

Efeitos da nanossílica no desempenho e na durabilidade de concretos submetidos ao ataque de CO₂

FERNANDO DO CARMO PEREIRA – MESTRE

CLEBER EDUARDO FERNANDES LEAL – DOUTORANDO

FERNANDA GIANNOTTI DA SILVA FERREIRA – PROFESSORA DOUTORA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – (PPGECIV/UFSCAR)

RESUMO

A NANOSSÍLICA É UMA ADIÇÃO MINERAL COM DIÂMETRO DE 3 A 150 NM, QUE INTERAGE DE FORMA QUÍMICA E FÍSICA COM A MATRIZ CIMENTÍCIA DEVIDO AOS SEUS EFEITOS FÍLER E POZOLÂNICO. ESTE ARTIGO BUSCOU AVALIAR AS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E DE DURABILIDADE FRENTE À CARBONATAÇÃO ACELERADA DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA. PARA TANTO, O ESTUDO FOI REALIZADO EM CONCRETOS COM

RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE IGUAL A 0,56 E DIFERENTES TEORES DE NANOSSÍLICA (1%, 5% E 10%), UM TRAÇO COM 1% DE ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA EM CONJUNTO COM 10% DE SÍLICA ATIVA E TAMBÉM UM TRAÇO REFERÊNCIA (SEM ADIÇÃO MINERAL). OS TRAÇOS COM OS MAIORES TEORES DE NANOSSÍLICA APRESENTARAM MELHOR DESEMPENHO MECÂNICO E TAMBÉM MAIOR DURABILIDADE FRENTE AO AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO.

Palavras-chave: concreto, durabilidade, carbonatação, nanossílica.

I. INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, a deterioração de edificações em concreto armado e a necessidade de ampliar sua durabilidade em meios agressivos fomentaram o início dos estudos relacionados aos mecanismos de degradação do material, bem como o desenvolvimento de tecnologias para seu reparo, reforço ou recuperação.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, a durabilidade de uma estrutura representa sua habilidade de resistir às influências ambientais definidas, previamente e em conjunto, pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante. Sob um aspecto qualitativo, a ABNT NBR 15575-1:2013 define durabilidade como a “capacidade

de edificação e de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas”.

Falhas na execução, falta de manutenção e uso diferente do previsto em projeto são frequentes causadores de manifestações patológicas nas edificações, assim como alternativas insuficientes para neutralizar as condições ambientais do local onde a estrutura está inserida. A corrosão das armaduras se destaca entre os problemas mais frequentes, estando diretamente relacionada com um fenômeno físico-químico que ocorre entre o dióxido de carbono presente na atmosfera e os compostos da pasta de cimento – a carbonatação.

A ação do dióxido de carbono tem grande influência na durabilidade de uma estrutura, sobretudo em cidades industrializadas e com altas concentrações de CO₂. Dependendo da porosidade do concreto, das características dos materiais constituintes e do meio ambiente, o CO₂ presente no ar adentra os poros do compósito, reage com o hidróxido de cálcio e provoca a sua carbonatação. Esse fenômeno, que é marcado pela transformação dos íons alcalinos em sais de carbonatos, reduz o pH da solução contida nos poros do concreto e leva à despassivação da armadura. Em outras palavras, o aço perde sua película protetora e torna-se propenso a corroer, como se estivesse diretamente exposto à atmosfera (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Considerando a importância econômica e ambiental representada pela durabilidade das estruturas de concreto, as adições minerais desempenham um importante papel na busca pela minimização dos efeitos provocados pelos agentes agressivos e causadores das manifestações patológicas. Segundo Dal Molin (2011), as adições minerais, a partir das suas características físicas e químicas, podem dar origem a materiais cimentícios mais duráveis. Sobre a adição de nanossílica ao concreto, Nili, Ehasai e Shabani (2010); Sánchez *et al.* (2016); Zanon, Schmalz e Ferreira (2018) apontam que é possível elevar a resistência à compressão do material e, ao mesmo passo, diminuir a sua permeabilidade.

Visando ao aumento da durabilidade, melhora no sistema de poros e inibição de agentes agressores, este trabalho propõe um estudo experimental

fundamentado na adição de nanossílica a traços distintos de concreto. Com a submissão das amostras à ação controlada do CO₂, pretende-se analisar a formação da frente de carbonatação, bem como investigar a influência dessa adição mineral nas propriedades físicas e no desempenho mecânico das misturas obtidas.

