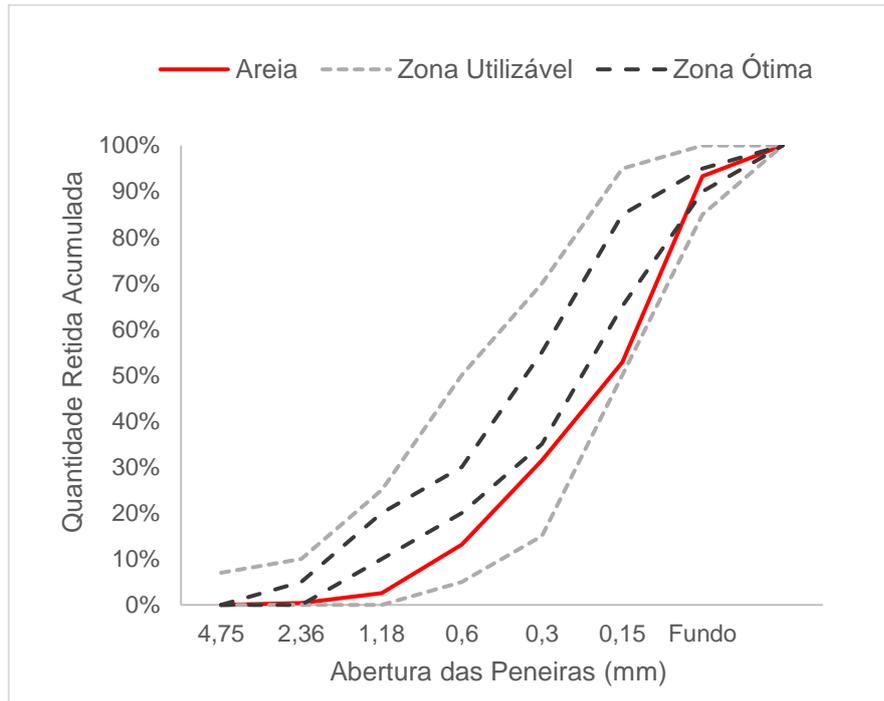
<b>Características</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Valores obtidos</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52:2009	2,52
Massa unitária seca e solta (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45:2006	1532,46
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45:2006	1661,49
Absorção de água (%)	NBR NM 30:2001	0,20
Material pulverulento (%)	NBR NM 46:2003	1,41

O ensaio de distribuição granulométrica foi realizado conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) utilizando-se a série normal de peneiras e três amostras de 500 g cada. A Tabela 5.6 apresenta dos resultados obtidos a partir da média das três amostras e a curva de distribuição granulométrica pode ser verificada na Figura 5-2.

**Tabela 5.6 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.**

<b>Peneira (mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
6,3	0	0
4,8	0,38	0,38
2,4	2,21	2,59
1,2	10,53	13,12
0,6	18,32	31,44
0,3	21,33	52,77
0,15	40,52	93,30
Fundo	6,7	100

**Figura 5-2 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.**



A partir da distribuição granulométrica encontrada, conclui-se que a dimensão máxima da areia é de 2,4 mm e o módulo de finura 1,94. Além disso, observando-se a curva de distribuição granulométrica, verifica-se que a areia encontra-se dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

#### 5.1.4 COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDO E MIÚDO

Com o objetivo de se obter a máxima compactidade entre os agregados graúdo e miúdo, foi feita a composição de agregados a partir do ensaio de massa unitária no estado compactado, a Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos no ensaio

**Tabela 5.7 - Determinação da composição ideal entre os agregados.**

Composição pedrisco/areia (%)	Quantidade de pedrisco (kg)	Quantidade de areia (kg)	Acréscimo de areia (kg)	Massa do agregado (kg)	Massa unitária est. Compactado (kg/dm <sup>3</sup> )
100/0	6	0,00	-	4,6485	1,55
90/10	6	0,67	0,67	4,9950	1,67
80/20	6	1,50	0,83	5,4560	1,82
70/30	6	2,57	1,07	5,7860	1,93
<b>60/40</b>	<b>6</b>	<b>4,00</b>	<b>1,43</b>	<b>5,8480</b>	<b>1,95</b>
50/50	6	6,00	2,00	5,7825	1,93
40/60	6	9,00	3,00	5,6595	1,89

Com a realização do ensaio pode-se concluir que a composição ideal é a de 60% agregado graúdo e 40% areia, pois a massa unitária é máxima e, conseqüentemente, é a mistura com menor índice de vazios.

### 5.1.5 SÍLICA ATIVA

A caracterização química e física da sílica fornecida pela Dow Corning Silício do Brasil é apresentada na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 - Características físicas e químicas da sílica ativa.**

Características	Valor
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O (%)	0,7
Perda ao Fogo (%)	3,7
SiO <sub>2</sub> (%)	93,0
Na <sub>2</sub> O (%)	0,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,5
CaO (%)	0,5
MgO (%)	0,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,2
K <sub>2</sub> O (%)	0,9
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,35
pH	7,9
Umidade (%)	0,1
Retido 45 mm (#325) (%)	3,7

Fonte: Dow Corning Silício do Brasil.

### 5.1.6 NANOSÍLICA

As características físicas e químicas da nanosílica Levasil CB8 fornecidas AkzoNobel encontram-se na Tabela 5.9.

**Tabela 5.9 - Principais características físicas e químicas da nanosílica.**

Produto	Levasil CB8
Aspecto	Líquido branco
Teor de sólidos (%)	50
pH	9,5
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,4
Viscosidade (v)	8

Fonte: AkzoNobel.

### 5.1.7 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

As propriedades do aditivo superplastificante ADVA CAST 585 fornecidas pelo fabricante encontram-se na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10 - Propriedades do aditivo superplastificante.**

Produto	ADVA CAST 585
Aspecto	Líquido alaranjado
pH	3,00 - 6,00
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,055 - 1,105
Sólidos (%)	32,39 - 35,81

Fonte: GCP Applied Technologies.

## 5.2 ENSAIOS REALIZADOS EM PASTA

### 5.2.1 CONE DE MARSH

O ensaio de Cone de Marsh foi realizado para as 5 misturas (referência, 1% de nanosílica, 5% de nanosílica, 10% de nanosílica e 1% de nanosílica + 10% de sílica ativa) da relação água/aglomerante igual a 0,40. Deve-se lembrar que para a relação a/agl igual a 0,56 não foi utilizado o aditivo SP, portanto esse ensaio não foi necessário. O detalhamento da composição dos traços analisados é apresentado na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11 – Composição dos traços das pastas.**

Pastas	Materiais (g)				
	Cimento	Sílica ativa	Nanosílica	SP(%)	Água
P40-REF	1000	-	-	0,1	400
	1000	-	-	0,2	400
	1000	-	-	0,3	400
	1000	-	-	0,4	400
	1000	-	-	0,5	400
P40-1-0	990	-	10	0,3	390
	990	-	10	0,4	390
	990	-	10	0,5	390
	990	-	10	0,6	390
	990	-	10	0,7	390

Tabela 5.11 – Composição dos traços das pastas (continuação).

Pastas	Materiais (g)				
	Cimento	Sílica ativa	Nanosílica	SP(%)	Água
P40-5-0	950	-	50	1,0	350
	950	-	50	1,1	350
	950	-	50	1,2	350
	950	-	50	1,3	350
	950	-	50	1,4	350
P40-10-0	900	-	100	1,9	300
	900	-	100	2,0	300
	900	-	100	2,1	300
	900	-	100	2,2	300
	900	-	100	2,3	300
P40-1-10	890,3	67,3	9,7	0,7	377,3
	890,3	67,3	9,7	0,8	377,3
	890,3	67,3	9,7	0,9	377,3
	890,3	67,3	9,7	1,0	377,3
	890,3	67,3	9,7	1,1	377,3

Para cada pasta foram testados 5 teores de aditivo superplastificante. Os resultados obtidos com o ensaio do Cone de Marsh estão apresentados na A partir do tempo (T) de escoamento, de cada um dos 5 teores testados, aos 10 minutos do contato da água com o cimento, foi calculado o Log (T) (Tabela 5.12).

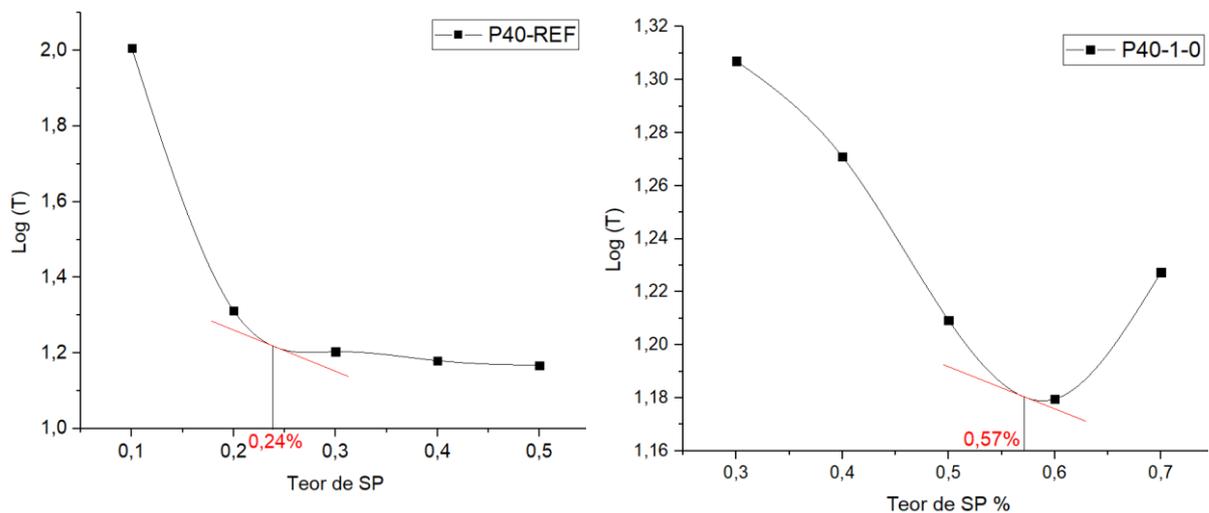
Tabela 5.12 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh.

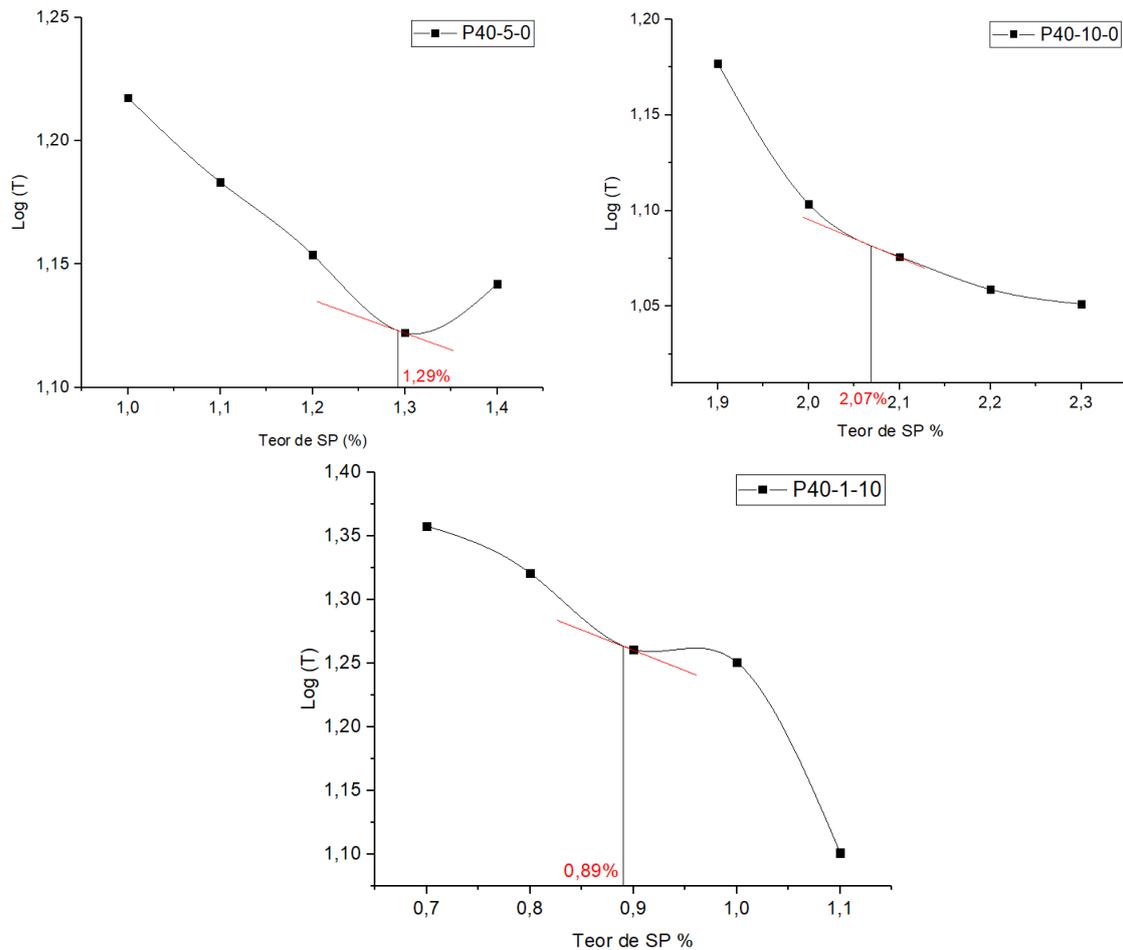
Pastas	P40-REF				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
T(s)	101,47	20,50	15,97	15,12	14,69
Log (T)	2,006	1,312	1,203	1,180	1,167
Pastas	P40-1-0				
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
T(s)	20,28	18,66	16,19	15,12	16,88
Log (T)	1,307	1,271	1,209	1,180	1,227
Pastas	P40-5-0				
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
T(s)	16,50	15,25	14,25	13,25	13,87
Log (T)	1,217	1,183	1,154	1,122	1,142

**Tabela 5.12 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh (continuação).**

Pastas		P40-10-0				
Teor de SP%		1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
T(s)		15,03	12,69	11,91	11,45	11,25
Log (T)		1,177	1,103	1,076	1,059	1,051
Pastas		P40-1-10				
Teor de SP%		0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
T(s)		22,80	20,93	18,23	17,81	12,62
Log (T)		1,358	1,321	1,261	1,251	1,101

Com os teores de aditivo superplastificante testados e com o Log do tempo de escoamento em 10 minutos após o contato entre a água e o cimento, foram geradas as curvas (Log (T) x Teor de SP). A partir do método de AFREM, foi encontrado o ponto de saturação do aditivo superplastificante para cada uma das pastas. A pasta P40-REF (referência) teve como ponto de saturação o teor de 0,24%, a pasta P40-1-0 (1% de nanosílica) o teor de 0,57%, a pasta P40-5-0 (5% de nanosílica) o teor de 1,29%, a pasta P40-10-0 (10% de nanosílica) o teor de 2,07% e a pasta P40-1-10 (1% de nanosílica e 10% de sílica ativa) o teor de 0,89% (Figura 5-3).

**Figura 5-3 - Gráficos Log (T) x Teor de SP %.**



Comparando-se as 5 pastas estudadas, percebe-se que a pasta referência foi a que obteve o menor teor de aditivo superplastificante como ponto de saturação e que conforme o teor de nanosílica foi crescendo o ponto de saturação também foi aumentado. A necessidade de um maior teor de aditivo superplastificante em decorrência do aumento do teor de nanosílica era algo esperado, visto que a nanosílica é um material mais fino do que o cimento. Como no caso estudado a relação água/aglomerante é fixa, sendo necessário um maior teor de aditivo SP.

