

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

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE
NANOSÍLICA**

Fernando do Carmo Pereira

São Carlos
2019

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

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE
NANOSÍLICA**

Fernando do Carmo Pereira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^a. Dr^a. 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 do candidato Fernando do Carmo Pereira, realizada em 29/04/2019:

Prof. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira
UFSCar

Prof. Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo
UnB

Prof. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro
EESC/USP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Valdirene Maria Silva Capuzzo e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

À minha avó Rosa,
por todo seu amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por sempre iluminar meu caminho, à Ele toda honra e glória.

Aos meus pais, Tomaz e Maria, pela educação, amor, confiança e apoio. À minha irmã Elisângela e ao meu cunhado Douglas, pela amizade e incentivo. Aos meus sobrinhos Giovana e Tarcísio, pela alegria e motivação.

À minha orientadora, professora Fernanda Giannotti, por toda a atenção dedicada a mim, pelo incentivo, empenho e compreensão que conduziu a orientação deste trabalho.

Às professoras Alessandra Castro e Valdirene Capuzzo, pelas valiosas contribuições.

Ao professor Eduardo Pereira, pelo auxílio na realização dos ensaios de DSC, à Unilago por disponibilizar o laboratório de Análises Químicas. À Carolina, aos técnicos, e à professora Valdirene pelo auxílio no desenvolvimento dos ensaios de carbonatação realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais da UnB.

Às empresas que contribuíram com os materiais utilizados nessa pesquisa: Dow Corning Silício do Brasil pelo fornecimento da sílica ativa; Akzonobel, pela nanosílica; GCP Applied Technologies pelo aditivo superplastificante.

Ao técnico de laboratório e amigo José Roberto, por todo o apoio, dedicação e proatividade com que colaborou na realização dos ensaios desenvolvidos neste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar, pela troca de experiências, em especial à Mariane com quem compartilhei a maioria dos momentos deste trabalho.

Aos amigos do Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil, Cleber, Keyzo e Taciane por todo companheirismo.

À Dieni, Danilo, Julia e Luana, amigos que sempre me apoiaram, tornando mais tranquila essa jornada.

Por fim, agradeço à todos que de certa forma colaboram para a realização deste trabalho.

PEREIRA, Fernando do Carmo. **Estudo da carbonatação de concretos com adição de nanosílica**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

A degradação de estruturas de concreto armado reflete em fatores econômicos e ambientais. Assim, o anseio de minimizá-la motiva pesquisas recentes, que visam adicionar nanomateriais à matriz cimentícia, buscando alterar e melhorar as suas propriedades, entre elas a durabilidade. A nanosílica é uma adição mineral com diâmetro entre 3 a 150 nm, que interage de forma química e física nas reações de hidratação do cimento e na microestrutura do concreto. Sua utilização ainda demanda conhecimento com relação ao efeito de sua incorporação a compósitos cimentícios, como por exemplo, sua influência na carbonatação do concreto. A penetração de CO_2 diminui a sua alcalinidade e gera a despassivação da armadura, podendo essa vir a correr na presença de oxigênio e água, comprometendo a durabilidade da estrutura. Neste contexto, o presente trabalho avalia a resistência à carbonatação acelerada em concretos com adição de nanosílica, quando submetidos ao ataque de CO_2 . Foram moldados traços com duas relações água/aglomerante distintas, 0,40 e 0,56. O aditivo superplastificante foi incorporado apenas nos concretos com relação água/aglomerante igual 0,40 a fim de garantir a consistência estabelecida (230 ± 10 mm). Além de um traço referência (sem adição mineral), foram moldados corpos de prova cilíndricos (50×100 mm) com diferentes teores de nanosílica (1%, 5% e 10%), e também um traço com 1% de adição de nanosílica em conjunto com 10% de sílica ativa. Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados em duas condições diferentes, utilizou-se uma câmara com $15 \pm 2\%$ de concentração de CO_2 , umidade relativa de $75 \pm 5\%$ e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, e outra com concentração de $3,0 \pm 0,5\%$ de dióxido de carbono, umidade relativa de $65 \pm 5\%$, e temperatura de $27 \pm 2^\circ\text{C}$. Em alguns traços, também foi avaliado o pH da solução de poro simulada e realizados ensaios microestruturais em pasta. Os resultados dos ensaios de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade indicam um melhor desempenho dos concretos com relação água/aglomerante igual a 0,40 e o traço com 10% de adição de nanosílica se mostrou mais eficiente. Nos ensaios de durabilidade somente os corpos de prova com relação água/aglomerante igual 0,56 apresentaram frente de carbonatação, independente da concentração de CO_2 a que foram submetidos, e houve um maior avanço do ataque de dióxido de carbono no traço com adição de 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa. A avaliação pH da solução de poro simulada possibilitou observar a nítida diferença entre os valores da região carbonatada com o interior do corpo de prova ainda não carbonatado e os ensaios microestruturais, indicam maior quantidade de hidróxido de cálcio no traço referência. Por fim, conclui-se que em maiores relações água/aglomerante, o efeito que provocam na porosidade dos concretos, pode se sobrepor ao efeito da adição mineral de refinamento dos poros, porém, nota-se a influência dessas adições nas propriedades mecânicas e físicas, pois nos traços com relação água/aglomerante igual a 0,56, apesar de melhora-las, a adição de nanosílica prejudica a resistência do concreto frente ao ataque de CO_2 , devido as reações pozolônicas que resultam em uma menor reserva alcalina, e assim, colaboram para o maior avanço da frente de carbonatação.

Palavras-chave: Concreto, durabilidade, carbonatação, nanosílica.

ABSTRACT

PEREIRA, Fernando do Carmo. **Study of carbonation of concrete with addition of nanosilica**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

The degradation of reinforcing concrete structures reflects in economic and environmental factors. Thus, the desire to minimize it motivates recent research, which aims to add nanomaterials to the cement matrix, seeking to change and improve its properties, among them durability. Nanosilica is a mineral addition with a diameter ranging from 3 to 150 nm, which interacts chemically and physically in the hydration reactions of the cement and in the microstructure of the concrete. Its use still demands knowledge regarding the effect of its incorporation in cementitious composites, such as its influence on the carbonation of the concrete. The penetration of CO₂ decreases its alkalinity and generates the disassembling of the armature, which may come running in the presence of oxygen and water, compromising the durability of the structure. In this context, the present work evaluates the resistance to accelerated carbonation in concrete with addition of nanosilica, when submitted to the attack of CO₂. Traces were formulated with two different water / binder ratios, 0,40 and 0,56. The superplasticizer additive was incorporated only in concretes with water binder ratio equal to 0,40 in order to guarantee the established consistency (230 ± 10 mm). In addition to a reference trait (without mineral addition), cylindrical test specimens (50x100 mm) with different nanosilica contents (1%, 5% and 10%) were molded, as well as a trace with 1% addition of nanosilica together with 10% active silica. The accelerated carbonation tests were performed under two different conditions, a chamber with 15 ± 2% CO₂ concentration, relative humidity of 75 ± 5% and temperature of 23 ± 2 °C, and another with a concentration of 3,0 ± 0,5% carbon dioxide, relative humidity 65 ± 5%, and temperature 27 ± 2 °C. In some traits, the pH of the simulated pore solution was also evaluated and microstructural pulp assays performed. The results of the mechanical strength and water absorption tests by capillarity indicate a better performance of the concretes with water/binder ratio equal to 0,40 and the trace with 10% addition of nanosilica showed to be more efficient. In the tests of durability only the specimens with water / binder ratio equal to 0,56 presented carbonation front, independent of the concentration of CO₂ to which they were submitted, and there was a greater advance of the attack of carbon dioxide in the trace with addition of 1% of nanosilica and 10% of active silica. The pH evaluation of the simulated pore solution made it possible to observe the clear difference between the values of the carbonate region and the interior of the still uncarbonated test specimen and the microstructural tests indicate a higher amount of calcium hydroxide in the reference trace. Finally, it can be concluded that in larger water/binder ratios, the effect of the porosity on the porosity of the concrete may overlap with the effect of the mineral addition of pore refinement, but the influence of these additions on the mechanical and physical properties, because in the traces with relation water/binder equal to 0,56, in spite of improving them, the addition of nanosilica damages the resistance of the concrete against the attack of CO₂, due to the pozzolanic reactions that result in a lower alkaline reserve, and thus, collaborate to further advance the carbonation front.

Key-words: Concrete, durability, carbonation, nanosilica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa da incidência e dos custos relativos à corrosão das armaduras em alguns países.	15
Figura 2.1 - Representação do processo de carbonatação.	18
Figura 2.2 - Mecanismo proposto para a carbonatação acelerada.	19
Figura 2.3 - Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto.	20
Figura 2.4 - Fatores intervenientes na carbonatação do concreto.	23
Figura 2.5 - Representação esquemática da difusão do CO ₂	24
Figura 2.6 - Medida da frente de carbonatação.	27
Figura 2.7 - coleta do pó (a) e análise da solução (b).	28
Figura 2.8 - Partículas de sílica e cimento.	30
Figura 2.9 - Relação entre o tamanho e a área superficial das partículas no concreto.	31
Figura 2.10 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanosílica em concretos e argamassas.	31
Figura 2.11 - Reações de hidratação do cimento na presença de nanosílica.	33
Figura 2.12 - Efeito da adição de nanosílica na quantidade de hidróxido de cálcio presente no concreto.	33
Figura 2.13 - Efeito da adição de nanosílica nos produtos da hidratação do cimento.	34
Figura 2.14 - Efeito da adição de nanosílica nos produtos da hidratação do cimento.	35
Figura 3.1 - Etapas do programa experimental.	41
Figura 3.2 - Procedimento de mistura das pastas.	45
Figura 3.3 - Ensaio de Cone de Marsh.	45
Figura 3.4 - Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante pelo Método AFREM.	46
Figura 3.5 - Ensaio de Miniabatimento: a) molde preenchido com a pasta e b) medição do diâmetro.	47
Figura 3.6 - Ensaio de Consistência: a) concreto após retirada do molde b) área de espalhamento.	47
Figura 3.7 – Procedimento de mistura dos concretos.	48
Figura 3.8 - Ensaio de resistência à compressão dos concretos.	49
Figura 3.9 - 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.	49
Figura 3.10 - Idades de ensaio e tempo de exposição ao CO ₂ (15% de concentração)	50
Figura 3.11 - Idades de ensaio e tempo de exposição ao CO ₂ (3% de concentração)	51
Figura 3.12 – Avaliação da solução de poro simulada: a) centrífuga b) medição do pH.	53
Figura 4.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.	57
Figura 4.2 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.	58
Figura 4.3 - Gráficos Log (T) x Teor de SP %.	63
Figura 4.4 - Curvas da área de espalhamento x tempo.	65
Figura 4.5 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,40.	68
Figura 4.6 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,56.	69
Figura 4.7 - Absorção de água por capilaridade dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 aos 28 dias.	73
Figura 4.8 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com fator a/agl igual a 0,56 aos 28 dias.	74
Figura 4.9 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização dos 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.	75
Figura 4.10 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização dos ensaios de absorção de água pro capilaridade aos 28 dias: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.	76

Figura 4.11 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 15% de concentração de CO ₂ aos 196 dias: a) C40-REF; b) C40-1-0; c) C40-5-0; d) C40-10-0 e e) C40-1-10.	77
Figura 4.12 - Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 15% de concentração de CO ₂	78
Figura 4.13 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 15% de concentração de CO ₂ : a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.	79
Figura 4.14 – Coeficiente de carbonatação (mm/ano ^{0,5}) dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 15% de concentração de CO ₂ aos 196 dias.	80
Figura 4.15 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 3% de concentração de CO ₂ aos 112 dias: a) C40-REF; b) C40-1-0; c) C40-5-0; d) C40-10-0 e e) C40-1-10.	81
Figura 4.16 – Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 3% de concentração de CO ₂	81
Figura 4.17 – Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 3% de concentração de CO ₂ aos 112 dias: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.	83
Figura 4.18 – Coeficiente de carbonatação (mm/ano ^{0,5}) dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 3% de concentração de CO ₂ aos 112 dias.	84
Figura 4.19 – Comparação entre a frente de carbonatação no concreto C56-1-10: a) aos 196 dias com 15% de CO ₂ e b) aos 112 dias com 3% de CO ₂	85
Figura 4.20 - Medida do pH da solução de poro simulada dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, após 140 dias em câmara de carbonatação acelerada (Ensaio com 15% de concentração de CO ₂).	86
Figura 4.21 – Medida do pH da solução de poro simulada dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, após 168 dias em câmara de carbonatação acelerada (Ensaio com 15% de concentração de CO ₂).	87
Figura 4.22 – Medida do pH da solução de poro simulada dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, após 196 dias em câmara de carbonatação acelerada (Ensaio com 15% de concentração de CO ₂).	87
Figura 4.23 – Curvas de DSC: a) relação a/agl igual a 0,40 e b) relação a/agl igual a 0,56.	88
Figura 4.24 – Detalhe do segundo pico das curvas de DSC: a) relação a/agl igual a 0,40 e b) relação a/agl igual a 0,56.	89
Figura 4.25 – Difratograma dos traços: a) C40-REF e b) C56-REF.	90
Figura 4.26 – Difratograma dos traços: a) C40-10-0 e b) C56-10-0.	90
Figura 4.27 – Difratograma dos traços: a) C40-1-10 e b) C56-1-10.	90
Figura 4.28 – Intensidade do pico de portlandita (18,1°): (a) relação a/agl igual a 0,40 (b) relação a/agl igual a 0,56.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficiente de difusão de CO ₂ em vários tipos de estrutura.....	22
Tabela 2.2 - Classificação da agressividade do ambiente.....	23
Tabela 2.3 - Classificação das adições minerais.....	29
Tabela 2.4 - Estudos sobre a incorporação de adições minerais em matrizes cimentícias... 37	
Tabela 2.5 - Condições de ensaio de carbonatação em concretos com adição mineral.....	39
Tabela 3.1 - Condições dos ensaios de carbonatação acelerada.	52
Tabela 4.1 - Propriedades físicas do CP V ARI.....	55
Tabela 4.2 - Propriedades químicas do CP V ARI.	56
Tabela 4.3 - Caracterização do agregado graúdo.	56
Tabela 4.4 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.	57
Tabela 4.5 - Caracterização agregado miúdo.	58
Tabela 4.6 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	58
Tabela 4.7 - Determinação da proporção ideal entre os agregados.	59
Tabela 4.8 - Características físicas e químicas da sílica ativa.....	59
Tabela 4.9 - Principais características físicas da nanosílica.....	60
Tabela 4.10 - Características do aditivo superplastificante.....	60
Tabela 4.11 - Composição dos traços das pastas.....	61
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh.....	62
Tabela 4.13 - Áreas de espalhamento obtidas com o ensaio de Miniabatimento.	64
Tabela 4.14 - Composição dos traços de concreto e consistências obtidas.	66
Tabela 4.15 - Consumo de material dos concretos.	66
Tabela 4.16 - Resistência à compressão dos concretos com 7 dias de idade.....	67
Tabela 4.17 - Resistência à compressão dos concretos com 28 dias de idade.....	67
Tabela 4.18 - Resistência à compressão dos concretos com 63 dias de idade.....	68
Tabela 4.19 - 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.	70
Tabela 4.20 - 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.	70
Tabela 4.21 - 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.	71
Tabela 4.22 - 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.	71
Tabela 4.23 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com 28 dias de idade.	73
Tabela 4.24 - Profundidade de carbonatação (mm) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 e variação da profundidade em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 140, 168 e 196 dias (Ensaio com 15% de concentração de CO ₂).	78
Tabela 4.25 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 140, 168 e 196 dias (ensaio com 15% de concentração de CO ₂).	78
Tabela 4.26 - Profundidade de carbonatação (mm) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 e variação da profundidade em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 28, 56 e 112 dias (Ensaio com 3% de concentração de CO ₂).	82
Tabela 4.27 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 28, 56 e 112 dias (Ensaio com 15% de concentração de CO ₂).....	82
Tabela 4.28 - Compostos identificados nos difratogramas.	91

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 GERAL.....	16
1.2.2 ESPECÍFICOS.....	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 CARBONATAÇÃO.....	18
2.1.1 FATORES INFLUENCIADORES NA CARBONATAÇÃO.....	22
2.1.2 PARÂMETROS DE ENSAIO.....	25
2.2 O EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS NA CARBONATAÇÃO.....	28
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	40
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	43
3.1.1 CIMENTO PORTLAND.....	43
3.1.2 AGREGADO GRAÚDO.....	43
3.1.3 AGREGADO MIÚDO.....	43
3.1.4 SÍLICA ATIVA.....	44
3.1.5 NANOSÍLICA.....	44
3.1.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	44
3.1.7 ÁGUA.....	44
3.2 COMPATIBILIDADE ENTRE AGLOMERANTES E ADITIVO.....	44
3.2.1 CONE DE MARSH.....	44
3.2.2 MINIABATIMENTO.....	46
3.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVA.....	47
3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS.....	48
3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	48
3.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	49

3.5	DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DO CO₂	50
3.5.1	AVALIAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO.....	52
3.5.2	AVALIAÇÃO DO PH DA SOLUÇÃO DE PORO SIMULADA.....	52
3.6	ENSAIOS MICROESTRUTURAIS	53
3.6.1	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)	53
3.6.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	53
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	54
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	55
4.1.1	CIMENTO.....	55
4.1.2	AGREGADO GRAÚDO	56
4.1.3	AGREGADO MIÚDO	57
4.1.4	PROPORÇÃO IDEAL ENTRE OS AGREGADOS GRAÚDO E MIÚDO.....	59
4.1.5	SÍLICA ATIVA.....	59
4.1.6	NANOSÍLICA.....	60
4.1.7	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	60
4.2	COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE AGLOMERANTES E ADITIVO	61
4.2.1	CONE DE MARSH	61
4.2.2	MINIABATIMENTO.....	64
4.3	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	65
4.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS	67
4.4.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	67
4.4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	72
4.5	DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DE CO₂	77
4.5.1	DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO	77
4.5.2	AVALIAÇÃO DO PH DA SOLUÇÃO DE PORO SIMULADA.....	85
4.6	ENSAIOS MICROESTRUTURAIS	88
4.6.1	ANÁLISE POR CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA (DSC).....	88

4.6.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	89
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
5.1	CONCLUSÕES.....	92
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
	REFERÊNCIAS.....	94
	APÊNDICES.....	104

1. INTRODUÇÃO

A construção de estruturas em concreto armado é um dos sistemas construtivos mais utilizados em todo o mundo. Essa associação de dois materiais distintos só é possível devido a aderência presente entre a armadura e o concreto que permite ao aço responder aos esforços de tração, justamente onde o concreto não apresenta bons resultados. O fato de os coeficientes de dilatação térmica de ambos os materiais serem semelhantes e a proteção física e química contra agentes agressivos que o concreto proporciona a armadura também são fatores essenciais.

Com o passar do tempo, houve a deterioração das edificações construídas em concreto armado, e então, surgiu a necessidade de se investir em reparos e reforços dessas estruturas. Por refletir em fatores econômicos e ambientais o aumento da durabilidade das construções fomentou o surgimento de estudos destinados a conhecer os mecanismos de degradação do material, para que se encontre soluções capazes de reduzir custos com reparos e reforços, além de minimizar a geração de resíduos provenientes de reformas e demolições.

A durabilidade é 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”, segundo a norma brasileira, NBR 6118:2014. Também há no Brasil uma abordagem qualitativa, visto que a NBR 15575-1:2013, define durabilidade como a “capacidade da edificação e seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas”.

Branco e Paulo (2012) afirmam que um efetivo controle de qualidade durante o processo de construção é a maneira mais eficiente para garantir a vida útil estimada em projeto. Porém, Mattos (2010) salienta que o setor da construção civil possui uma grande quantidade de variáveis e se desenvolve em um ambiente dinâmico e mutável, o que dificulta esse controle, fazendo assim, com que a durabilidade da estrutura seja afetada pelo surgimento de manifestações patológicas.

Problemas na execução, falta de manutenção e uso diferente do previsto em projeto são fatores que causam manifestações patológicas, assim como, alternativas insuficientes para neutralizar as condições ambientais do local onde a estrutura está inserida. Dentre os

problemas patológicos mais frequentes nas estruturas está a corrosão das armaduras que também se destaca pela gravidade das possíveis consequências.

A corrosão das armaduras sofre influência da ação do dióxido de carbono presente no ar, através do fenômeno conhecido como carbonatação, que consiste na transformação de íons alcalinos em sais de carbonatos. A carbonatação, tem como consequência a redução do pH da solução contida nos poros do concreto, o que causa a despassivação do aço, que sem a película protetora está propenso a corroer, como se estivesse simplesmente exposto a atmosfera (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Dada a importância econômica e ambiental da durabilidade de estruturas de concreto, as adições minerais desempenham um importante papel na busca pela minimização dos efeitos provocados pelos agentes agressivos que causam as manifestações patológicas. De acordo com Dal Molin (2011), as adições minerais, a partir das suas características físicas e químicas, podem proporcionar materiais cimentícios mais duráveis.

No caso da adição de nanosílica ao concreto, Nili, Ehasai e Shabani (2010), Sánchez *et al* (2016), Zanon, Schmalz e Ferreira (2018) afirmam que é possível aumentar a resistência à compressão e diminuir a sua permeabilidade. Dessa forma pode-se utilizar a incorporação dessa adição com o anseio de aumentar a durabilidade de concretos, visto que é possível melhorar o sistema de poros dificultando a permeabilidade de agentes agressores.

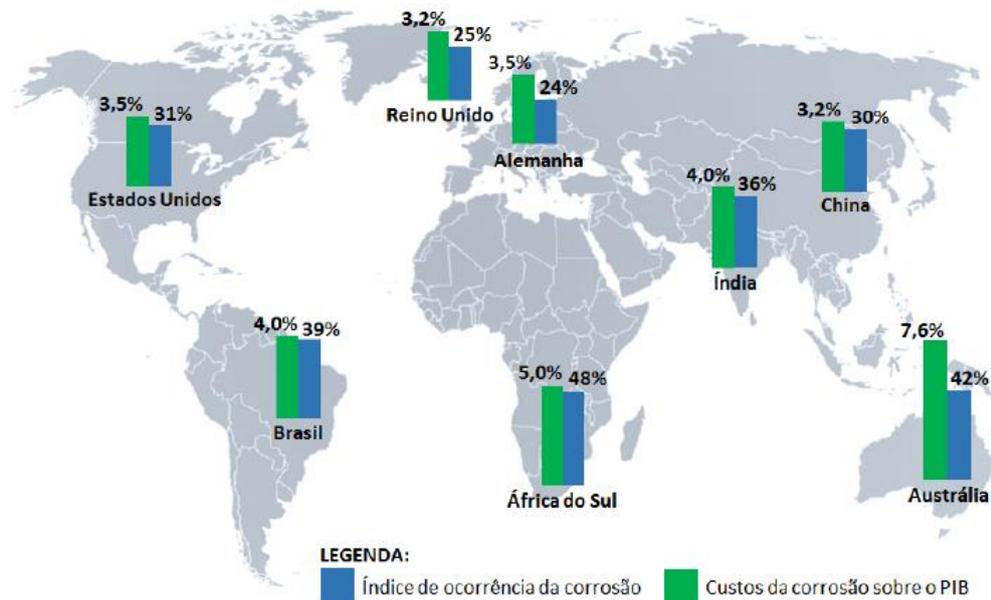
Neste contexto é que pretende-se desenvolver este estudo experimental, submetendo corpos de prova de concreto com adição de nanosílica à ação do CO₂, afim de analisar a formação da frente de carbonatação e concluir sobre a influência desta adição mineral na resistência à carbonatação.

1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização do concreto armado apresentou um crescimento considerável no último século, e por motivos financeiros e ambientais se faz necessário estudar meios de aumentar a sua durabilidade. Porém, a corrosão das armaduras é um dos principais fatores que limitam a vida útil das estruturas de concreto armado (ZOU *et al*, 2017).

Félix (2018) utiliza dados da *World Corrosion Organization* para montar a Figura 1.1, onde é possível observar os custos relativos à corrosão das armaduras e o seu índice de ocorrência em diversas nações pelo mundo.

Figura 1.1 - Mapa da incidência e dos custos relativos à corrosão das armaduras em alguns países.



Fonte: Félix (2018).

Nota-se que os valores apresentados superam 3% do Produto Interno Bruto (PIB) em vários países, alcançando até 7,6%, como é o caso da Austrália. Também é possível observar que o índice de ocorrência dessa manifestação patológica pode chegar a 48%, como na África do Sul, o que destaca a corrosão das armaduras como um dos principais problemas em estruturas de concreto armado e evidencia a relevância de estudos sobre a durabilidade.

Dependendo da porosidade do concreto, das características do material e do meio ambiente, o CO_2 presente no ar penetra os poros e, assim, reage com o hidróxido de cálcio, provocando a carbonatação. Durante esse processo o pH da solução presente nos poros do concreto diminui, resultando na despassivação da barra de aço, que fica propensa ao desenvolvimento da corrosão (RIBEIRO; CUNHA, 2018).

A carbonatação em concretos é motivo de estudo por muitos pesquisadores, porém há vários parâmetros a serem definidos na metodologia de ensaio como afirmam Pauletti, Possan e Molin (2007), sendo necessário avaliar os diversos fatores que influenciam na carbonatação de concretos com diferentes composições.

No âmbito internacional há várias publicações que abordam a discussão sobre a carbonatação de concretos (Gall *et al*, 2016; Dung; Unluer, 2017; Jiang *et al*, 2017; Li; Li, 2018; Ho *et al*, 2018; Zhang; Xiao, 2018;). No Brasil há uma preocupação com a padronização dos ensaios visto que não há normas, porém diversos trabalhos são desenvolvidos com foco no estudo da carbonatação (Pauletti, 2009; Possan, 2010; Ferreira, 2013; Pires, 2016; Silva; Andrade, 2017; Martins *et al*, 2018, Andrade *et al*, 2018).

No contexto da nanotecnologia, Campos Neto e Geyer (2017) afirmam que atualmente a nanosílica é um dos produtos utilizados na construção civil, contudo, é necessário conhecer melhor suas aplicações e efeitos sobre os compósitos cimentícios. O estudo sobre os nanomateriais é crescente, em especial a nanosílica vem sendo motivo de várias publicações internacionais recentes (Quercia *et al*, 2010; Nili, Ehsani e Shabani, 2010; Zamorano e Linton, 2017; Li *et al*, 2017; Mendes, Repette e Reis, 2017;).

Visto que a adição de nanosílica ao concreto ainda demanda estudos com o objetivo de compreender diversos fatores, principalmente a sua contribuição à durabilidade, e que a carbonatação dos concretos é uma das mais recorrentes e principais manifestações patológicas, busca-se através desse trabalho experimental unir essas duas áreas de estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a resistência à carbonatação acelerada de concretos com adição de nanosílica coloidal.

1.2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar as propriedades mecânicas e físicas dos concretos com adição de nanosílica;
- Determinar o teor ideal de adição de nanosílica de acordo com a frente de carbonatação;
- Analisar o efeito conjunto da nanosílica e da sílica ativa em concretos quando submetidos ao ataque de CO₂;
- Avaliar o pH da solução de poro simulada dos concretos e realizar uma análise comparativa da alcalinidade na região carbonatada com a região não carbonatada;
- Avaliar a microestrutura dos concretos com adição de nanosílica e comparar com o material sem adição.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Visando atingir os objetivos propostos, desenvolveu-se esta dissertação que está dividido em cinco capítulos:

O capítulo 1 expõe uma introdução ao assunto, de maneira a contextualizá-lo. Também nesse capítulo é feita a justificativa da escolha do tema e apresenta-se o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica acerca dos assuntos estudados, visando embasar, com conhecimentos teóricos obtidos na literatura, a pesquisa realizada.

O capítulo 3 traz o programa experimental utilizado para realização da pesquisa proposta por esse trabalho. Nesse capítulo são descritos os ensaios, materiais e equipamentos necessários para o alcance dos objetivos propostos.

O capítulo 4 registra os resultados e discussão, de maneira a facilitar análise dos fatores levantados durante a elaboração desta pesquisa.

No capítulo 5 são enumeradas as conclusões da pesquisa, e aponta-se sugestões de trabalhos futuros, afim de complementar e dar sequência aos resultados obtidos por esse trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

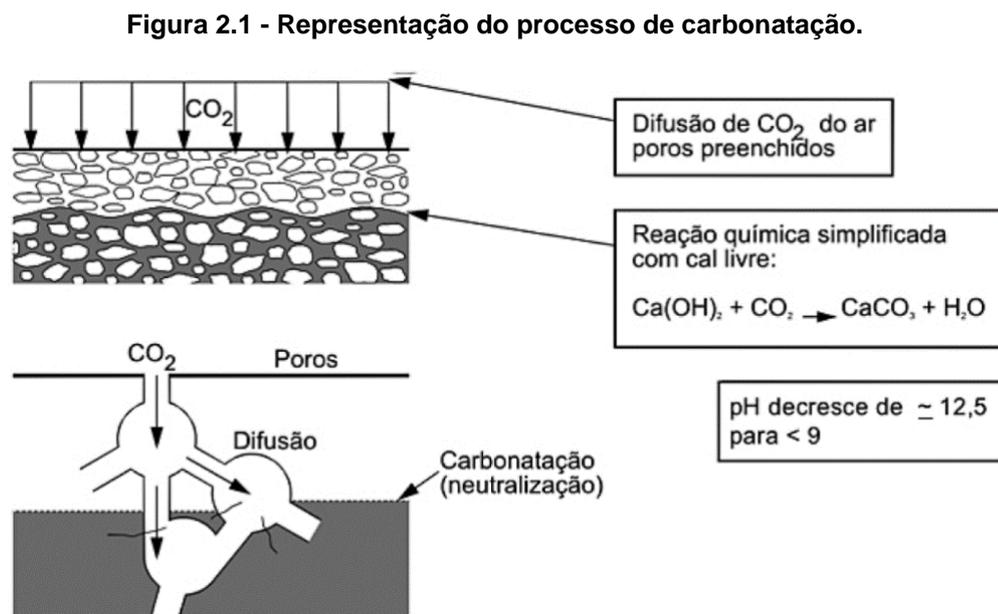
2.1 CARBONATAÇÃO

A carbonatação pode ser definida como o fenômeno de redução de alcalinidade do concreto por meio do ataque de CO₂. A ação do dióxido de carbono no concreto armado é um fator importante na análise da durabilidade de uma estrutura, principalmente em cidades industrializadas, que apresentam geralmente alto teor de CO₂ (ALMEIDA; SALES, 2018).

De acordo com Silva (2007), o processo de carbonatação ocorre de forma natural, quando as estruturas de concreto estão submetidas ao ataque do CO₂, que penetra pelos poros e reage na presença de umidade, avançando progressivamente para o interior da seção transversal, formando a frente de carbonatação.