Ao comparar a pasta com 1% de nanosílica (P4-1-0) com a pasta com 1% de nanosílica + 10 de sílica ativa (P4-1-10), percebe-se que ocorreu um aumento no ponto de saturação, o que ocorre devido a incorporação de finos na mistura, pois mesmo que as partículas de sílica ativa sejam maiores do que as de nanosílica elas possuem diâmetro inferior ao do cimento e, portanto, neste caso também há a necessidade de uma maior quantidade de água, mas que devido ao fator água/aglomerante ser fixo, o teor ideal de aditivo superplastificante aumenta.

### 5.2.2 MINIABATIMENTO

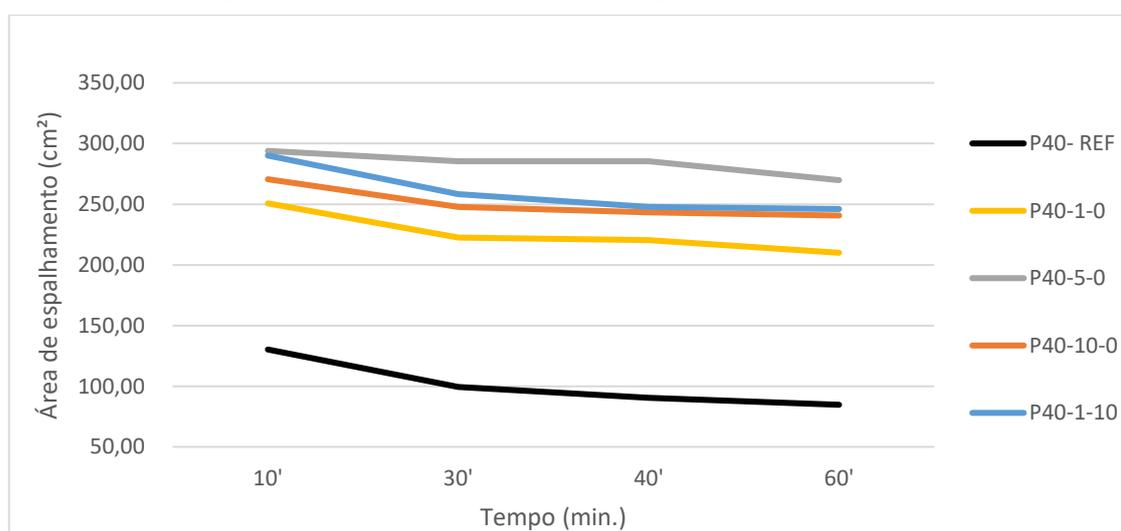
O ensaio de Miniabatimento foi realizado para as mesmas pastas utilizadas no ensaio de Cone de Marsh, mas dessa vez utilizando-se o ponto de saturação de aditivo superplastificante definido por meio do método de AFREM. As áreas de espalhamento foram medidas após 10, 30, 40 e 60 minutos do contato entre o cimento e a água, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.13.

**Tabela 5.13 - Áreas de espalhamento obtidas com o ensaio de Miniabatimento.**

Pastas	Teores de SP (%)	Área de espalhamento (cm <sup>2</sup> )			
		10'	30'	40'	60'
P40-REF	0,24	130,24	99,43	90,37	84,69
P40-1-0	0,57	250,68	222,57	220,39	209,98
P40-5-0	1,29	293,95	285,43	285,32	269,82
P40-10-0	2,07	270,58	247,87	243,27	240,67
P40-1-10	0,89	290,10	258,29	247,66	246,02

A Figura 5-4 apresenta as curvas da área de espalhamento pelo tempo obtidas com a realização do ensaio.

**Figura 5-4 - Curvas da área de espalhamento x tempo.**



As pastas com maior teor de nanosílica, P40-5-0 e P40-10-0, foram as que apresentaram queda na área de espalhamento menos significativa durante os 60 minutos de ensaio, 8% e 10%, respectivamente. Diferente do que ocorreu com as demais pastas analisadas, as quais apresentaram uma maior diminuição no espalhamento durante o ensaio,

variando entre 15% e 34%. Além disso, percebe-se que as maiores quedas na área de espalhamento ocorrem durante os primeiros 30 minutos de ensaio. Por exemplo, a pasta referência (P40-REF) teve uma queda total de cerca de 34%, sendo que 23% da redução ocorreu nos primeiros 30 minutos de ensaio. Para um maior conhecimento sobre a causa dessa queda brusca na área de espalhamento nos primeiros minutos de ensaio, estudos adicionais devem ser realizados.

### 5.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

Na Tabela 5.14 apresenta-se a composição de cada traço e a média dos diâmetros de espalhamento obtidos com o respectivo teor de aditivo superplastificante utilizado. Deve-se ressaltar que a nanosílica utilizada é dispersa em uma solução aquosa onde 50% da massa total é composta de sílica e 50% de água. Portanto, para a definição dos traços foi considerado apenas a porcentagem de sílica existente na massa total do material e a água de amassamento foi quantificada descontando-se a água da solução. A adição de nanosílica foi feita em substituição ao cimento, portanto para cada traço a massa de cimento foi sendo corrigida, descontando-se a massa de nanosílica adicionada. O teor de aditivo superplastificante necessário em cada mistura para que os concretos atingissem o espalhamento de  $(230 \pm 10)$  mm foram inferiores aos pontos de saturação definidos por meio do ensaio de Cone de Marsh (item 5.2.1).

**Tabela 5.14 - Composição dos traços de concreto e consistências obtidas.**

Concretos	Materiais (g)						Água	Consistência (mm)
	Cimento	A.G.	A.M.	S	N	SP (%)*		
C40-REF	1000,0	1920	1280	-	-	0,20	400,0	232,00
C40-1-0	990,0	1920	1280	-	10,0	0,36	390,0	240,00
C40-5-0	950,0	1920	1280	-	50,0	0,88	350,0	225,00
C40-10-0	900,0	1920	1280	-	100,0	1,60	300,0	230,00
C40-1-10	890,3	1920	1280	67,3	9,7	0,58	377,3	233,00
C56-REF	1000,0	1920	1280	-	-	-	560,0	294,00
C56-1-0	990,0	1920	1280	-	10,0	-	550,0	277,00
C56-5-0	950,0	1920	1280	-	50,0	-	510,0	250,33
C56-10-0	900,0	1920	1280	-	100,0	-	460,0	222,67
C56-1-10	890,3	1920	1280	67,3	9,7	-	532,0	267,67

\*teor ótimo de aditivo superplastificante em relação à massa de aglomerante.

## 5.4 ENSAIOS REALIZADOS EM CONCRETO

### 5.4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, bem como o desvio-padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) estão apresentados nas Tabela 5.15 a Tabela 5.17. Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística e a mesma encontra-se no Apêndice A.

**Tabela 5.15 - Resistência à compressão dos concretos com 7 dias de idade.**

Concretos	Resistência à compressão (MPa)				DP(MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	Média		
C40-REF	54,67	52,12	54,33	53,71	1,38	2,58
C40-1-0	58,66	54,13	55,21	56,00	2,37	4,23
C40-5-0	66,94	65,36	69,49	67,26	2,08	3,10
C40-10-0	73,48	65,92	70,31	69,90	3,80	5,43
C40-1-10	54,89	55,59	58,13	56,20	1,70	3,03
C56-REF	38,68	39,81	39,52	39,34	0,59	1,49
C56-1-0	36,99	39,68	39,90	38,86	1,62	4,17
C56-5-0	39,17	41,69	39,74	40,20	1,32	3,29
C56-10-0	42,92	41,92	41,55	42,13	0,71	1,68
C56-1-10	37,36	38,71	37,45	37,84	0,75	1,99

**Tabela 5.16 - Resistência à compressão dos concretos com 28 dias de idade.**

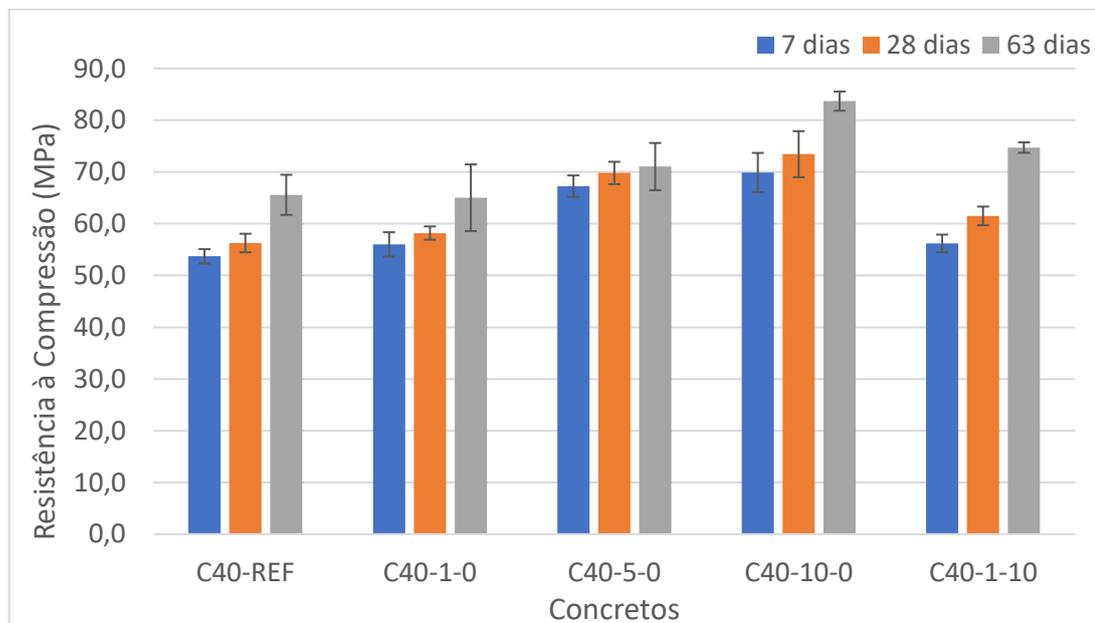
Concretos	Resistência à compressão (MPa)				DP(MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	Média		
C40-REF	54,40	56,51	57,95	56,29	1,79	3,17
C40-1-0	58,16	56,94	59,51	58,20	1,29	2,21
C40-5-0	71,83	70,09	67,53	69,82	2,16	3,10
C40-10-0	74,99	68,44	76,92	73,45	4,44	6,05
C40-1-10	62,02	63,02	59,51	61,52	1,81	2,94
C56-REF	45,18	45,30	47,41	45,96	1,25	2,73
C56-1-0	45,60	46,06	47,36	46,34	0,91	1,97
C56-5-0	45,49	50,15	45,95	47,20	2,57	5,44
C56-10-0	46,50	46,67	50,14	47,77	2,05	4,30
C56-1-10	47,41	43,92	47,27	46,20	1,98	4,28

Tabela 5.17 - Resistência à compressão com 63 dias de idade.

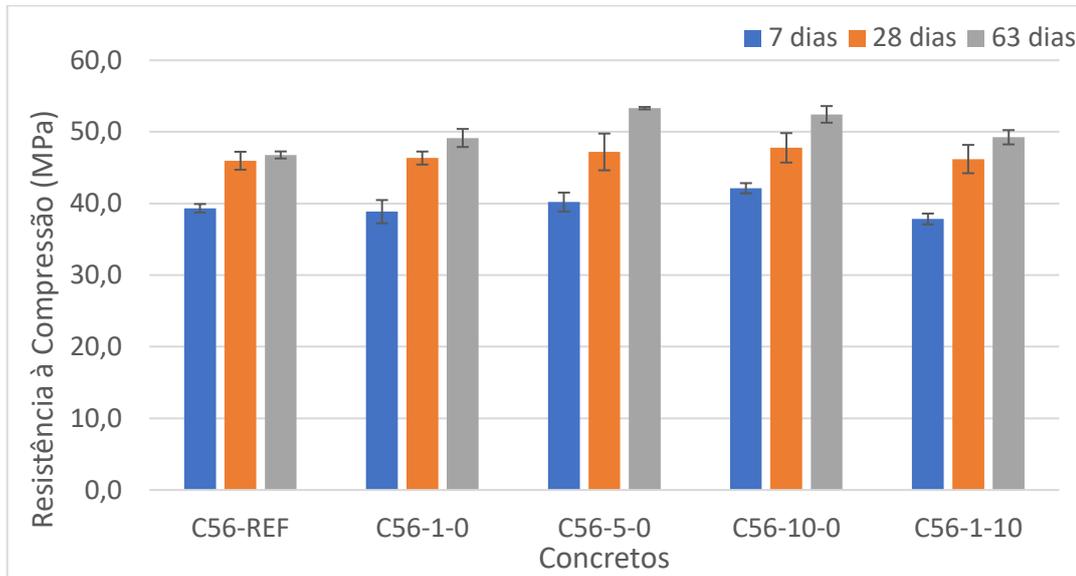
Concretos	Resistência à compressão (MPa)				DP(MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	Média		
C40-REF	64,15	69,99	62,64	65,59	3,88	5,92
C40-1-0	71,12	65,68	58,29	65,03	6,44	9,90
C40-5-0	71,40	66,33	75,43	71,05	4,56	6,42
C40-10-0	85,82	82,41	82,86	83,70	1,85	2,21
C40-1-10	75,54	73,61	75,03	74,73	1,00	1,34
C56-REF	46,37	47,21	46,34	46,78	0,49	1,06
C56-1-0	48,09	48,04	50,25	49,15	1,26	2,57
C56-5-0	53,45	53,34	53,12	53,30	0,17	0,32
C56-10-0	52,82	51,30	53,58	52,44	1,16	2,21
C56-1-10	50,38	48,51	48,84	49,24	1,00	2,03

As Figura 5-5 e Figura 5-6 ilustram a evolução, no decorrer do tempo, da resistência média dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 e 0,56, respectivamente.

**Figura 5-5 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,40.**



**Figura 5-6 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,56.**



Ao se analisar os valores de resistência à compressão, percebe-se que os maiores valores foram alcançados pelos concretos de relação a/agl 0,40, algo que já era esperado. Analisando-se a evolução da resistência à compressão dos concretos das duas relações a/agl, nota-se que adição de nanosílica, mostrou-se mais eficiente nos concretos de relação a/agl igual a 0,40. A adição de 10% de nanosílica no concreto de relação a/agl 0,40 (C40-10-0) resultou em um aumento de cerca de 27% na resistência à compressão aos 63 dias, se comparado ao referência, enquanto que, para a relação a/agl igual a 0,56 com o mesmo teor de nanosílica, o ganho de resistência foi de apenas 12%.

O melhor desempenho quanto a resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,40, se comparados aos concretos de relação a/agl igual a 0,56 pode ser justificado pela utilização do aditivo superplastificante nos concretos de menor relação a/agl. Heikal, Al-Duaij e Ibrahim (2015) encontram maiores valores de resistência à compressão em compostos cimentícios com a substituição parcial do cimento por 1% e 4% de nanosílica, com aditivo superplastificante do que sem a utilização do mesmo. Os autores concluíram que a utilização do aditivo superplastificante melhora a dispersão da nanosílica e do cimento, o que leva a uma hidratação mais eficiente e a uma melhor compactação.

A Tabela 5.18 apresenta o desenvolvimento da resistência à compressão, em porcentagem, dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 em relação ao concreto referência, nas três idades de ensaio.

**Tabela 5.18 – Desenvolvimento da resistência à compressão (%) dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) aos 7, 28 e 63 dias.**

Concretos	Variação de resistência (%)		
	7 dias	28 dias	63 dias
C40-1-0	4,3	3,4	- 0,8
C40-5-0	25,2	24,0	8,3
C40-10-0	30,2	30,5	27,6
C40-1-10	4,6	9,3	13,9

Os maiores ganhos de resistência à compressão, nas três idades estudadas, ocorreram com a adição de 10% de nanosílica. Nas 3 idades analisadas, ao se comparar o concreto referência (C40-REF) com o concreto com 10% de nanosílica (C40-10-0), o aumento na resistência foi em torno de 30%, o que corresponde a 16 MPa aos 7 dias, 17 MPa aos 28 dias e a 18 MPa aos 63 dias, atingindo 69,90 MPa, 73,45 MPa e 85,82 MPa, respectivamente.