Segundo Neville (2016), a carbonatação pode ser entendida como um fenômeno físico-químico, que modifica as características do concreto, porém, não suscita diretamente a sua deterioração. Entretanto, a interação do CO₂ com o concreto pode causar consequências severas à estrutura, visto que esse fenômeno reduz o pH da água de poros do concreto.

A Figura 2.1 traz uma representação esquemática da penetração de CO₂ por difusão que gera o processo de carbonatação.



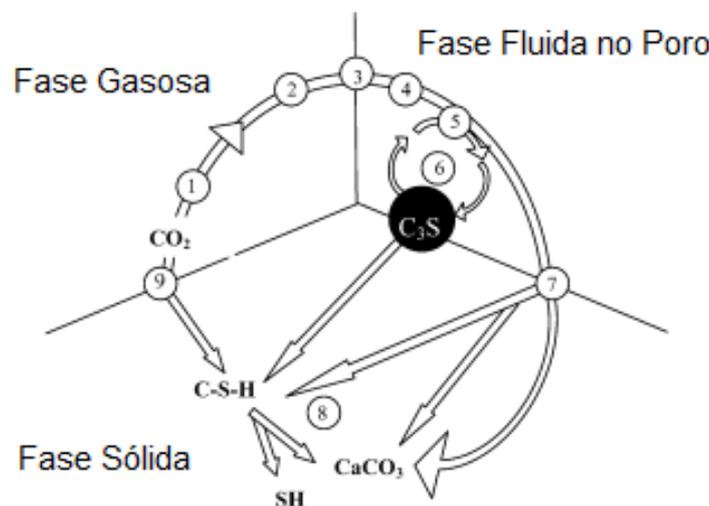
Fonte: CEB (1984) apud Cascudo e Carasek (2011).

Durante a carbonatação o dióxido de carbono (CO_2) reage na presença de água (H_2O) com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), resultante das reações de hidratação do cimento. Dessa reação forma-se o carbonato de cálcio (CaCO_3) e água, conforme explicita a Equação 1.



Bertos *et al* (2004) propõem um mecanismo de reação apresentado na Figura 2.2, que ocorre durante a carbonatação acelerada, aquela que acontece com índices de concentração de dióxido de carbono elevados, não comumente encontrado no meio ambiente. Ao sequenciar e enumerar as etapas individuais do processo de carbonatação de materiais cimentícios, o autor auxilia na compreensão do processo como um todo.

Figura 2.2 - Mecanismo proposto para a carbonatação acelerada.



Fonte: Bertos *et al* (2004).

As etapas sugeridas pelo mecanismo proposto por Bertos *et al* (2004) são nomeadamente:

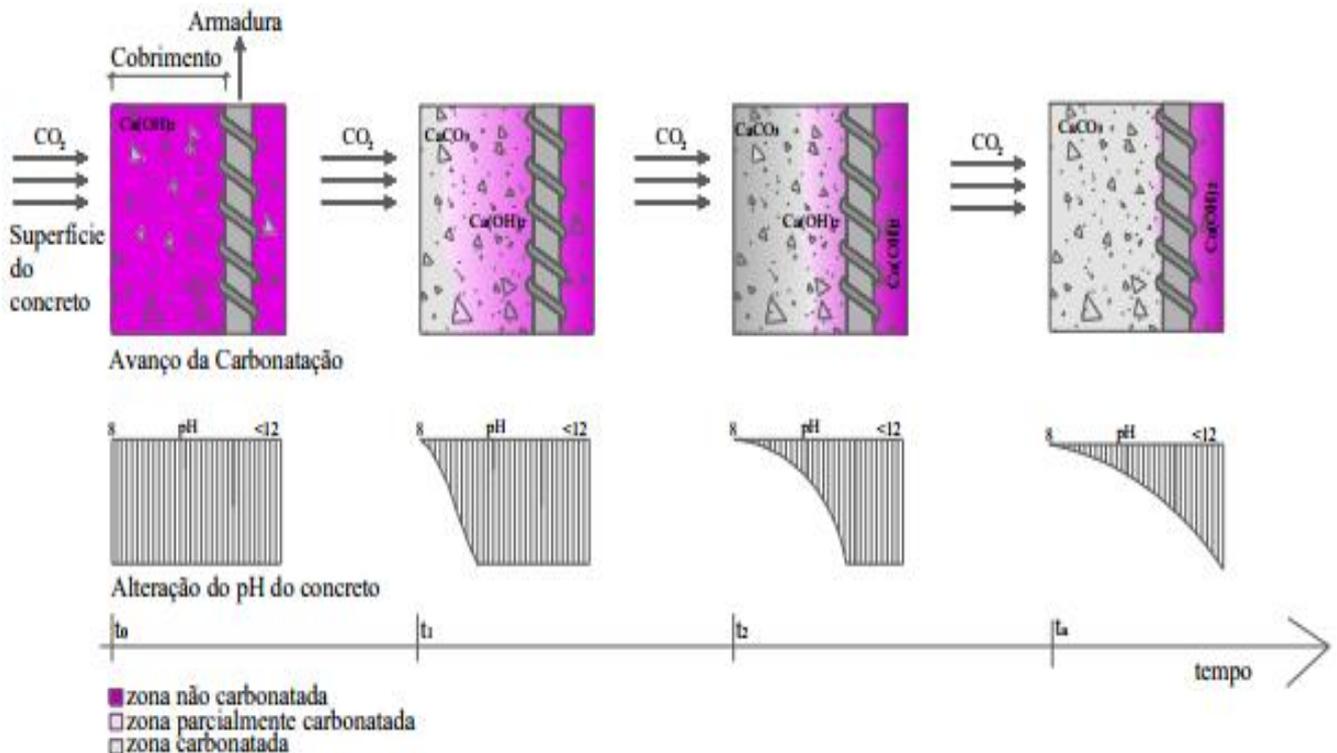
1. Difusão do CO_2 no ar.
2. Ingresso do CO_2 por meio do sólido.
3. Dissolução do CO_2 (gasoso) para o CO_2 (aquoso). Limite de mudança de fase.
4. Hidratação do CO_2 (aquoso) para H_2CO_3 . Esta é uma transformação lenta.
5. Ionização do H_2CO_3 para H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} . Esta etapa ocorre praticamente de forma instantânea e faz com que o pH reduza em aproximadamente 3 unidades, variando de 11 a 8.
6. Dissolução das fases cimentícias C_3S e C_2S . Esta etapa é considerada rápida e extensiva, visto que o processo é cíclico e a reação é exotérmica. Os grãos

de silicatos são cobertos por uma camada livre de gel de silicato de cálcio hidratado, que é dissolvido de forma rápida liberando íons de Ca^{2+} e SiO_4^{4-} .

7. Nucleação do CaCO_3 e C-S-H. Limite de mudança de fase.
8. Precipitação da fase sólida. No começo desta etapa podem ser formadas vaterita e aragonita, mas no final o CaCO_3 resulta calcita. No produto final também é possível encontrar carbonatos de cálcio amorfos.
9. Carbonatação secundária. O gel de C-S-H se forma e é progressivamente descalcificado, convertendo-se em S-H (silicato hidratado) e CaCO_3 .

O pH do concreto que originalmente apresenta um valor entre 12,6 e 13,5 quando sofre o efeito da carbonatação é reduzido para próximo de 9, podendo chegar a 8,3 quando todo o hidróxido de cálcio for carbonatado (NEVILLE, 2016). Desta forma, quando a frente de carbonatação que divide a região em duas zonas de pH muito distintos avançar para o interior da estrutura e o pH baixo tanger a área próxima a armadura, a película de óxido protetor da barra será removida, ocasionando a despassivação da armadura, permitindo que ocorra a corrosão, caso haja a presença de umidade e oxigênio. A Figura 2.3 retrata o avanço dessa frente em função do tempo.

Figura 2.3 - Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto.



Fonte: Possan (2010).

Sousa (2018) explica a corrosão de um material, como um processo de deterioração, que resulta na sua perda de massa. Isso se dá pela ação química ou eletroquímica do meio ambiente em que ele está inserido. Essa interação destrutiva entre o material e o ambiente é o processo em que o metal retorna ao seu estado natural, gerando compostos estáveis na forma de óxidos.

Além da diminuição do pH do concreto, apontada como a principal consequência da carbonatação, Ribeiro e Cunha (2018) indicam o ganho de resistência em amostras atacadas por CO₂ como um fenômeno recorrentemente observado. Roy, Poh e Northwood (1999), Bertos *et al* (2004), e Song e Know (2007) atribuem o aumento da resistência dos concretos carbonatados à redução da sua porosidade.

Segundo Silva (2007), houve ao longo do tempo o desenvolvimento de diversas formulações matemáticas com o anseio de determinar a profundidade de carbonatação. Ao apresentar vários métodos propostos por diversos autores, a autora ressalta que essas equações são recomendadas para o contexto de uma estrutura de concreto em que o coeficiente de carbonatação é conhecido.

Ribeiro e Cunha (2018) simplificam a descrição da velocidade de carbonatação ao assumir essa grandeza como inversamente proporcional à espessura do concreto. Portanto, é um fenômeno de difusão que pode ser definido pela lei de Fick, conforme é apresentado na Equação (2).

$$\frac{dx}{dt} = \frac{D}{x} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo que x representa a profundidade de carbonatação, t indica o tempo e D, o coeficiente de difusão. Porém, vale ressaltar que isso é uma aproximação, visto que conforme a frente de carbonatação avança pelo concreto, ela modifica a sua morfologia porosa.

Segundo Broomfield (2007), a variação nos níveis de umidade, eventuais fissuras, e a modificação na composição do concreto também interferem na utilização da equação da difusão perfeita. Ao integrar-se a Equação 2, obtém-se uma expressão de raiz quadrada que pode ser utilizada, com o anseio de descrever a evolução da carbonatação (Equação 3).

$$x = A.t^n, \text{ sendo } 0 < n < 1 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde x indica a profundidade de carbonatação, A é o coeficiente de difusão e t representa o tempo em anos. O valor de n é considerado 0,5 pela maioria dos pesquisadores, como afirmam Ribeiro e Cunha (2018), e dessa forma é possível chegar no valor de A, e calcular a velocidade de carbonatação do concreto de várias estruturas.

Broomfield (2007) apresenta os dados contidos da Tabela 2.1 como resultados de um estudo que analisou um grande número de estruturas de concreto armado, quando estimou os coeficientes de difusão, considerando n igual a 0,5.

Tabela 2.1 - Coeficiente de difusão de CO₂ em vários tipos de estrutura.

Estruturas			Variação dos coeficientes de difusão (ano ^{0,5} /mm)	Média dos coeficientes de difusão (ano ^{0,5} /mm)
Quantidade analisada	Tipo	Idade		
11	Prédios	8 a 24 anos	1,2 a 6,7	3
7	Parques de automóveis	14 a 41 anos	2,2 a 7,6	4,3
1	Molhe marítimo	10 anos	1,8	-
1	Ponte	90 anos	1,6	-

Fonte: Broomfield (2007).

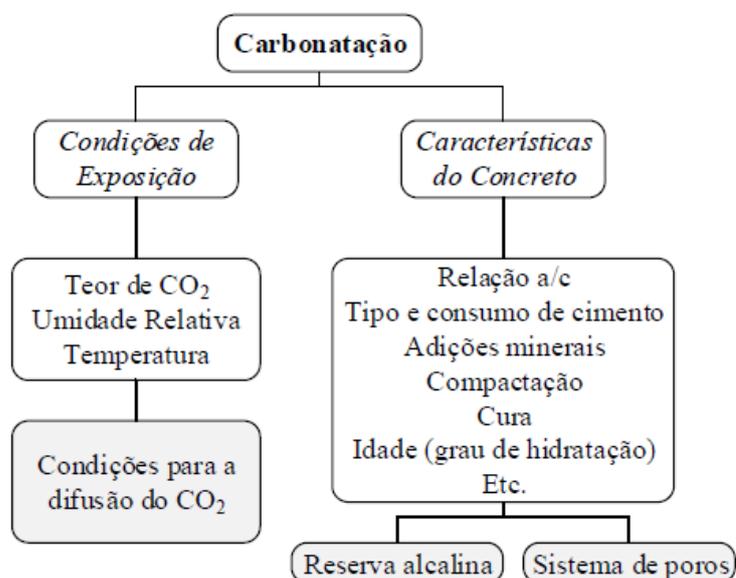
Caso durante o projeto da estrutura não haja por meio dos profissionais responsáveis a preocupação de medidas preventivas ao ataque de CO₂, conforme estipula a NBR 6118:2014 de acordo com a classe de agressividade ambiental onde a estrutura está localizada, se faz necessária a reabilitação dos concretos carbonatados para garantir o bom desempenho da estrutura e possibilitar que sua durabilidade seja satisfatória.

2.1.1 FATORES INFLUENCIADORES NA CARBONATAÇÃO

O processo de carbonatação ocorre por meio de difusão. Portanto, a sua velocidade e profundidade dependem de diversos fatores que, na sua grande maioria, estão relacionados com as condições de exposição da estrutura e com as características do concreto. O sistema de poros e o pH já apresentado pela estrutura, são originados principalmente pela composição do material e sua execução. A condição de exposição do concreto também interfere na difusão do CO₂, visto que as características do ambiente ao qual está exposta exercem grande influência na estrutura (CASCUDO; CARASEK, 2011).

A Figura 2.4 exibe uma sistematização dos principais fatores que intervêm no processo de carbonatação.

Figura 2.4 - Fatores intervenientes na carbonatação do concreto.



Fonte: Cascudo; Carasek (2011).

A velocidade de carbonatação do concreto é diretamente proporcional à concentração de CO_2 no meio em que está inserido, principalmente nos concretos em que a relação água/cimento é elevada (NEVILLE, 2016). A Tabela 2.2 apresenta uma correlação entre as classes de agressividades adotadas pela NBR 6118:2014 com a concentração de dióxido de carbono no ambiente.

Tabela 2.2 - Classificação da agressividade do ambiente.

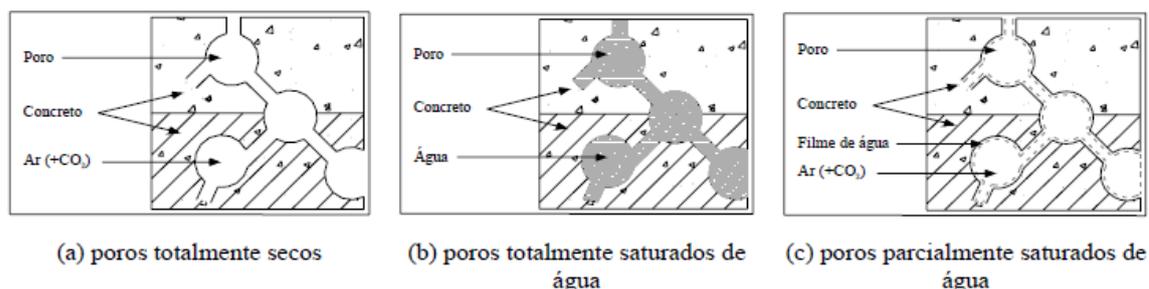
Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras			
Classe de agressividade	Agressividade	Macro-Clima	Concentração de CO_2
I	Fraca	Atmosfera Rural	$\leq 0,3\%$
II	Média	Urbana	$\leq 0,3\%$
III	Forte	Marinha ou Industrial	$\geq 0,3\%$
IV	Muito Forte	Pólos Industriais	$> 0,3\%$

Fonte: Helene (1995).

Figueiredo (2005) afirma que a umidade relativa do meio ambiente onde a estrutura está localizada desempenha um forte papel sobre a quantidade de água contida nos poros e, portanto, condiciona a velocidade de penetração do CO_2 . Segundo Paiva (2016) as maiores taxas de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa está entre 50 e 70%.

A Figura 2.5 mostra a representação esquemática da difusão do CO_2 , com relação a quantidade de água contida nos poros do concreto.

Figura 2.5 - Representação esquemática da difusão do CO₂.



Fonte: Bakker (1988) apud Possan (2010).

Quando os poros estão secos (Figura 2.5a), o CO₂ penetra mais facilmente, porém não reage devido à falta de água. No caso da Figura 2.5b, onde os poros estão totalmente saturados, a água bloqueia os poros, dificultando a difusão do dióxido de carbono. O caso da Figura 2.5c é o mais favorável para o avanço da frente de carbonatação, pois os poros estão parcialmente saturados, ou seja, há espaço para a penetração do CO₂ e existe água para ocorrer a reação (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Neville (2016), variações pequenas na temperatura não interferem de forma significativa no ataque de CO₂. Porém, a temperatura elevada contribui para o aumento da velocidade da carbonatação, a não ser quando a secagem dos poros devida a essa alta temperatura impeça a ocorrência do processo.

Ao explicar a relação da temperatura com o avanço da frente de carbonatação, Cascudo e Carasek (2011) destacam o papel catalizador dessa variável nas reações químicas, sendo o acréscimo da temperatura diretamente proporcional ao aumento da velocidade de reação. O movimento dos íons em solução é acelerado com a elevação da temperatura, resultando numa maior velocidade das reações químicas.

Com relação aos aspectos do concreto, Figueiredo (2005) ressalta a eficiência e duração do método de cura adotado e a relação água/cimento utilizada como fatores preponderantes na resistência à carbonatação do concreto, visto que diminuem a sua porosidade e permeabilidade. Além disso, o autor afirma que o tipo de cimento utilizado na produção do concreto influencia diretamente no avanço da frente de carbonatação; afinal, o cimento determina a quantidade de compostos alcalinos disponíveis para reagir com o CO₂ absorvido pela estrutura.

A princípio, quanto mais cimento se utilizar em um concreto, menor será a sua carbonatação, devido a uma maior quantidade de Ca(OH)₂ na pasta, que atua como uma reserva alcalina (CASCUDO; CARASEK, 2011). Porém, Bertolini (2010) ressalta que nos cimentos compostos, a hidratação dos materiais pozolânicos ou da escória de alto-forno gera um menor teor de Ca(OH)₂ na pasta.

Assim como ocorre com cimentos compostos, as adições minerais incorporadas diretamente no concreto, reduzem a capacidade de proteção da pasta de cimento relativo ao avanço da frente de carbonatação. Esse efeito negativo das adições minerais ocorre devido às reações pozolânicas que resultam numa menor quantidade de hidróxido de cálcio precipitado na pasta de cimento (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Por outro lado, Cascudo e Carasek (2011) também ressaltam que as adições minerais produzem um sistema de poros mais refinado, menos conectado e mais tortuoso, resultado da alteração física da estrutura da pasta de cimento por efeito fíler (físico) e pozolânico (químico), o que implica numa redução da difusividade do CO_2 . Esses efeitos de melhoria na morfologia dos poros do concreto se sobressaem positivamente em relação à redução do teor de cimento devido a incorporação de adições minerais em concretos que possuem baixa relação a/agl (menor que 0,45 – 0,50).

Os diversos fatores internos que caracterizam o concreto e acabam por influenciar no avanço da frente de carbonatação são objetos de estudo por vários pesquisadores, devido a necessidade de alinhar as propriedades do concreto com as condições naturais em que a estrutura será exposta e garantir um desempenho adequado. Para a realização dessas pesquisas, é necessário estipular as condições em que os ensaios são executados, visto que há fatores externos que influenciam no processo de carbonatação.

2.1.2 PARÂMETROS DE ENSAIO

Neville (2016) relata que o processo de carbonatação ocorre mesmo em ambientes com baixa concentração de CO_2 , como é o caso de zonas rurais que apresentam por volta de 0,03% de concentração de dióxido de carbono. Em ambiente laboratorial esse valor pode chegar a 0,1%, e em cidades grandes onde há uma maior emissão de CO_2 , os teores são em média 0,3%, atingindo excepcionalmente valores como 1%.

Dada a concentração de dióxido de carbono em ambiente natural, a carbonatação é considerada uma reação que ocorre de forma lenta e devido ao longo prazo necessário para a obtenção de resultados significativos vários estudos adotam o método da carbonatação acelerada (FERREIRA, 2013).

Há autores que optam por desenvolver pesquisas com carbonatação natural, como é o caso de Possan (2004) que analisou corpos de prova com 7 anos de exposição, Pires (2016) que analisou amostras com cerca de 14 anos no meio ambiente, Ekolu (2018) que estudou concretos de 10 anos, Huang, Chang e Liang (2012) que estudaram a carbonatação em uma estrutura com 35 anos de idade. Porém, devido às características do concreto analisado existe

resultado em pesquisas de carbonatação natural com menos de um ano, como é o caso de Durán-Herrera *et al* (2013) e Kamur, Malay e Kujur (2018).

Ensaio acelerados em concreto, como o da carbonatação, procuram reproduzir a degradação natural, com intensidade superior às condições normais, com o objetivo de reduzir o tempo necessário para a obtenção de um estado de degradação avançado. Geralmente desenvolvidos em laboratórios, os ensaios de carbonatação acelerada destacam-se pelo rígido controle do ambiente de exposição das amostras analisadas, e pela precisão na tomada de medidas (POSSAN, 2004).

As normas buscam estabelecer parâmetros para a realização dos ensaios de carbonatação acelerada, visto que diversos fatores podem interferir neste processo de degradação. De acordo com a quantidade de variáveis presentes durante a realização dos experimentos, há uma certa dificuldade na comparação de resultados expostos por diferentes pesquisadores.

A ISO 1920-12:2015 que fixa as condições do ensaio de carbonatação acelerada, estipula que a concentração de CO₂ deve ser de $3,0 \pm 0,5\%$, a temperatura igual a $22 \pm 2^\circ\text{C}$, e a umidade relativa de $55 \pm 5\%$. Porém, há nesta norma uma ressalva quanto a localidades de clima quente: nessas regiões deve-se adotar-se temperatura de $27 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$, enquanto a concentração de CO₂ se mantém a mesma.

Na Europa a norma DIN EN 13295:2004 que estabelece especificações para a determinação da resistência à carbonatação, determina que o ensaio deve ser feito com concentração de CO₂ igual a 1%, temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60 \pm 10\%$. Por outro lado, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal, determina em sua norma LNEC E 391:1993 como parâmetros do ensaio de carbonatação, uma concentração de CO₂ igual a $5 \pm 0,1\%$, temperatura de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60 \pm 5\%$.

Ferreira (2015), ao comparar a especificação portuguesa LNEC E 391 (1993) com a norma NT Build 357 (1989) e com a norma espanhola UNE 83993-1 (2013), concluiu que as especificações são praticamente semelhantes em tudo, divergindo somente no parâmetro de exposição relativo a concentração de CO₂ na câmara de carbonatação. Enquanto a norma LNEC E 391:1993 apresenta a concentração de CO₂ com valor referência de $5 \pm 0,1\%$, a NT Build 357 (1989) sugere um valor de $3 \pm 0,1\%$.

Pauletti, Possan e Dal Molin (2007) justificam a necessidade de padronização dos ensaios com o anseio de unificar ou uniformizar os dados coletados, e dessa maneira criar uma base de dados segura, relativa a durabilidade que poderá contribuir para a previsão de vida útil das estruturas.

A frente de carbonatação que avança sobre o concreto é geralmente aferida por meio de indicadores como a fenolftaleína, a timolftaleína ou o amarelo de alizarina, que são aspergidos sobre o concreto. Segundo Filomeno (2018), a fenolftaleína, que é a mais utilizada, a solução alcalina do concreto é rica em hidróxido de cálcio que quando em contato com essas referidas substâncias, fazem com que elas adquiram uma coloração vermelho carmim com pHs iguais ou superiores a uma faixa entre 8,0 e 9,8, conforme retrata a Figura 2.6.

Figura 2.6 - Medida da frente de carbonatação.

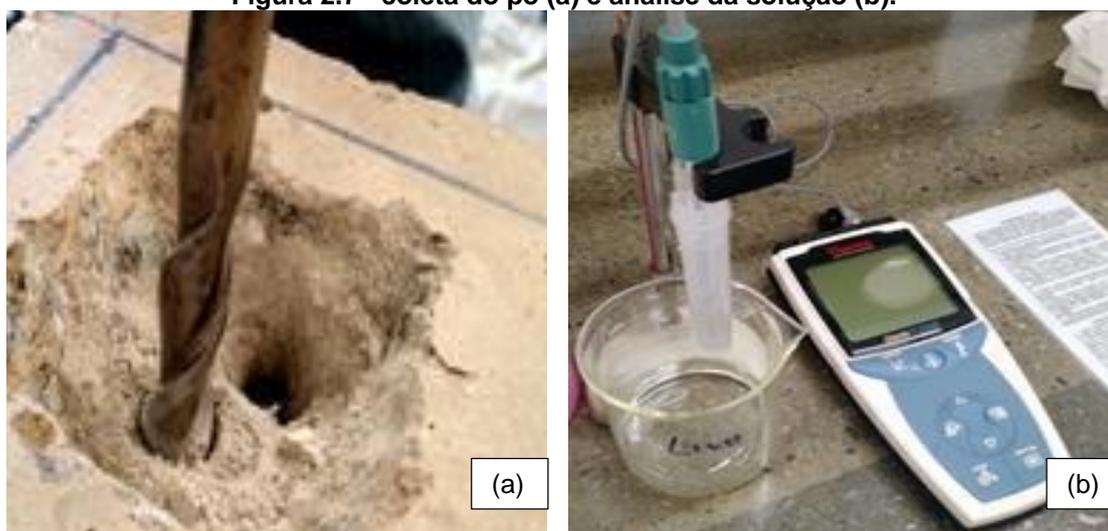


Fonte: Pires (2016).

Um método complementar que ajuda a identificar a presença de uma frente de carbonatação em concretos é o da avaliação do pH da solução de poro simulada. Segundo Pires (2016), é uma análise inovadora que possibilita obter informações sobre o pH da solução, sendo de grande importância, visto que a alcalinidade do concreto está diretamente ligada à proteção química das armaduras contra a corrosão.

Este método consiste na perfuração do concreto carbonatado para a coleta do pó, que posteriormente é diluído em água destilada e fica sob agitação; por fim, a solução é filtrada com o anseio de remover o pó. Após essa etapa final da preparação da solução, ela está pronta para que sejam feitas as análises químicas pertinentes (PIRES, 2016). A Figura 2.7a ilustra a remoção do pó por meio de uma furadeira, e a Figura 2.7b demonstra a medição do pH da solução por meio de um medidor portátil.

Figura 2.7 - coleta do pó (a) e análise da solução (b).



Fonte: Pires (2016).

Há diversos fatores envolvidos na execução do ensaio de carbonatação que vão desde as condições do ataque, o tipo de corpo de prova até o modo de aferir o avanço da frente de carbonatação. Os estudos sobre o ataque de CO_2 ao concreto refletem essa diversidade presente nas condições de ensaios, também nos objetivos das pesquisas, que abordam diferentes temas relacionados à carbonatação, contribuindo para uma melhor compreensão desse fenômeno.

2.2 O EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS NA CARBONATAÇÃO

Albuquerque e Lima (2014) definem adição mineral como materiais inorgânicos que modificam as propriedades do concreto. As atuações das adições minerais no concreto variam de acordo com a sua granulometria, atividade química e composição mineralógica.

Fonseca (2010) afirma que as adições são utilizadas com a função de somar ou até mesmo em alguns casos substituir, parcialmente, o cimento. O emprego de adições minerais na indústria do cimento e concreto é motivada por fatores tecnológicos, econômicos e ambientais.

A utilização de adições minerais na construção é consonante à sustentabilidade requerida ao setor, que é apontado pela literatura como o maior consumidor individual de recursos naturais. Grande parte das adições minerais são resíduos industriais, o que minimiza a deposição desses resíduos no ambiente e evita a contaminação do solo e fontes de água, além de diminuir o consumo de energia no processo de extração de novos minerais (DAL MOLIN, 2005).

Segundo Nagrockienè, Girskas e Skripkiunas (2017), as adições minerais modificam o processo de hidratação do cimento e, portanto, influenciam nas características físicas e no comportamento mecânico do concreto, possibilitando o desenvolvimento de novos materiais, como o concreto de alto desempenho e os concretos especiais, que absorvem metais pesados ou suprimem a radiação. Devido a interação dessas adições com o cimento se faz importante investigar os seus efeitos no desempenho efetivo do concreto e na sua durabilidade.

As adições minerais são classificadas em três grupos diferentes, de acordo com a sua ação físico-química no concreto, elas podem se categorizar como: fíler, materiais pozolânicos e materiais cimentantes, conforme é apresentado na Tabela 2.3, que expõe exemplos dessas adições dentro de cada categoria.

Tabela 2.3 - Classificação das adições minerais.

Adições minerais		Exemplos
Material pozolânico	Natural	Cinza vulcânica
	Artificial	Argilas calcinadas ou termicamente ativadas, cinza volante, cinza da casca de arroz, metacaulim, sílica ativa
Material cimentante		Escória granulada de alto forno
Fíler		Pó de calcário, pó de quartzo, pó de pedra

Fonte: Dal Molin (2011).

As adições identificadas como materiais pozolânicos e cimentantes formam compostos com propriedades cimentantes, a diferença entre eles consiste no fato de que os primeiros necessitam da presença do hidróxido de cálcio para reagirem. O fíler por sua vez, não apresenta atividade química e age apenas fisicamente no concreto (DAL MOLIN, 2011).

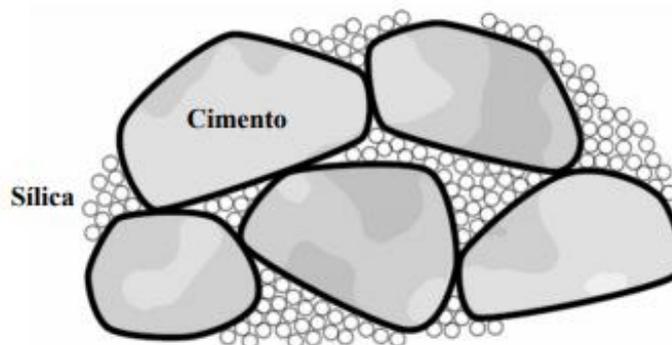
Classificada como material pozolânico, a sílica ativa é definida por Almeida (2007), como um resíduo artificial, proveniente da fabricação de ferro-silício e silício metálico. Este é um material altamente reativo na presença do hidróxido de cálcio, produto do cimento hidratado.

A sílica ativa é comumente utilizada na produção de concreto de alto desempenho, a fim de aumentar a resistência mecânica e compacidade, devido às reações pozolânicas e ao efeito fíler. No Brasil, a NBR 13956:2012 denominada, “Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta” regulamenta a aplicação da sílica em concretos.

As partículas de sílica ativa são amorfas, esféricas e extremamente pequenas, com diâmetro cem vezes menor que o do cimento (FONSECA, 2010). De acordo com Dal Molin

(2011), o diâmetro médio das partículas de sílica ativa são de 0,1 a 0,2 μm . Esta pequena dimensão das partículas permite que elas preencham os pequenos vazios na pasta, onde as partículas de cimento não conseguem chegar, conforme ilustra a Figura 2.8.

Figura 2.8 - Partículas de sílica e cimento.



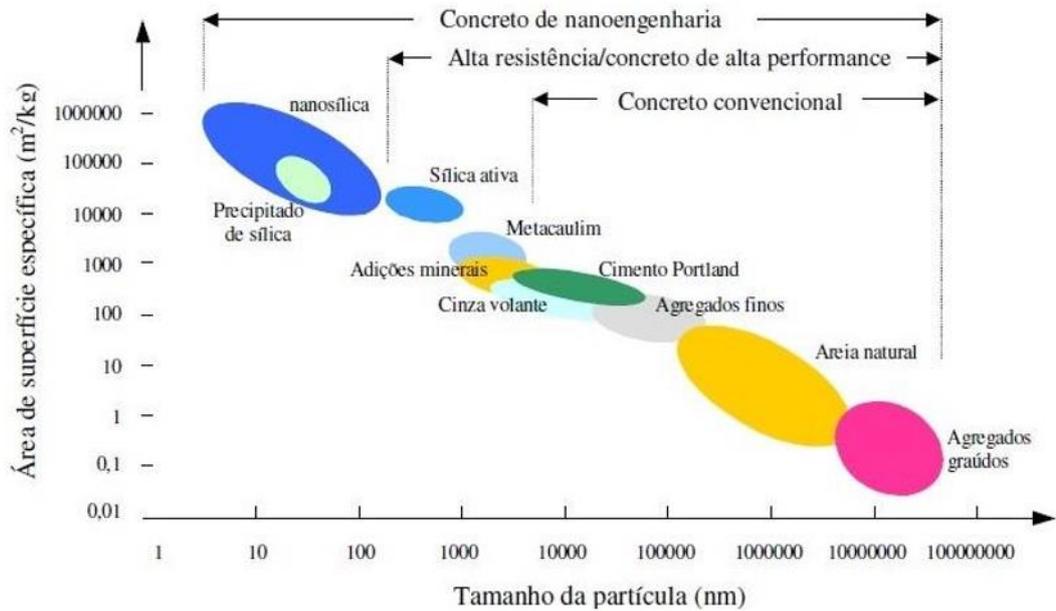
Fonte: Almeida (2007).

Além da sílica ativa, atualmente a indústria do cimento e do concreto e os pesquisadores, estão focando também na aplicação da nanosílica, que apresenta partículas menores que a sílica ativa, com diâmetro médio entre 3 e 150 nm, que majoram a sua reatividade química, devido ao aumento da superfície de contato (DELGADO, 2012).

Ao comparar estudos recentes que abordam a incorporação de nanosílica em materiais cimentícios, nota-se que esta pode ser encontrada em diferentes tipos. Os pesquisadores Ramezani pour e Moeini (2018), assim como Ehsani, Nili e Shaabani (2017) utilizaram em seus trabalhos nanosílica em pó, já Mendoza-Reales, Sierra-Gallego e Tobón (2016) a empregam dispersa em solução aquosa. A nanosílica do tipo coloidal é estudada por Naskar e Chakraborty (2016); por outro lado, Massana *et al* (2018) e Flores *et al.* (2017) utilizam nanosílica do tipo coloidal dispersa em solução aquosa.

Li *et al* (2017) afirmam que a nanosílica incorporada em materiais cimentícios em conjunto com a sílica ativa compõem uma distribuição granulométrica capaz de preencher de forma eficaz os vazios entre os grãos de cimento e, assim, aumenta a densidade de empacotamento desses materiais. A Figura 2.9 demonstra a relação entre a área das partículas presentes no concreto, desde os agregados até as adições, indicando o tipo de concreto que as contém.

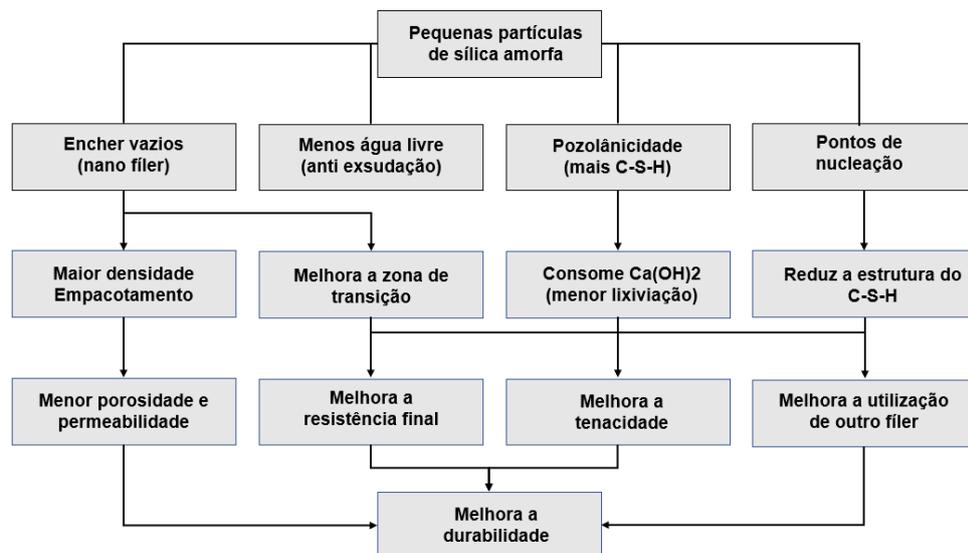
Figura 2.9 - Relação entre o tamanho e a área superficial das partículas no concreto.



Fonte: Sanchez; Sobolev (2010).

A partir da utilização da nanosílica como adição, é possível aumentar a resistência mecânica à compressão do material cimentício e diminuir a sua permeabilidade (NILI; EHSANI; HABANI, 2010; ANDRADE, 2017; SCHMALZ, 2018). Produzir um concreto menos permeável é algo positivo do ponto de vista de durabilidade da estrutura, visto que torna mais difícil o fluxo de água e a penetração de agentes agressivos como os sulfatos, os íons cloreto e o dióxido de carbono. A Figura 2.10 retrata uma representação esquemática dos efeitos da incorporação de nanosílica em concretos e argamassas.

Figura 2.10 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanosílica em concretos e argamassas.



Fonte: Bianchi (2014).

Por outro lado, as pequenas dimensões das partículas de nanosílica que aumentam a área superficial resultam numa maior absorção de água de amassamento, em consequência do ganho de coesão (VERA-AGULLO *et al.*, 2009; SENFF *et al.*, 2009). Caso seja fixada a relação a/agl numa composição, quanto mais nanosílica é adicionada a mistura, menos trabalhável ela se torna, dificultando por exemplo, o processo de moldagem.

Mehta e Monteiro (2014) apontam a utilização de aditivos superplastificantes (SP) como forma de compensar os baixos valores de consistência devido a adição de nanopartículas de sílica. Esses produtos são aditivos que ajudam a minimizar a tensão superficial da água circundante e aumentam a fluidez do sistema. A relação do teor de aditivo incorporado no material apresenta uma relação linear e diretamente proporcional com o teor de nanosílica adicionado (KHALOO; MOBINI; HOSSEINI, 2016; GESOGLU *et al.*, 2016).

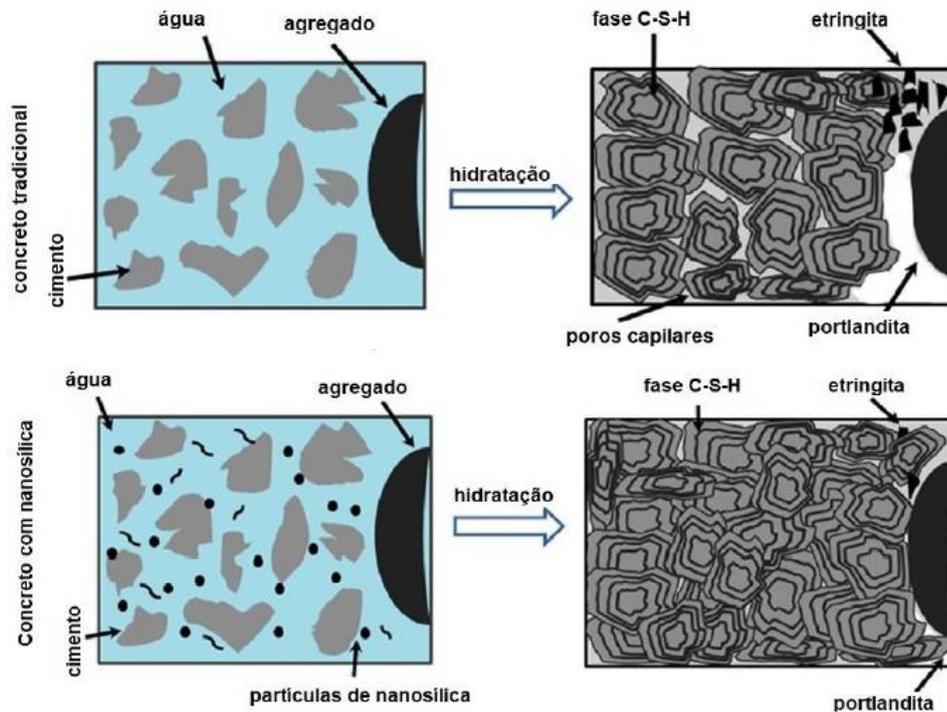
Mesmo que a adição desse nanomaterial gere resultados adversos nas propriedades em estado fresco dos materiais à base de cimento (SCHMALZ, 2018), a nanosílica é considerada uma adição pozolânica altamente reativa (GLEIZE, 2007), o que faz com que o seu efeito pozolânico intensificado interfira no processo de hidratação do cimento, que passa a ter uma estrutura mais densa devido o preenchimento dos vazios pelas nanopartículas e assim apresenta um aumento na resistência à compressão do material, concluem Vera-Agullo *et al.* (2009).

Quando há adição de nanosílica em materiais cimentícios, as reações pozolânicas e as reações de nucleação são dois possíveis mecanismos de reação durante a hidratação do cimento (SINGH *et al.*, 2013). A atividade pozolânica é explicada por Cincotto (2011), como a reação dos materiais pozolânicos em contato com solução fortemente alcalina, contendo o íon cálcio, formando produtos hidratados hidráulicos. No caso da nanosílica, ela reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 ou CH) oriundo da hidratação do cimento e forma silicato de cálcio hidratado, também chamado de gel hidratado (C-S-H) (SINGH *et al.*, 2013).

Segundo Cincotto (2011), o outro efeito da influência de materiais pozolânicos na hidratação do cimento, a nucleação dos cristais da etringita e do C-S-H nas primeiras horas, pode ser observado na evolução do calor de hidratação. As reações de nucleação contribuem para a formação de uma fase C-S-H mais compacta, que passa a ocorrer também nos poros do material (SINGH *et al.*, 2013).

Na Figura 2.11 pode-se observar a diferença da fase C-S-H em um concreto convencional e em um concreto com adição de nanosílica.

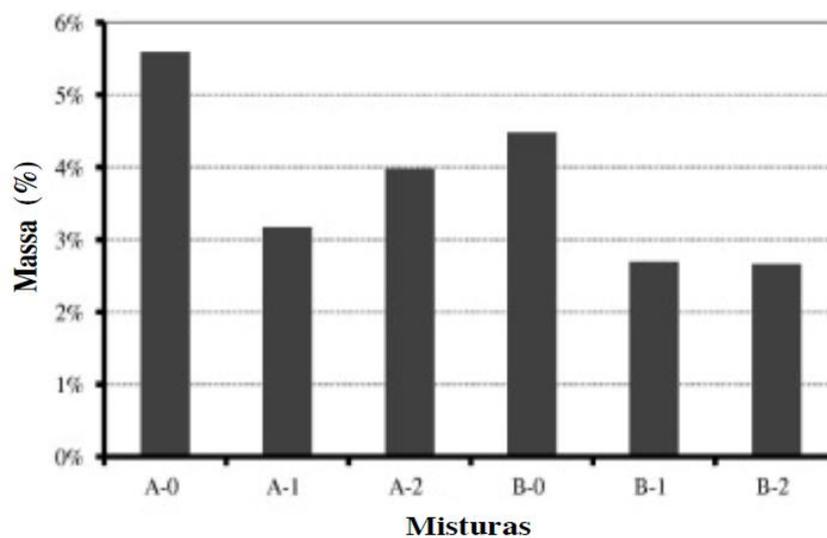
Figura 2.11 - Reações de hidratação do cimento na presença de nanosilica



Fonte: Singh *et al.*, 2013.

Said *et al.* (2012) propuseram analisar a quantidade de portlandita (CH) presente no concreto, dependendo do tipo de cimento e do teor de adição de nanosilica. Os autores utilizaram dois tipos de cimento, o Portland (A-0) e com cinza volante (B-0), e para cada um foram adicionados dois teores de nanosilica, 3% (A-1/B-1) e 6% (A-2/B-2). Os resultados deste estudo são apresentados na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Efeito da adição de nanosilica na quantidade de hidróxido de cálcio presente no concreto.

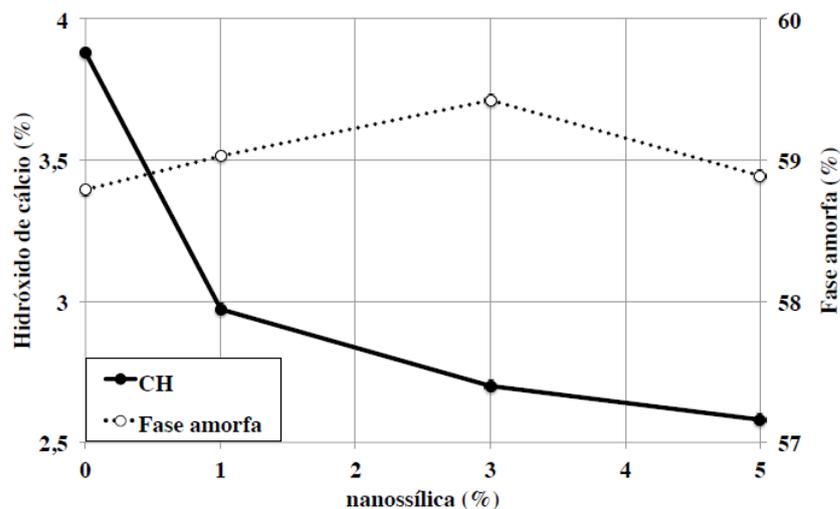


Fonte: Said *et al.*, 2012 apud Mendes (2016).

Nota-se que houve uma diminuição na quantidade de portlandita nos traços que foram adicionados a nanosílica, confirmando a ocorrência da reação pozolânica. É importante ressaltar que os concretos com cinza volante já apresentam essa redução quando comparados com os de cimento Portland sem adição. Por fim, percebe-se que nos traços com cinza volante, apesar do aumento do teor de nanosílica, a quantidade de CH permanece praticamente constante, o que pode ser indício da nucleação contribuindo para a formação de cristais de hidróxido de cálcio (SAID *et al.*, 2012).

Rong *et al.* (2015) avaliaram os produtos de hidratação de matrizes cimentícias com adição de nanosílica e também observaram a sua influência nas reações pozolânicas, visto que conforme aumenta o teor de adição, mais alto é o consumo de hidróxido de cálcio (CH). Os resultados expostos na Figura 2.13 indicam também o crescimento da fase amorfa (C-S-H), que atinge um pico máximo para o teor igual a 3% de adição de nanopartícula de sílica.

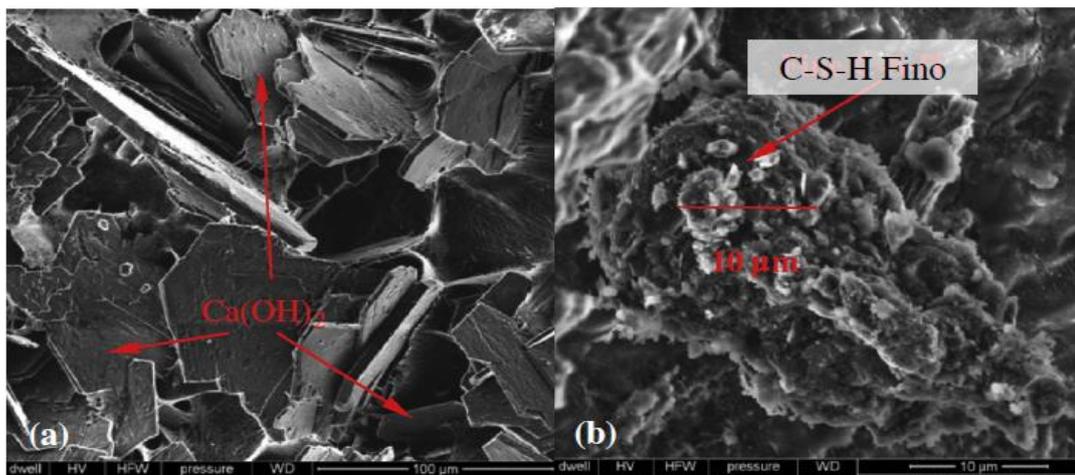
Figura 2.13 - Efeito da adição de nanosílica nos produtos da hidratação do cimento.



Fonte: Rong *et al.*, 2015 apud Mendes (2016).

O estudo realizado por Yu *et al.* (2014) ilustra o que já foi discutido, com relação a atividade pozolânica da nanosílica, nos resultados de outros autores. Na Figura 2.14, são apresentadas imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na Figura 2.14a, onde não existe a adição de nanosílica pode-se observar nitidamente grandes placas de hidróxido de cálcio; já na Figura 2.14b que possui adição de nanopartículas de sílica, nota-se a presença de cristais finos e homogêneos de silicato de cálcio hidratado e a ausência de portlandita, conforme destacam os autores.

Figura 2.14 - Efeito da adição de nanosílica nos produtos da hidratação do cimento.



Fonte: Yu *et al.* (2014) apud Mendes (2016).

De acordo com os estudos apresentados nota-se que a adição de nanopartículas de sílica seguem o que é descrito pela literatura com relação ao seu efeito na reação pozolânica e também na nucleação. Mendes (2016) observa que a incorporação de nanosílica na dosagem de concretos contribuem para a formação de uma estrutura mais compacta e homogênea do silicato de cálcio hidratado e para o consumo de portlandita.

Este efeito pozolânico que colabora para a diminuição da permeabilidade e para o aumento da resistência à compressão dos concretos com adição de nanosílica pode se tornar um problema relativo a durabilidade da estrutura, quando esta é submetida ao ataque de CO_2 . O concreto apresenta uma reserva alcalina formada pelo hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento. Como a portlandita é consumida nas reações pozolânicas, essa reserva alcalina do concreto é minimizada, permitindo o avanço mais rápido da frente de carbonatação.

Apesar dos benefícios mecânicos e físicos que a adição de nanosílica traz ao concreto é necessário dedicar atenção ao seu efeito na resistência ao ataque de CO_2 , a fim de compreender melhor quando o efeito da morfologia porosa é menos determinante que as consequências da atividade pozolânica.

O trabalho desenvolvido por Lim e Mondal (2015) consistiu em uma pesquisa com pastas de cimento de relação a/agl igual a 0,45 e teor de adição de nanosílica de 5%, a fim de avaliar os efeitos sobre a carbonatação. Os autores concluem que em pequenas quantidades, como foi empregado no estudo, a incorporação da nanosílica dificultou o avanço da frente de carbonatação.

Jeong *et al.* (2018) analisam o efeito da adição das nanopartículas de sílica sobre o processo de carbonatação. No estudo foi utilizada uma relação a/agl igual a 0,38, adição de

2% de nanosílica e duas condições distintas de curas. Os resultados indicaram que o efeito da variação da cura na frente de carbonatação é maior do que a incorporação da adição mineral.

Assim, observa-se que ainda são poucos os trabalhos que tem como objetivo investigar a durabilidade dos materiais com incorporação da nanossílica, especialmente com relação ao avanço da frente de carbonatação. Nota-se a necessidade de esclarecer efetivamente para quais relações a/agl e teores de adição é possível se obter um material que apresente um desempenho mecânico, físico e de durabilidade adequado ao ambiente em que está inserido, além dos parâmetros de projeto.

O estudo sobre durabilidade na construção civil é algo complexo devido à grande variedade de técnicas construtivas, materiais utilizados e condições de exposição. O conhecimento sobre a influência da carbonatação depende dos diversos fatores que influenciam no processo, além do recorrente surgimento de novas variáveis, como, por exemplo, o constante desenvolvimento de novos materiais incorporados ao concreto, que é o caso das adições minerais.

A ampla variação dos tipos de adições minerais, e o seu efeito sobre a resistência do concreto ao ataque de CO_2 , se destaca entre os fatores influenciadores. É importante garantir que a incorporação dessas adições assegure o bom desempenho do concreto, não apenas melhorando suas propriedades mecânicas, mas também não interferindo na durabilidade do material, visto que já é de consenso na literatura que uma estrutura com boas características mecânicas não é sinônimo de vida útil prolongada.

Com a apresentação dos dados contidos na Tabela 2.4, busca-se descrever algumas pesquisas em que foi analisada a incorporação das adições minerais em matrizes cimentícias, obtendo um panorama dos tipos de adição estudados e dos teores incorporados. Na Tabela 2.5 são apresentados as condições de ensaio dos trabalhos que analisaram a influência das adições minerais na resistência do concreto frente ao ataque de CO_2 , a fim de conhecer o efeito provocado na durabilidade de material.

Tabela 2.4 – Estudos sobre a incorporação de adições minerais em matrizes cimentícias.

Autor (es)	Ano	País	Título da Pesquisa	Tipo do Material	Relação A/C	Adição Mineral	Teor de Adição (%)
Ferraris, Obla e Hill	2001	USA	A influência de aditivos minerais na reologia da pasta de cimento e do concreto	Pasta de cimento e concreto	0,28 a 0,35	Cinza volante, metacaulim, e sílica	0 a 16%
Leite	2007	Brasil	Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável	Concreto	0,33	Sílica ativa e cinza volante	0,40%
Senff <i>et al.</i>	2009	Brasil Portugal	Efeito da nanosílica na reologia e nas propriedades frescas de pastas e argamassas de cimento	Argamassas e pastas de cimento	0,35	Nanosílica	0 a 2,5%
Senff, Hotzaii, e Repette.	2010	Brasil	Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica	Pasta de cimento	0,4	sílica ativa e nanossílica	Sílica: 0 a 10% Nanossílica: 1%
Raisdorfer	2015	Brasil	Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos	Concreto	0,50 (referência) e 0,55 (adição)	cinza volante, sílica ativa, sílica de casca de arroz, fíler de quartzo e metacaulim.	10% e 30%
Cherif <i>et al</i>	2016	França	Estudo da solução de poros e da microestrutura de adições minerais de pastas de cimento	Pasta de cimento	0,5	sílica ativa (SA)	10%
Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho	2017	Brasil	Influência da sílica ativa e do metacaulim na taxa de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/agl	Concreto	0,5	Sílica Ativa e metacaulim	10%

Tabela 2.4 – Estudos sobre a incorporação de adições minerais em matrizes cimentícias (Continuação).

Elgalhud, Dhir e Ghataora	2017	Inglaterra	Resistência à carbonatação do concreto: efeito de adição de calcário	Concreto	0,34	Calcário	5–35%
Cardoso <i>et al</i>	2017	Brasil	Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra Ação de CO ₂ e Íons Cloreto	Argamassa	0,5 e 0,7	Sílica Ativa	10% e 15%
Réus <i>et al.</i>	2017	Brasil	Efeito do metacaulim na carbonatação natural: avaliação com modelos de previsão de vida útil	Concreto	0,46 - 0,74	Metacaulim e cal	8% Metacaulim 5% Cal
Agra <i>et al</i>	2017	Brasil	Influência das adições de pozolanas nas taxas de carbonatação em concretos	Concreto	0,5	Pozolanas	45%
Diniz	2018	Brasil	Estudo das propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com alto teor de aditivos minerais submetidos à carbonatação	Concreto Autoadensável	0,44	Metacaulim, pozolana da casca de arroz (PCA) e biomassa da cana-de-açúcar (RBC)	20 a 30%
Jin <i>et al</i>	2018	China	Degradação de concreto com adição de mistura mineral devido à penetração do íon cloreto livre sob efeito de carbonatação	Concreto	0,35 a 0,55	Cinza volante e escória de alto-forno granulada	35%
Oliveira e Cascudo	2018	Brasil	Efeito das adições minerais incorporadas ao concreto nos parâmetros termodinâmicos e cinéticos da corrosão por reforço induzida por cloreto	Concreto	0,55	Sílica ativa, metacaulim e carvão mineral	Sílica e Carvão Mineral - 5 a 12,5% Metacaulim - 0 a 15%

Tabela 2.5 – Condições de ensaio de carbonatação em concretos com adição mineral

Autor (es)	Ano	Forma e Dimensão da Amostra	Tipo e Tempo de Cura	Pré-Condicionamento	UR	T	CO ₂	Influência na Carbonatação
Raisdorfer	2015	cilíndrica de Ø 10 x 20 cm	Cura em câmara úmida (28 dias)	21 dias em ambiente climatizado	60%	40°C	5%	A utilização de adições minerais com potencial pozolânico reduziu à resistência à carbonatação dos concretos.
Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho	2017	cilíndrica de Ø 10 x 20 cm	Cura em câmara úmida (28 dias)	Camãra Seca 20 Dias	55 ± 5%	23 ± 3°C	5 ± 1%	Os resultados indicam que a resistência à compressão, a absorção e a relação água/cimento apresentam influência na velocidade de carbonatação
Réus <i>et al</i>	2017	cilíndrica de Ø 10 x 20 cm	Cura em câmara úmida (28 dias)	-		23±2 °C	0,053%	Os resultados indicaram que os 5% de cal adicionados na massa de concreto não foram suficientes para compensar o consumo de portlandita provocado pelas reações pozolânica do metacaulim
Agra <i>et al</i>	2017	cilíndrica de Ø 10 x 20 cm e prismática com 4x4x16 cm	Cura em câmara úmida (7 e 28 dias)	-	65%	23°C ± 2	5%	Foi verificado que a substituição do clínquer por pozolanas, nos cimentos CPIV, influem negativamente nas taxas de carbonatação dos concretos.
Diniz	2018	prismática com 10x10x10 cm	Cura por imersão em água (28 dias)	secos ao ar livre por 14 dias	80%	30 ± 2%	4 ± 0,5%	As misturas com adições apresentaram propriedades mecânicas equivalentes ao concreto sem adições minerais e as frentes de carbonatação não atingiram a profundidade equivalente ao cobrimento nominal.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta pesquisa é continuidade de outros trabalhos já realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Dessa forma, vários parâmetros adotados neste trabalho tomaram como base a pesquisa desenvolvida Schmalz (2018), que analisou a durabilidade de argamassas com adição de nanossílica, quando submetidas ao ataque de sulfatos.

O método de trabalho que compõe essa pesquisa é formado por 6 etapas: caracterização dos materiais, compatibilização entre aglomerantes e aditivo, definição dos traços e moldagem dos corpos de prova, propriedades mecânicas e físicas, durabilidade dos concretos frente a ação do CO₂ e por fim, ensaios microestruturais. A Figura 3.1 descreve os ensaios realizados em cada uma das etapas.

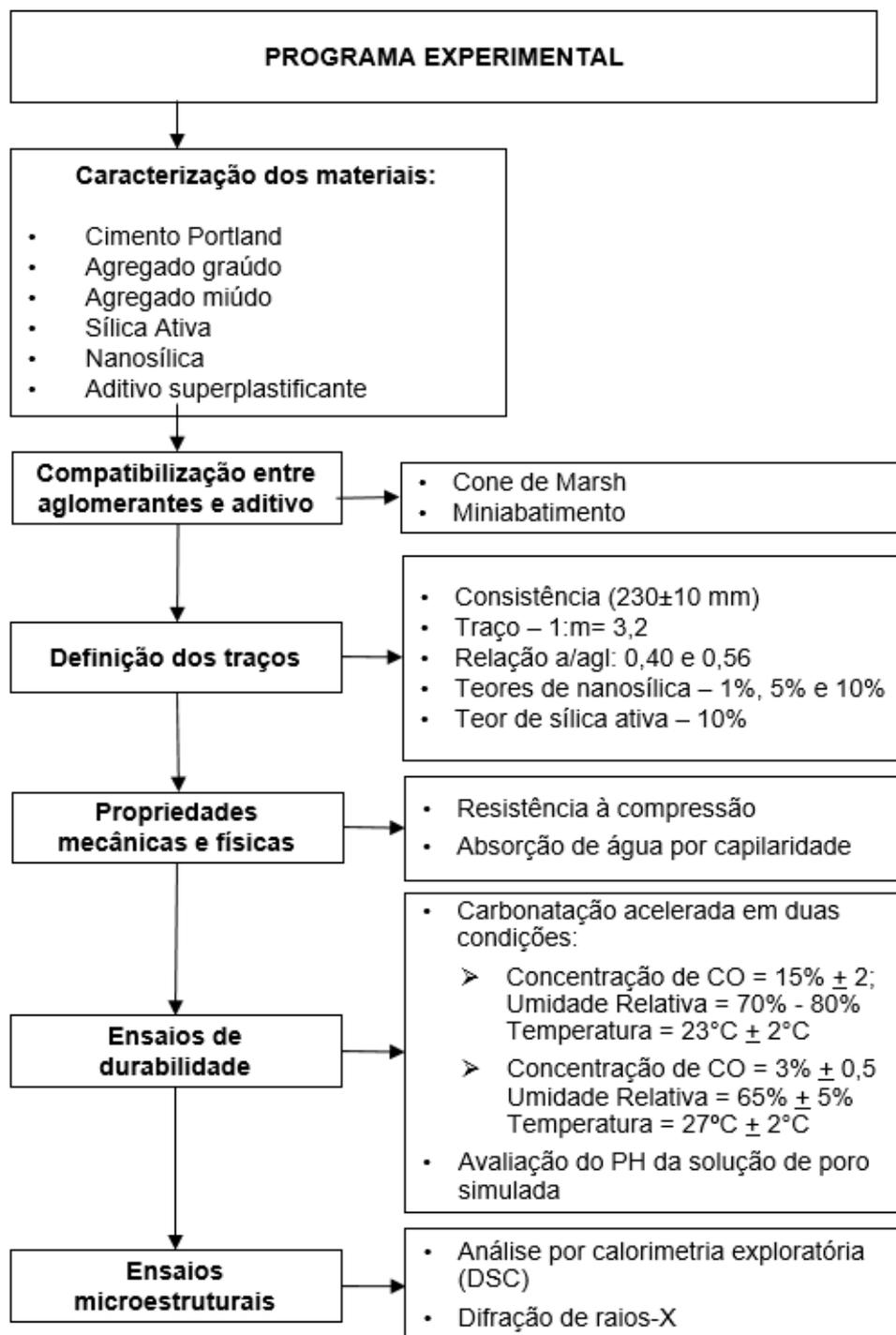
Após a caracterização executada na primeira etapa, realizaram-se ensaios em pasta no estado fresco com o objetivo de se verificar a compatibilidade entre os materiais empregados, principalmente entre cimento, nanossílica e sílica ativa com o aditivo superplastificante escolhido para ser utilizado.