Com o objetivo de avaliar a existência de diferenças significativas entre os resultados obtidos, as médias de resistência foram submetidas à Análise de Variância e, quando necessário, ao Teste de Tukey. A Tabela 5.19 apresenta o Teste de Tukey realizado com os resultados dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF).

**Tabela 5.19 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) aos 7, 28 e 63 dias.**

Concretos	7 dias	28 dias	63 dias
C40-1-0	Não	Não	Não
C40-5-0	Sim	Sim	Não
C40-10-0	Sim	Sim	Sim
C40-1-10	Não	Não	Não

Obs: sim: há diferença significativa, não: não há diferença significativa.

Com a análise estatística, percebe-se que a adição de 1% de nanosílica (C40-1-0) e a adição combinada de 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa (C10-1-10) não resultaram em diferenças significativas na resistência à compressão em relação ao concreto referência em nenhuma das idades estudadas. Já adição de 5% de nanosílica (C40-5-0) resultou em diferenças significativas, quando comparada ao concreto referência, apenas aos 7 e 28 dias, enquanto que a adição de 10% de nanosílica foi a que levou aos melhores resultados de resistência à compressão, sendo os resultados obtidos nas três idades, significativamente diferentes, se comparados ao referência.

Nos concretos de relação a/agl igual a 0,56 a incorporação de adições minerais mostrou-se menos eficiente. A Tabela 5.20 apresenta o desenvolvimento da resistência, em porcentagem, dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 em relação ao referência.

**Tabela 5.20 - Desenvolvimento de resistência à compressão (%) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 7, 28 e 63 dias.**

Concretos	Variação de resistência (%)		
	7 dias	28 dias	63 dias
C56-1-0	- 1,2	0,8	5,1
C56-5-0	2,2	2,7	13,9
C56-10-0	7,1	3,9	12,1
C56-1-10	- 3,8	0,5	5,3

A adição de 10% de nanosílica (C56-10-0) foi a que resultou nos maiores valores de resistência à compressão, nas três idades estudadas, assim como verificado na relação a/agl igual a 040. Enquanto, os valores de resistência com a adição de 1% de nanosílica (C56-1-0) e 1% de nanosílica com 10% de nanosílica (C56-1-10) aos 7 dias, foram inferiores a resistência do concreto referência.

A análise estatística indicou que houve diferença significativa no resultado de resistência à compressão em relação ao referência, apenas com a adição de 5% de nanosílica (C56-5-0) e 10% de nanosílica (C56-10-0), aos 63 dias. As demais adições não levaram a valores de resistência significativamente diferentes em comparação ao referência, em nenhuma das idades de ensaio (Tabela 5.21)

**Tabela 5.21 -Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 7, 28 e 63 dias.**

Concretos	Ganho de resistência (%)		
	7 dias	28 dias	63 dias
C56-1-0	Não	Não	Não
C56-5-0	Não	Não	Sim
C56-10-0	Não	Não	Sim
C56-1-10	Não	Não	Não

Obs: sim: há diferença significativa, não: não há diferença significativa.

Andrade (2017), ao estudar a adição de 1%, 2%, 3%, 5% e 10% de nanosílica coloidal em argamassas, obteve ganhos de resistência de aproximadamente 3%, 9%, 18%, 37% e 51%. Resultado este, que é semelhante ao verificado neste programa experimental onde os

melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos com os maiores teores de substituição, 5% e 10%, para as duas relações a/agl estudadas.

Além disso, Andrade (2017) também estudou o efeito combinado da sílica ativa e da nanosílica em argamassa por meio da substituição de vários teores sílica ativa e nanosílica, sendo que as misturas com 10% de sílica ativa foram as que apresentaram os melhores resultados. Com a adição de 10% de sílica ativa, o autor utilizou os teores de 1%, 2% e 3% de nanosílica coloidal, e o maior ganho de resistência aos 28 dias ocorreu com a adição de 10% de sílica ativa + 3% de nanosílica coloidal. Tal resultado indica que a adição de 10% de sílica + 1% de nanosílica estudada nesta pesquisa não é suficiente para se avaliar a ação combinada dessas duas adições em compostos cimentícios.

#### 5.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 e 0,56 aos 28 dias estão apresentados na Tabela 5.22. Apresentam-se os valores de coeficiente de absorção obtidos nas 5 leituras (3h, 6h, 24h, 48h e 72h) e a altura da ascensão capilar atingida ao final do ensaio. Foi realizada análise estatística dos resultados obtidos que estão apresentados no Apêndice B, bem como os valores individuais obtidos.

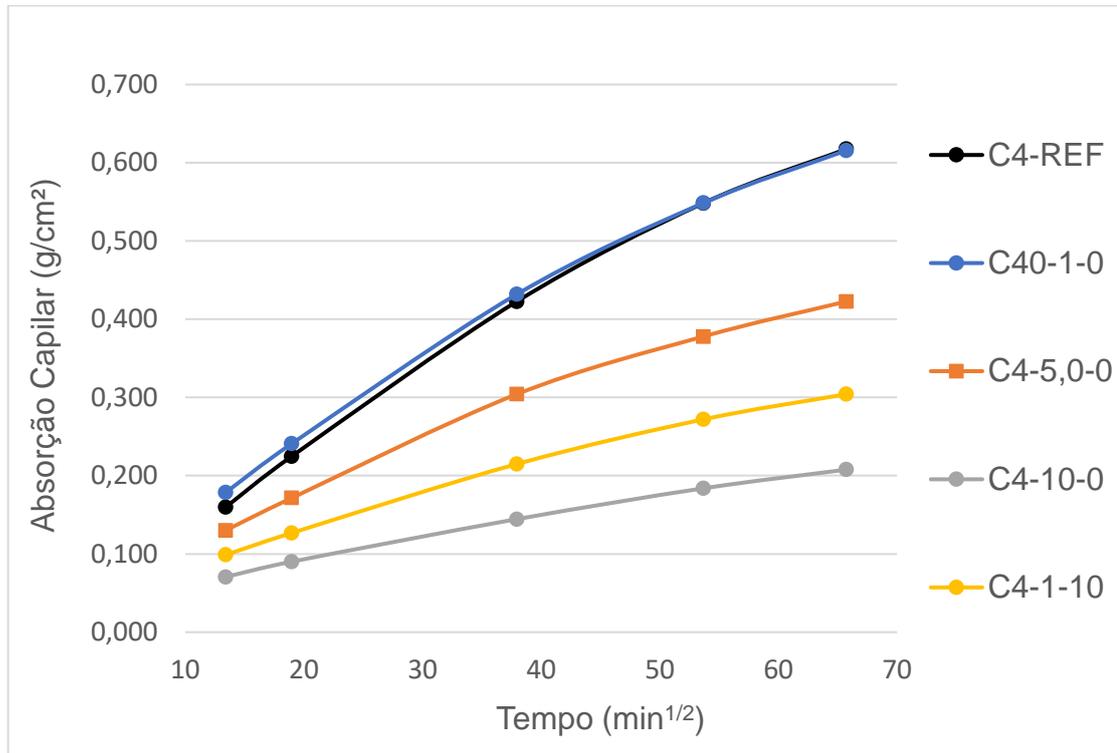
**Tabela 5.22 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com 28 dias de idade.**

Concretos	Absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )					Altura de ascensão (cm)
	3h	6h	24h	48h	72h	
C40-REF	0,160	0,225	0,423	0,548	0,618	5,5
C40-1-0	0,179	0,241	0,432	0,549	0,616	5,4
C40-5-0	0,130	0,171	0,304	0,378	0,423	2,5
C40-10-0	0,071	0,090	0,144	0,184	0,208	8,8
C40-1-10	0,099	0,127	0,215	0,272	0,304	1,8
C56-REF	0,342	0,488	0,973	1,283	1,415	10
C56-1-0	0,353	0,500	0,976	1,273	1,408	10
C56-5-0	0,310	0,434	0,827	1,063	1,207	7,6
C56-10-0	0,211	0,286	0,531	0,668	0,757	4,9
C56-1-10	0,335	0,470	0,903	1,172	1,342	8,6

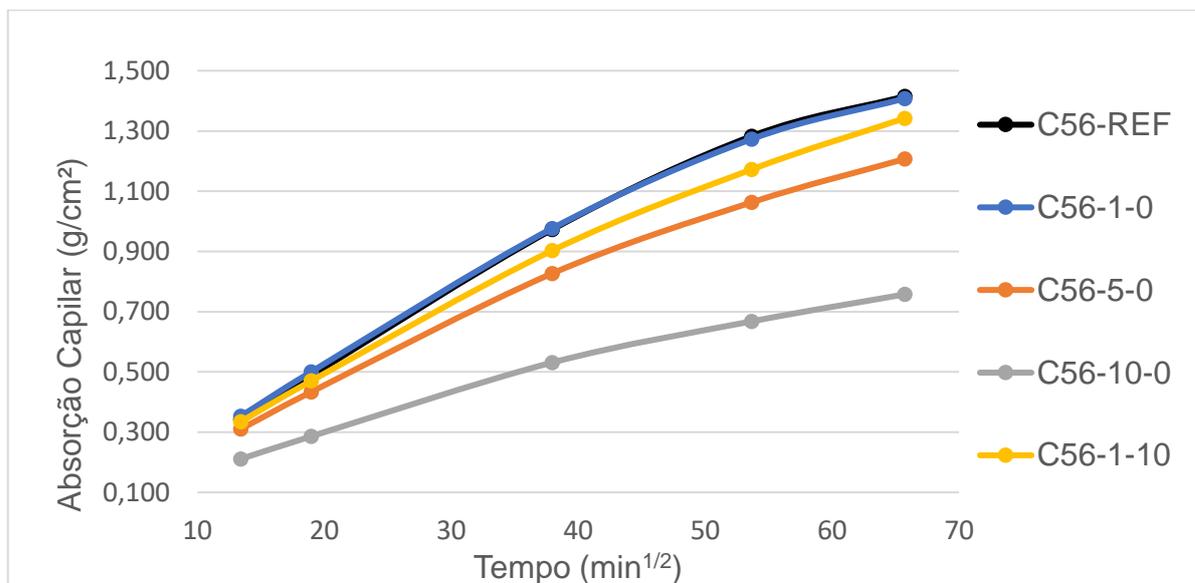
Com os resultados obtidos pode-se concluir que os índices de absorção capilar foram menores para os concretos com relação a/agl 0,40, algo que já era esperado, visto que quanto maior a quantidade de água utilizada na mistura, maior será a quantidade de vazios com o avanço da hidratação do cimento.

As Figura 5-7 e Figura 5-8 apresentam a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo aos 28 dias, para os concretos de relação a/agl igual a 0,40 e 0,56, respectivamente.

**Figura 5-7 - Absorção de água por capilaridade dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 aos 28 dias.**



**Figura 5-8 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 aos 28 dias.**



Nos concretos de relação a/agl igual a 0,40, aos 28 dias e após 72 horas de ensaio, a adição de nanosílica e de sílica ativa resultou em menores índices de absorção capilar ao se comparar com o apresentado pelo concreto referência. A adição de 1%, 5%, 10% de nanosílica e 1% de nanosílica com 10% de sílica ativa resultou em uma redução de cerca de

0,5%, 31%, 66% e 51%, respectivamente, no índice de absorção capilar, se comparados ao concreto referência. De acordo com a Análise de Variância, existem diferenças significativas entre todos os teores de adições estudados, exceto entre o concreto sem adições (C40-REF) e o com 1% de nanosílica (C40-1-0).

Nos concretos de relação a/agl igual a 0,56, aos 28 dias e após 72h de ensaio, os concretos com adições apresentaram redução no índice de absorção capilar, exceto o concreto C56-1-0, que apresentou índice de absorção pouco inferior ao referência. A ANOVA indicou que a diferença verificada entre o concreto C56-REF e o C56-1-0, como também com relação ao C56-1-10, não são significativas, já para os demais concretos a diferença das médias de absorção em relação ao referência mostraram-se significativas. A redução na absorção de água com 5% e 10% de adição de nanosílica foi de cerca de 15% e 46%, respectivamente, em relação ao concreto sem adições.

Zahedi, Ramezaniapour e Ramezaniapour (2015) testaram a nanosílica coloidal em argamassas de relação a/agl 0,485 e dois teores de substituição de nanosílica 2,5% e 5% e os melhores resultados na redução da absorção capilar foram obtidos com o maior teor de substituição da nanosílica. Aos 28 dias, a adição de 2,5 e 5% de nanosílica resultou em uma redução de aproximadamente 9% e 24% no índice de absorção capilar, respectivamente.

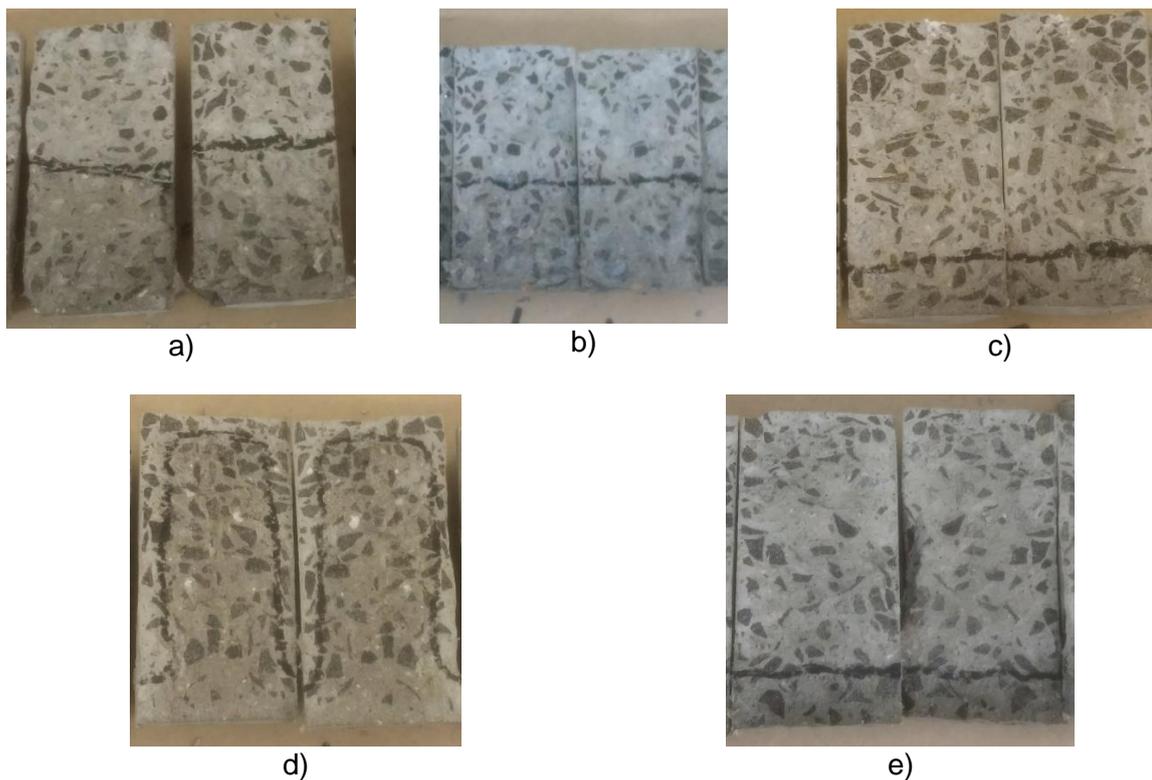
Joshaghani e Moeini (2017) também estudaram a adição de nanosílica coloidal em argamassas de relação a/agl 0,485 e dois teores de substituição, 3% e 6% com a utilização de aditivo superplastificante. Nesta pesquisa os autores também verificaram as maiores reduções na absorção capilar de água com o maior teor de nanosílica. Aos 28 dias, a utilização 3% e 6% da nanosílica coloidal reduziu a absorção de água em cerca de 14% e 22% respectivamente.