Na terceira etapa foram definidos os traços a serem utilizados, de acordo com Schmalz (2018), e com base em ensaios com concreto no estado fresco. Foi realizada verificação da consistência dos concretos (230±10 mm) e definição do teor de aditivo superplastificante necessário em cada um dos traços de relação a/agl igual a 0,40. Para a relação a/agl igual a 0,56, o aditivo superplastificante não foi utilizado.

Posteriormente foram avaliadas as propriedades dos concretos no estado endurecido. Na quarta etapa realizou-se a caracterização física e mecânica dos concretos, a partir de ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. Sequencialmente, na quinta etapa realizou-se os ensaios de durabilidade frente a ação do CO₂, que foram a carbonatação acelerada e a avaliação do pH da solução de poro simulada.

Por fim, na sexta etapa foram realizados os ensaios microestruturais em pasta, que consistiram na análise por calorimetria exploratória (DSC) e a difração de raios-X.

Figura 3.1 - Etapas do programa experimental.



O desenvolvimento desta pesquisa foi realizado em conjunto com Santos (2019), que estudou concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de cloretos e CO_2 . A caracterização dos materiais, a compatibilização entre aditivo e aglomerantes, a definição dos traços, a moldagem dos corpos de prova, a caracterização mecânica e física dos concretos, e também, o ensaio isolado de carbonatação acelerada com concentração de 15%

de CO₂, foram realizados conjuntamente com Santos (2019), visto que os traços estudados em ambos os trabalhos foram os mesmos.

Segundo Marconi e Lakatos (2003), na metodologia de trabalhos científicos há dois tipos de variável, a independente e a dependente, sendo a primeira aquela que é capaz de influenciar, determinar ou afetar a segunda que, por sua vez, deve ser explicada ou descoberta ao longo da pesquisa. Aplicando esse conceito ao presente estudo, tem-se como variáveis independentes o tipo e o teor de adição a serem incorporadas nos concretos estudados, e como variáveis dependentes as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade que são consequências dos fatores independentes.

A nanosílica empregada é uma solução aquosa que apresenta uma concentração de 50% de sólidos e para avaliar o seu efeito nas misturas, foram estudados quatro teores de nanosílica (0%, 1%, 5% e 10%) em relação à massa de cimento, sendo a substituição feita em massa, e, para avaliação do efeito combinado da nanosílica e da sílica, em algumas misturas foi incorporada a sílica ativa no teor de 10%, sendo a substituição feita em volume. O traço foi mantido fixo para todas as misturas em 1:m=3,2, sendo m igual ao total de agregados. Os concretos foram moldados com duas relações água/aglomerante: 0,40 e 0,56.

Para um melhor entendimento, adotou-se a seguinte nomenclatura mR-N-S, sendo:

m:	Tipo de mistura	C:	Concreto / P: Pasta
R:	Relação a/agl	40:	0,40 / 56: 0,56
N:	Nanosílica	Teor (%) de substituição de cimento (em massa)	
S:	Sílica Ativa	Teor (%) de substituição de cimento (em volume)	

Dessa forma, um traço denominado C40-1-10 se refere a um concreto com relação a/agl igual a 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, por exemplo, um concreto de traço referência com relação a/agl igual a 0,56, será identificado como C56-REF.

Vale destacar que o teor (%) de nanosílica indicado é a quantidade de sólidos (50% de nano partículas de sílica) presente na solução aquosa em que o material é disponibilizado no mercado. O teor de substituição de cimento feito pela nanosílica é determinado em massa por indicação do fabricante, já o teor de substituição de sílica ativa é feito em volume com o intuito de manter o procedimento adotado em trabalhos anteriores realizados no grupo de pesquisa.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 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 no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

3.1.2 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado é natural de origem basáltica com dimensão máxima característica de 9,5 mm e comercializado na região de São Carlos, sendo 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 248:2003.

3.1.3 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo empregado nesta pesquisa foi areia natural fina de origem quartzosa, encontrada da região de São Carlos, sendo 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 248:2003.

3.1.4 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa adotada nesta pesquisa foi uma sílica não densificada, fabricada pela Dow Corning Silício do Brasil. A caracterização química e física foi fornecida pelo fabricante.

3.1.5 NANOSÍLICA

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

3.1.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

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

3.1.7 ÁGUA

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento de São Carlos.

3.2 COMPATIBILIDADE ENTRE AGLOMERANTES E ADITIVO

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 foram realizados em pasta e apenas para a relação a/agl igual a 0,40, pois, para a relação a/agl igual a 0,56 não se utilizou aditivo superplastificante.

3.2.1 CONE DE MARSH

Por meio do ensaio do Cone de Marsh é 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.

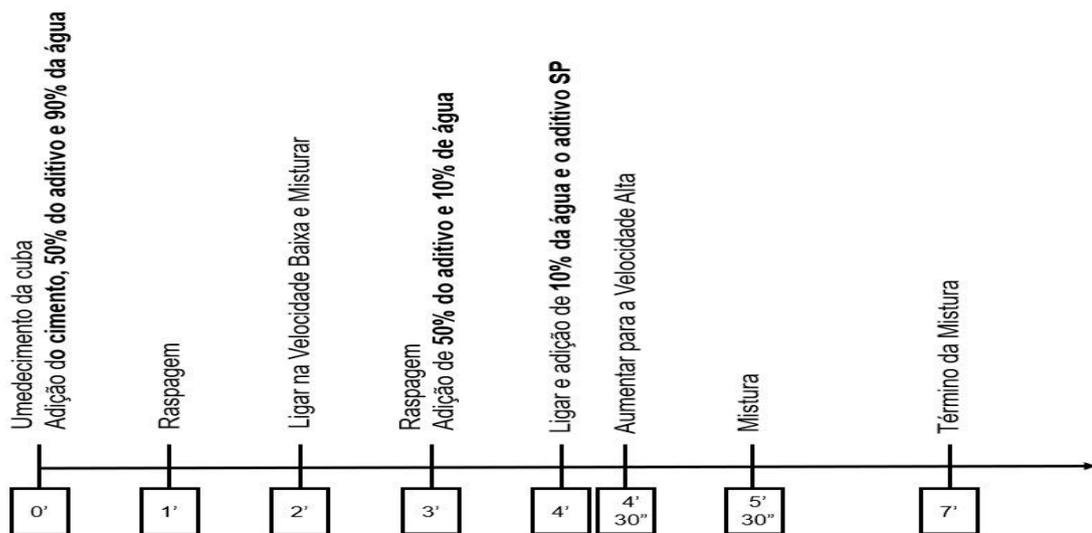
No total foram ensaiadas 5 composições de pasta e para cada uma delas variou-se o aditivo superplastificante em 5 teores:

- 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;
- Cimento + 1% de nanosílica + 10% de sílica ativa + aditivo SP (0,7% a 1,1%) + água.

Para a confecção das pastas foi realizado procedimento apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Procedimento de mistura das pastas.



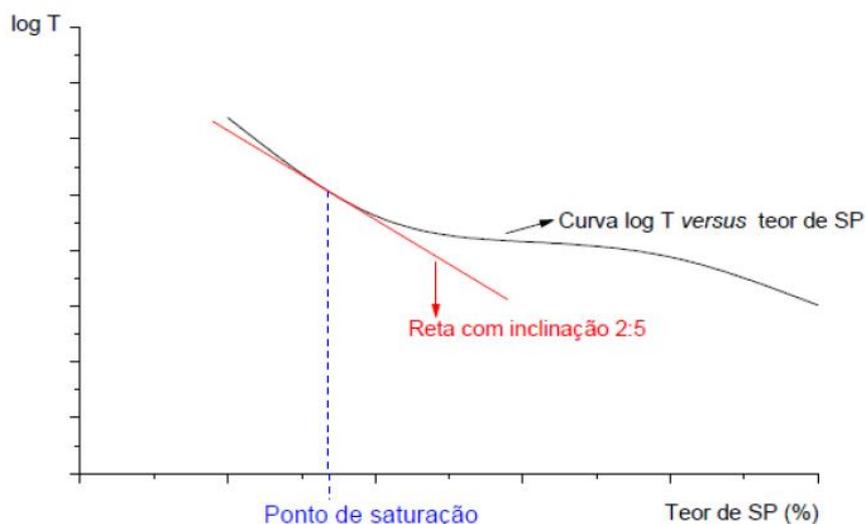
Para cada pasta estudada variou-se o teor de aditivo superplastificante, e com os tempos (T) de escoamento de 500 ml de pasta foi gerada uma curva do log (T) pelo teor de aditivo utilizado. A execução do ensaio é mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Ensaio de Cone de Marsh.



Plotada as curvas, o ponto de saturação do aditivo superplastificante foi encontrado a partir 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, conforme ilustra a Figura 3.4.

Figura 3.4 - Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante pelo Método AFREM.



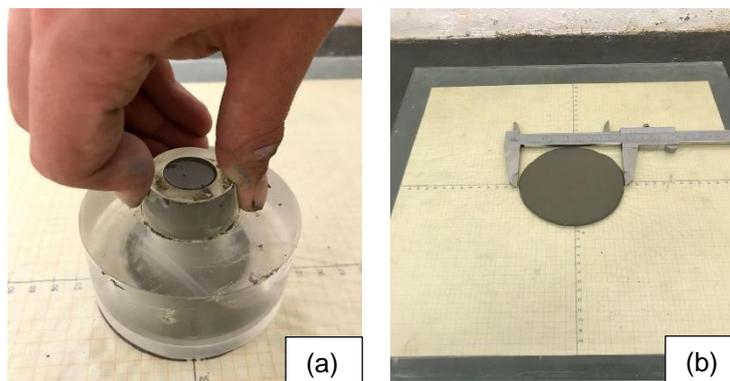
Fonte: Castro (2007).

3.2.2 MINIABATIMENTO

O ensaio de Miniabatimento é realizado com o objetivo de verificar a perda de consistência das misturas com o decorrer do tempo. Este foi executado, após ter sido encontrado o teor ótimo de aditivo superplastificante a ser utilizado nas pastas, por meio do ensaio de Cone de Marsh. Para a realização do Miniabatimento da pasta de cimento, 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 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 3.5). Realizou-se o ensaio após 10, 30, 40 e 60 minutos do contato da água com o cimento.

Figura 3.5 - Ensaio de Miniabatimento: a) molde preenchido com a pasta e b) medição do diâmetro.



3.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVA

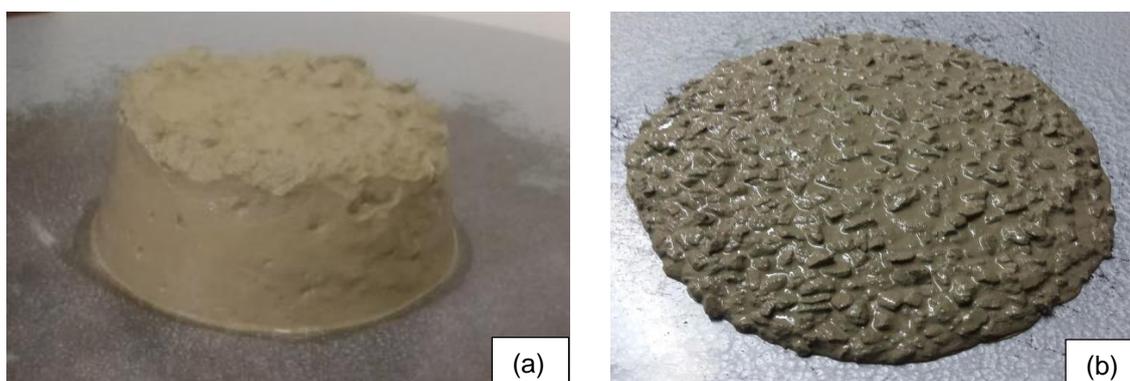
Para a moldagem dos corpos de prova analisados nessa pesquisa, estabeleceu-se o traço dos concretos, com variação da relação a/agl e dos teores de substituição de sílica ativa e de nanosílica.

Nas misturas com relação a/agl igual 0,40, a quantidade de aditivo superplastificante utilizada em cada traço foi definida por meio da verificação da consistência dos concretos, sendo adotada consistência ideal de (230 ± 10) mm. Deste modo, foram testados diferentes teores de aditivo superplastificante até se obter um valor de consistência dentro do limite especificado.

Para a realização deste ensaio utilizou-se a NBR 13276:2016 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, que é 9,5 mm.

A Figura 3.6 retrata o concreto sobre a mesa para índice de consistência, no momento imediatamente após a retirada do molde tronco cônico.

Figura 3.6 - Ensaio de Consistência: a) concreto após retirada do molde b) área de espalhamento.



O procedimento de mistura dos concretos que foi utilizado neste programa experimental é apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Procedimento de mistura dos concretos.



Após a mistura, os corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura foram moldados conforme a NBR 5738:2015 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.

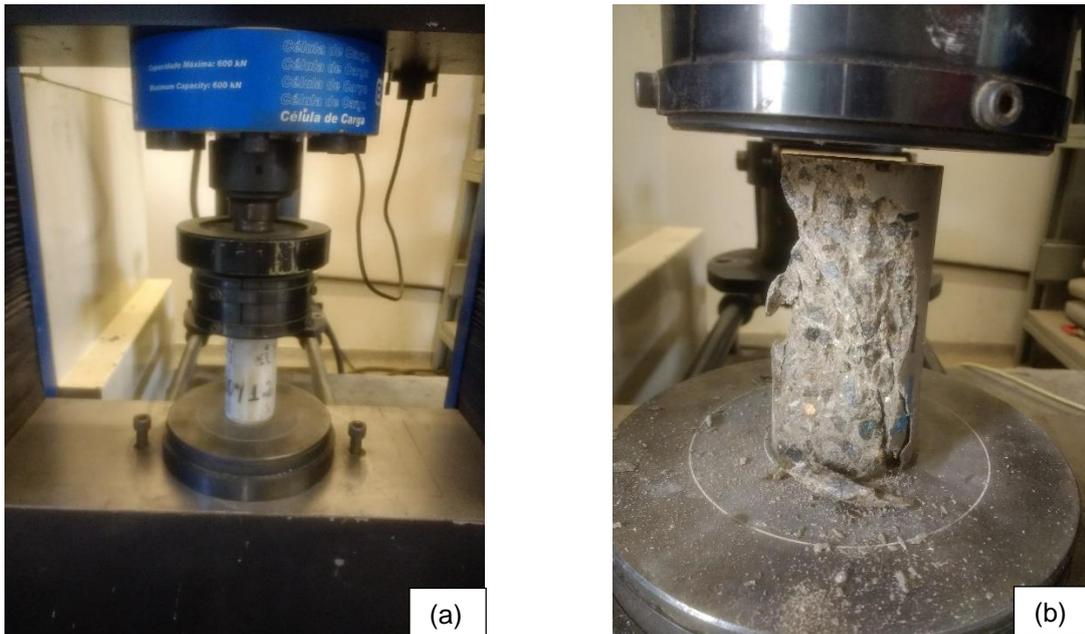
3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS

Para cada idade analisada nos ensaios de propriedades mecânicas e físicas 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.

3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados conforme a NBR 5739:2018 nas idades de 7, 28 e 63 dias. Antes da realização do ensaio de resistência à compressão que é retratado pela Figura 3.8, os corpos de prova foram retificados para permitir uma distribuição uniforme da carga.

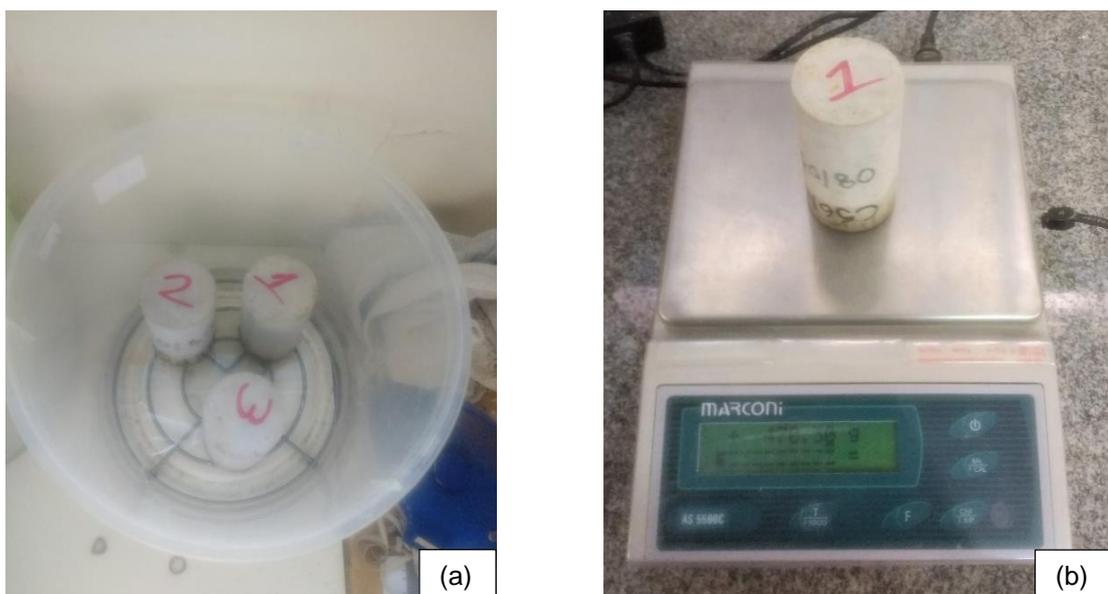
Figura 3.8 - Ensaio de resistência à compressão dos concretos.



3.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 28 dias após a moldagem dos corpos de prova, seguindo as especificações da NBR 9779:2012. A Figura 3.9 retrata o ensaio no momento em que os corpos de prova estão em contato com água (Figura 3.9a) e quanto foi realizada as pesagens (Figura 3.9b).

Figura 3.9 - 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.



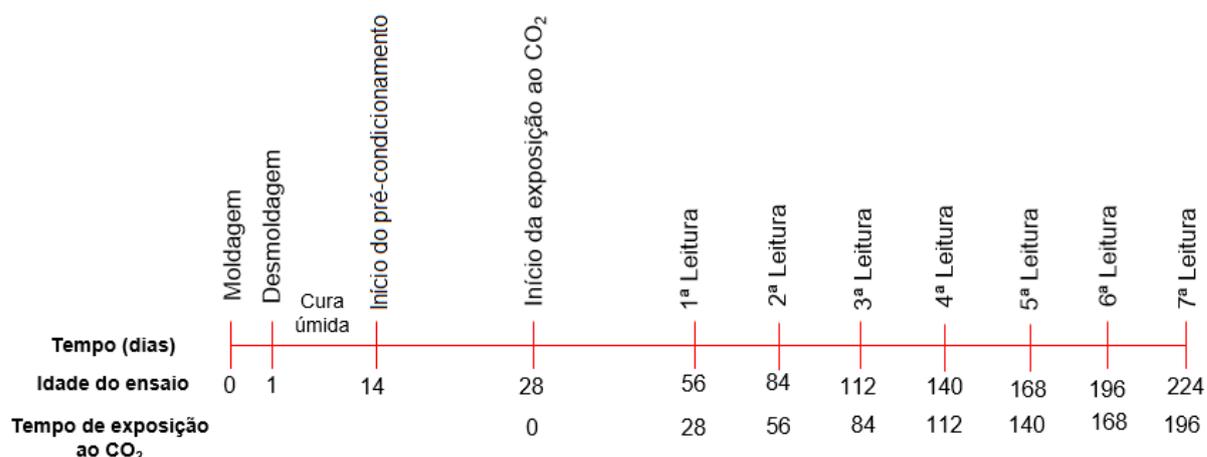
3.5 DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DO CO₂

O ataque acelerado de CO₂ aos corpos de prova aconteceram em duas câmaras de carbonatação com características distintas.

Primeiramente o ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC/UFSCar) em São Carlos - SP, onde câmara de carbonatação utilizada conta com concentração de $(15 \pm 2)\%$ de CO₂, umidade relativa entre 70% e 80% e temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. A câmara de carbonatação do LMC/UFSCar conta com sensores para indicar os parâmetros de ensaio, e o controle das condições é feito manualmente pelo técnico de laboratório.

As medidas das frentes de carbonatação foram realizadas após 28 dias de exposição ao CO₂ até completar 196 dias. Os corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100mm de altura foram moldados e mantidos em ambiente de laboratório por 1 dia, posteriormente foram desmoldados e, então, conservados em câmara úmida por 14 dias. Ao completar o período de cura, os corpos de prova foram submetidos a 14 dias de pré-condicionamento ambiente de laboratório, e após esse período, iniciou-se a exposição na câmara ao ataque acelerado de CO₂ (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Idades de ensaio e tempo de exposição ao CO₂ (15% de concentração)



Após o tempo de exposição ao CO₂, a determinação da profundidade da frente de carbonatação foi feita pelo método colorimétrico e posteriormente foi avaliado o pH da solução de poro simulada.

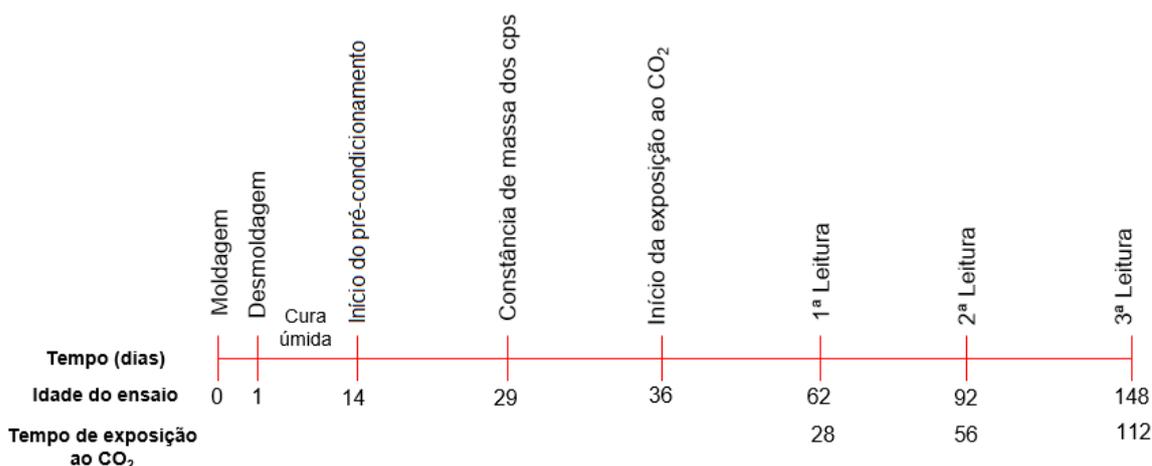
Em uma segunda etapa foram moldados novos corpos de prova no LMC/UFSCar em São Carlos - SP, com as mesmas características geométricas e seguindo os mesmos procedimentos da primeira etapa. Depois de passar 14 dias de cura em câmara úmida os

concretos foram submetidos a um período de pré-condicionamento com o objetivo de estabilização da umidade interna, que durou 15 dias até atingir constância de massa.

Os corpos de prova foram envolvidos com plástico filme e enviados ao Laboratório de Ensaio em Materiais (LEM/UnB) em Brasília – DF, onde o ensaio de carbonatação acelerada foi realizado. A câmara de carbonatação utilizada segue os parâmetros recomendados pela ISO 1920-12:2015: concentração de $(3,0\pm 0,5)\%$ de CO_2 , umidade relativa de $(65\pm 5)\%$ e temperatura de $(27\pm 2)^\circ\text{C}$. O controle da concentração de dióxido de carbono na câmara de carbonatação acelerada do LEM/UnB é feita automaticamente por meio de um sistema.

O rompimento dos corpos de prova e as leituras da profundidade de carbonatação ocorreram após 28, 56 e 112 dias após se iniciar o ataque acelerado em câmara, conforme ilustra a Figura 3.11, sendo identificada a frente de carbonatação pelo método colorimétrico.

Figura 3.11 - Idades de ensaio e tempo de exposição ao CO_2 (3% de concentração)



O início da exposição ao CO_2 no ensaio com 15% de concentração, ocorreu aos 28 dias, já no experimento com 3% de concentração o início de exposição se deu aos 36 dias devido a necessidade de transportar os corpos de prova de São Carlos-SP, onde foram moldados e permaneceram durante a cura e o período de pré-condicionamento, até Brasília-DF onde foi realizado o ataque acelerado na câmara de carbonatação.

A quantidade de leituras e o tempo de exposição dos corpos de prova ao CO_2 , também foram distintos nos dois ensaios, e seguiram a necessidade imposta por cada condição em que os experimentos foram feitos. Na câmara com 15% de concentração de CO_2 foi necessária a realização de mais leituras visto que o surgimento da frente de carbonatação demorou mais tempo para ocorrer, quando comparado com o ensaio realizado a 3% de concentração que apresentou resultados significativos em menos tempo.

A Tabela 3.1 apresenta de maneira resumida as duas condições dos ensaios de carbonatação acelerada.

Tabela 3.1 – Condições dos ensaios de carbonatação acelerada.

Ensaio de carbonatação acelerada		
Local	LMC (UFSCar) – São Carlos - SP	LEM (UnB) – Brasília - DF
Corpo de Prova	Cilíndrico – Ø50x100mm	Cilíndrico – Ø50x100mm
Cura	Úmida – 14 dias	Úmida – 14 dias
Pré condicionamento	14 dias em ambiente de laboratório	15 dias em ambiente de laboratório
Teor de CO₂	15% ± 2%	3% ± 0,5%
Umidade	70% - 80%	65% ± 5%
Temperatura	23°C ± 2°C	27°C ± 2°C

3.5.1 AVALIAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO

O método colorimétrico consiste na aplicação de uma solução que em contato com o concreto alcalino, adquire uma coloração vermelho carmim. Nesse trabalho o indicador utilizado foi a fenolftaleína, que em contato com o pH alcalino, assume uma coloração vermelha carmim, possibilitando identificar a região carbonatada e a região não-carbonatada.

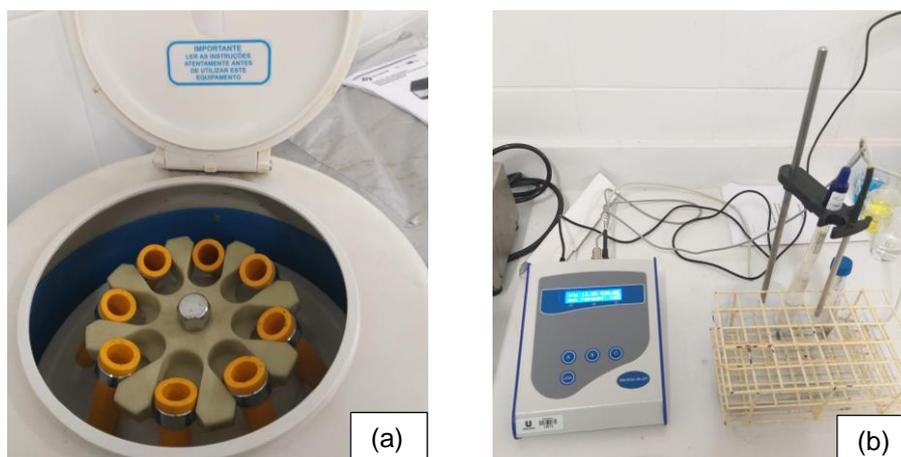
Completado o tempo de exposição ao CO₂, os corpos de provas foram rompidos à tração por compressão diametral e, então feita a aspensão da solução de fenolftaleína e, com auxílio de um paquímetro, foi realizada a medida da frente de carbonatação.

3.5.2 AVALIAÇÃO DO PH DA SOLUÇÃO DE PORO SIMULADA

Para a utilização desse método foi necessário preparar a solução, obtida a partir do pó extraído do corpo de prova e da mistura com água destilada em uma proporção de 1/20 (pó/água). A solução foi agitada por 10 minutos em uma centrífuga com velocidade de 2000 rpm (Figura 3.12a). Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Análises Químicas da União das Faculdades dos Grandes Lagos, na cidade de São José do Rio Preto – SP.

O pH da solução foi aferido por meio de um equipamento denominado phmetro (Figura 3.12b), o que possibilitou avaliar diferença entre o pH da região não carbonatada do corpo de prova, com a região atingida pela frente de carbonatação.

Figura 3.12 – Avaliação da solução de poro simulada: a) centrífuga b) medição do pH.



3.6 ENSAIOS MICROESTRUTURAIIS

3.6.1 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

De acordo com Martins (2018), o ensaio de DSC acompanha os efeitos do calor em um determinado material, associados a mudanças de fase ou reações químicas em função da temperatura. A técnica de calorimetria exploratória diferencial possibilita a construção de uma curva do fluxo de calor (mW) pela temperatura ($^{\circ}\text{C}$), onde é possível analisar a decomposição térmica dos compostos existentes na amostra.

Em matrizes cimentícias o ensaio de calorimetria diferencial (DSC), não é empregado quantitativamente, mas sim para identificação de fases. Este experimento é utilizado para confirmar a presença das fases cristalinas encontrados em outros experimentos, como por exemplo, o ensaio de difração de raios-X (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH; 2016).

As análises térmicas foram realizadas no Complexo de Laboratórios Multiusuários da Universidade Estadual de Ponta Grossa (CLABMU – UEPG), por meio de um equipamento da marca Setaram, modelo Labsys evo, que operou numa faixa de temperatura de 0° a 1000°C , a uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ em atmosfera de Argônio (ANDRADE, 2015; GONÇALVES, 2016).

3.6.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Este experimento permite a identificação das substâncias (fases cristalinas) que estão presentes nas amostras estudadas. Através dos picos presentes nos difratogramas gerados é possível identificar os compostos existentes, e quantificá-los a partir da medida da intensidade desses picos (SILVA, 2006).

O ensaio de difração de raios-X foi desenvolvido no Laboratório de Raios-X, da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios-X da marca Rigaku, modelo Última IV e o experimento foi desenvolvido em uma faixa angular (2θ) de 5° a 100° , com passo de 0,0200/segundo e velocidade de $2^\circ/\text{min}$, tensão de 40kV e corrente de 40 mA.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados de resistência à compressão axial 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 houve diferenças significativas, foi realizado o teste de Tukey.

Resumidamente, a ANOVA consiste em testar duas hipóteses:

- Hipótese Nula (H_0): não existe diferença significativa entre as médias;
- Hipótese Alternativa (H_1): há pelo menos uma diferença significativa entre elas.

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

- Se $p\text{-valor} \geq \alpha$, aceita-se H_0 (não há diferenças significativas)
- Se $p\text{-valor} < \alpha$, rejeita-se H_0 (há diferenças significativas)

Após a ANOVA, realizou-se o teste de Tukey para os casos onde H_0 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 $\alpha = 5\%$, utilizando-se o software OriginLab.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de expor os dados obtidos a partir da execução do programa experimental, é que se apresenta este capítulo, que traz especificamente os resultados de caracterização dos materiais, ensaios em pasta, definição dos traços de concreto, ensaios de caracterização física e química dos concretos e, por fim, os resultados dos ensaios de durabilidade e microestruturais.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado neste trabalho é CP V ARI, e suas características físicas são retratadas pela Tabela 4.1, assim como, suas propriedades químicas são apresentadas na Tabela 4.2. Os resultados obtidos indicam que o material utilizado está em conformidade com o especificado pela NBR 16697:2018.

Tabela 4.1 - Propriedades físicas do CP V ARI.

Características e propriedades		Valores obtidos	Limites NBR 16697:2018
Massa específica (NBR NM 23)		3,12 g/cm ³	**
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 ² /kg	> 300 m ² /kg
Resistência à compressão (f _{ci})	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 4.2 - Propriedades químicas do CP V ARI.

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

* A NBR 16697:2018 não estabelece valores limites.

¹ A NBR 15577:2018 limita o teor de Equivalente alcalino (em Na₂O) em 0,6%.

4.1.2 AGREGADO GRAÚDO

A partir da realização dos ensaios de caracterização do agregado graúdo, obtém-se os resultados que são expostos pela Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Caracterização do agregado graúdo.

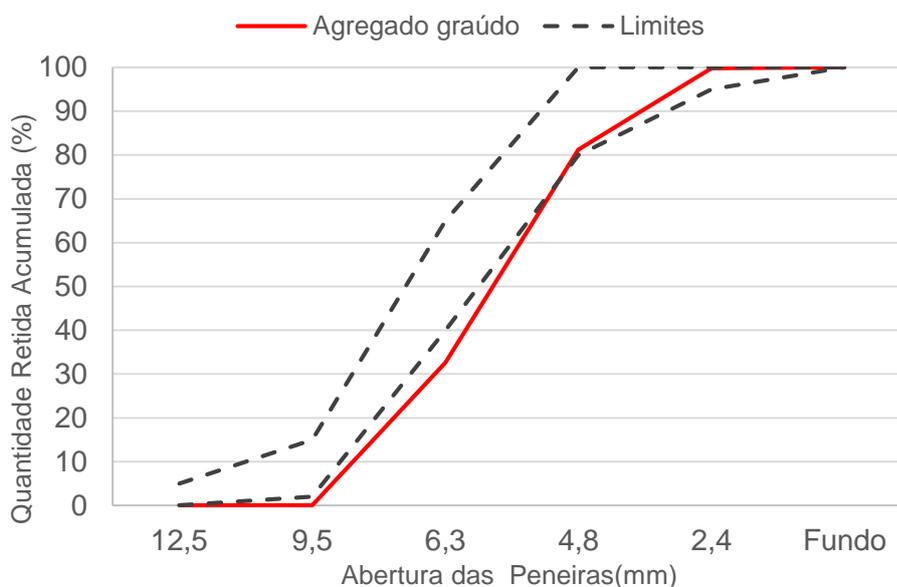
Características	Metodologia	Valores obtidos
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 53:2009	2,77
Massa unitária seca e solta (kg/m ³)	NBR NM 45:2006	1422,32
Massa unitária compactada (kg/m ³)	NBR NM 45:2006	1568,72
Absorção de água (%)	NBR NM 53:2009	2,26
Material pulverulento (%)	NBR NM 46:2003	1,00

A Tabela 4.4 revela os valores encontrados por meio da realização do ensaio de distribuição granulométrica do agregado graúdo. Por sua vez, a Figura 4.1 apresenta a curva de distribuição granulométrica desse mesmo agregado.

Tabela 4.4 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira	% Retida	% Acumulada
12,5	0,00	0,00
9,5	0,00	0,00
6,3	29,47	32,58
4,8	31,75	81,22
2,4	0,30	99,79
2,0	0,08	99,88
1,2	0,00	99,91
Fundo	0,09	100,00

Figura 4.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.



Nota-se que o agregado graúdo utilizado neste trabalho apresenta dimensão máxima característica de 9,5mm, módulo de finura de 5,81 e que sua curva granulométrica está no limite inferior da faixa estabelecida pela NBR 7211:2009 para a zona 4,75/12,5.

4.1.3 AGREGADO MIÚDO

Obtidos a partir dos ensaios realizados neste programa experimental, os valores que caracterizam o agregado miúdo estão expressos na Tabela 4.5.

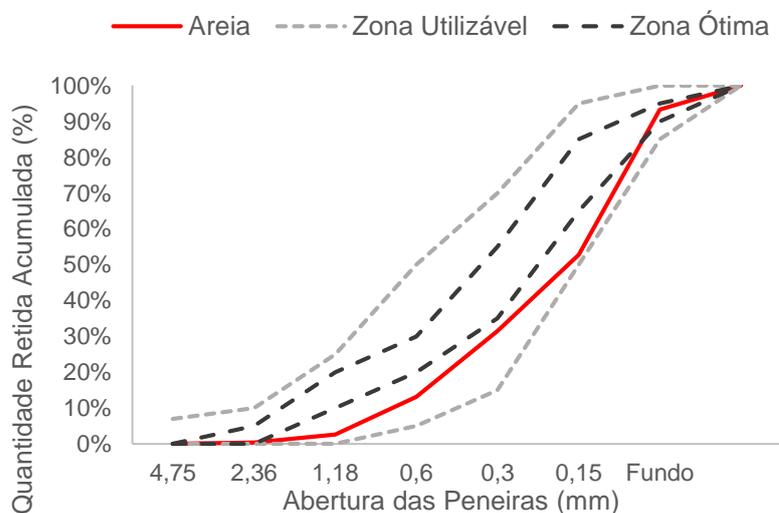
Tabela 4.5 - Caracterização agregado miúdo.

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

A distribuição granulométrica do agregado miúdo foi obtida por meio de ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248:2003, onde utilizou-se a série normal de peneiras e foi executado para três amostras de 500 g cada. Os resultados obtidos a partir da média das três amostras são revelados pela Tabela 4.6 e a curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo é retratada na Figura 4.2.

Tabela 4.6 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira (mm)	% Retida	%Acumulada
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 4.2 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa possui dimensão máxima característica de 2,4 mm e apresenta módulo de finura igual a 1,94. A curva de distribuição granulométrica da areia está inserida dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211:2009.

4.1.4 PROPORÇÃO IDEAL ENTRE OS AGREGADOS GRAÚDO E MIÚDO

O ensaio de massa unitária no estado compactado foi realizado para obtenção da composição ideal dos agregados e os resultados são expostos pela Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Determinação da proporção ideal entre os agregados.

Composição predrisco/areia (%)	Quantidade de pedrisco (kg)	Quantidade de areia (kg)	Acréscimo de areia (kg)	Massa do agregado (kg)	Massa unitária est. Compactado (kg/dm ³)
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
60/40	6	4,00	1,43	5,8480	1,95
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.

4.1.5 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa utilizada neste trabalho foi fornecida pela Dow Corning Silício do Brasil e a sua caracterização química e física é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Características físicas e químicas da sílica ativa.

Características	Valor
Equivalente alcalino em Na ₂ O (%)	0,7
Perda ao Fogo (%)	3,7
SiO ₂ (%)	93,0
Na ₂ O (%)	0,2
Fe ₂ O ₃ (%)	0,5
CaO (%)	0,5
MgO (%)	0,4

Tabela 4.8 - Características físicas e químicas da sílica ativa (continuação).

Características	Valor
Al ₂ O ₃ (%)	0,2
K ₂ O (%)	0,9
Densidade (g/cm ³)	0,35
Ph	7,9
Umidade (%)	0,1
Retido 45 mm (#325) (%)	3,7

Fonte: Dow Corning Silício do Brasil.

4.1.6 NANOSÍLICA

Nesta pesquisa foi adicionada aos concretos a nanosílica Levasil CB8, fornecida pela AkzoNobel. A Tabela 4.9 apresenta as características físicas do material.

Tabela 4.9 - Principais características físicas da nanosílica.

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

Fonte: AkzoNobel.

4.1.7 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

O aditivo superplastificante empregado na moldagem dos concretos foi o ADVA CAST 585 e as suas características foram fornecidas pelo fabricante (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 - Características do aditivo superplastificante.

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

Fonte: Grace (GCP Applied Technologies).

4.2 COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE AGLOMERANTES E ADITIVO

4.2.1 CONE DE MARSH

O ensaio de Cone de Marsh foi realizado para as 5 misturas com relação a/agl igual a 0,40 (referência, 1% de nanosílica, 5% de nanosílica, 10% de nanosílica e 1% de nanosílica + 10% de sílica ativa). A composição dos traços analisados é apresentada na Tabela 4.11. Vale ressaltar que para a relação a/agl igual a 0,56 não foi utilizado o aditivo SP, portanto, esse ensaio não foi realizado. Nota-se que é descontado da quantidade de água a porção existente na solução de nanosílica.

Tabela 4.11 – 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
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

Tabela 4.11 – Composição dos traços das pastas (continuação).

Pastas	Materiais (g)				
	Cimento	Sílica ativa	Nanosílica	SP(%)	Água
P40-1-10	1000	67,3	9,7	0,7	377,3
	1000	67,3	9,7	0,8	377,3
	1000	67,3	9,7	0,9	377,3
	1000	67,3	9,7	1,0	377,3
	1000	67,3	9,7	1,1	377,3

Para cada um dos 5 tipos de pasta foram testados 5 teores diferentes de aditivo superplastificante. A Tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos com o ensaio do Cone de Marsh. A partir de 10 minutos do contato da água com o cimento, foi obtido o tempo (T) de escoamento para cada um dos 5 teores testados, e por fim, foi calculado o Log (T).

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh.

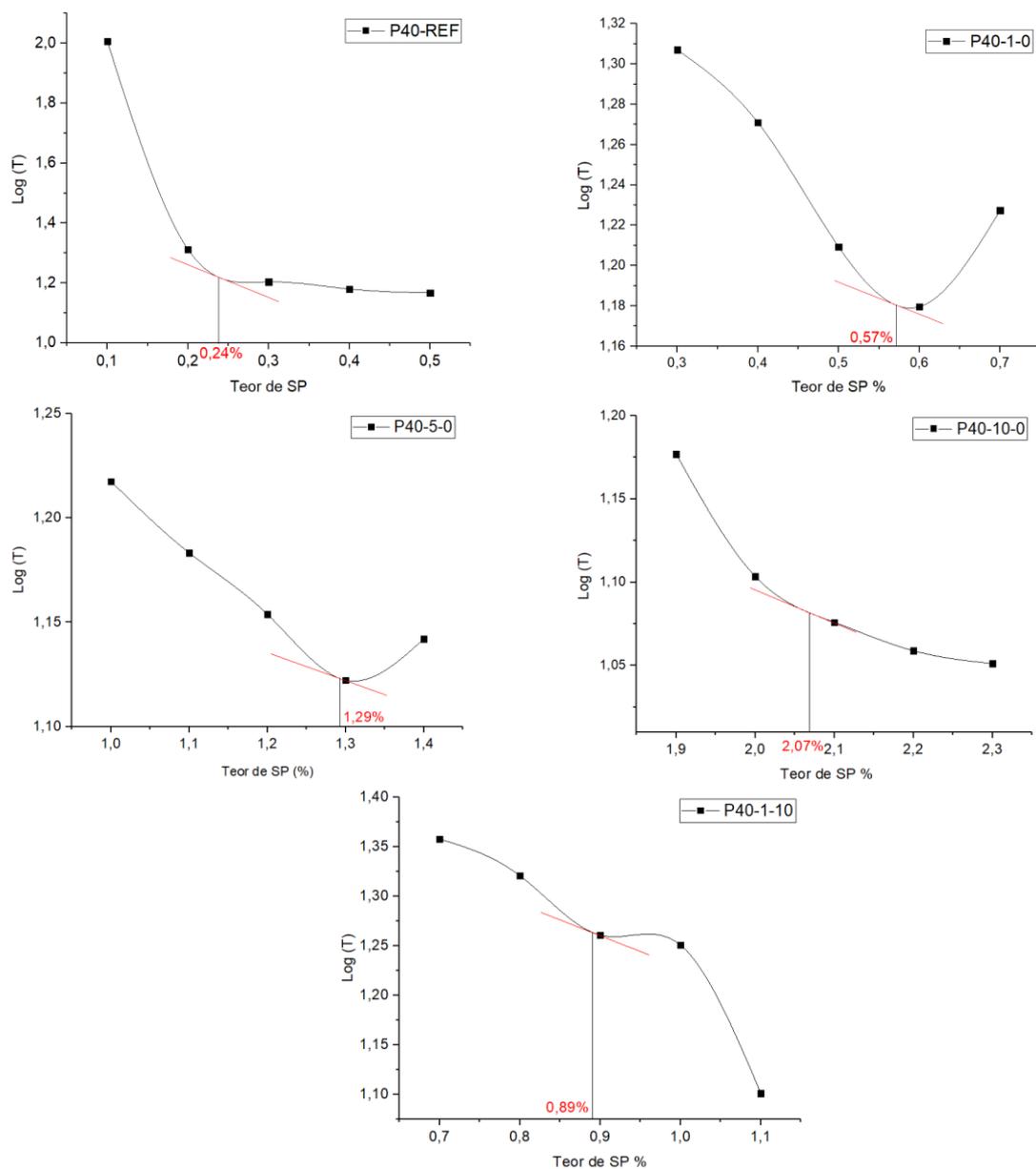
Pastas	P40-REF				
Teor de SP%	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
T(s)	101,47	20,50	15,97	15,12	14,69
Log (T)	2,006	1,312	1,203	1,180	1,167
Pastas	P40-1-0				
Teor de SP%	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
T(s)	20,28	18,66	16,19	15,12	16,88
Log (T)	1,307	1,271	1,209	1,180	1,227
Pastas	P40-5-0				
Teor de SP%	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
T(s)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

De posse dos 5 teores de aditivo superplastificante testados para cada mistura, e conhecendo o Log do tempo de escoamento da pasta no cone de Marsh, que é iniciado após

10 minutos do contato entre a água e o cimento, foi possível gerar as curvas (Log (T) x Teor de SP), que são ilustradas pela Figura 4.3.

Com base no método de AFREM, que foi apresentado na metodologia deste trabalho, encontrou-se o ponto de saturação do aditivo superplastificante para cada uma das pastas estudadas. Nota-se que pasta P40-REF (referência) teve como ponto de saturação o teor de 0,24% de aditivo, já a pasta P40-1-0 (1% de nanosílica) obteve um teor igual a 0,57%, no caso da pasta P40-5-0 (5% de nanosílica) o teor encontrado foi de 1,29%, referente a pasta P40-10-0 (10% de nanosílica) o teor é igual a 2,07% e por fim, a pasta P40-1-10 (% de nanosílica e 10% de sílica ativa) apresentou o teor de 0,89% (Figura 4.3).

Figura 4.3 - Gráficos Log (T) x Teor de SP %.



Pode-se observar que nas 5 pastas analisadas a quantidade de nanosílica adicionada é diretamente proporcional ao teor de aditivo indicado como ponto de saturação, visto que

quanto mais nanosílica foi incorporada à mistura, maior foi o teor de aditivo. A pequena dimensão das partículas de nanosílica faz com se demande uma maior quantidade de água de amassamento, devido ao aumento da área superficial, e dessa forma, justifica-se a necessidade de um maior teor de aditivo superplastificante que visa contribuir para a trabalhabilidade da mistura.

Os resultados apresentados vão de encontro com o que é exposto pela literatura (KHALOO; MOBINI; HOSSEINI, 2016; GESOGLU *et al*, 2016), visto que o fator a/agl é fixo para as misturas, acaba sendo preciso que se incorpore um maior teor de aditivo SP, conforme aumenta-se a incorporação da adição mineral.

No caso da única pasta com adição de sílica ativa, a (P4-1-10), que é composta por com 1% de nanosílica + 10 de sílica ativa, quando esta é comparada com a pasta de apenas 1% de nanosílica (P4-1-0), nota-se que também houve um acréscimo no teor de aditivo que indica o ponto de saturação. A substituição do cimento pela sílica ativa também colabora em um maior consumo de água de amassamento e, dessa maneira, mantendo-se constante a relação a/agl , justifica-se a necessidade de uma maior quantidade de aditivo SP. Portanto, apesar da sílica ativa possuir partículas de diâmetro maior que o da nanosílica, o diâmetro das partículas desta primeira ainda é menor que o do cimento, portanto, a sua incorporação aumenta o teor de finos e diminui a consistência de misturas com relação a/agl fixa.

4.2.2 MINIABATIMENTO

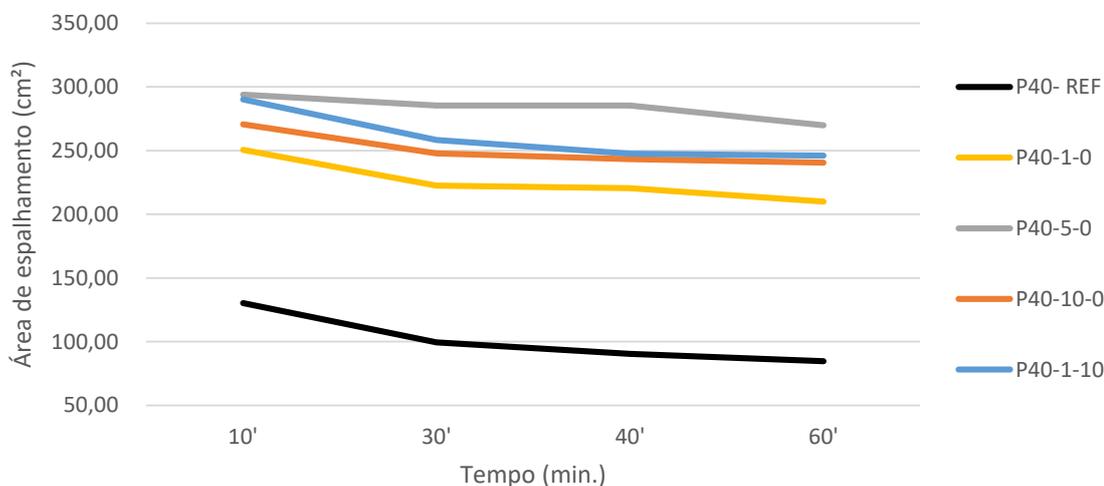
Com as mesmas pastas utilizadas no ensaio de Cone de Marsh, realizou-se o ensaio de Miniabatimento. Entretanto, este ensaio foi executado empregando-se apenas o teor ideal de aditivo superplastificante definido anteriormente, pelo método de AFREM. Os resultados encontrados estão expostos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Áreas de espalhamento obtidas com o ensaio de Miniabatimento.

Pastas	Teores de SP (%)	Área de espalhamento (cm ²)			
		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

As curvas da área de espalhamento pelo tempo são apresentadas na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Curvas da área de espalhamento x tempo.



A partir da construção do gráfico onde estão inseridas as curvas que representam a variação da área de espalhamento das pastas em função do tempo, é possível notar que em praticamente todos os traços foi durante os primeiros 30 minutos de ensaio que as pastas apresentaram a maiores quedas na área de espalhamento. Pode-se observar que no caso da pasta referência (P40-REF) houve uma queda inicial de 23% no primeiro intervalo do ensaio, o que representa uma grande parte da perda total na área de espalhamento da pasta, a qual finaliza o ensaio com uma redução de cerca de 34% da área.

Nota-se também que as misturas que apresentaram a menor queda na área de espalhamento ao longo dos 60 minutos de ensaio, foram as pastas com maior adição de nanosílica, nomeadamente a P40-5-0 com 8% e P40-10-0 com 10%. No caso das demais pastas, a diminuição do espalhamento varia de 15%, podendo chegar até 34%.

4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

No âmbito da definição dos traços de concreto estudados nessa pesquisa, é importante destacar que a nanosílica empregada é dispersa em uma solução aquosa onde 50% da massa total é composta de nanopartículas de sílica e os outros 50% de água. Na etapa da definição dos traços foi considerada como adição ao concreto apenas a porcentagem de nanosílica presente na solução, já o restante que consiste nos 50% de água teve esse valor descontado na quantidade de água de amassamento estipulada de acordo com a relação a/agl adotada.

A adição de nanosílica foi feita em substituição à massa de cimento no concreto. Portanto, para cada traço, a quantidade de cimento foi sendo corrigida, descontando-se a massa de nanosílica incorporada na mistura. Seguindo um padrão utilizado pelos trabalhos

do grupo de pesquisa, em que este está inserido, a adição de sílica ativa foi feita em volume como ocorre em Schmalz (2018).

O teor de aditivo superplastificante utilizado em cada traço foi definido por meio do ensaio de consistência e, para que os concretos atingissem um espalhamento dentro do limite estabelecido (230 ± 10) mm, foram utilizados teores menores que os definidos no ensaio de Cone de Marsh (item 4.2.1). A Tabela 4.14 apresenta a composição de cada traço e a média dos diâmetros de espalhamento obtidos com o respectivo teor de aditivo superplastificante empregado. Já a Tabela 4.15 expõe para cada traço e o consumo de cada material para a obtenção de 1 m^3 de concreto.

Tabela 4.14 - Composição dos traços de concreto e consistências obtidas.

Concretos	Materiais (g)						Consistência (mm)	
	Cimento	A.G.	A.M.	S	N	SP (%)*		Água
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	19,3	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	19,3	-	532,00	267,67

*em relação à massa de aglomerante.

Tabela 4.15 – Consumo de material dos concretos.

Concretos	Consumo de Materiais (kg/m ³ de concreto)						
	Cimento*	A.G.	A.M.	S	N	SP (%)*	Água
C40-REF	510	978	652	-	-	1,02	204
C40-1-0	504	977	651	-	10	1,83	198
C40-5-0	481	972	648	-	51	4,46	177
C40-10-0	453	966	644	-	101	8,05	151
C40-1-10	420	907	605	32	9,11	2,65	178
C56-REF	471	904	603	-	-	-	264
C56-1-0	466	903	602	-	9,41	-	259
C56-5-0	446	902	601	-	47	-	239
C56-10-0	422	899	600	-	94	-	215
C56-1-10	392	846	564	27	8,50	-	234

*consumo teórico de cimento.

4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS

4.4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Com a execução do ensaio de resistência à compressão em diferentes idades, foram obtidos resultados que estão apresentados nas Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18, assim como o desvio-padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV). Estes valores encontrados foram submetidos a uma análise estatística, que encontra-se no Apêndice A.

Tabela 4.16 - 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 4.17 - 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 4.18 - Resistência à compressão dos concretos 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

Visto que o ensaio de resistência à compressão foi realizado para todos os traços de concreto em diferentes idades, foi possível observar a evolução dos seus resultados ao longo do tempo. Na Figura 4.5 apresenta-se a evolução da resistência média dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 e na Figura 4.6, dos concretos com relação a/agl igual a 0,56.

Figura 4.5 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,40.

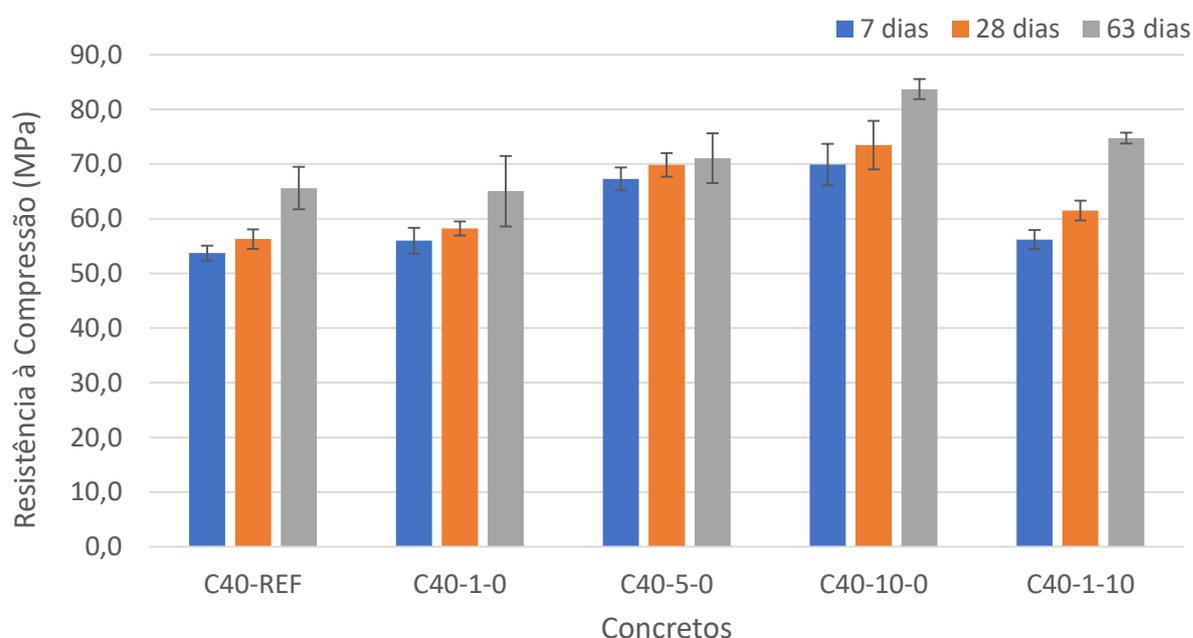
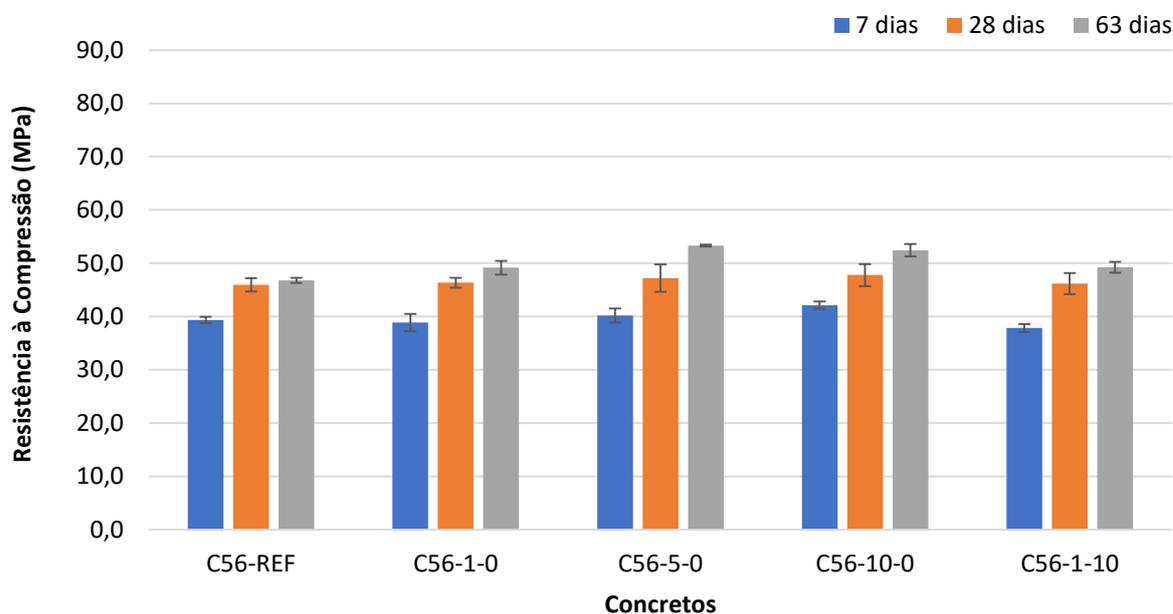


Figura 4.6 - Evolução da resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,56.



No caso dos concretos analisados, observa-se que os com relação a/agl igual a 0,40 apresentam maior resistência à compressão, quando comparados com os de relação a/agl igual a 0,56. Esse comportamento já era esperado, devido a menor quantidade de água de amassamento. Concretos com a mesma quantidade de adição mineral, porém com relação a/agl menor, chegaram a obter um aumento da resistência média de até 31,26 MPa, como é o caso do concreto com 10% de adição de nanosílica, que possui uma resistência média de 53,44 MPa aos 63 dias com relação a/agl igual a 56 (C56-10-0) e este valor aumentou quando se reduziu a quantidade de água (C40-10-0) chegando a 83,70 MPa.

Além da quantidade de água de amassamento, que diferencia os concretos com relação a/agl igual a 0,56 dos com relação a/agl igual a 0,40, a presença de aditivo superplastificante, nesse segundo grupo, é outra característica distinta. Os traços com relação a/agl igual a 0,56 não necessitaram do emprego de aditivo para auxiliar na trabalhabilidade da mistura.

Heikal, Al-Duaij e Ibrahim (2015), ao estudarem a incorporação de nanosílica em compostos cimentícios, chegaram à conclusão de que a utilização do aditivo superplastificante melhora a dispersão da nanosílica e do cimento, resultando em uma hidratação mais eficiente e, conseqüentemente, uma melhor compactação. A presença de aditivo superplastificante também colabora para a aproximação da nanosílica com o hidróxido de cálcio, que é liberado

pela hidratação do C_3S e C_2S , formando uma quantidade adicional de C-S-H e, dessa forma, há um aumento da resistência à compressão dos compostos cimentícios.

Quando analisados os traços com a mesma relação a/agl, nota-se que o aumento da resistência à compressão dos concretos acompanha o aumento dos teores de adição de nanosílica, ou seja, os concretos com índices maiores de substituição ao cimento apresentam melhor desempenho. Vale destacar que, apesar do aumento da resistência à compressão ser diretamente proporcional ao teor de adição para os dois valores de relação a/agl estudados, a utilização da nanosílica se mostrou mais eficiente nos concretos com relação a/agl igual a 0,40. Comparado o valor de resistência à compressão aos 63 dias do concreto referência, em relação àquele com adição de 10% de nanosílica, houve um ganho de cerca de 27%; em contrapartida, esse aumento na resistência do concreto com 10% de adição e relação a/agl igual a 0,56 em relação ao referência, foi de apenas 12%.

Na Tabela 4.19 é retratado de forma detalhada 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 em que foi realizado o ensaio. A Tabela 4.20, identifica se há diferenças significativas entre nos ganhos de resistência dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 em comparação ao concreto referência (C40-REF). Para isso os resultados obtidos, foram submetidos ao Teste de Tukey.

Tabela 4.19 – 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

Tabela 4.20 - 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.