A redução nos índices de absorção capilar de água dos compostos cimentícios, conforme ocorre o aumento no teor de nanosílica utilizado, confirma que este material apresenta os efeitos fíler e pozolânico, os quais contribuem para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia.

Analisando-se as duas relações a/agl estudadas, pode-se se perceber que a incorporação de nanosílica apresentou resultados mais relevantes, independente do teor utilizado, nos concretos de relação a/agl igual 0,40. Este resultado, é semelhante ao verificado nos ensaios de resistência à compressão, e também pode ser justificado pelo uso do aditivo superplastificante, como já mencionado, que melhora a dispersão das partículas de cimento e nanosílica, o que resulta em uma hidratação mais eficiente e em uma melhor densificação da matriz da pasta de cimento.

Após o término do ensaio, os corpos de prova foram rompidos para que fosse feita a medida da ascensão capilar. As médias obtidas encontram-se na Tabela 5.22 e nas Figura 5-9 e Figura 5-10 estão apresentados os perfis de ascensão da água no interior dos corpos de prova.

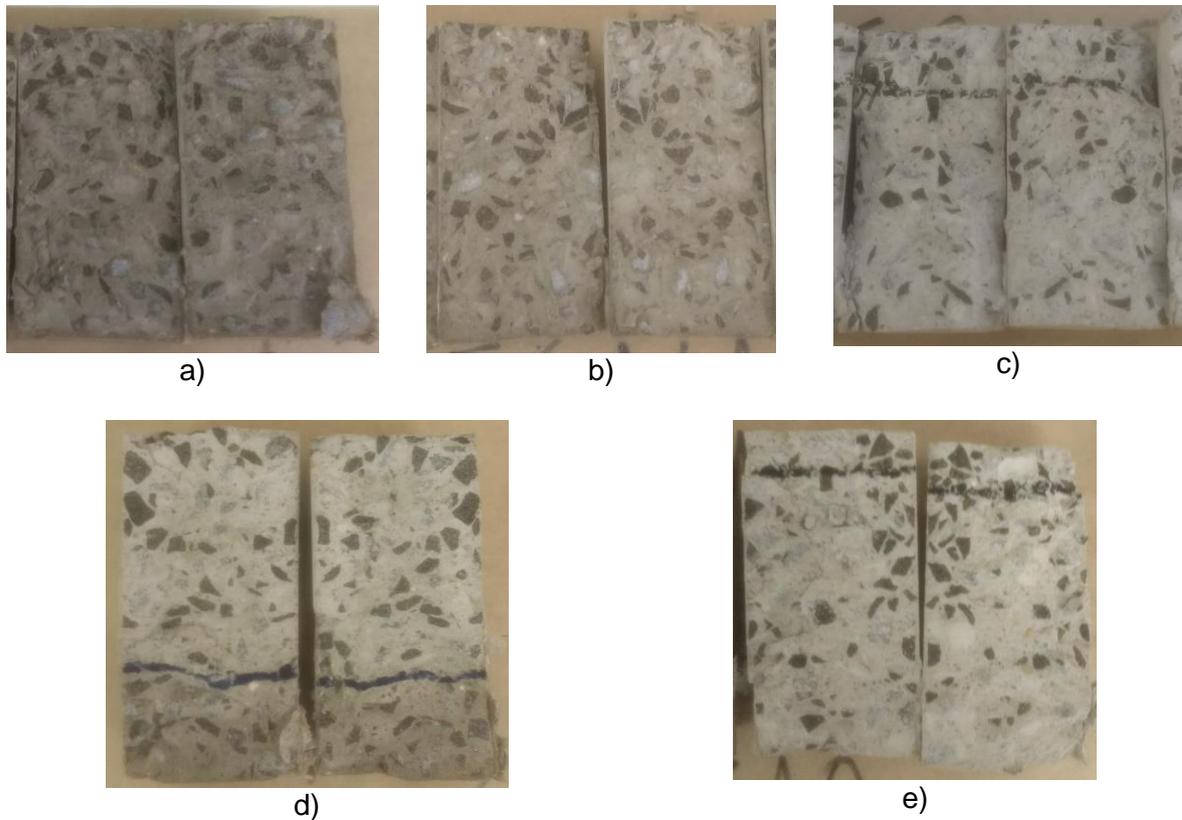
**Figura 5-9 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização do ensaios de absorção de água pro capilaridade aos 28 dias: a) C40-REF; b) C40-1-0; c) C40-5-0; d) C40-10-0 e e) C40-1-10.**



Como pode-se perceber pelas imagens da Figura 5-9, nos concretos C40-REF, C40-1-0, C40-5-0 e C40-1-10, o avanço da umidade ocorreu de modo uniforme, atingindo toda a seção do corpo de prova, enquanto que o concreto C40-10-0 apesar de apresentar a maior altura de ascensão da umidade (8,8cm), o avanço da ascensão capilar ocorreu no centro do corpo de prova e não nas laterais.

O concreto C40-10-0 embora tenha apresentado a maior ascensão capilar, foi o concreto que absorveu a menor quantidade de água. Segundo Castro e Ferreira (2016), este fato pode ser explicado pelo diâmetro dos poros do concreto, quanto menor a sua dimensão, maior é a pressão de sucção capilar, gerando, assim, uma maior altura de ascensão capilar.

**Figura 5-10 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização do ensaios de absorção de água por capilaridade aos 28 dias: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.**



Nos concretos de relação  $a/agl$  0,56 a ascensão capilar ocorreu de modo uniforme em todos os traços estudados, sendo que nos concretos C56-REF e C56-1-0 a água atingiu o topo do corpo de prova (Figura 5-10). Neste caso, os corpos de prova que apresentaram menor ascensão capilar foram os que absorveram menor quantidade de água, o que indica que a utilização das adições contribuiu para o refinamento dos poros da matriz cimentícia.

### **5.4.3 DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DOS CLORETOS E DO $CO_2$**

#### **5.4.3.1 DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

Para a determinação da frente de penetração de cloretos, foram realizados após 8, 12 e 18 ciclos de secagem e molhagem, correspondente a 56, 84 e 126 dias de ataque, ao final dos ciclos, realizou-se a medida da profundidade de penetração dos íons.

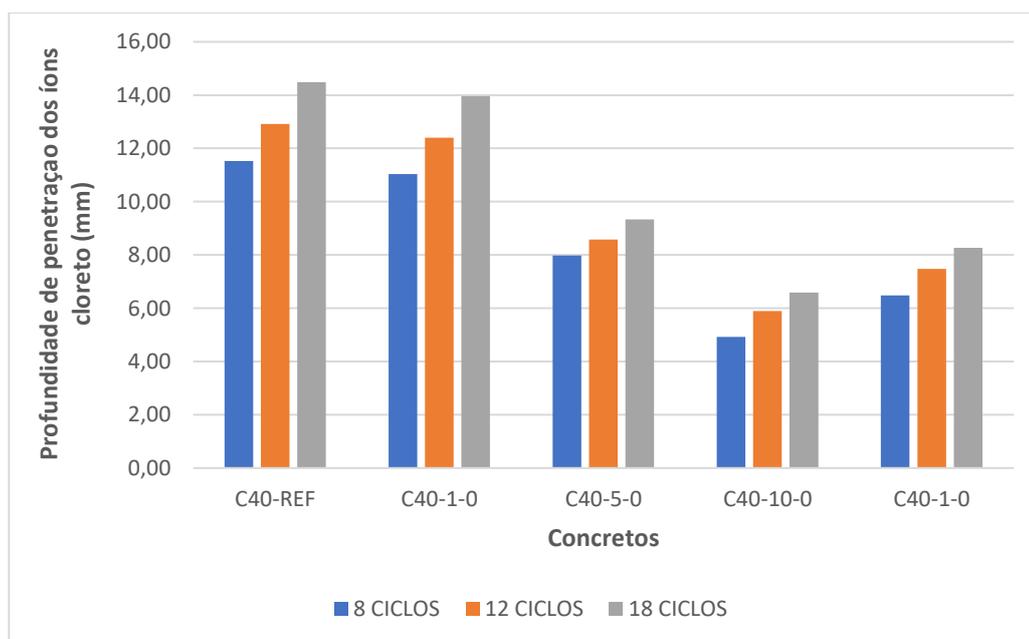
Os resultados verificados nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 são apresentados na Tabela 5.23.

**Tabela 5.23 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,40.**

Concreto	Profundidade de penetração (mm)		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C40-REF	11,5	12,9	14,5
C40-1-0	11,0	12,4	14,0
C40-5-0	7,9	8,6	9,3
C40-10-0	4,9	5,9	6,6
C40-1-10	6,4	7,5	8,3

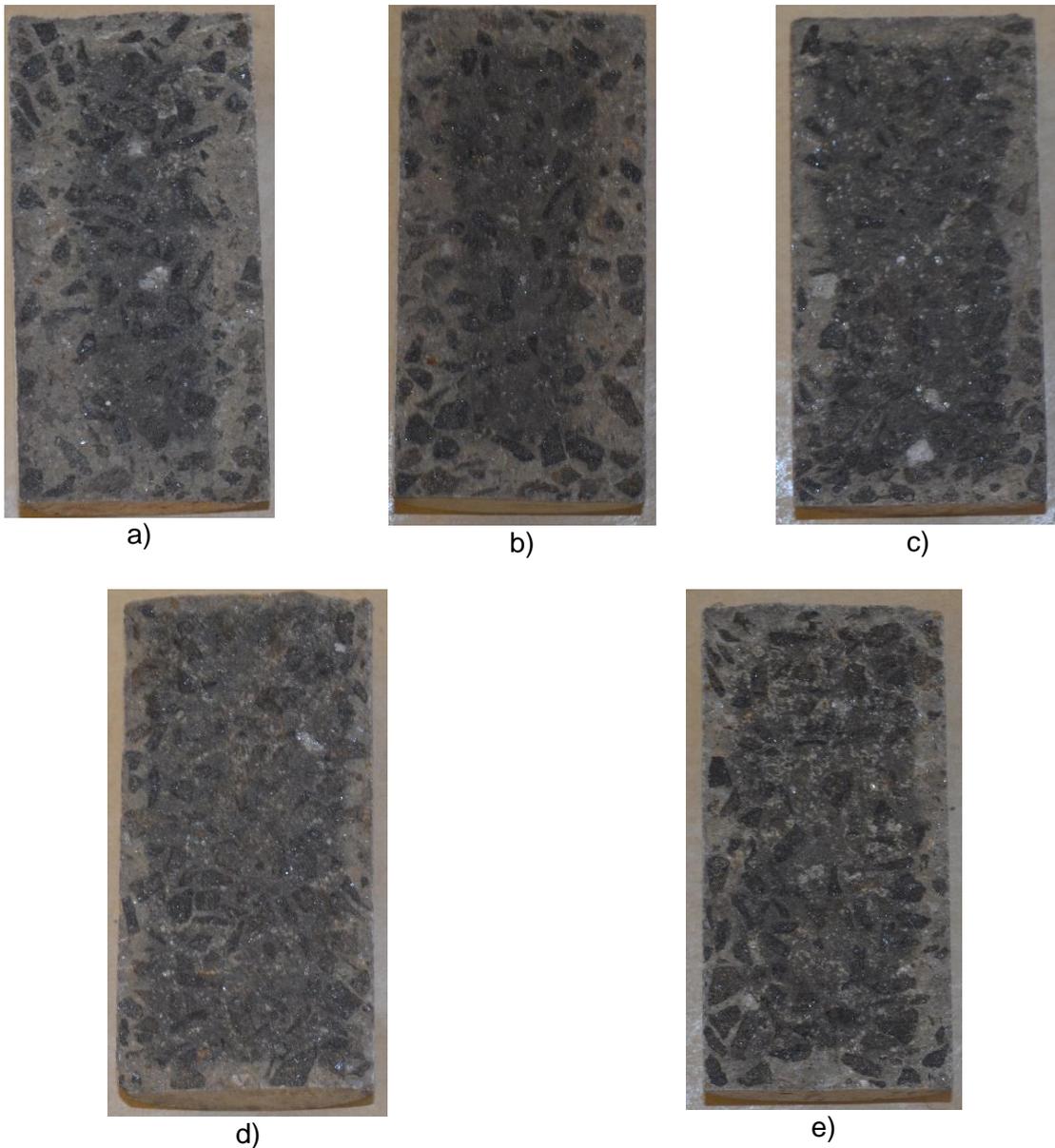
Para melhor ilustrar os resultados obtidos a Figura 5-11 apresenta em forma gráfica como ocorreu o avanço da penetração dos íons cloreto nos 5 traços de concretos estudados de relação água/aglomerante 0,40 no decorrer no ensaio.

**Figura 5-11- Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**



A Figura 5-12 apresenta os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 18 ciclos de molhagem e secagem.

**Figura 5-12- Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 18 ciclos de ataque: a) C40-REF, b)C40-1-0, c)C40-5-0, d)C40-10-0 e e)C40-1-10.**



Os valores obtidos foram submetidos à análise estatística para se verificar a existência de diferença significativa no desempenho dos concretos estudados quando comparados ao concreto referência (Tabela 5.24).

**Tabela 5.24 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) após 8, 12 e 18 ciclos de secagem e molhagem.**

Concretos	Profundidade de penetração de cloretos		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C40-1-0	Não	Não	Não
C40-5-0	Sim	Sim	Sim
C40-10-0	Sim	Sim	Sim
C40-1-10	Sim	Sim	Sim

Obs: sim = há diferença significativa, não = não há diferença significativa.

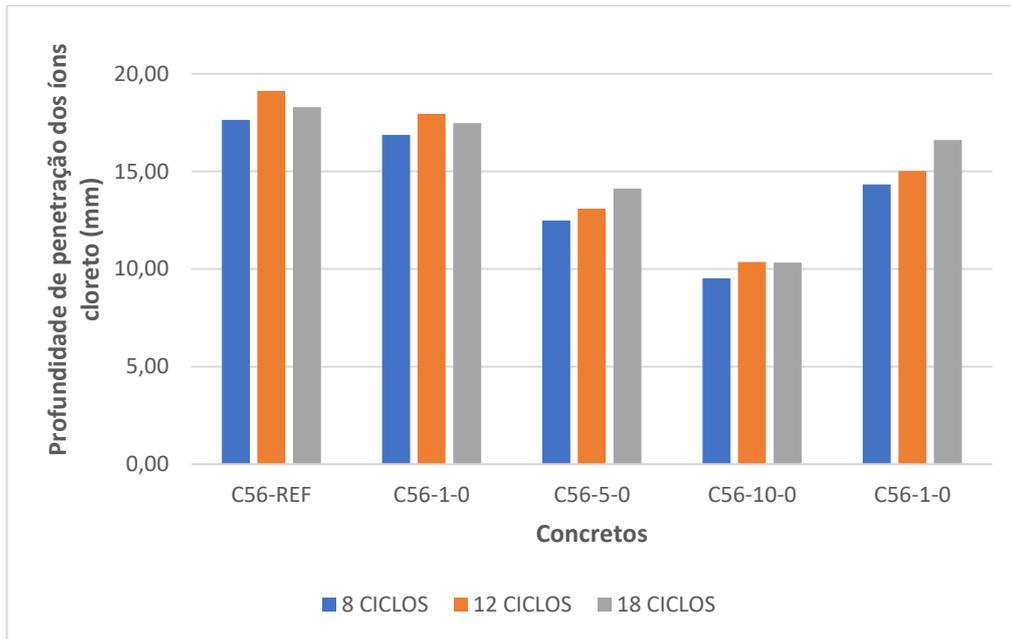
Com o resultado da análise estatística, percebe-se que nas 3 idades de ataque, apenas a utilização de 1% de nanosílica não levou a diferença significativa nos resultados obtidos. A incorporação de 5% e 10% de nanosílica e de 1% de nanosílica e 10% de sílica levou a redução significativa na profundidade de penetração dos cloretos, quando comparados ao concreto referência.