A partir da realização da análise estatística, é possível observar que apenas o concreto com 10% de adição de nanosílica (C40-10-0) apresenta uma diferença significativa nos seus valores de resistência à compressão em todas as idades ensaiadas, quando este é comparado com o concreto referência. No caso do concreto com 5% de incorporação de nanosílica (C40-5-0) percebe-se que a diferença é significativa apenas nas duas primeiras idades; quando o corpos de prova chegam aos 63 dias de idade, o ganho de resistência do concreto de referência torna essa distinção nos resultados não significativo.

Os concretos com incorporação de 1% de nanosílica (C40-1-0) e a adição combinada de 1% de nanosílica mais 10% de sílica ativa (C40-1-10) não apresentam diferenças significativas na resistência à compressão em nenhuma das idades, quando comparados ao concreto referência. Isto indica que para essa relação a/agl, a adição mineral nesses teores não seria interessante, do ponto de vista das propriedades mecânicas dos concretos.

Como já relatado neste trabalho, ao comparar a eficiência das adições minerais nas duas diferentes relações a/agl empregadas, observou-se que nos concretos de relação a/agl igual a 0,56 essas adições se mostram menos eficazes. Neste contexto, a Tabela 4.21 explicita individualmente o desenvolvimento da resistência, em porcentagem, desses concretos com adições em relação ao referência. A Tabela 4.22 indica, por meio do Teste de Tukey, se esse ganho de resistência apresenta diferença significativa ou não.

Tabela 4.21 - 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

Tabela 4.22 -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.

Ao analisar os dados oriundos da análise estatística, é possível afirmar que nos concretos com relação a/agl igual a 0,56, houve ganho significativo na resistência à compressão apenas nos traços com adição de 5% de nanosílica (C56-5-0) e com 10% de adição (C56-10-0), ainda assim, somente na idade de 63 dias, o que comprova a baixa eficácia da utilização desse tipo de adição em concretos com essa quantidade de água de amassamento.

Assim como observado nessa pesquisa, Saloma, Iswandi e Mikrajuddin (2013) também chegaram a resultados que indicam o aumento da resistência à compressão dos concretos, conforme se eleva o teor de incorporação de nanosílica. Os autores trabalharam com relação a/agl de 0,20 e substituíram parte do cimento por teores de nanosílica que chegam até 10% e foi neste teor máximo que a resistência à compressão em todas as idades ensaiadas apresentou os maiores resultados.

Rong *et al* (2015) analisam concretos com substituição de 35% da sua massa de cimento por cinza volante, com relação a/agl igual a 0,20, e realizam a incorporação da nanosílica com um intervalo menor entre os teores (0%, 1%, 3% e 5%). Neste caso, não é o maior teor de incorporação de nanosílica que apresenta o melhor valor de resistência à compressão. Em todas as idades, os concretos com 3% de nanosílica se destacaram com os maiores valores na análise da propriedade mecânica, o que indica que a incorporação da nanosílica tem o seu comportamento influenciado por demais adições incorporadas ao concreto.

Andrade (2017) concluiu que a adição de 10% de sílica ativa em argamassas apresentava o melhor desempenho e, então, estudou o seu efeito combinado com a incorporação de nanosílica coloidal (1%, 2% e 3%). Com relação a resistência à compressão, o traço que obteve os melhores resultados aos 28 dias foi o de 10% de sílica com 3% de nanosílica. Desta forma, é possível concluir que os baixos valores apresentados pelos concretos com incorporação de nanosílica e sílica ativa (1% de nanosílica+10% de sílica) podem ser melhorados em futuras pesquisas, empregando-se diferentes teores das adições minerais.

4.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade realizado nos concretos estudados, proporcionou determinar os valores do coeficiente de absorção obtidos nas 5 leituras efetuadas (3h, 6h, 24h, 48h e 72h) e possibilitou conhecer a altura da ascensão capilar atingida ao final do ensaio, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.23. Vale destacar,

que foi feita ainda a análise estatística dos resultados encontrados, que é exposta no Apêndice B, assim como os valores individuais obtidos.

Tabela 4.23 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com 28 dias de idade.

Concretos	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					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

Destaca-se os valores apresentados pelos concretos com relação a/agl igual a 0,40 foram menores que dos traços com relação a/agl igual a 0,56, tanto para o coeficiente de absorção, quanto para a altura de ascensão capilar. Esses resultados vão de encontro com as propriedades mecânicas já abordadas, e são justificados pela utilização de uma menor quantidade de água de amassamento, o que torna mais densa a matriz cimentícia, devido a diminuição da porosidade.

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 retratam 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 a 0,56, respectivamente.

Figura 4.7 - Absorção de água por capilaridade dos concretos de relação a/agl igual a 0,40 aos 28 dias.

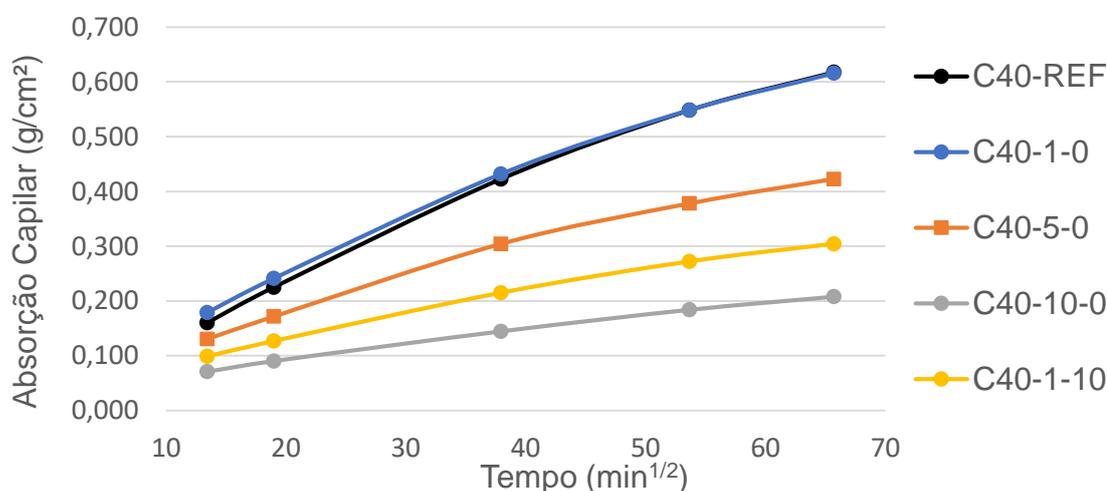
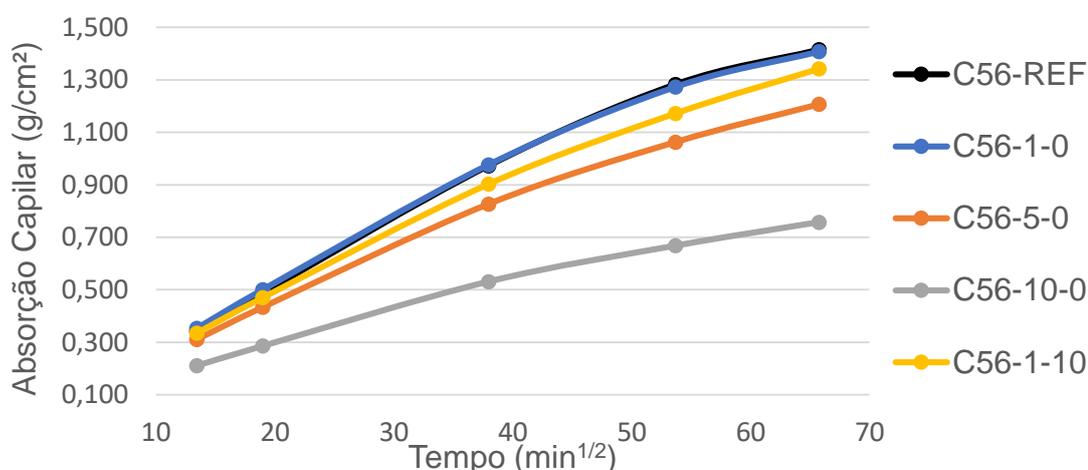


Figura 4.8 - Absorção de água por capilaridade dos concretos com fator a/agl igual a 0,56 aos 28 dias.



No final do ensaio, após 72 horas de contato dos corpos de prova com a água, é possível afirmar que nos concretos que possuem relação a/agl igual a 0,40, as adições minerais contribuirão para uma menor absorção capilar. A incorporação de 10% de nanosílica (C40-10-0) e também a de 1% de nanosílica com 10% de sílica ativa (C40-1-10) acabaram por resultar nos menores índices de absorção; se comparados ao concreto referência houve uma redução de 66% e 51%, respectivamente. A análise estatística realizada com os resultados deste ensaio indica que apenas o concreto com 1% de nanosílica (C40-1-0) não apresentou uma diferença significativa em relação à referência (C40-REF), os demais teores de adições estudados proporcionaram diferenças consideráveis (Apêndice B).

No caso dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, os traços que apresentam menor índice de absorção capilar são os com 10% (C56-10-0) e 5% (C56-5-0) de adição de nanosílica, apresentando, respectivamente, 46% e 15% de redução, quando comparados com o com o referência (C56-REF). A partir da análise estatística, percebe-se que os concreto com 1% de nanosílica (C56-1-0) e com 1% de nanosílica mais 10% de sílica ativa (C56-1-10) não apresentaram diferenças significativas, com relação ao traço referência, os resultados dos demais concretos mostram-se relevantes (Apêndice B).

Assim como no ensaio de resistência mecânica, os concretos com relação a/agl igual a 0,40 apresentam um melhor desempenho também no ensaio de absorção de água por capilaridade, visto que a quantidade de poros é inferior devido a menor quantidade de água de amassamento. Além disso, as adições minerais são mais eficientes na relação a/agl igual a 0,40, o que pode ser explicado pela presença do aditivo superplastificante, que como já foi mencionado, pode melhorar a dispersão na mistura, resultando em uma hidratação mais eficaz segundo Heikal, Al-Duaij e Ibrahim (2015).

É notório que em ambas as relações a/agl o concreto com 1% de adição de nanosílica não se destacou frente à referência, o que indica que esse teor não seja interessante no ponto de vista das propriedades físicas. O comportamento do concreto que incorpora 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa varia de acordo com a relação a/agl , sendo o segundo traço a menos absorver, no caso da relação 0,40, passa a ter uma diferença insignificante com o concreto sem adição, na relação a/agl igual a 0,56, portanto, este traço se mostrou mais sensível frente a quantidade de água na mistura e a presença de aditivo superplastificante.

Ao analisar outros trabalhos publicados que também procuraram estimar as propriedades físicas de compósitos cimentícios com incorporação de nanosílica, nota-se que os maiores teores de substituição apresentam os menores índices de absorção, assim como nesta pesquisa. Zahedi, Ramezani pour e Ramezani pour (2015), Joshaghani e Moeini (2017) e SCHMALZ (2018) tiveram como teor máximo de adições em suas pesquisas, 5%, 6% e 10% respectivamente, e em todos os casos estes foram os traços com melhor desempenho.

As médias das medidas da ascensão capilar nos concretos já foram apresentadas anteriormente pela Tabela 4.23, mas os perfis dessa ascensão no interior dos corpos de prova são expostos pelas Figuras 4.9 e 4.10. Ao romper os corpos de prova no final do ensaio, foi possível mensurar a altura e o comportamento da água absorvida.

Figura 4.9 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização dos 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.

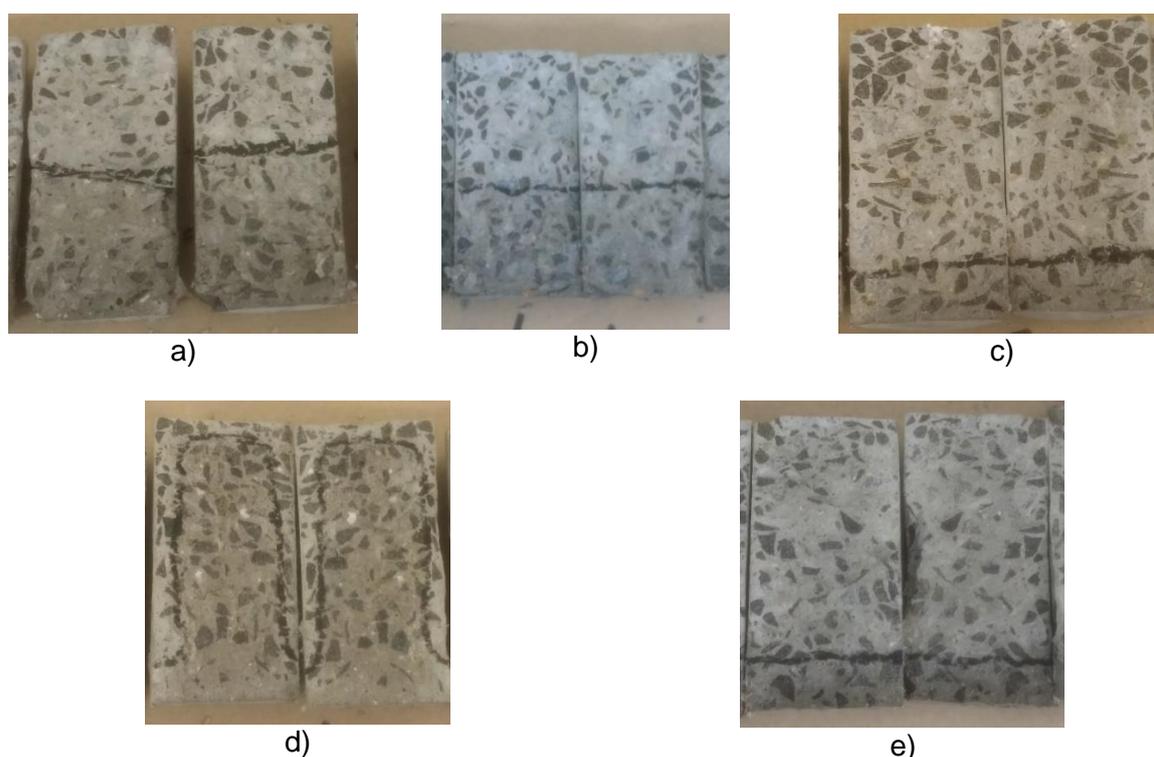
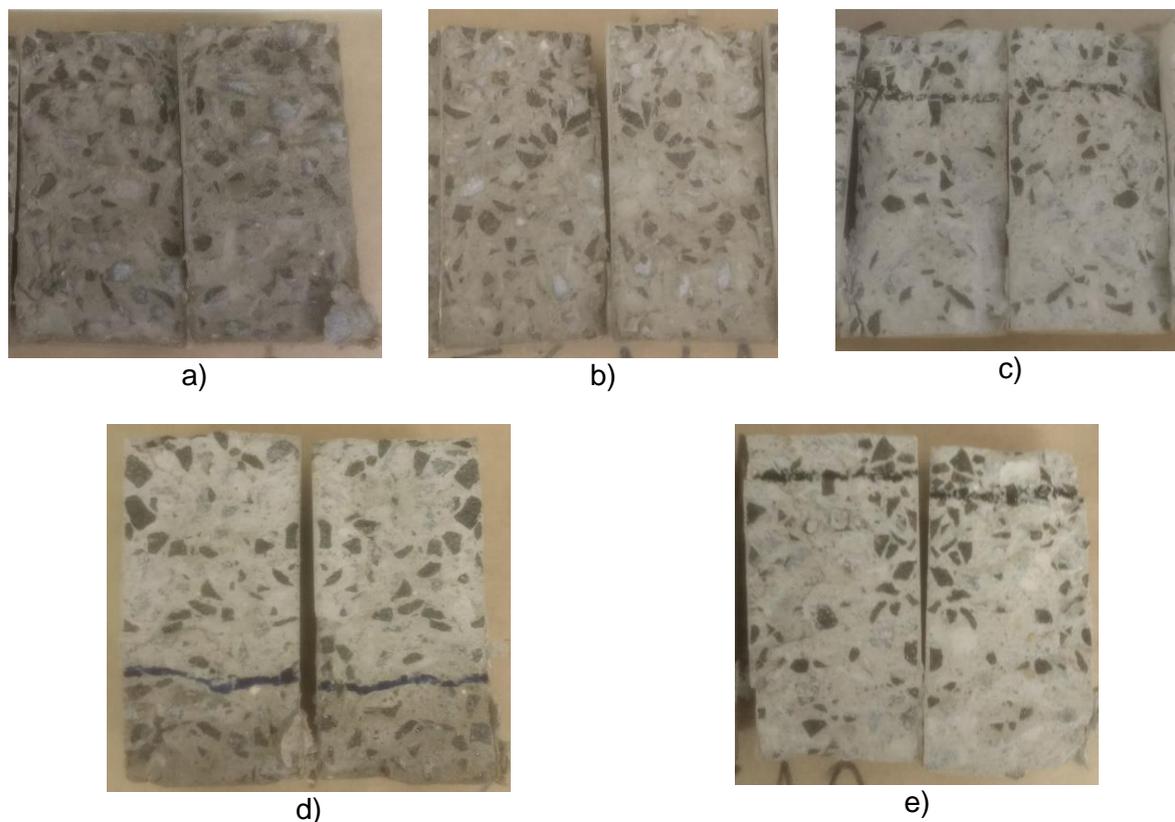


Figura 4.10 - Ascensão capilar nos corpos de prova após finalização dos ensaios de absorção de água pro capilaridade aos 28 dias: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.



Praticamente em todos os concretos com relação a/agl igual a 0,40 a ascensão de água aconteceu de maneira uniforme em toda a seção do corpo de prova, nesses casos a altura atingida pela umidade foi condizente com o coeficiente de absorção. O único concreto que destoa dessa situação, é o concreto com 10% de nanosílica (C40-10-0) que apresentou o menor coeficiente de absorção, e em contrapartida, possui a maior ascensão capilar. Isso ocorre, segundo Castro e Ferreira (2016), devido as pequenas dimensões dos poros do concreto que aumenta a pressão de sucção capilar, e possibilita a umidade atingir a maior altura.

Quando a relação a/agl dos concretos é igual a 0,56, a ascensão capilar ocorreu de modo uniforme em todos os traços, e apresentou alturas coerentes com os coeficientes de absorção. No caso do concreto sem adição mineral (C56-REF) e daquele com 1% de nanosílica (C56-1-0) apresentaram a maior absorção e a umidade chegou ao topo do corpo de prova (Figura 4.10a e Figura 4.10b).

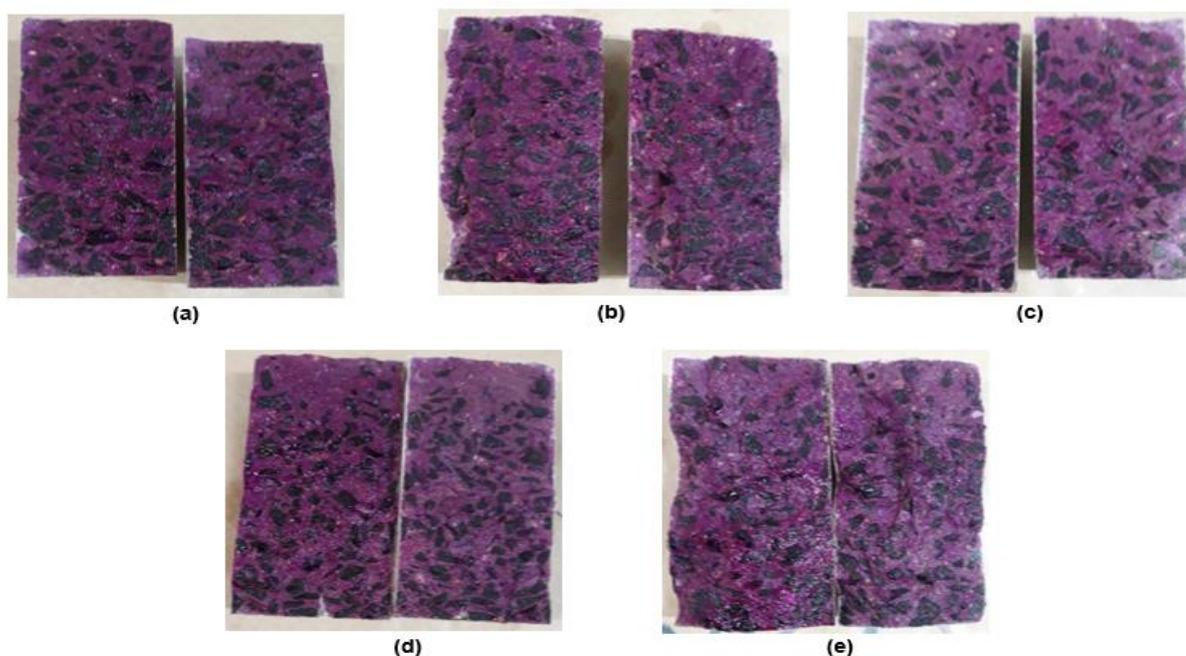
4.5 DURABILIDADE FRENTE A AÇÃO DE CO₂

4.5.1 DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO

- ENSAIO DE CARBONATAÇÃO COM CONCENTRAÇÃO DE CO₂ IGUAL A 15%

Após o início do ensaio de carbonatação com concentração de CO₂ igual a 15%, foram feitas sete leituras (28, 56, 84, 112, 140, 168 e 196 dias). No caso dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 não houve frente de carbonatação em nenhum traço, independente do teor de adição mineral e da idade analisada. A Figura 4.11 ilustra os corpos de prova com relação a/agl igual 0,40 após 196 dias de ataque em câmara de carbonatação acelerada.

Figura 4.11 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 15% de concentração de CO₂ 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 também não apresentaram frente de carbonatação nas primeiras idades de leitura. Foi somente após 140 dias na câmara de ataque acelerado que foi identificada frente de carbonatação nos concreto estudados, sendo os resultados apresentados na Figura 4.12. Na Tabela 4.24 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, e na Tabela 4.25, a análise estatística realizada.

Figura 4.12 - Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 15% de concentração de CO₂.

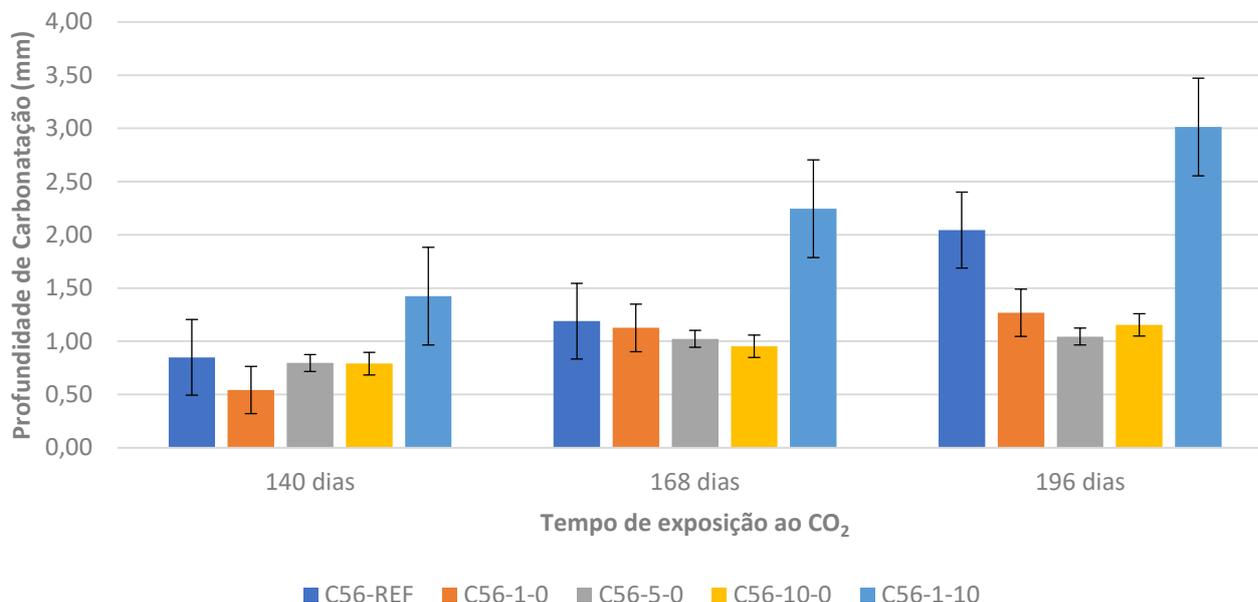


Tabela 4.24 – Profundidade de carbonatação (mm) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 e variação da profundidade em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 140, 168 e 196 dias (Ensaio com 15% de concentração de CO₂).

Concretos	140 dias		168 dias		196 dias	
	Profundidade (mm)	Varição (%)	Profundidade (mm)	Varição (%)	Profundidade (mm)	Varição (%)
C56-1-0	0,85	-	1,19	-	2,04	-
C56-1-0	0,54	-36,2	1,13	-5,3	1,27	- 38,0
C56-5-0	0,80	-5,8	1,02	-14,2	1,04	-49,1
C56-10-0	0,79	-7,0	0,95	-19,9	1,15	-43,5
C56-1-10	1,42	67,8	2,25	88,8	3,01	47,4

Tabela 4.25 - Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 140, 168 e 196 dias (ensaio com 15% de concentração de CO₂).

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

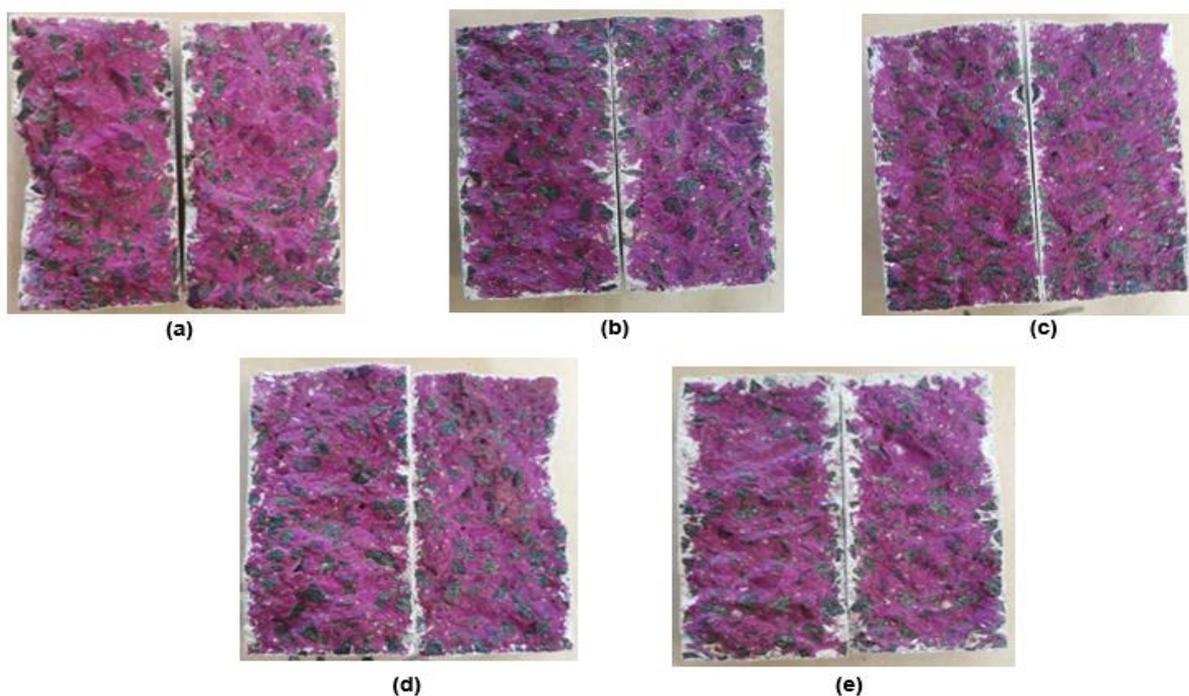
Obs: sim: há diferença significativa, não: não há diferença significativa.

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

Não há uma tendência no comportamento dos vários traços de concreto ao longo das idades analisadas, já que 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.

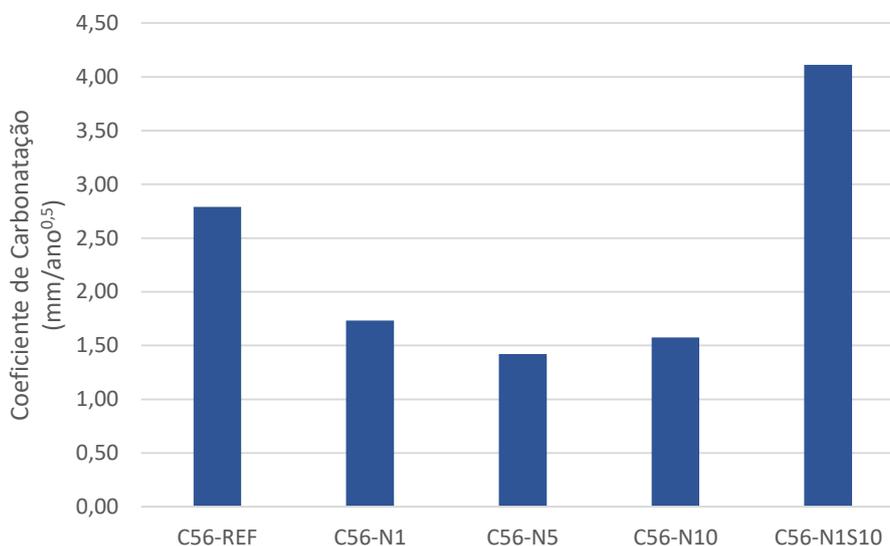
A Figura 4.13 apresenta a frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, aos 196 dias de ataque em câmara com concentração de 15% de dióxido de carbono.

Figura 4.13 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 15% de concentração de CO_2 : a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.



Após a finalização do ensaio foi calculado o coeficiente de carbonatação de cada traço de concreto, conforme é apresentado na Figura 4.14. Para o cálculo foi utilizado a profundidade de penetração do CO_2 medida aos 196 dias de ataque.

Figura 4.14 – Coeficiente de carbonatação ($\text{mm/ano}^{0,5}$) dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 15% de concentração de CO_2 aos 196 dias.



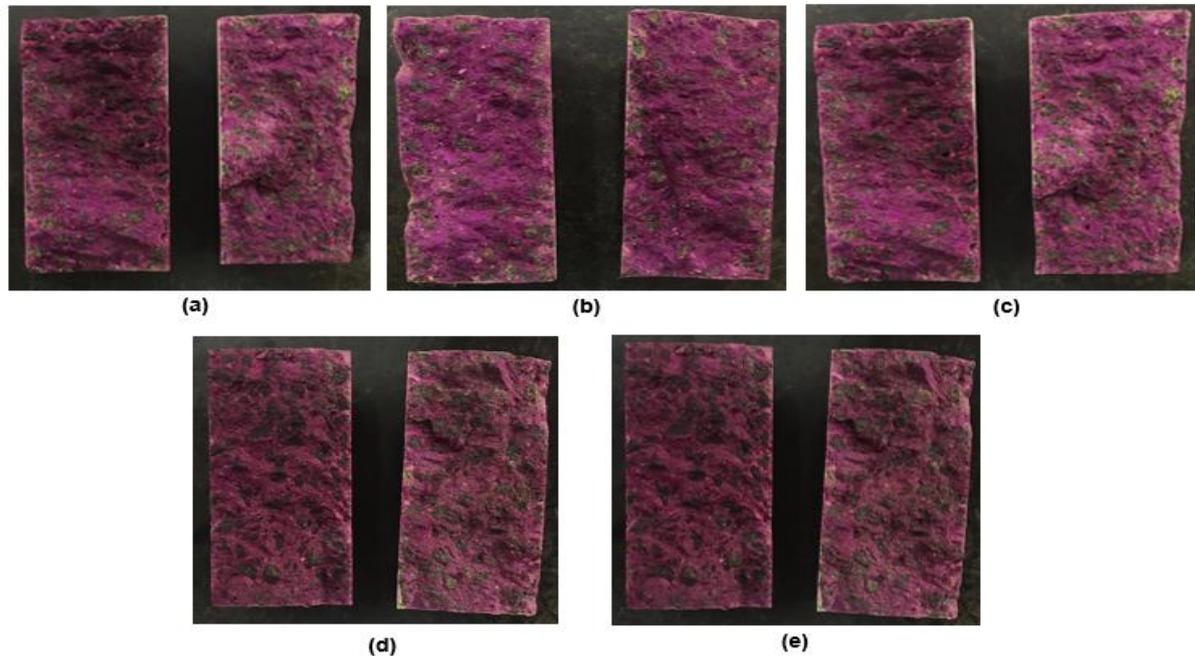
Ao calcular o coeficiente de carbonatação é possível estimar quanto tempo levaria para que o cobrimento de uma estrutura de concreto armado submetida a essas condições do ensaio, estivesse totalmente carbonatado, permitindo assim, a despassivação da armadura. Da mesma forma que Miranda (2018), estimou-se a quantidade de anos necessários para a frente de carbonatação atingir todo o cobrimento nominal de uma estrutura localizada na classe de agressividade ambiental III, que segundo a NBR 6118:2014 deve possuir 40 mm.

Desconsiderando a interação da estrutura com outros agentes agressivos presentes no ambiente que poderiam interferir no avanço da frente de carbonatação, seriam necessários aproximadamente 206, 534, 794, 645 e 95 anos para carbonatar 40 mm dos concretos C56-REF, C56-1-0, C56-5-0, C56-10-0 e C56-1-10. Vale, destacar que o ensaio foi realizado com 15% de concentração de CO_2 , um valor muito acima do encontrado na atmosfera.

- **ENSAIO DE CARBONATAÇÃO COM CONCENTRAÇÃO DE CO_2 IGUAL A 3%**

No ensaio de carbonatação com 3% de concentração de CO_2 todos os concretos com relação a/agl igual a 0,40 também não apresentaram frente de carbonatação em nenhuma das idades analisadas. A Figura 4.15 apresenta imagens dos corpos de prova com relação a/agl igual a 0,40 aos 112 dias de exposição ao dióxido de carbono.

Figura 4.15 – Frente de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 3% de concentração de CO₂ aos 112 dias: a) C40-REF; b) C40-1-0; c) C40-5-0; d) C40-10-0 e e) C40-1-10.



Nos concretos com 0,56 de relação a/agl foi possível identificar a ação do CO₂ logo aos 28 dias de ataque em câmara, conforme retrata a Figura 4.16. A Tabela 4.26 mostra em porcentagem o desenvolvimento da profundidade de carbonatação nos concretos com relação a/agl igual a 0,56 quando comparados com o traço referência, e a Tabela 4.27 identifica os casos onde a frente de carbonatação de um concreto apresenta diferença significativa com a do traço referência.

Figura 4.16 – Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 no ensaio com 3% de concentração de CO₂.

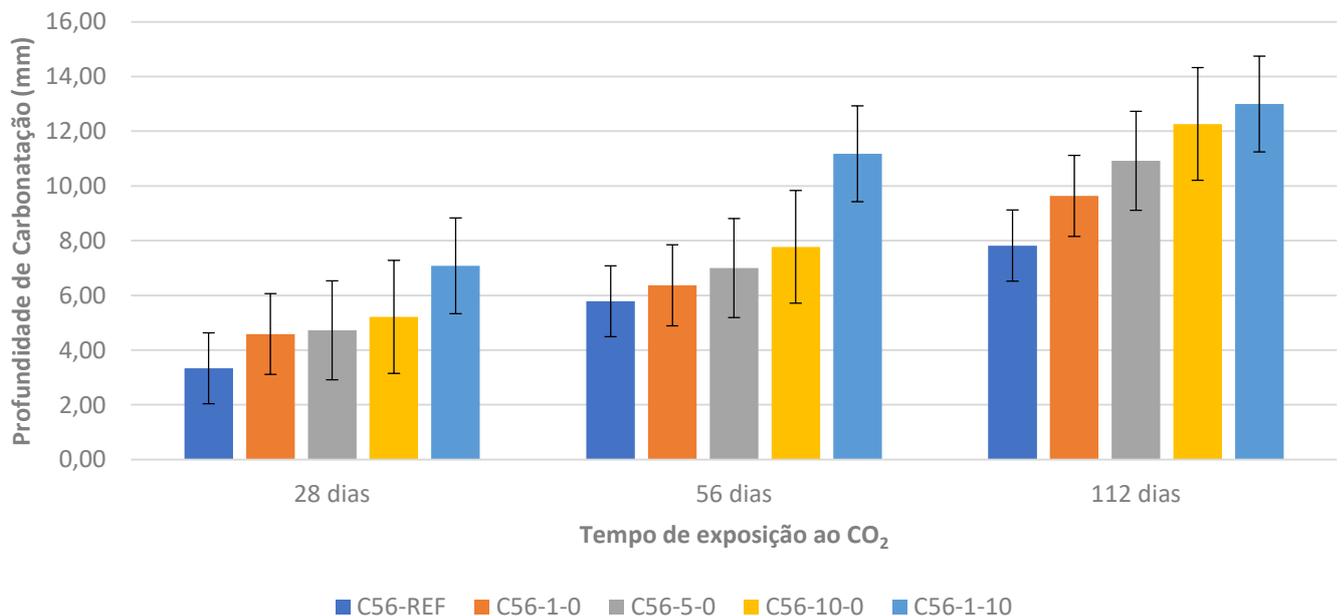


Tabela 4.26 – Profundidade de carbonatação (mm) dos concretos de relação a/agl igual a 0,56 e variação da profundidade em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 28, 56 e 112 dias (Ensaio com 3% de concentração de CO₂).

Concretos	28 dias		56 dias		112 dias	
	Profundidade (mm)	Varição (%)	Profundidade (mm)	Varição (%)	Profundidade (mm)	Varição (%)
C56-1-0	3,34	-	5,79	-	7,82	-
C56-1-0	4,59	37,3	6,37	10,1	9,64	23,2
C56-5-0	4,73	41,5	7,00	20,9	10,92	39,7
C56-10-0	5,21	56,1	7,77	34,2	12,26	56,8
C56-1-10	7,08	111,9	11,17	93,0	3,01	66,2

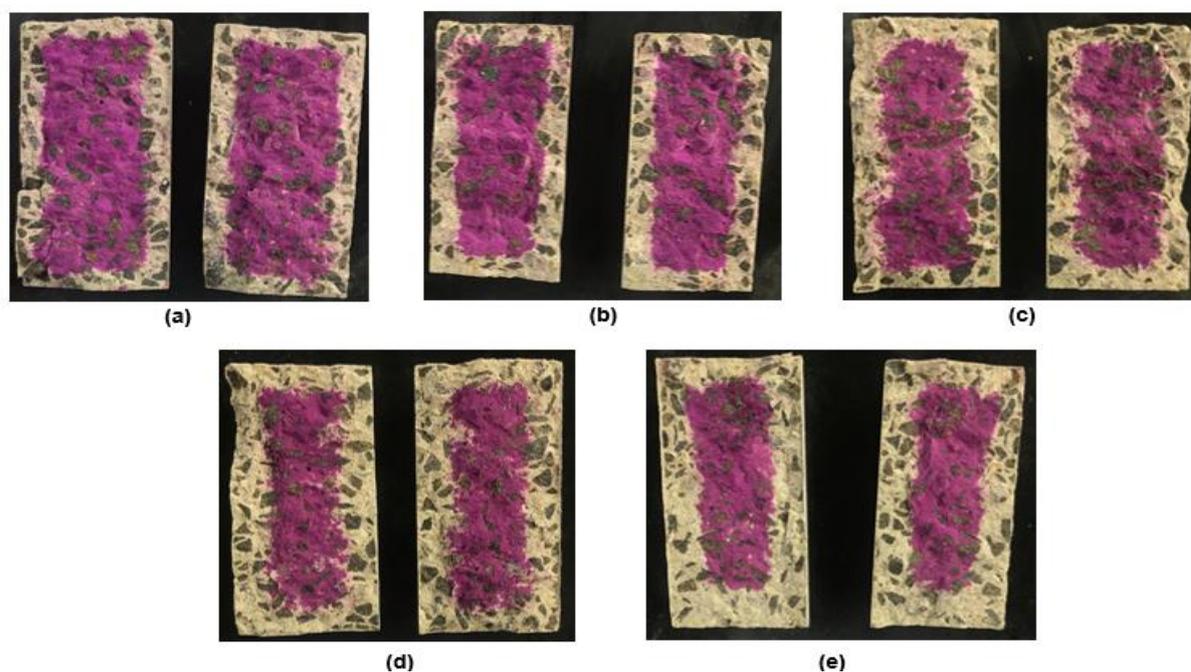
Tabela 4.27 -Teste de Tukey para os concretos de relação a/agl igual a 0,56 em comparação ao concreto referência (C56-REF) aos 28, 56 e 112 dias (Ensaio com 15% de concentração de CO₂)

Concretos	Profundidade de carbonatação (%)		
	28 dias	56 dias	112 dias
C56-1-0	Sim	Não	Sim
C56-5-0	Sim	Sim	Sim
C56-10-0	Sim	Sim	Sim
C56-1-10	Sim	Sim	Sim

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

Os resultados obtidos no ensaio com 3% de concentração de CO₂ indicam um comportamento regular dos diferentes traços, nas três idades ensaiadas. O concreto referência (C56-REF) é o que apresenta menor frente de carbonatação e o traço com adição combinada de 1% de nanosílica e 10% de sílica (56-1-10) apresenta a maior, e isso se repete em todas as leituras. A Figura 4.17 apresenta as frentes de carbonatação nos corpos de prova com relação a/agl igual a 0,56.

Figura 4.17 – Profundidade de carbonatação dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 3% de concentração de CO₂ aos 112 dias: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10.



Ao comparar os concretos com adição em relação ao referência nota-se que a diferença na profundidade de carbonatação entre eles é quase sempre significativa, exceto no caso do traço com 1% de nanosílica (C56-1-0) aos 56 dias, que não se difere de maneira relevante do referência. Nota-se também que, quanto mais nanosílica é adicionada ao concreto, maior foi a frente de carbonatação apresentada.

Os resultados apresentados por Salvoldi *et al* (2015) são semelhantes ao ocorrido no ensaio com 3% de concentração de CO₂. Os autores compararam a frente de carbonatação em concretos com adições de microsílica, cinza volante e escória de alto forno, e o traço que menos carbonatou foi o traço referência, que não possuía nenhuma adição mineral.

Samimi *et al* (2018) atestam que a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional ao teor de adições. Os autores justificam que o maior teor de hidróxido de cálcio faz com que o gás carbônico se difunda menos, pois há maior quantidade de hidróxido de cálcio para ele reagir.

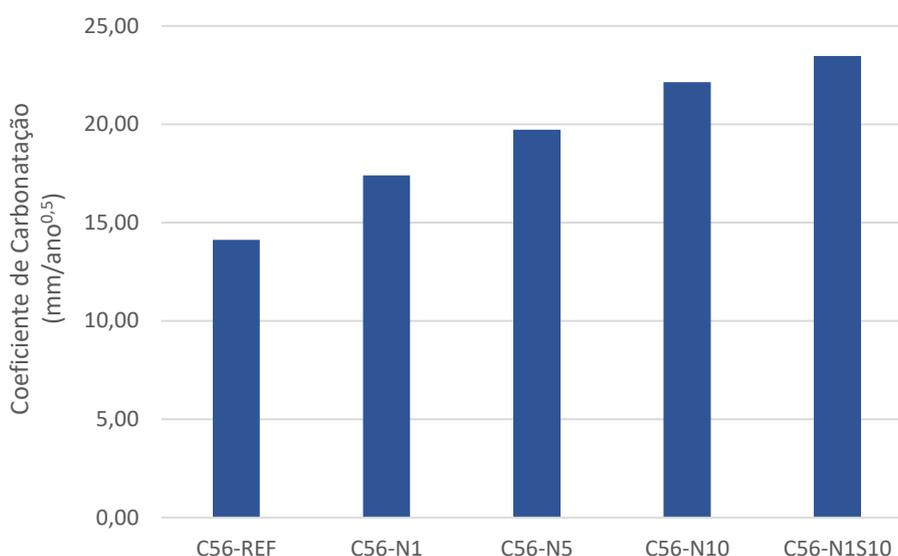
Diniz (2018) estudou a influência de adições minerais provenientes de resíduos agroindustriais, e concluiu que em matrizes cimentícias com grande presença de hidróxido de cálcio o efeito químico é o que rege a carbonatação, e conforme há a sua diminuição o que causa maior influência ao ataque de CO₂ é o efeito físico relacionado ao diâmetro dos poros.

Com base no que foi encontrado na literatura e nos resultados do ensaio com 3% de CO₂, a quantidade de hidróxido de cálcio foi preponderante para profundidade de carbonatação, e desta forma os concretos com adição de nanosílica e sílica ativa, apesar de

apresentarem melhores propriedades mecânicas, não apresentam maior resistência à ação do CO₂. Dessa forma, a relação a/agl igual a 0,56 interferiu no sistema de poros, sendo mais efetivo que a adição mineral.

Ao finalizar o ensaio com 3% de concentração de CO₂, também foi determinado o coeficiente de carbonatação de cada traço de concreto. Para o cálculo foi utilizado a profundidade de carbonatação medida aos 112 dias de ataque, e os resultados são expostos na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0,5}) dos concretos com relação a/agl igual a 0,56 no ensaio com 3% de concentração de CO₂ aos 112 dias.

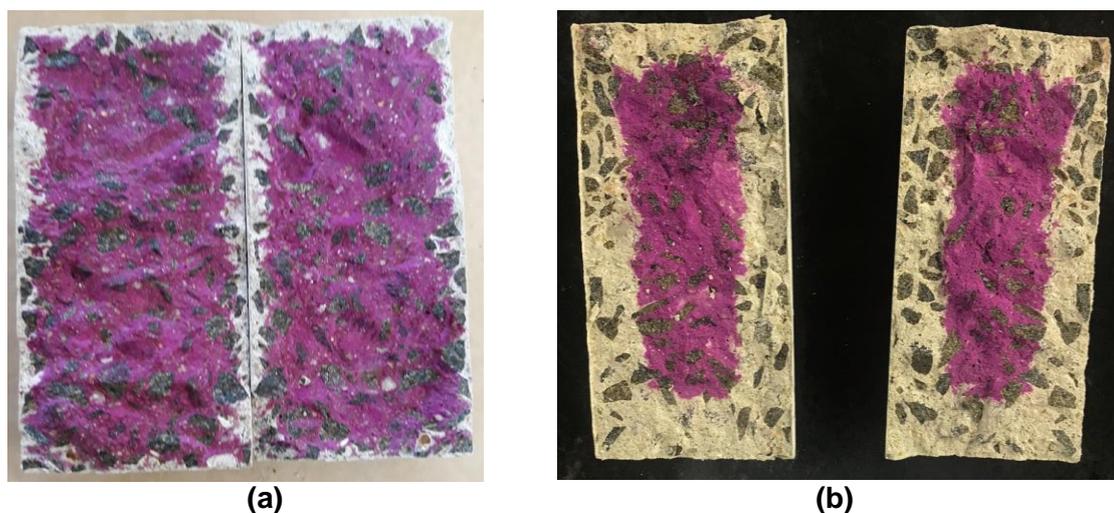


A partir dos valores de coeficiente de carbonatação encontrados, também foi estimado a quantidade de anos necessários para carbonatar todo o cobrimento nominal de uma estrutura inserida na classe de agressividade ambiental III, que deve possuir comprimento de 40 mm, de acordo com a NBR 6118:2014. Estima-se que para os traços C56-REF, C56-1-0, C56-5-0, C56-10-0 e C56-1-10 são necessários, respectivamente, por volta de 8,0, 5,3, 4,1, 3,3 e 2,9 anos.

Nota-se que neste ensaio com concentração de 3% de CO₂ o tempo estimado para a frente de carbonatação atingir o cobrimento é curto. Por mais que a concentração de dióxido de carbono em ambientes naturais seja menor que a adotada no experimento, vale destacar que os resultados encontrados indicam um possível comprometimento da vida útil da estrutura em um pequeno espaço de tempo.

Assim como o coeficiente, a frente de carbonatação foi maior no ensaio com 3±0,5% de concentração de CO₂, onde a umidade relativa era de 65±5% e a temperatura igual a 27±2°C os resultados foram mais nítidos e de melhor compreensão, conforme ilustra a Figura 4.19.

Figura 4.19 – Comparação entre a frente de carbonatação no concreto C56-1-10: a) aos 196 dias com 15% de CO₂ e b) aos 112 dias com 3% de CO₂



No ensaio de carbonatação em que a concentração de dióxido de carbono na câmara era de $15\pm 2\%$, a umidade relativa de $75\pm 5\%$ e a temperatura de $23\pm 2^\circ\text{C}$, haveria a necessidade de mais tempo de exposição dos corpos de prova ao ataque, para que as medidas da profundidade de carbonatação fossem mais conclusivas.

Ao comparar as duas condições de ensaio utilizadas neste programa experimental, nota-se que além de uma maior concentração de gás, no caso do ensaio com 15% de CO₂, a temperatura é menor, chegando a 4°C a menos nesta condição. Com relação a umidade relativa há um aumento de 10% neste ensaio, o que indica maior quantidade de água nos poros do concreto, restando menos espaço para o avanço do dióxido de carbono.

A câmara de carbonatação utilizada no ensaio com 15% de concentração de CO₂, possui um espaço menor para disposição dos corpos de prova, e apesar de garantir a ventilação do gás no ambiente e manter uma determinada distância entre eles, havia um número muito elevado de corpos de prova, o que talvez prejudicou a distribuição do dióxido de carbono por toda a câmara. Também vale ressaltar, a necessidade de aferição do medidor de CO₂, afim de garantir a concentração pretendida.

Como discuto por Pauletti, Possan e Dal Molin (2007), há a necessidade de padronização dos ensaios de carbonatação no Brasil, a fim de possibilitar a criação de um banco de dados.

4.5.2 AVALIAÇÃO DO PH DA SOLUÇÃO DE PORO SIMULADA

Após serem realizadas as medidas da frente de carbonatação nos concretos do ensaio com 15% de concentração de CO₂, visto que estes estavam no LMC/UFSCar local onde foi realizado a maior parte dos ensaios, o que tornou mais viável a sua utilização.

Foi extraído o pó com o auxílio de uma furadeira do interior do corpo de prova (região não carbonatada) e da superfície (região carbonatada). Como a profundidade de carbonatação apresentada nos concretos era muito pequena, houve uma certa dificuldade para extração do pó. Portanto, decidiu-se analisar somente três traços, os mesmos estudados nos ensaios micro estruturais, que foram o concreto referência (C56-REF), aquele com 10% de nanosílica (C56-10-0) e também o traço com adição de 1% de nanosílica combinado com 10% de sílica ativa (C56-1-10).

Após o preparo das soluções, mediu-se o pH de cada uma e, então, foi possível verificar a diferença entre as regiões carbonatadas e não carbonatadas, como está exposto nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 que retratam os concretos após 140, 168 e 196 dias de exposição ao CO₂, respectivamente.

Figura 4.20 - Medida do pH da solução de poro simulada dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, após 140 dias em câmara de carbonatação acelerada (Ensaio com 15% de concentração de CO₂).

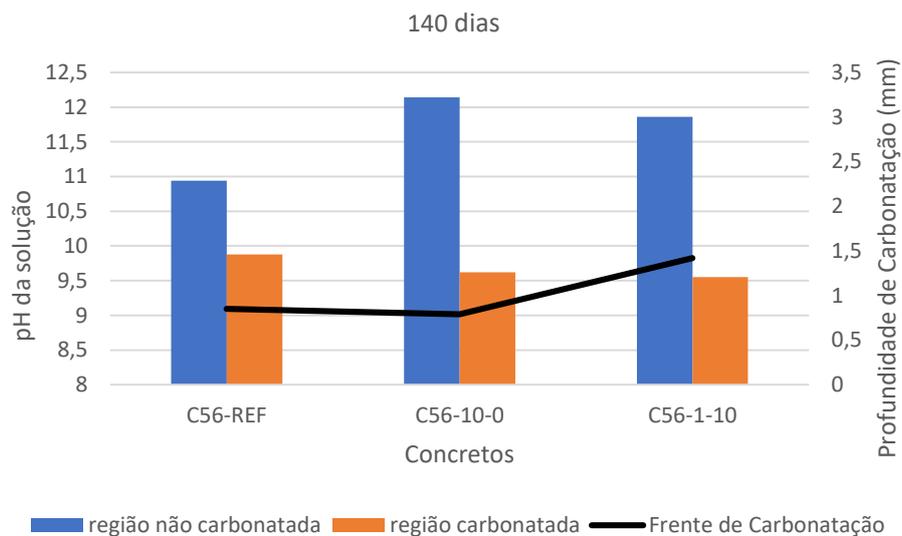


Figura 4.21 – Medida do pH da solução de poro simulada dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, após 168 dias em câmara de carbonatação acelerada (Ensaio com 15% de concentração de CO₂).

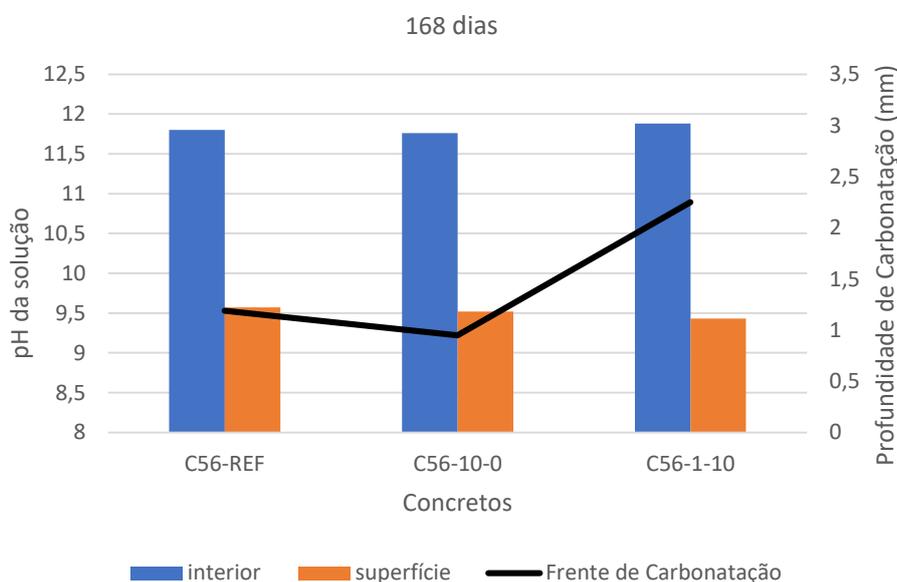
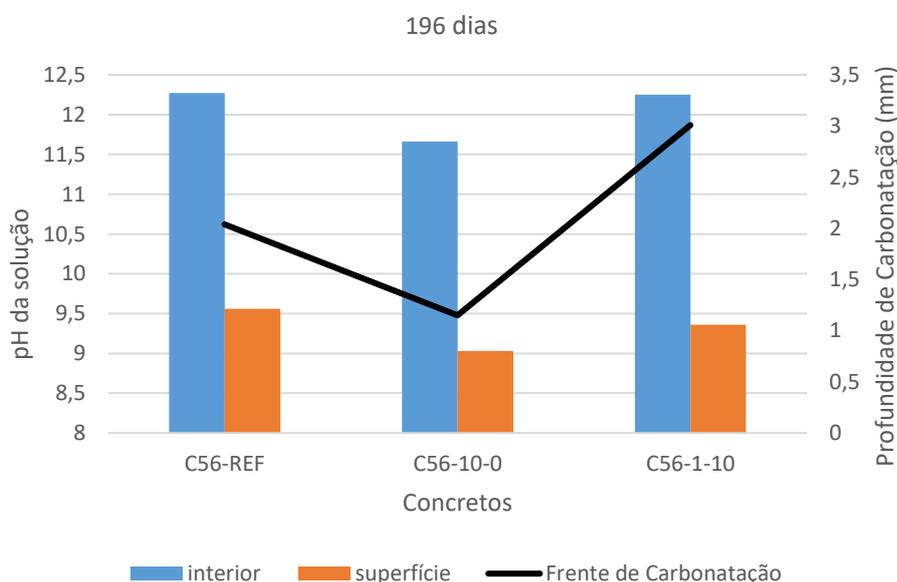


Figura 4.22 – Medida do pH da solução de poro simulada dos concretos com relação a/agl igual a 0,56, após 196 dias em câmara de carbonatação acelerada (Ensaio com 15% de concentração de CO₂).



Nota-se que a diferença do pH entre as regiões analisadas é nítida. Ao fazer a média dos valores para a região carbonatada encontra-se pH igual a 9,5 e para a região que não sofreu com a ação do CO₂ a média é de 11,8, levando em conta todas as idades e todos os concretos.

Pires (2016) além de analisar o pH da solução de poro simulada de concretos carbonatados, onde observou de forma clara a diferença entre as regiões distintas. Ele utilizou

essa solução para a realização de outras análises químicas e obteve resultados satisfatórios. Dessa forma, o autor indica que esse método pode ser adotado como uma alternativa a técnica tradicional de extração da solução do poro sob altas pressões.

A análise do pH da solução de poro simulada pode ser utilizada para a identificação da profundidade da frente de carbonatação. Ao retirar o pó em várias profundidades distintas, desde a superfície do concreto, é possível construir um perfil com os valores do pH que permite indicar o ponto de viragem do pH e, assim, determinar qual a medida da região com baixa alcalinidade.

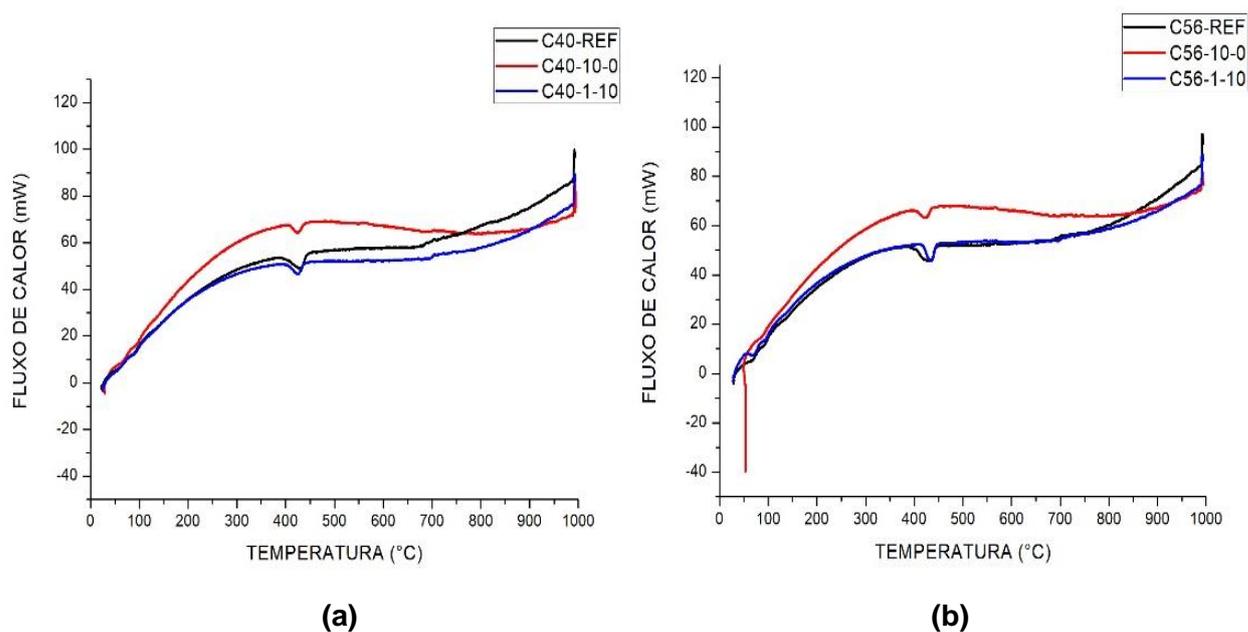
Destaca-se que, devido aos baixos valores de profundidades de carbonatação observados nos corpos de prova ensaiados neste trabalho, não foi possível determinar o perfil com os valores do pH da solução de poro simulada em diferentes profundidades.

4.6 ENSAIOS MICROESTRUTURAIS

4.6.1 ANÁLISE POR CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA (DSC)

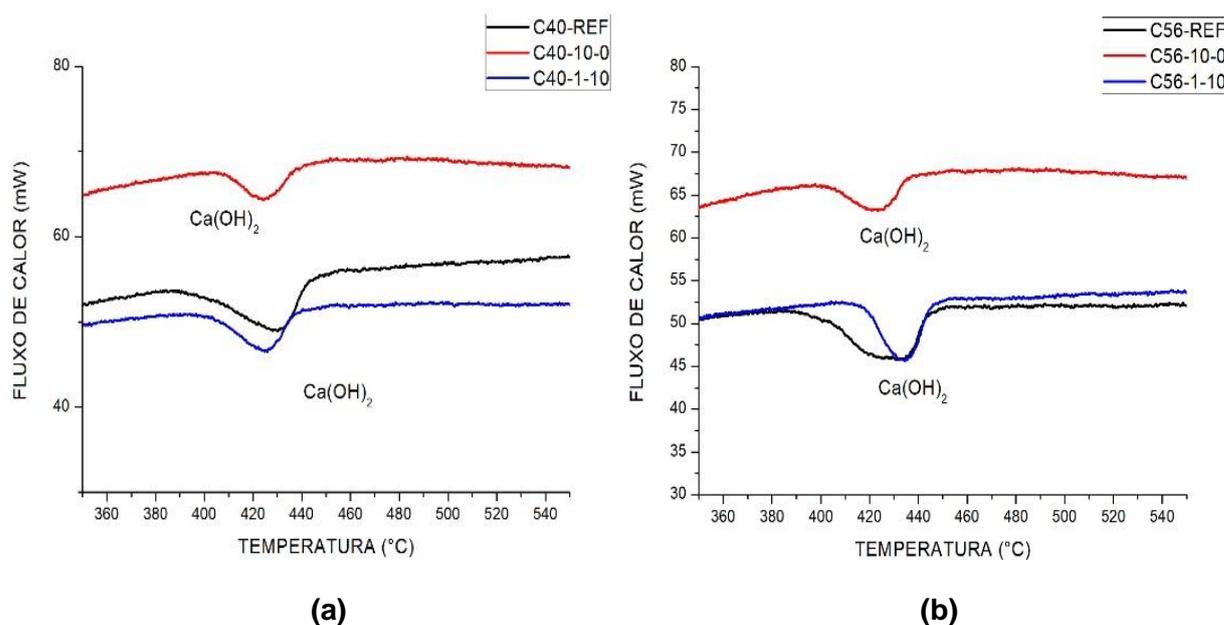
A partir das análises de DSC pode-se observar os picos dos compostos presentes na pasta cimento e, partir daí, são determinadas faixas de temperaturas onde há a decomposição térmica de cada hidratado. A Figura 4.23 apresenta as curvas de DSC do traço referência, daquele com 10% de nanosílica e também do traço com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa.