Os resultados apresentados pelos concretos com relação água/aglomerante igual a 0,56 podem ser verificados na Tabela 5.25 e na Figura 5-13 os resultados são apresentados de forma gráfica.

**Tabela 5.25 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,56.**

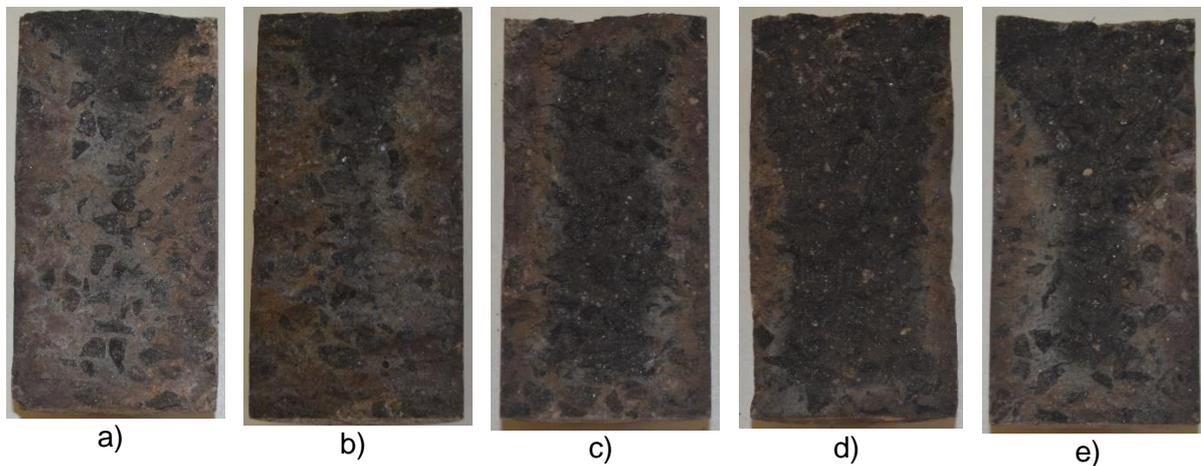
Concreto	Profundidade de penetração de cloretos (mm)		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C56-REF	13,2	15,0	16,0
C56-1-0	12,9	14,1	15,0
C56-5-0	11,2	12,3	13,1
C56-10-0	6,2	7,4	8,1
C56-1-10	10,5	11,8	12,7

**Figura 5-13 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 após 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**



A Figura 5-14 apresenta a profundidade de penetração dos íons cloreto após 18 semanas de ataque, nos concretos de relação água/aglomerante 0,56.

**Figura 5-14- Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante 0,56 após 18 ciclos de ataque: a) C56-REF, b)C56-1-0, c)C56-5-0, d)C56-10-0 e e)C56-1-10.**



Estes resultados também foram submetidos a análise estatística para se verificar a existência de diferença significativa entre os resultados obtidos, nas 3 idades de ataque, quando comparado ao concreto referência. Na Tabela 5.26 pode se verificar o teste de Tukey para esses concretos.

**Tabela 5.26 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) após 8, 12 e 18 ciclos de secagem e molhagem.**

Concretos	Profundidade de penetração de cloretos		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C56-1-0	Não	Não	Não
C56-5-0	Sim	Sim	Sim
C56-10-0	Sim	Sim	Sim
C56-1-10	Sim	Sim	Não

Obs: sim = há diferença significativa, não = não há diferença significativa.

Com base na análise estatística realizada, é possível concluir que nas 3 idades de ataque a incorporação de 1% de nanosílica não acarretou em diferenças significativas, como também a utilização de 1% de nanosílica e 10% de sílica, após 18 semanas de ataque.

Analisando-se as leituras das profundidades de penetração de cloretos, pode-se concluir que os concretos com adições apresentaram um menor avanço de cloretos, quando comparados ao concreto referência. Após 8 ciclos de ataque, nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40, a incorporação de 1%, 5% e 10% de nanosílica resultou em uma redução da profundidade de penetração de cloretos em torno de 4%, 30% e 56%, respectivamente, enquanto que a adição de nanosílica e sílica ativa (C40-1-10) gerou uma redução de aproximadamente 43%.

Ao se comparar as duas relações a/agl estudadas, percebe-se que os concretos com menor quantidade de água foram os que apresentaram os melhores resultados nas 3 idades de ataque estudadas. Este resultado já era esperado, devido ao menor diâmetro dos poros nos concretos de menor relação água/aglomerante, o que dificulta a penetração dos agentes agressivos.

Joshaghani e Moeini (2017), ao realizarem ensaios de migração de cloretos em argamassas aos 28 dias de idade, com adição de 3% e 6% da nanosílica coloidal, verificaram redução no coeficiente de migração em aproximadamente de 70% e 77%, respectivamente.

Li *et al.* (2017a) estudaram a efeito combinado da sílica ativa e da nanosílica em pó na durabilidade de argamassas de relação água/aglomerante igual a 0,40, sendo feitas adições de 10% de sílica ativa e 1% e 2% de nanosílica. A incorporação de sílica ativa juntamente com 1% de nanosílica resultou em uma queda de 92,4% na penetração de cloretos, teor esse bastante superior do que o verificado nesta pesquisa. A adição de sílica ativa juntamente com 2% de nanosílica levou a um resultando um pouco melhor, sendo a diminuição da penetração de cloretos de 93,5%. Enquanto que a adição isolada da sílica ativa resultou em um

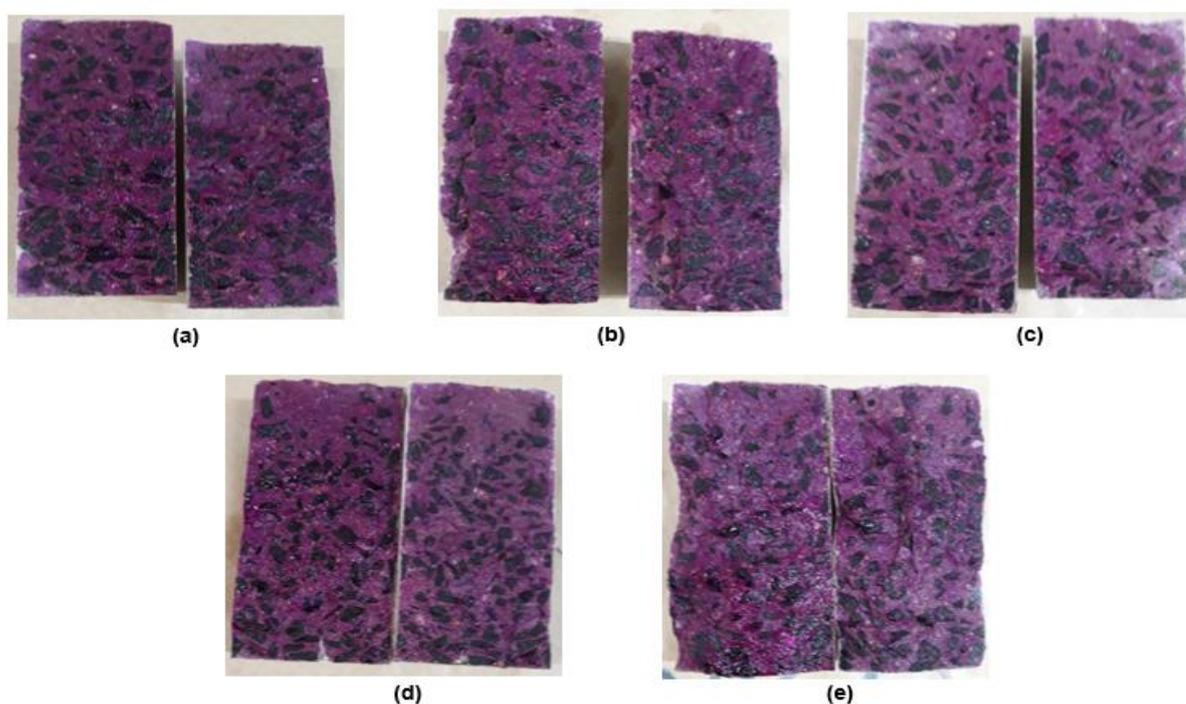
decréscimo na penetração de cloretos de aproximadamente 92%, e a adição isolada de 1% e 2% de nanosílica resultaram em uma queda de cerca de 4% e 11% na penetração dos íons, respectivamente.

A melhora na resistência do concreto à penetração de cloretos é atribuída ao efeito fíler proporcionado pelo material, as partículas de nanosílica preenchem os vazios do concreto, gerando o refinamento dos poros, além do efeito pozolânico, com isso, maiores volumes de produto são formados, reduzindo a porosidade, conseqüentemente, a penetração dos agentes agressivos é dificultada (ZAHEDI; RAMEZANIANPOUR; RAMEZANIANPOUR, 2015).

#### 5.4.3.2 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

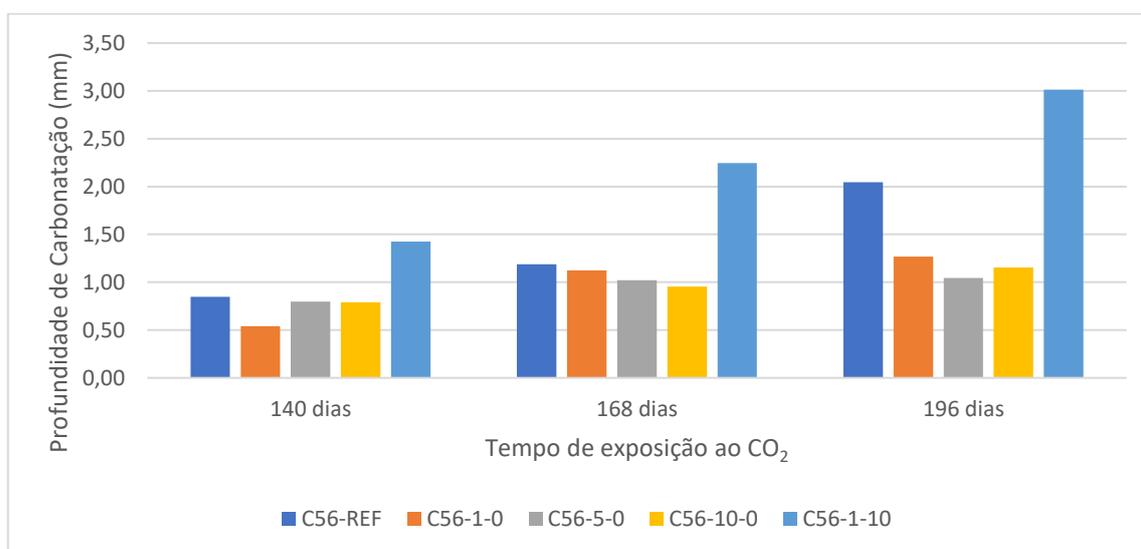
Os concretos foram submetidos a 28, 56, 84 e 112 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>. Nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40, mesmo após a última leitura prevista para o ensaio, não verificou-se a existência de frente de carbonatação em nenhum dos traços estudados. Por esse motivo, além das leituras previstas, foram realizadas mais três, aos 140, 168 e 196 dias de ataque, e, mesmo assim, não constatou-se a existência de frente de carbonatação. Portanto, não foi possível avaliar a influência das adições minerais nanosílica e sílica ativa no avanço da frente de carbonatação nesses concretos. A Figura 5-15 apresenta os concretos com 196 dias de ensaio após a aspensão de fenolftaleína.

**Figura 5-15 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no aos 196 dias: a) C40-REF; b) C40-1-0; c) C40-5-0; d) C40-10-0 e e) C40-1-10.**



Os concretos com relação a/agl igual a 0,56 apresentaram frente de carbonatação somente após 140 dias na câmara de CO<sub>2</sub>, que seria a última leitura prevista para este ensaio, por esse motivo foram realizadas mais duas leituras, aos 168 e 196 dias. A Figura 5-16 apresenta os resultados obtidos. Na Tabela 5.27 são apresentadas, em porcentagem, o desenvolvimento da profundidade de carbonatação nos concretos com relação a/agl igual a 0,56, quando comparados com o traço referência.

**Figura 5-16 - Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56.**



**Tabela 5.27 - Desenvolvimento da profundidade de carbonatação (%) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 140, 168 e 196 dias.**

Concretos	Variação de profundidade da carbonatação (%)		
	140 dias	168 dias	196 dias
C56-1-0	-36,2	-5,3	- 38,0
C56-5-0	-5,8	-14,2	-49,1
C56-10-0	-7,0	-19,9	-43,5
C56-1-10	67,8	88,8	47,4

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística, para se verificar se os resultados obtidos quando comparados ao concreto referência apresentaram diferença significativa. Na Tabela 5.28 são apresentados os resultados do teste de Tukey.

**Tabela 5.28 - Teste de Tukey para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 aos 140, 168, e 196 dias de carbonatação acelerada em comparação com concreto referência (C56-REF).**

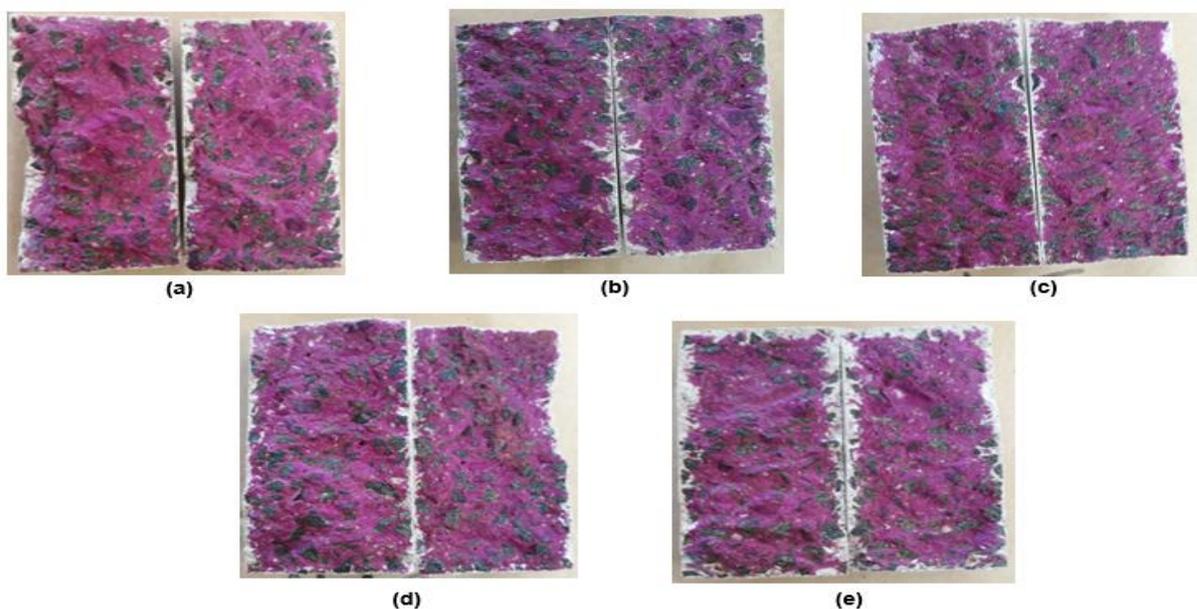
Concretos	Profundidade de carbonatação (%)		
	140 dias	168 dias	196 dias
C56-1-0	Sim	Não	Sim
C56-5-0	Não	Não	Sim
C56-10-0	Não	Não	Sim
C56-1-10	Sim	Sim	Sim

O traço com adição combinada de 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa (C56-1-10) foi o único que apresentou uma frente de carbonatação maior que o traço referência (C56-REF) em todas as idades e a diferença foi sempre significativa. Nas duas primeiras idades, os traços com maior teor de nanosílica (C56-5-0 e C56-10-0) não apresentam diferença significativa quando comparados com o concreto referência (C56-REF).

Analisando-se os resultados obtidos, percebe-se que não há uma tendência no comportamento dos vários traços de concreto ao longo das idades analisadas, já que a cada leitura um traço diferente apresenta a menor frente de carbonatação. No entanto, ao aplicar o teste de Tukey, comparando todos os traços entre si, nota-se que na maioria das comparações entre os concretos com adição, somente de nanosílica (C56-1-0, C56-5-0 e C56-10-0), não há diferença significativa entre eles.

Na Figura 5-17 apresenta-se a frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, aos 196 dias de ataque.

**Figura 5-17 - Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.**



Li *et al.* (2017a), ao estudar a influência da adição de nanosílica e sílica ativa no avanço da frente de carbonatação em concretos de relação a/agl igual a 0,40 após 28 dias de exposição, verificaram a existência de frente de carbonatação. O concreto referência apresentou frente de carbonatação de 12,5 mm e a adição de 1% e 2% de nanosílica fez com que a profundidade de carbonatação fosse reduzida para 9,8 mm e 8,1 mm respectivamente. Com a adição de 10% de sílica ativa foi verificada frente de carbonatação de 9,4 mm. Enquanto que com adição combinada de 10% de sílica ativa com 1% e 2% de nanosílica resultaram em profundidades de 5,9 mm e 4,9 mm, respectivamente.

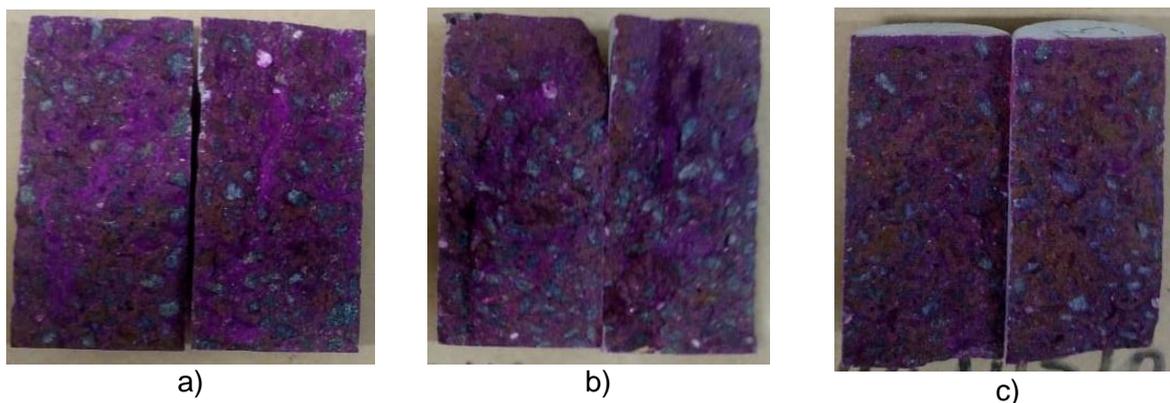
#### 5.4.3.3 Ensaios combinados

Os ensaios combinados foram executados de duas maneiras, alternando-se o ataque inicial e o ataque final. O primeiro ensaio combinado consistiu, inicialmente, na exposição dos corpos de prova ao ataque por cloretos por 126 dias, por meio dos ciclos de molhagem e secagem, e então as amostras foram colocadas na câmara de carbonatação por 28, 56 e 84 dias. O processo inverso também foi realizado, no qual as amostras foram expostas primeiramente, ao CO<sub>2</sub> por 84 dias, e em seguida aos cloretos por 56, 84 e 126 dias.

- ATAQUE POR CLORETOS SEGUIDO POR CARBONATAÇÃO ACELERADA

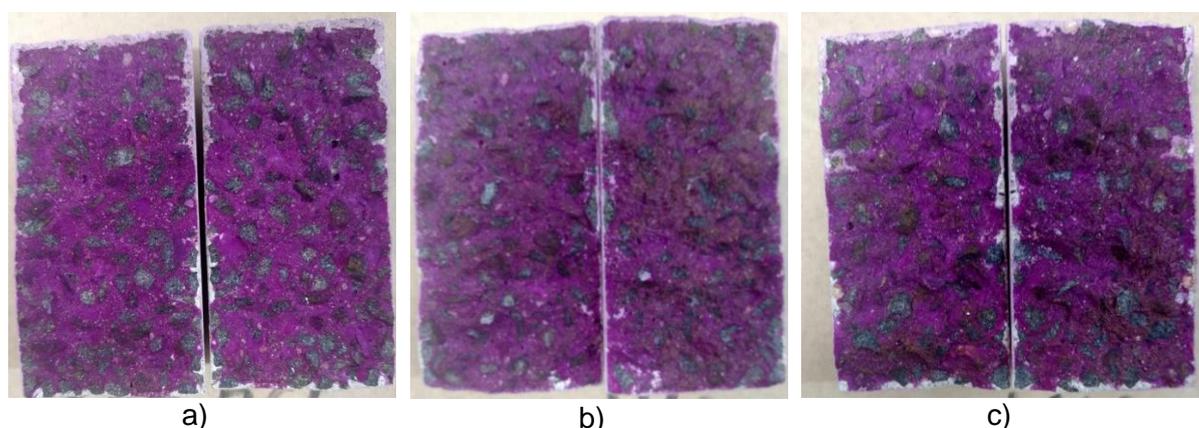
Assim como nos ensaios isolados de carbonatação acelerada, no ensaio combinado, 18 ciclos de molhagem e secagem seguido 28, 56 e 84 dias de exposição ao CO<sub>2</sub>, os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 não apresentaram frente de carbonatação. Por este motivo não foi possível se avaliar a influência da penetração dos cloretos no avanço da frente de carbonatação. Na Figura 5-18 é possível confirmar a não existência de frente de carbonatação em nenhum dos 3 traços de relação água/aglomerante igual a 0,40 submetidos ao ataque combinado.

**Figura 5-18 - Frente de carbonatação após 18 ciclos de molhagem e secagem e 84 de carbonatação acelerada nos concretos de relação água aglomerante 0,40: a) C40-REF, b) C40-10-0 e c) C40-1-10.**



Nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56, foi possível se perceber o início de uma frente de carbonatação aos 84 dias de ataque. As frentes verificadas nos concretos estudados foram mínimas e não uniformes, dificultando a aferição precisa das mesmas. A Figura 5-19 fica claro que a maior frente de carbonatação foi verificada no concreto C56-1-10, seguido pelo C56-REF e o concreto que apresentou uma menor frente de carbonatação foi a o C56-10-0. Para uma melhor análise, seria interessante prolongar o ensaio, o que não foi possível neste trabalho.

**Figura 5-19 - Frente de carbonatação após 18 ciclos de molhagem e secagem e 84 de carbonatação acelerada nos concretos de relação água aglomerante iguala 0,56: a) C56-REF, b) C56-10-0 e c) C56-1-10.**



Nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40, tanto no ensaio isolado, quanto no ensaio combinado, não verificou-se a presença de frente de carbonatação, portanto, não foi possível avaliar a influência dos cloretos no avanço da frente de carbonatação.

Já nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56, no ensaio isolado foi verificada a existência de frente de carbonatação somente após 140 dias de ensaio, enquanto que nos corpos de prova submetidos primeiramente ao ataque de cloretos e na sequência carbonatação acelerada, foi notada a presença de uma pequena frente de carbonatação após 126 dias de ataque. Tal resultado, indica que no caso dos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56, a presença dos cloretos atuou acelerando o avanço da frente de carbonatação, porém para se ter um maior embasamento e certeza desta afirmação seria necessário que os ensaios fossem prolongados. Aos 126 dias de ataque de cloretos no ensaio combinado, apesar de ter sido notada a presença da frente da carbonatação, esta era pequena e não uniforme, o que tornou inviável se fazer a leitura, portanto, não foi possível se fazer o comparativo dos ensaios isolado e combinado nesta idade.

Deve-se destacar que neste trabalho tanto no ensaio isolado de carbonatação quanto no combinado carbonatação/cloretos não foi controlada a umidade dos corpos de prova por

meio de pesagens para se verificar a constância de massa, os mesmos foram mantidos pelo período pré-determinado em pré-condicionamento e na sequência os ensaios foram iniciados, o que pode ter interferido nos resultados obtidos, visto que o resultado obtido não foi o verificado nas pesquisas experimentais estudadas.

O resultado verificado neste estudo vai contra ao verificado por Malheiro *et al.*, (2014b) e Liu *et al.*, (2017) em que, nessas pesquisas a ação dos cloretos levou a um menor avanço da frente de carbonatação, o que é justificado pela presença do sal em forma cristalina nos poros após a evaporação da água, diminuindo a porosidade e dificultando a entrada dos agentes agressivos.

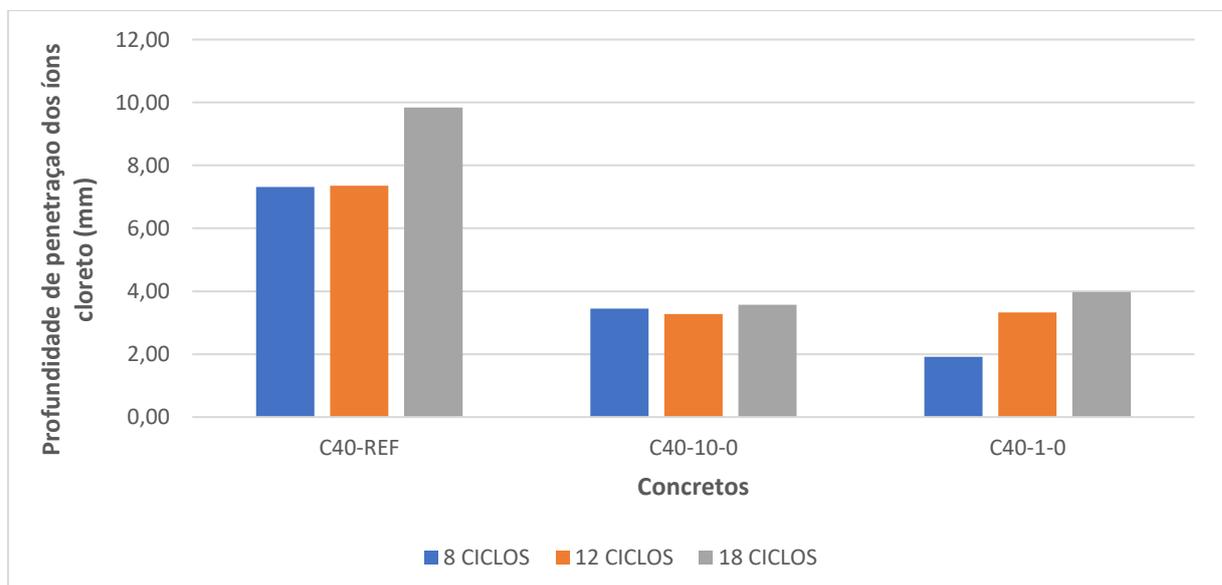
- ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA SEGUIDO DE ATAQUE POR CLORETOS

Na Tabela 5.29 pode-se verificar a profundidade de penetração de cloretos dos concretos referência, com incorporação de 10% de nanosílica e 1% de nanosílica + 10% de sílica, submetidos primeiramente a carbonatação acelerada, com relação água/aglomerante igual a 0,40. Na Figura 5-20, os resultados obtidos são apresentados graficamente.

**Tabela 5.29 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,40, no ensaio combinado de 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**

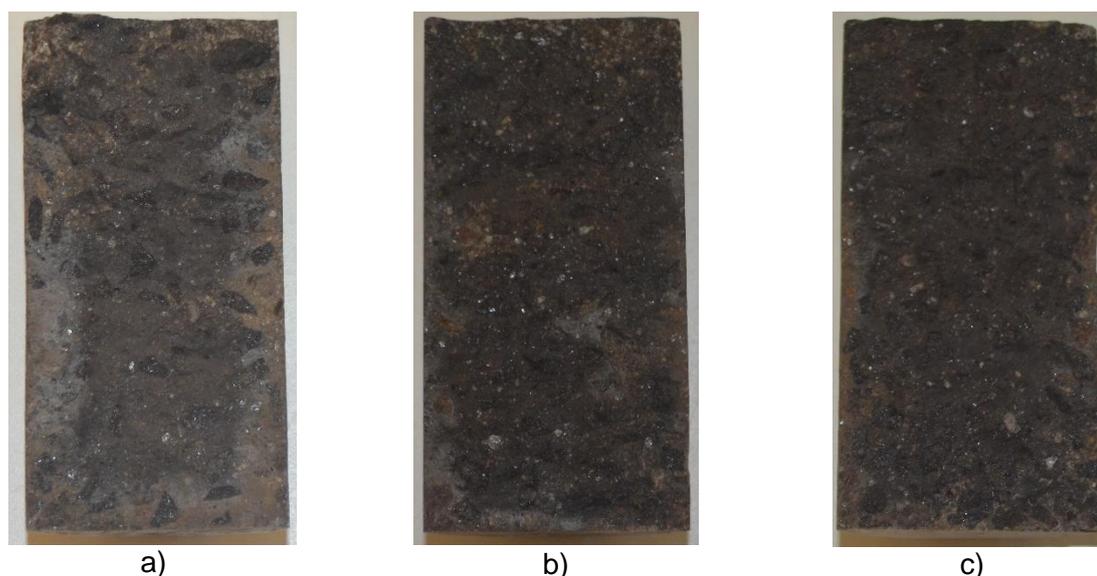
Concreto	Profundidade de penetração (mm)		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C40-REF	7,3	7,4	9,8
C40-10-0	3,4	3,4	3,6
C40-1-10	1,9	3,3	4,0

**Figura 5-20 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**



Na Figura 5-21 são apresentados os resultados para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após serem submetidos aos 84 dias de carbonatação acelerada seguido por 18 ciclos de molhagem e secagem.

**Figura 5-21 - Penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 após 84 de carbonatação acelerada seguido por 18 ciclos de molhagem e secagem: a)C40-REF, b)C40-10-0 e c)C40-1-10.**



Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística para se verificar se o uso de adições minerais acarretou em diferenças significativas nas profundidades de penetração de cloretos. A Tabela 5.30 apresenta o teste de Tukey realizado para a verificação de diferenças significativas no C40-10-0 e C40-1-10 quando comparados ao concreto referência.

**Tabela 5.30- Teste de Tukey para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF) após 84 dias de carbonatação acelerada seguido por 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**

Concretos	Profundidade de penetração dos íons cloreto		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C40-10-0	Sim	Sim	Sim
C40-1-10	Sim	Sim	Sim

obs: sim = há diferença significativa, não = não há diferença significativa.

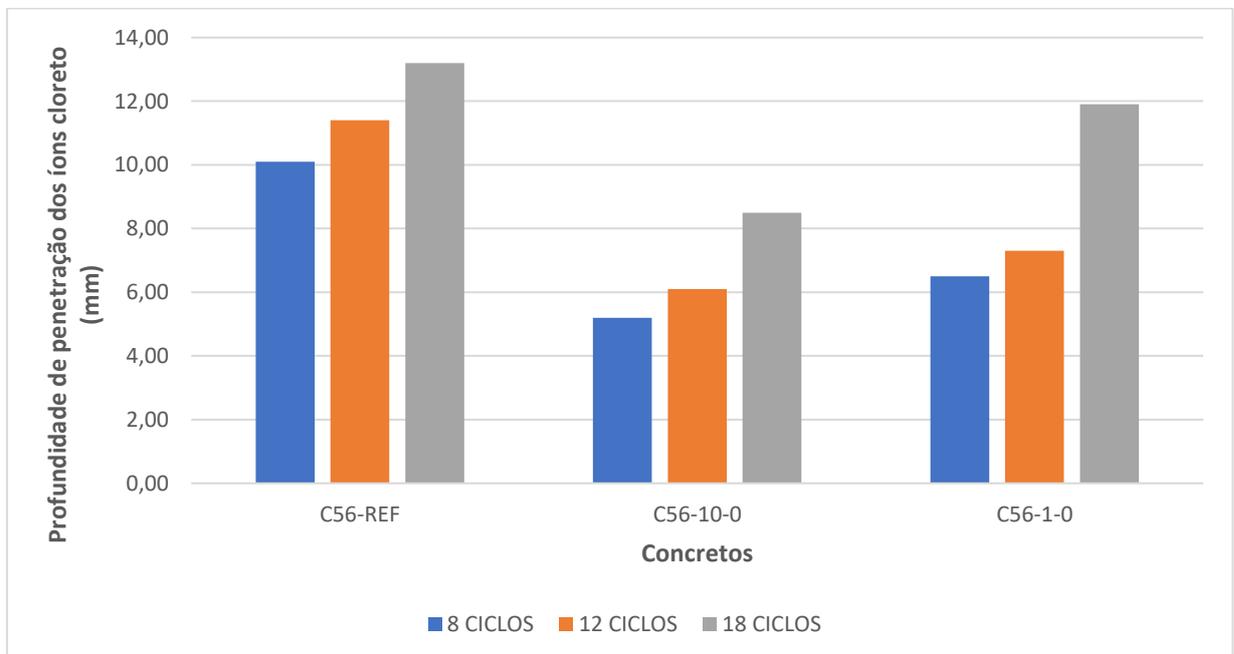
Com os resultados obtidos, conclui-se que a incorporação de adições minerais levou a uma redução significativa na profundidade de penetração de cloretos.