Figura 4.23 – Curvas de DSC: a) relação a/agl igual a 0,40 e b) relação a/agl igual a 0,56.



Ao analisar o gráfico, nota-se dois picos endotérmicos, o primeiro e mais modesto ocorre entre o 0° a 100° C, que indica a liberação de água, o que era de se esperar visto que as amostras não foram secas inicialmente, apenas retiradas da cura úmida e deixadas em ambiente de laboratório. O segundo pico localizado ente 400° a 450° C, que indica a decomposição do hidróxido de cálcio (PINTO, 2005). A Figura 4.24 apresenta de forma detalhada o segundo pico da curva de DSC.

Figura 4.24 – Detalhe do segundo pico das curvas de DSC: a) relação a/agl igual a 0,40 e b) relação a/agl igual a 0,56.



Nos traços com 10% de nanosílica o pico não tão acentuado indica a menor quantidade de hidróxido de cálcio, que foi consumido nas reações pozolânicas, o mesmo pode ser observado nos traços com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa. O concreto referência sem nenhuma adição mineral apresenta picos mais acentuados que indicam a maior presença de Ca(OH)_2 , e conseqüentemente uma maior reserva alcalina.

4.6.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

O ensaio de difração de raios-X foi executado com amostras dos traços: referência, 10% de nanosílica e 1% de nanosílica com 10% de sílica. E a partir da análise dos seus resultados é possível identificar a presença de compostos como é retratado nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27.

Figura 4.25 – Difratoograma dos traços: a) C40-REF e b) C56-REF.

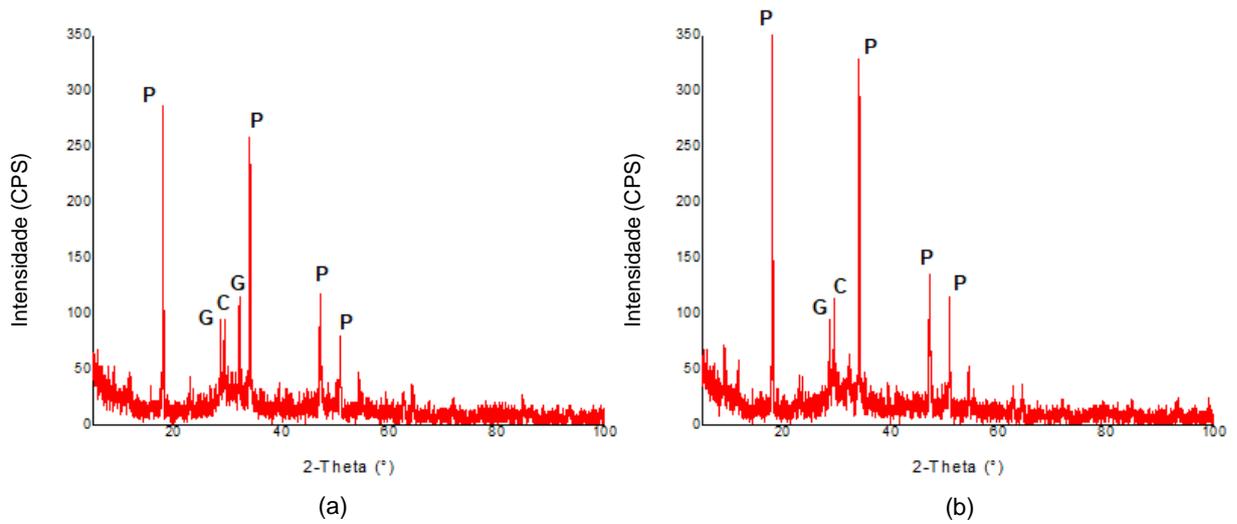


Figura 4.26 – Difratoograma dos traços: a) C40-10-0 e b) C56-10-0.

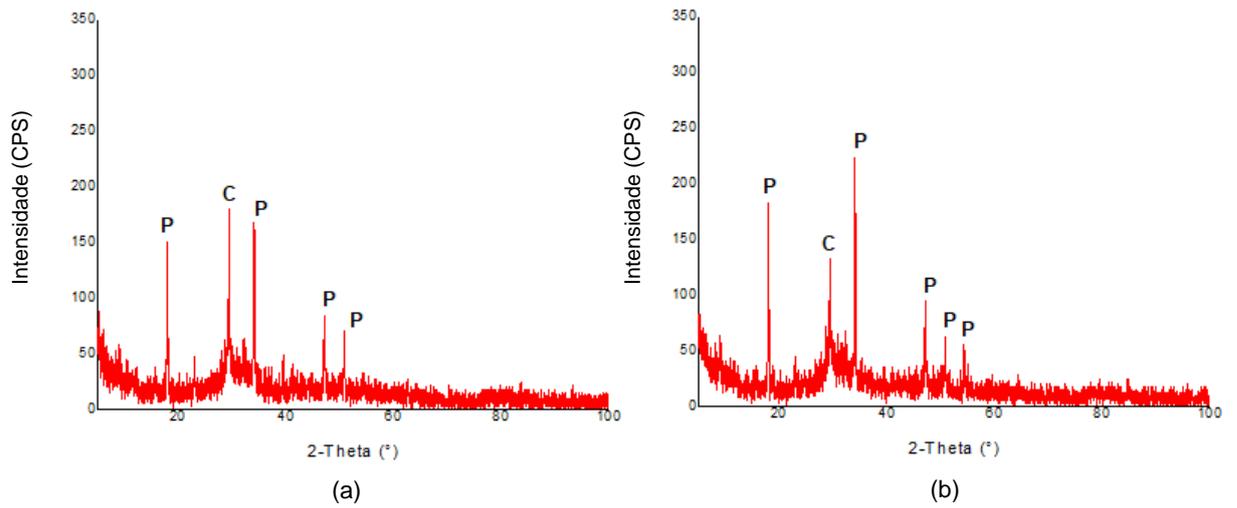
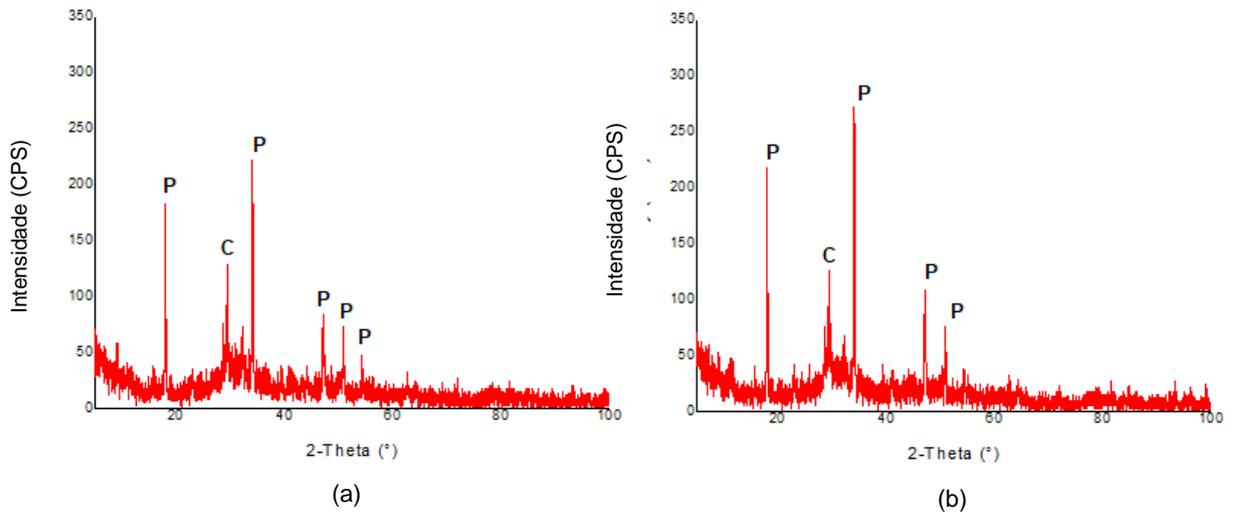


Figura 4.27 – Difratoograma dos traços: a) C40-1-10 e b) C56-1-10.



A Tabela 4.28 apresenta a legenda contendo o significado de cada letra utilizada para representar um composto identificado na difração.

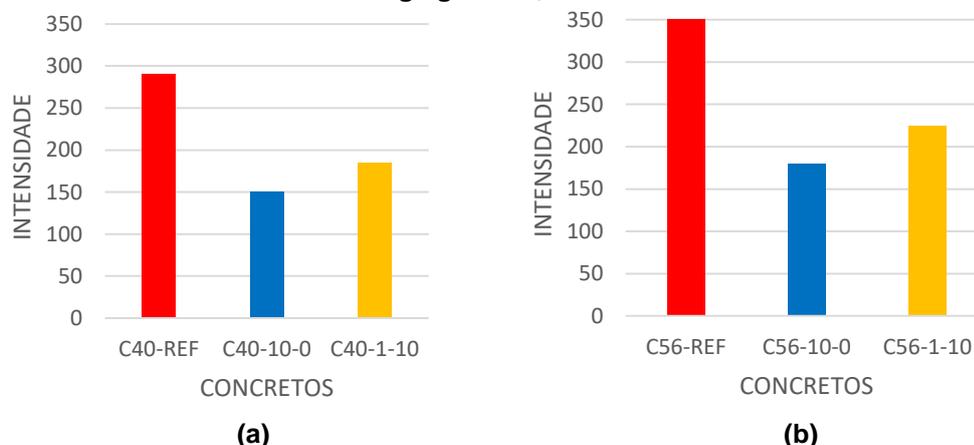
Tabela 4.28 – Compostos identificados nos difratogramas.

Compostos	Fórmula	Nomenclatura adotada
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	P
Calcita	CaCO_3	C
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	G

Ao analisar os difratogramas, percebe-se que a distribuição desses picos é basicamente mantida quando altera-se a relação a/agl de 0,40 para 0,56. Os compostos encontrados após a difração são os mesmos em quase todos os traços e estão enumerados na Tabela 4.28, variando a quantidade de picos e sua intensidade.

A principal fase de interesse para este trabalho é a formação do hidróxido de cálcio, que foi identificada nos ângulos $18,1^\circ$, $34,1^\circ$, $47,2^\circ$ e $50,9^\circ$. Ao analisar as intensidades dos picos de portlandita no ângulo $18,1^\circ$, foi possível construir o gráfico apresentado na Figura 4.28, que expõe a diferença entre os traços ensaiados.

Figura 4.28 – Intensidade do pico de portlandita ($18,1^\circ$): (a) relação a/agl igual a 0,40 (b) relação a/agl igual a 0,56.



Os traços com adição mineral possuem picos com menor intensidade do que o referência, independentemente da relação a/agl analisado. Os traços com 10% de nanosílica apresentam a menor intensidade, seguido do traço com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa. Com relação ao hidróxido de cálcio essa redução nos picos é esperada, visto que nos traços com adições minerais há o seu consumo por meio das reações pozolânicas.

A menor quantidade de portlandita nos traços com adições minerais foi verificado também no DSC, e indicam uma menor reserva alcalina. Justificando assim, os resultados do ensaio de carbonatação, onde esses traços apresentaram menor resistência ao ataque do CO_2 .

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com a execução do ensaio de resistência à compressão em diferentes idades, foram obtidos resultados que O presente trabalho, ao avaliar a resistência à carbonatação acelerada de concretos com adição de nanosílica coloidal, conclui a partir dos resultados obtidos, que os efeitos da incorporação da adição mineral estão ligados a relação a/agl dos concretos, visto que em alguns casos o efeito desta adição pode ser sobreposto pela influência da quantidade de água contida no traço.

No caso dos concretos com relação a/agl igual a 0,40 prevaleceu o efeito proporcionado pela baixa quantidade de água adicionada, resultando em uma menor porosidade que não permitiu analisar a ação do CO₂ nos diferentes traços estudados, visto que nenhum deles carbonatou durante o desenvolvimento deste estudo.

Nos concretos com relação a/agl igual a 0,56 a presença da nanosílica não colaborou com a resistência à carbonatação. No ensaio com 15% de concentração de CO₂, a diferença entre os traços com adição em relação ao referência não foi significativa, dada a pequena frente identificada até o final do estudo. No caso do ensaio com concentração de 3% de dióxido de carbono, o traço referência foi o que apresentou menor frente de carbonatação, sendo a profundidade nos demais diretamente proporcional ao teor de adição, o que indica o efeito da incorporação de nanosílica no consumo de portlandita devido as reações pozolânicas.

Com relação às propriedades mecânicas e físicas dos concretos, a adição de nanosílica apresentou um bom desempenho. O efeito da adição foi mais expressivo nos concretos com relação a/agl igual a 0,40: quanto maior o teor adicionado, mais significativo foram os resultados. No caso do traço com 10% de adição de nanosílica aumentou-se a resistência à compressão em 27% e diminui a absorção de água por capilaridade em 66%. Esses resultados são atribuídos aos efeitos da nanosílica que auxiliam no refinamento da microestrutura.

Não é possível determinar um teor ideal de adição de nanosílica de acordo com a ação do dióxido de carbono, visto que a profundidade de carbonatação aumenta de acordo com o

teor de adição. O efeito da nanosílica adicionada em conjunto a sílica ativa, além de não apresentar melhorias significativas nas propriedades mecânicas e físicas, é o traço que apresentou maior frente de carbonatação.

Ao avaliar o pH da solução de poro simulada, notou-se a diferença significativa na alcalinidade da região carbonatada dos corpos de prova e da região não carbonatada. Essa distinção entre os valores de pH indica a ação do CO_2 , e evidencia a presença de um ambiente propício à despassivação da armadura. A técnica utilizada foi eficiente e apresentou uma relativa facilidade de execução, quando comparado com outros métodos de avaliar a solução presente nos poros do concreto.

Com base nos resultados apresentados pelos ensaios microestruturais foi possível analisar os efeitos das adições mineirais utilizadas neste estudo, e relatar a menor quantidade de hidróxido de cálcio nos traços com nanosílica e sílica ativa, quando comparados com o referencial. Ao consumirem o hidróxido de cálcio, as reações pozolânicas resultam numa menor reserva alcalina no concreto, deixando-o mais suscetível ao ataque do CO_2 .

Por fim, conclui-se que a adição de nanosílica em concretos, com relação às propriedades mecânicas físicas provoca o melhoramento na microestrutura, porém, em ambientes com elevado teor de CO_2 a ação da nanosílica acaba resultando no aumento da carbonatação, devido a diminuição da reserva alcalina.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas conclusões obtidas através da realização desta pesquisa, e afim de dar continuidade e aprofundar os conhecimentos sobre o assunto abordado, sugere-se como temas de estudos futuros:

- Indicar a viabilidade da incorporação de nanosílica nos concretos de cimento Portland, de acordo com a relação a/agl empregada.
- Realizar outros ensaios microscópicos nos concretos com adição de nanosílica, a fim de aprofundar o conhecimento sobre sua interferência na matriz cimentícia.
- Analisar a porosidade dos concretos com incorporação de nanosílica, mesmo daqueles que não apresentam frente de carbonatação, com o objetivo de identificar a influência da adição na microestrutura, no tamanho e na conectividade do sistema de poros.

REFERÊNCIAS

AGRA, T.; CARNEIRO, B.; SALES, N.; LIMA, N. Influência das Adições de Pozolanas nas Taxas de Carbonatação em Concretos. Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. 2017, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, 2017 <Disponível em: <http://revistas.poli.br/index.php/CONPAR>>. Acesso em: 25 ago 2017.

ALBUQUERQUE, R. T. O.; LIMA, N. L. A. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida**. s/v. p. 57 – 68, 2014.

ALMEIDA, D. C. **Desempenho de argamassas com sílica ativa em ambiente marinho**. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

ALMEIDA, F. do C. R.; SALES, A. Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise e Intervenção**, 2 ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

ANDRADE, F. H. **Síntese e caracterização de espuma de vidro dopada com pentóxido de nióbio**. 2015. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015.

ANDRADE, T. Tópicos sobre Durabilidade do Concreto. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 25, p. 753-792.

ANDRADE, T; SILVA, A. J. C. e. Patologia das Estruturas. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 32, p. 953-1127.

ANDRADE, D. DA S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com incorporação de nanosílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, 2017.

ANDRADE, J. J. de O.; POSSAN, E.; SQUIAVON, J. Z.; ORTOLAN, T. L. P. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**. v. 161, 2018, p. 70-83.

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

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

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

_____. **NBR 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.
- _____. **NBR 15575-1**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 15577**: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro. 2018.
- _____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro. 2018.
- _____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.
- _____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. 5 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- BERTOS, M. F.; SIMONS, S.J.R.; HILLS, C.D.; CAREY, P.J. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. **Journal of Hazardous Materials**, B112, p. 193-205, 2004.
- BIANCHI, Q. **Application of nano-silica in concrete**. Tese (PhD). Eindhoven University of Technology, 2014.
- BRANCO, F. A.; PAULO, P. V. O projecto de pontes para vidas superiores a 100 anos. **Revista ALCONPAT**. v. 2, n. 1, p. 1-9, 2012.
- BROOMFIELD, J.P. **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair**. 2 ed, Taylor & Francis, 2007.
- CAMPOS NETO, T. F. C.; GEYER, A. L. B. **Efeitos do uso de aditivo com nanosílica em suspensão coloidal na consistência e resistência mecânica do concreto**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil. v. 13, n. 2, p. 162-172. 2017.

CARDOSO, A.; DELMIRO, T.; MENDES, A.; MONTEIRO, E.; RABBANI, E. K. Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra a Ação de CO₂ e Íons Cloreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n° 3, p. 167-175, 2017.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da Carbonatação no Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 24, p. 849-885.

CASTRO, A. L. *Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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, n. 2, p. 91-104, 2016.

CHERIF, R.; HAMAMI, A. A.; AIT-MOKHTAR, A.; MEUSNIER, J-F. Study of the pore solution and the microstructure of mineral additions blended cement pastes. **Energy Procedia**, v. 139 p. 584-589, 2017.

CINCOTTO, M. A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 11, p. 381 - 413.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 08, p.261-309.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 12, p. 345 – 379.

DE LARRARD, F.; BOSCH, F.; CATHERINE, C.; DEFLORENNE, F. The AFREM method for the mix-design of high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 30, p. 439-446, 1997.

DELGADO, A., TALERO, R., TÉLLEZ, E., BAYARRI, R., FORTUÑO, J.M., POMPIANO, R.B. **Nanosílice estabilizada y microsílice para materiales cementantes expuestos al ambiente marino. Aplicación al caso del Mar Caribe**. p. 1-16. 2012.

DINIZ, H. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação**. 2018. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

DUNG, N. T.; UNLUER, C. Carbonated MgO concrete with improved performance: The influence of temperature and hydration agent on hydration, carbonation and strength gain. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 152-164, 2017.

DURÁN-HERRERA, J.M; MENDONZA-RANGEL, E.U.; DE-LOS-SANTOS, F; VÁZQUEZ, F.; VALDEZ, P.; BENTZ, D.P. Accelerated and natural carbonation of concretes with internal curing and shrinkage/viscosity modifiers. **Materials and Structures**. 2013.

EKOLU, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1 – formulation. **Cement and Concrete Composites**. v. 86, p. 40 – 56, 2018.

ELGALHUD, A. A.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. Carbonation resistance of concrete: limestone addition effect. **Magazine of Concrete Reaech**, v. 69, p. 84-106, 2017.

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.

ESPECIFICAÇÃO LNEC E391. Betões: determinação da resistência à carbonatação. LNEC, Lisboa, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **DIN EN 13295**. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of resistance to carbonation. Brussels, 2004.

FELIX, E. F. **Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão**. 2018. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

FERRARIS, C. F.; OBLA, K. H.; HILL, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 245 – 255, 2001.

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

FERREIRA, B. T. Resistência à carbonatação de betões estruturais de agregados leves. Lisboa, 2015. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2015.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 27, p. 829-855.

FILOMENO, R. H. **Avaliação da influência da umidade relativa da atmosfera de cura na carbonatação de materiais de fibrocimento**. Pirassununga, 2018. 111p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2018.

FLORES, Y. C.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M. 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.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GALL, E. T.; SONAT, C.; NAZAROFF, W. N.; UNLUER, C. Experimental investigation on carbonation in fatigue-damaged concrete. **Building and Environment**, v. 110, p. 161-172, 2016.

GESOGLU, M. E; GUNEYISI, D.S; ASSAD, G.F; MUHYDDIN. Properties of low-binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica. **Construction and Building Materials**. v. 102, p. 706-713, 2016.

GLEIZE, P. J. P. *Nanotecnologia e materiais de construção*. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. v. 2, p. 1659-1685. São Paulo: IBRACON, 2007.

GRIESSER, A., **Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures**. Tese de Doutorado, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. 2001.

GONÇALVES, A. **Estudo da dependência composicional com as propriedades térmicas e espectroscópicas do sistema $\text{TeO}_2\text{-Li}_2\text{O-BaO}$** . 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016.

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,. 2015.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas. **Téchne**. nº. 17, p. 28 – 31, 1995.

HO, L. S.; NAKARAI, K.; OGAWA, Y.; SASAKI, T.; MORIOKA, M. Effect of internal water content on carbonation progress in cement-treated sand and effect of carbonation on compressive strength. **Construction and Building Materials**. v. 85, p. 9-21, 2018.

HUANG, N. M.; CHANG, J. J.; LIANG, M. T. Effect of plastering on the carbonation of a 35-year-old reinforced concrete building. **Construction and Building Materials**. v. 29, p. 206 – 214, 2012.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 1920-12:2015** – Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. Geneva, Switzerland.

JIANG, C.; HUANG, Q.; GU, X.; ZHANG, W. Experimental investigation on carbonation in fatigue-damaged concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 99, p. 38-52, 2017.

JIN, M.; GAO, S.; JIANG, L.; CHU, H.; LU, M.; ZHI, F. Degradation of concrete with addition of mineral admixture due to free chloride ion penetration under the effect of carbonation. **Corrosion Science**, v. 138, p. 42-53, 2018.

JEONG, Y. J.; YOUM, K. S.; YUN, T. S. Effect of nano-silica and curing conditions on the reaction rate of class G well cement exposed to geological CO_2 – sequestration conditions. **Cement and Concrete Research**. v.109, p. 208 – 2016, 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.

KAMUR, M.; MALAY, N.; KUJUR, J. Study of natural carbonation of concrete incorporating marble dust. **Construction Materials**. v. 171, p. 85 – 92, 2018.

KHALOO, A.; MOBINI, M. H.; HOSSEINI, P. Influence of different types of nano- SiO_2 particles on properties of high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 188–201, 2016.

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável**. Londrina, 2007. 188p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, 2007.

LI, L. G.; HUANG, Z. H.; ZHU, J.; KWAN, A.K.H.; CHEN, H.Y. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**. v. 140, 2017, p. 229-238.

LI, Z; Li, S. Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**. v. 163, p. 668-680, 2018.

LIM, S.; MONDAL, P. **Effects of incorporating nanosilica on carbonation of cement paste**. J Mater Sci. v. 50, p. 3531-3540, 2015.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. M.; **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARTINS, R. O. G.; ALVARENGA, R. de C. S. S.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, A. F. de; MENDES, B. C. AZEVEDO, A. R. G. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. **Construction and Building Materials**. v. 159, 2018, p. 261-268.

MASSANA, J.; REYES, E.; BERNAL, J.; LEÓN, N.; SÁNCHEZ-ESPINOSA, E. 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.

MATTOS, A. D. **Planejamento e controle de obras**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2010.

MEDEIROS, M. H. F. de; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 125-139, 2017.

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

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L.; REIS, P. J. Effects of nano-silica on mechanical performance and microstructure of ultra-high performance concrete. **Cerâmica**. v. 63, 2017, p. 387 – 394.

MENDES, T. M. **Efeito da nanossílica em matrizes cimentícias de ultra alta resistência**. Florianópolis, 2016. 113p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

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. **DYNA**, v. 83, n. 198, p. 136–141, 2016.

MIRANDA, L. R. M. de. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais**. Brasília, 2018. 127p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2018.

NAGROCKIENÈ, D.; GIRSKAS, G.; SKRIPKIUNAS, G. Properties of concrete modified with mineral additives. **Construction and Building Materials**. v. 135, p. 37-42, 2017.

NASKAR, S.; CHAKRABORTY, A. K. Effect of nano materials in geopolymer concrete. **Perspectives in Science**. v. 8, p. 273-275, 2016.

NILI, M.; EHSANI, A.; SHABANI, K. **Influence of Nano-SiO₂ and Microsilica on Concrete Performance**. In: Proceedings Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 2010. Universita Ploitecnica delle Marche, Ancona, Italy, 2010.

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

PAIVA, O. A. **Durabilidade de concretos contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2016, 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

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

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PINTO, C. A. **Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados**. 2005. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PIRES, P. F. **Estudo da Carbonatação Avançada em Concreto Adições Mineirais**. 2016. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2016.

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. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. Tese (Doutorado em engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

QUERCIA, G.; BROUWERS, H. J. H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. In: International PhD Symposium in Civil Engineering. 8., 2010, Kongens Lyngby. **Anais eletrônicos...** Kongens Lyngby: [s.n.]. 2010. Disponível em: <<http://josbrouwers.bwk.tue.nl/publications/Conference78.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. Curitiba, 2015. 151p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

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.

RÉUS, G. C.; DITZEL, L. F. S.; MEDEIROS, M. H. F. Efeito do Metacaulim na Carbonatação Natural: Avaliação com Modelos de Previsão de Vida Útil. In: Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas, 2017, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife, 2017 <Disponível em: <http://revistas.poli.br/index.php/CONPAR>>. Acesso em: 25 ago 2017.

RIBEIRO, D. V. **Influência da adição de lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. Tese (Doutorado em ciências e engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise e Intervenção**, 2 ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

ROY, S.K.; POH, K.B.; NORTHWOOD, D.O. Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**. v. 34, p. 597 – 606, 1999.

RONG, Z; SUN, W; XIAO, H & JIANG, G. Effects of nano-SiO₂ on the mechanical and microstructural aspects of ultra-high performance cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**. v. 56, p 25-31, 2015.

OLIVEIRA, A. M. de; CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters on chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 192, p 467-477, 2018.

SÁ, R. R. de. **Influência da realcalinização por meio da absorção/difusão de soluções alcalinas na resistência à compressão do concreto, na aderência de Tintas e vernizes e na repassivação da armadura**. Goiânia, 2006, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, p. 158.

SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 838-844, 2012.

SAMIMI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; MAGHSOUDI, A. A.. Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. **Construction And Building Materials**, v. 165, p.247-263, 2018.

SÁNCHEZ, E.; BERNAL, J.; LEÓN, N. MORAGUES, A. Propriedades reológicas e mecânicas de um concreto auto adensável, com a adição de nano sílica e de micro sílica (sílica ativa). **ALCONPAT**, v. 6, n. 1, p. 1 – 14, 2016.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV. K. Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 2060-2071, 2010.

SANTOS, M. O. dos. **Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de cloretos e CO₂**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

SALOMA, A. N.; ISWANDI, I.; MIKRAJUDDIN, A. Experimental investigation on nanomaterial concrete. **International Journal of Civil & Environmental Engineering**. v. 13. n. 03, p. 15 – 20, 2013.

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

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos : efeito da adição da nanosílica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS R.; LOTHENBACH B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. London, Chapter 5, 2016.

SEFF, L.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2487–2491, 2009.

SEFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. **Revista Matéria**, v. 15, n. 1, p. 12–20, 2010.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 236 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 279 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. de O. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 704-715, 2017.

SINGH, L. P.; KARADE, S.R.; BHATTACHARYYA, S. K.; YOUSUF, M. M.; AHALAWAT, S. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1069–1077, 2013.

SONG, H.W.; KWON, S. J. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 909 - 9015, 2007.

SOUSA, C. A. C. de. Princípios da corrosão eletroquímica. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise e Intervenção**, 2 ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

UNE 83993-1 Ensayo de durabilidad del hormigón. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 2: método natural.

VERA-AGULLO, J.; CHOZAS-LIGERO, V.; PORTILLO-RICO, D.; GARCÍA-CASAS M. J.; GUTIÉRREZ-MARTÍNEZ, A.; MIERES-ROYO, J. M.; GRÁVALOS-MORENO, J. Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials. **Nanotechnology in Construction**. v. 3, p. 383-388, 2009.

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, 2015.

ZAMORANO, L. Y.G.; LINTON, C. E. C. Modificação das propriedades de matrizes cimentícias através da adição de partículas de nanosilica. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción**. V. 6, n. 2, p. 101 – 115, 2017.

ZANON, T.; SCHMALZ, R.; F. G. S. FERREIRA. Avaliação dos efeitos da nanosilica em concretos submetidos à ação de íons cloreto. **ALCONPAT**, v. 8, n. 2, p. 138 – 149, 2018.

ZHANG, K.; XIAO, J. Prediction model of carbonation depth for recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 88, 2018, p. 85-99.

ZOU, Z.; WU, J.; YU, W.; WANG, Z. Influence of Mineral Admixtures on the Electrochemical Realkalization of Carbonated Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, p. 04017124, 2017.

Yu, R; SPIESZ, P; BROWERS, H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with low binder amount. **Construction and Building Materials**. v. 65, p. 140-150, 2014.

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 ²)
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 H₀, 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 ²)
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 - 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	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 ²)
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- ANOVA para os 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 H₀, 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 ²)
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 H₀, 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 ²)
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 - 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	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 ²)
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 - ANOVA para os 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 H₀, 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 ²)				
	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 ²)	Média (g/cm ²)	Variância ((g/cm ²) ²)
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 ²)				
	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 ²)	Média (g/cm ²)	Variância ((g/cm ²) ²)
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.