Os resultados verificados nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56, são apresentados detalhadamente na Tabela 5.31 e também são apresentados graficamente na Figura 5-22.

**Tabela 5.31 - Profundidade de penetração de cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,56, no ensaio combinado de 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**

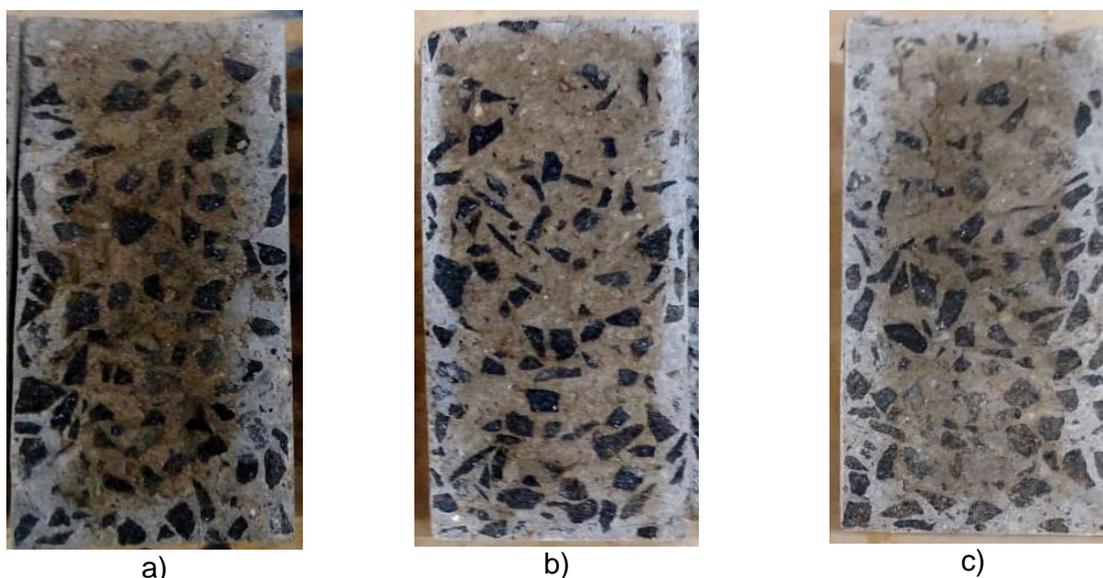
Concreto	Profundidade de penetração (mm)		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C56-REF	10,1	11,4	13,2
C56-10-0	5,2	6,1	8,5
C56-1-10	6,5	7,3	11,9

**Figura 5-22 - Profundidade de penetração dos íons cloreto nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 após 84 dias de carbonatação acelerada e 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**



A Figura 5-23 apresenta os concretos C56-REF, C56-10-0 e C56-1-10, após serem submetidos a 84 dias de carbonatação acelerada seguido de 18 ciclos de molhagem e secagem.

**Figura 5-23 - Penetração de cloretos nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 após 84 de carbonatação acelerada seguido por 18 ciclos de molhagem e secagem: a)C56-REF, b)C56-10-0 e c)C56-1-10.**



Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística para a verificação de diferença significativa dos resultados obtidos, quando comparados ao concreto referência, C56-REF (Tabela 5.32).

**Tabela 5.32 - Teste de Tukey para os concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) após 84 dias de carbonatação acelerada seguido por 8, 12 e 18 ciclos de molhagem e secagem.**

Concretos	Profundidade de penetração de cloretos		
	Após 8 ciclos	Após 12 ciclos	Após 18 ciclos
C56-10-0	Sim	Sim	Sim
C56-1-10	Sim	Sim	Sim

Os resultados obtidos nos ensaios isolados e combinados são apresentados na Tabela 5.33. Comparando-se os resultados obtidos nos ensaios isolados e nos ensaios combinados, nota-se que nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40, após 18 ciclos de molhagem e secagem os 3 concretos estudados apresentaram uma menor profundidade de penetração de cloretos no ensaio combinado. O concreto referência (C40-REF) apresentou uma profundidade de penetração 67% menor, o que corresponde 4,7 cm; o concreto C40-10-0 uma penetração aproximadamente 55% menor, redução de 3 cm e o concreto C40-1-10, 49% menor, correspondendo esse valor a uma redução de 4,3 cm. Portanto, nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40 pode-se afirmar que a carbonatação atuou retardando o avanço da profundidade de penetração dos íons cloreto.

**Tabela 5.33 - Comparativo da profundidade de penetração dos íons cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,40, após 18 ciclos de molhagem e secagem nos ensaios isolado e combinado.**

Ensaio realizado	Profundidade de penetração (mm)		
	Após 18 ciclos		
	C40-REF	C40-10-0	C40-1-10
Ensaio isolado	14,5	3,6	8,3
Ensaio combinado	9,8	3,6	4,0

Já nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,56, após os 18 ciclos de molhagem e secagem pode-se perceber que no ensaio combinado que ocorreu diminuição na profundidade de penetração dos íons cloreto no concreto referência (18% menor) e no concreto com incorporação 1% de nanosílica e 10% de sílica (7% menor), porém no concreto com 10% de nanosílica ocorreu um aumento de 4% da profundidade de penetração dos íons cloreto. Portanto, para a relação água/aglomerante igual a 0,56 não foi possível chegar a um resultado conclusivo sobre a influência da carbonatação no avanço da penetração dos íons cloreto.

**Tabela 5.34 - Comparativo da profundidade de penetração dos íons cloretos nos concretos de relação a/agl igual a 0,56, após 18 ciclos de molhagem e secagem nos ensaios isolado e combinado.**

Ensaio realizado	Profundidade de penetração (mm)		
	Após 18 ciclos		
	C40-REF	C40-10-0	C40-1-10
Ensaio isolado	16,0	8,1	12,7
Ensaio combinado	13,2	8,5	11,9

Malheiro et al., (2014a) ao estudarem a influência da carbonatação na penetração dos íons cloreto em argamassas, chegaram a um resultado aproximado. A carbonatação atuou diminuindo a concentração superficial de cloretos e a quantidade de cloretos totais presente ao longo da profundidade dos corpos de prova. As amostras também foram submetidas a ensaio de absorção de água por capilaridade e permeabilidade a água e os menores coeficientes de absorção foram apresentados pelos corpos de prova carbonatados. Tal resultado pode ser fundamentado na densificação dos poros da matriz cimentícia gerada pela carbonatação, o que conseqüentemente reduz a permeabilidade da microestrutura.

Wang *et al.*, 2017 ao estudar a influência da carbonatação no teor de na profundidade de penetração dos íons cloreto observou que concretos carbonatados submetidos

posteriormente ao ataque por íons cloreto apresentaram uma maior profundidade de penetração dos íons cloreto, resultado este que vai de encontro ao verificado neste trabalho. Resultado similar ao verificado por MALHEIRO *et al.*, (2016) no qual concretos carbonatados apresentaram um maior coeficiente de difusão de cloretos do que amostras não carbonatadas. Este resultado pode estar relacionado com a redução da capacidade de fixação dos cloretos e um aumento nos grandes poros capilares causado pela carbonatação.

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 5.5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes considerações:

- Os resultados mais expressivos da adição de nanosílica nas características mecânicas e físicas foram obtidos nos concretos de relação a/agl igual a 0,40 com a adição de 10% de nanosílica, gerando cerca de 30% de aumento na resistência à compressão e redução de 66% na absorção de água por capilaridade, ambos aos 28 dias, em relação ao concreto referência.
- Quanto ao uso combinado da nanosílica coloidal e da sílica ativa, não foram observadas melhorias significativas, de acordo com a análise de variância, na resistência à compressão dos concretos, se comparado ao concreto referência e com 1% de nanosílica. Já na absorção de água por capilaridade, com a uso combinado das adições, pode-se observar queda de 51% no índice de absorção dos concretos de relação a/agl igual a 0,40, comparando-se com o concreto referência, enquanto que, nos concretos de relação a/agl 0,56 não houve diferenças significativas;
- Tanto a utilização isolada de nanosílica, quanto a utilização de nanosílica em combinação com a sílica ativa levaram a reduções significativas na profundidade de penetração de cloretos nos concretos das duas relações água/aglomerante estudadas, quando comparados ao concreto referência. Nos concretos de relação a/agl 0,40, após 18 ciclos, a redução chegou a 50% (concreto com 10% de nanosílica) e 67% (concreto com 1% de nanosílica e 10% de sílica) quando comparado ao concreto referência
- Nos concretos de relação água/aglomerante igual a 0,40, não foi possível avaliar o comportamento dos concretos com adição no que diz respeito a ação do CO<sub>2</sub>, visto que, mesmo após 196 dias submetidos à carbonatação acelerada, nenhum dos traços estudados apresentou frente de carbonatação.
- No que diz respeito a influência dos cloretos na carbonatação dos concretos, para se entender melhor esse fenômeno deve-se estender o período de ensaio, visto que os concretos de relação 0,40 não apresentaram frente de

carbonatação durante todo o período e nos concretos de relação 0,56 a frente de carbonatação surgiu em idades mais avançadas de ensaio, não sendo possível estender os ensaios por um período maior. Além disso, deve ser feito o controle da umidade dos corpos de prova antes de serem submetidos aos ensaios, pois este é um fator que pode ter influenciado dos resultados obtidos.

- O CO<sub>2</sub> atuou dificultando a penetração de cloretos nos concretos, nos 3 traços estudados, independente da relação água/aglomerante ser 0,40 ou 0,56, ou seja, contribui para uma maior durabilidade das estruturas de concreto frente a corrosão por cloretos. Esse resultado é justificado pela densificação dos poros da matriz cimentícia gerada pelo processo de carbonatação.
- A incorporação de 10% de nanosílica em substituição ao cimento no concreto foi o teor que apresentou o melhor desempenho nas propriedades mecânica, física e de durabilidade frente à ação dos cloretos e do CO<sub>2</sub>.

## 5.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões obtidas, apresenta-se algumas sugestões para continuidade desta pesquisa:

- Estudar diferentes teores de sílica ativa em combinação com a nanosílica;
- Prolongar o tempo de exposição aos agentes agressivos, para uma melhor análise da ação combinada do CO<sub>2</sub> e cloretos;
- Determinar o teor de cloretos dos concretos com a incorporação de nanosílica;
- Avaliar a profundidade de carbonatação acelerada dos concretos, de acordo com as recomendações da ISO 1920-12:2015.

# REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7681**: Calda de cimento para injeção. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro. 2012.
- ABNT. **NBR 15575-1 Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais** Rio de Janeiro, 2013.
- ALMEIDA, F. DO C. R.; SALES, A. Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: ELSEVIER (Ed.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: 2014, 2014. p. 51–73.
- ANDRADE, D. DA S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com incorporação de nano sílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2017.
- AREL, H. S.; THOMAS, B. S. The effects of nano- and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks. **Results in Physics**, v. 7, p. 843–851, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento** Rio de Janeiro, 2014.
- AVELDAÑO, R. R.; ORTEGA, N. F. Characterization of concrete cracking due to corrosion of reinforcements in different environments. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 630–637, 2011.
- BACKUS, J.; MCPOLIN, D. Effect of Cyclic Carbonation on Chloride Ingression in GGBS Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 7, p. 1–6, 2016.
- BIANCHI, Q. Application of nano-silica in concrete. 2014.
- CAMACHO, G. et al. Ação Combinada da Carbonatação e dos Iões Cloreto em Betões com Cinzas Volantes. 2016.
- CAMACHO, G. N. S. A Ação Combinada da Carbonatação e dos Cloretos: Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos em Betões Carbonatados. p. 149, 2015.
- CAMPOS NETO, T. F.; BORTOLACCI GEYER, A. L.; GEYER, A. L. B. EFEITOS DO USO DE ADITIVO COM NANOSÍLICA EM SUSPENSÃO COLOIDAL NA CONSISTÊNCIA E RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 2, 16 maio 2017.
- CASTRO, A.; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 31, 2016.

CHANG, H. Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions. 2017.

CHANG, H.; MU, S.; FENG, P. Influence of carbonation on "maximum phenomenon" in surface layer of specimens subjected to cyclic drying-wetting condition. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 95–109, 2018.

CHITHRA, S.; KUMAR, S. R. R. S.; CHINNARAJU, K. The effect of Colloidal Nano-silica on workability , mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 794–804, 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261–309.

DU, H.; DU, S.; LIU, X. Durability performances of concrete with nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 705–712, 30 dez. 2014.

EHSANI, A.; NILI, M.; SHAABANI, K. Effect of Nanosilica on the Compressive Strength Development and Water Absorption Properties of Cement Paste and Concrete Containing Fly Ash. **KSCE Journal Of Civil Engineering**, v. 21, p. 1854–1855, 2017.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: IBRACON (Ed.). **Concreto. Ensaio Pesquisa e Realizações**. São Paulo: 2005, 2005. p. 829–855.

FLORES, Y. C. et al. Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 524–530, 15 ago. 2017.

GARG, R.; BANSAL, M.; AGGARWAL, Y. Strength, Rapid Chloride Penetration and Microstructure Study of Cement Mortar Incorporating Micro and Nano Silica. **Int. J. Electrochem. Sci**, v. 11, p. 3697–3713, 2016.

GÓMEZ-ZAMORANO, L. Y.; CASTILLO-LINTON, C. E. Modificação das propriedades de matrizes cimentícias através da adição de partículas de nanosílica. **Revista Alconpat**, 2016.

HARTMANN, C. et al. Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos. In: IBRACON (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: 2011, 2011. p. 347–380.

HEIKAL, M.; AL-DUAIJ, O. K.; IBRAHIM, N. S. Microstructure of composite cements containing blast-furnace slag and silica nano-particles subjected to elevated thermally treatment temperature. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 1067–1077, 15 set. 2015.

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1993.

HENDI, A. et al. Simultaneous effects of microsilica and nanosilica on self-consolidating concrete in a sulfuric acid medium. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 192–205, 2017.

ISFAHANI, F. T. et al. Effects of Nanosilica on Compressive Strength and Durability Properties of Concrete with Different Water to Binder Ratios. v. 2016, 2016.

JANG, J. G. et al. Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration. 2016.

JIN, M. et al. Degradation of concrete with addition of mineral admixture due to free chloride ion penetration under the effect of carbonation. **Corrosion Science**, abr. 2018.

JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M. A. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 818–831, 2017.

KAVKANI, H. R. S.; MORTEZAEI, A. R.; NAGHIZADEH, R. The effect of metakaolin, silica

fume and nanosilica on the mechanical properties and microstructure of cement mortar. **Iranian Journal of Materials Science & Engineering**, v. 13, n. 2, p. 51–61, 2016.

KHALOO, A.; MOBINI, M. H.; HOSSEINI, P. Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 188–201, 15 jun. 2016.

LAND, G.; STEPHAN, D. Controlling cement hydration with nanoparticles. **Cement and Concrete Composites**, v. 57, p. 64–67, 1 mar. 2015.

LI, L. G. et al. Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 337–347, 2017a.

LI, L. G. et al. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 229–238, 1 jun. 2017b.

LI, L. G. et al. Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 622–632, 2018.

LIU, J. et al. Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. **Corrosion Science**, v. 112, p. 364–372, 1 nov. 2016a.

LIU, J. et al. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 217–225, 2017.

LIU, W. et al. Carbonation of concrete made with dredged marine sand and its effect on chloride binding. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 1–9, 2016b.

MALHEIRO, R. et al. Durabilidade do betão tendo em conta a ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto. [s.d.].

MALHEIRO, R. et al. Carbonation front progress in mortars containing fly ash considering the presence of chloride ions. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 214–221, 2015.

MALHEIRO, R. L. M. C. et al. Avaliação de matriz cimentícia contendo cinzas volantes frente à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto. **JPEE 2014 - 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas**, p. 1–14, 2014a.

MALHEIRO, R. L. M. C. et al. Influência dos iões cloreto sobre o desenvolvimento da frente de carbonatação em argamassas com cinzas volantes. **X Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas (CINPAR 2014)**, p. 1–10, 2014b.

MALHEIRO, R. L. M. C. et al. Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto. **Encontro Nacional Betão Estrutural 2016 (BE2016)**, p. 1–8, 2016.

MASSANA, J. et al. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 93–103, 2018.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4. ed. São Paulo: 2014, 2014.

MENDOZA-REALES, O. A.; SIERRA-GALLEGO, G.; TOBÓN, J. I. The mechanical properties of Portland cement mortars blended with carbon nanotubes and nanosilica: A study by experimental design Propiedades mecánicas de morteros de cemento Portland adicionados con nanotubos de carbono y nanosilica: Estudio por diseño. **DYNA**, v. 83, n. 198, p. 136–141, 2016.

MONTEMOR, M. F. et al. Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 45–53, 2002.

NARESH, K.; DADAPEER, A. B. S. A STUDY ON THE PROPERTIES OF HIGH STRENGTH

CONCRETE BY USING THE NANO MATERIALS. **International Research Journal of Engineering and Tecchnology**, v. 4, n. 5, p. 2889–2894, 2017.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. In: IBRACON (Ed.). **. Concreto. Ensaio Pesquisa e Realizações Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: 2005, 2005. p. 793–827.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: 2016, 2015.

NILI, M.; EHSANI, A.; SHABANI, K. Influence of Nano-SiO<sub>2</sub> and Microsilica on Concrete Performance. **Proceedings Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, n. April, p. 7, 2010.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Hydration and Carbonation of Pozzolanic Cements. **ACI Materials Journal I**, v. 89, 1992.

PATTALI, A.; MATHEW, B. An Experimental Investigation on Strength Properties of Concrete Containing Micro-Silica and Nano-Silica. **International Research Journal of Engineering and Technology**, p. 2395–56, 2017.

PAULETTI, C. et al. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. n. 4, p. 7–20, 2007.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: IBRACON (Ed.). **. Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: 2011, 2011. p. 585–614.

PEREIRA, F., C. **Estudo da carbonatação de concretos com adição de nanosílica**. 2019. 111p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019

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

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. **Desempenho, Durabilidade e Vida útil das Edificações: Abordagem Geral**. [s.l.] Karl Steinhauser, 2013. v. 1

RAMEZANIANPOUR, A. A.; MOEINI, M. A. Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 611–621, 2018.

RAO, S.; SILVA, P.; DE BRITO, J. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>). **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 508–517, out. 2015.

RAPHAELE, M.; CAMÕES, A.; MEIRA, G. BEHAVIOUR OF CONCRETE UNDER SEVERE ENVIRONMENT -EFFECT OF CARBONATION ON THE CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION TEST. **Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials**, v. 48, n. 1, p. 64–69, 2018.

RIBEIRO, D. V. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ELSEVIER (Ed.). **. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: 2014, 2014. p. 37–50.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto. In: ELSEVIER (Ed.). **. Corrsão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: 2014, 2014. p. 87–118.

RUPASINGHE, M. et al. Investigation of strength and hydration characteristics in nano-silica incorporated cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 17–30, 2017.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. 2 — D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1703–1712, 1 dez. 1995.

- SAID, A. M. et al. Properties of concrete incorporating nano-silica. 2012.
- SANCHEZ, F.; SOBOLEV. K. Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 2060-2071, 2010
- SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos : efeito da adição da nanosílica.** [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 28 mar. 2018.
- SCHMALZ, R.; FERREIRA, F. G. DA S.; QUARCIONI, V. A. **Estudo de argamassas com incorporação de sílica ativa e nanosílica.** [s.l.] Karl Steinhauser, 2017. v. 1
- SHARMA, U. et al. Effect of particle size of nanosilica on microstructure of C-S-H and its impact on mechanical strength. *Cement and Concrete Composites*, v. 97, p. 312–321, 1 mar. 2019.
- SILVA, F. G. DA. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** [s.l.: s.n.].
- SILVA, T. J. DA. Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto. In: IBRACON (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: [s.n.]. p. 809–848.
- SINGH, L. P. et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 1069–1077, 1 out. 2013.
- THANGAVEL, K.; RENGASWAMY, N. S. Relationship between Chloride/hydroxide Ratio and Corrosion Rate of Steel in Concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 20, p. 283–292, 1998.
- VIEIRA, F. P. et al. ESTUDOS DE DURABILIDADE EM CONCRETOS E ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE MICROSSÍLICA. 2007.
- WANG, Y. et al. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. *Construction and Building Materials*, v. 140, p. 173–183, 2017.
- YE, H. et al. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 457–463, 1 jun. 2016.
- ZAHEDI, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*, v. 78, p. 354–361, 1 mar. 2015.
- ZHANG, D.; SHAO, Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 516–526, 1 out. 2016.
- ZHU, X. et al. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 110, p. 369–380, 1 maio 2016.

## **APÊNDICES**

## **APÊNDICE A**

### **RESISTÊNCIA MECÂNICA – ANÁLISES ESTATÍSTICAS**

Condições:  $a/agl = 0,40$  e idade = 7 dias.

**Tabela A.1 - Resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 7 dias.**

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	C40-REF	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
1	54,67	58,66	66,94	73,48	54,89
2	52,12	54,13	65,36	65,92	55,59
3	54,33	55,21	69,49	70,31	58,13

**Tabela A.2 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 7 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
C40-REF	3	161,12	53,71	1,92
C40-1-0	3	168,00	56,00	5,60
C40-5-0	3	201,79	67,26	4,34
C40-10-0	3	70,31	69,90	14,41
C40-1-10	3	58,13	56,20	2,91

**Tabela A.3 - ANOVA para os concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 7 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	656,89	4	164,22	28,14	2,021E-5
Dentro dos grupos	58,35	10	5,84		
Total	715,23	14			

**Conclusão: Rejeitar  $H_0$** , ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações são significativamente diferentes

**Tabela A.4 - Teste de Tukey para os concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 7 dias.**

Concretos	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
C40-REF	não	Sim	Sim	Não
C40-1-0	-	Sim	Sim	Não
C40-5-0	-	-	Não	Sim
C40-10-0	-	-	-	Sim

Obs: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições:  $a/agl = 0,40$  e idade = 28 dias.

**Tabela A.5 - Resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias.**

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	C40-REF	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
1	54,40	58,16	71,83	74,99	62,02
2	56,51	56,94	70,09	68,44	63,02
3	57,95	59,51	67,53	76,92	59,51

**Tabela A.6 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
C40-REF	3	168,86	56,29	3,19
C40-1-0	3	174,61	58,20	1,65
C40-5-0	3	209,45	69,82	4,68
C40-10-0	3	220,35	73,45	19,76
C40-1-10	3	184,55	61,52	3,27

**Tabela A.7 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	666,88	4	166,72	26,61	3,089E-5
Dentro dos grupos	65,09	10	6,51		
Total	731,97	14			

**Conclusão: Rejeitar  $H_0$** , ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações são significativamente diferentes.

**Tabela A.8 - Teste de Tukey para os concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias.**

Concretos	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
C40-REF	Não	Sim	Sim	Não
C40-1-0		Sim	Sim	Não
C40-5-0			Não	Sim
C40-10-0				Sim

Obs: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições:  $a/agl = 0,40$  e idade = 63 dias.

**Tabela A.9 - Resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 63 dias.**

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	C40-REF	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
1	64,15	71,12	71,40	85,82	75,54
2	69,99	65,68	66,33	82,41	73,61
3	62,64	58,29	75,43	82,86	75,03

**Tabela A.10 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 63 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
C40-REF	3	196,78	65,59	15,07
C40-1-0	3	195,09	65,03	41,47
C40-5-0	3	213,16	71,05	20,79
C40-10-0	3	251,09	83,70	3,43
C40-1-10	3	224,18	74,73	1,00

**Tabela A.11 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 63 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	704,30	4	176,07	10,77	0,0012
Dentro dos grupos	163,52	10	16,35		
Total	867,83	14			

**Conclusão: Rejeitar  $H_0$** , ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações são significativamente diferentes.

**Tabela A.12 - Teste de Tukey para os concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 63 dias.**

Concretos	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
C40-REF	Não	Não	Sim	Não
C40-1-0	-	Não	Sim	Não
C40-5-0	-	-	Sim	Não
C40-10-0	-	-	-	Não

Obs: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

Condições:  $a/agl = 0,56$  e idade = 7 dias.

**Tabela A.13 - Resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 7 dias.**

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	C56-REF	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
1	38,68	36,99	39,17	42,92	37,36
2	39,81	39,68	41,69	41,92	38,71
3	39,52	39,90	39,74	41,55	37,45

**Tabela A.14 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 7 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
C56-REF	3	118,01	39,34	0,34
C56-1-0	3	116,57	38,86	2,63
C56-5-0	3	120,60	40,20	1,75
C56-10-0	3	126,39	42,13	0,50
C56-1-10	3	113,52	37,84	0,57

**Tabela A.15 - ANOVA para os concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 7 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	31,36	4	7,84	6,77	0,0066
Dentro dos grupos	11,57	10	1,16		
Total	42,94	14			

**Conclusão: Rejeitar  $H_0$** , ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações são significativamente diferentes.

**Tabela A.16 - Teste de Tukey para os concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 7 dias.**

Concretos	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
C56-REF	não	Não	Não	Não
C56-1-0	-	Não	Sim	Não
C56-5-0	-	-	Não	Não
C56-10-0	-	-	-	Sim

Obs: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições:  $a/agl = 0,56$  e idade = 28 dias.

**Tabela A.17 - Resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 28 dias.**

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	C56-REF	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
1	45,18	45,60	45,49	46,50	47,41
2	45,30	46,06	50,15	46,67	43,92
3	47,41	47,36	45,95	50,14	47,27

**Tabela A.18 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 28 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
C56-REF	3	137,89	45,96	1,57
C56-1-0	3	139,02	46,34	0,83
C56-5-0	3	141,59	47,20	6,59
C56-10-0	3	143,31	47,77	4,22
C56-1-10	3	138,60	46,20	3,90

**Tabela A.19 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 28 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Gráus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	6,64	4	1,73	0,507	0,732
Dentro dos grupos	34,25	10	3,42		
Total	41,19	14			

**Conclusão: Aceitar  $H_0$** , ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações não são significativamente diferentes.

- Condições:  $a/agl = 0,56$  e idade = 63 dias.

**Tabela A.20 - Resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 63 dias.**

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	C56-REF	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
1	46,37	48,08	53,45	52,82	48,51
2	47,21	48,04	53,34	51,30	48,84
3	46,34	50,25	53,12	53,58	50,38

**Tabela A.21 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 63 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
C56-REF	3	139,92	46,78	0,24
C56-1-0	3	146,38	49,15	1,59
C56-5-0	3	159,91	53,30	0,03
C56-10-0	3	157,70	52,44	1,35
C56-1-10	3	147,73	49,24	1,00

**Tabela A.22 - Valores estatísticos descritivos de resistência à compressão dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 63 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	66,98	4	16,74	16,897	5,74248E-4
Dentro dos grupos	7,92	8	0,99		
Total	74,91	12			

**Conclusão: Rejeitar  $H_0$** , ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações são significativamente diferentes.

**Tabela A.23 - Teste de Tukey para os concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 63 dias.**

Concretos	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
C56-REF	não	Sim	Sim	Não
C56-1-0		Sim	Sim	Não
C56-5-0			Não	Sim
C56-10-0				Sim

Obs: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

## **APÊNDICE B**

### **ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE – ANÁLISES ESTATÍSTICAS**

- Condições:  $a/agl = 0,4$ , idade = 28 dias e leitura = 72h.

**Tabela B.1 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias após 72 horas.**

Nº CP	Absorção capilar (g/cm <sup>2</sup> )				
	C40-REF	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
1	0,634	0,683	0,440	0,209	0,303
2	0,650	0,581	0,423	0,197	0,298
3	0,569	0,584	0,405	0,217	0,312

**Tabela B.2 - Valores estatísticos descritivos de absorção de água dos concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (g/cm <sup>2</sup> )	Média (g/cm <sup>2</sup> )	Variância ((g/cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> )
C40-REF	3	1,853	0,618	0,002
C40-1-0	3	1,847	0,616	0,003
C40-5-0	3	1,268	0,423	0,000
C40-10-0	3	0,623	0,208	0,000
C40-1-10	3	0,913	0,304	0,000

**Tabela B.3 - ANOVA para os concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	0,405	4	0,101	89,344	8,76229E-8
Dentro dos grupos	0,011	10	0,001		
Total	0,416	14			

**Conclusão:** ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações são significativamente diferentes. **Rejeitar H0.**

**Tabela B.4 - Teste de Tukey para os concretos de relação  $a/agl$  0,40 com 28 dias.**

Concretos	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
C40-REF	não	Sim	Sim	Sim
C40-1-0	-	Sim	Sim	Sim
C40-5-0	-	-	Sim	Sim
C40-10-0	-	-	-	Sim

Obs: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições:  $a/agl = 0,56$ , idade = 28 dias e leitura = 72h.

**Tabela B.5 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com relação  $a/agl$  0,56 com 28 dias após 72 horas.**

Nº CP	Absorção capilar (g/cm <sup>2</sup> )				
	C40-REF	C40-1-0	C40-5-0	C40-10-0	C40-1-10
1	1,398	1,433	1,258	0,755	1,347
2	1,447	1,406	1,185	0,782	1,374
3	1,400	1,385	1,179	0,735	1,306

**Tabela B.6 - Valores estatísticos descritivos de absorção de água dos concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 28 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (g/cm <sup>2</sup> )	Média (g/cm <sup>2</sup> )	Variância ((g/cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> )
C56-REF	3	4,245	1,415	0,000
C56-1-0	3	4,224	1,408	0,000
C56-5-0	3	3,612	1,207	0,002
C56-10-0	3	2,272	0,757	0,001
C56-1-10	3	4,027	1,342	0,001

**Tabela B.7 - ANOVA para os concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 28 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F calc.	p-valor
Entre grupos	0,914	4	0,228	212,268	1,2699E-9
Dentro dos grupos	0,011	10	0,001		
Total	0,924	14			

**Conclusão:** ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , as médias das populações são significativamente diferentes. **Rejeitar H0.**

**Tabela B.8 - Teste de Tukey para os concretos de relação  $a/agl$  0,56 com 28 dias.**

Concretos	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
C56-REF	não	Sim	Sim	Não
C56-1-0		Sim	Sim	Não
C56-5-0			Sim	sim
C56-10-0				sim

Obs: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.