2. DESENVOLVIMENTO

No início deste programa experimental caracterizaram-se os materiais utilizados de acordo com as normas específicas. Após a definição dos traços, analisaram-se suas propriedades mecânicas e físicas segundo os ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água por capilaridade. Por fim, verificou-se, por meio do ensaio de carbonatação acelerada, a durabilidade dos concretos quando submetidos à ação do CO₂.

2.1 Materiais utilizados

Foram utilizados nesta pesquisa: cimento Portland do tipo CP V ARI; agregado miúdo natural de origem quartzosa; agregado graúdo basáltico; nanossílica coloidal; sílica ativa; e água. As características físicas e químicas do cimento empregado seguem apresentadas na Tabela 1.

O agregado miúdo apresentou dimensão máxima característica de 2,4 mm e módulo de finura de 1,94, enquanto o agregado graúdo exibiu dimensão máxima característica de 9,5 mm e módulo de finura de 5,81. Neste caso, a porção ideal entre os agregados foi de 60% de agregado graúdo e 40% de agregado miúdo (tomada em função da maior massa unitária obtida). O traço foi fixado para todas as misturas em 1:m = 3,2, sendo m igual ao total de agregados.

► Tabela 1 – Propriedades do CP V ARI

Propriedades físicas			Propriedades químicas			
Características e propriedades	Valores obtidos	Limites NBR 16697:2018	Componentes	Valores obtidos (% em massa)	Limites NBR 16697:2018 (% em massa)	
Massa específica (NBR NM 23)	3,12 g/cm ³	**	Perda ao fogo (PF)	3,79	< 4,5%	
Início de pega (NBR NM 65)	135 min	> 120 min	Anidro silícico (SiO ₂)	19,17	**	
Fim de pega (NBR NM 65)	210 min	< 600 min	Óxido de cálcio (CaO)	63,97	**	
Água para pasta de consistência normal	31,5 %	**	Óxido de magnésio (MgO)	0,61	< 6,5%	
Finura	Retido 75 µm (#200)	0,1 %	< 6,0 %	Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	3,21	**
	Área específica*	473 m ² /kg	> 300 m ² /kg	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	5,03	**
Resistência à compressão (f _{cd})	1 dia	27,5 MPa	> 14,0 MPa	Anidrido sulfúrico (SO ₃)	2,84	< 3,5%
	3 dias	42,0 MPa	> 24,0 MPa	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,06	**
	7 dias	48,7 MPa	> 34,0 MPa	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,61	**
	28 dias	52,2 MPa	**	Equivalente alcalino (em Na ₂ O)	0,461	**
—	—	—	—	Óxido de cálcio livre (CaO)	1,76	**
—	—	—	—	Resíduo insolúvel (RI)	0,85	< 1,0%
—	—	—	—	Anidrido carbônico (CO ₂)	2,38	< 3,0%

* Determinada a partir do método de Blaine; ** Valores Limites não especificados pela NBR 16697:2018.

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



As características físicas dos agregados utilizados nesse programa experimental são apresentadas na Tabela 2.

A Tabela 3 apresenta a caracterização química e física da sílica ativa empregada nesse programa experimental.

A adição utilizada foi a nanossílica coloidal, cujas principais características são apresentadas na Tabela 4.

2.2 Definição dos traços

Para que o efeito das adições

► Tabela 2 – Caracterização física dos agregados

Característica	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa específica (g/cm ³)	2,52	2,77
Massa unitária seca e solta (kg/m ³)	1532,46	1422,32
Massa unitária compactada (kg/m ³)	1661,49	1568,72
Absorção de água (%)	0,20	2,26
Material pulverulento (%)	1,41	1,00

sobre a resistência ao ataque de CO₂ nos concretos fosse analisado, estabeleceu-se a relação água/agl. de 0,56, conforme trabalho de Pereira (2019). A substituição de cimento por nanossílica foi feita em massa (de acordo com a recomendação do fabricante), adotando-se três diferentes teores de nanossílica (1%, 5% e 10%) em relação à massa de aglomerante. A sílica ativa foi incorporada em um dos traços no teor de 10% em volume (buscando-se manter o mesmo volume das misturas, uma vez que a massa específica da sílica ativa é menor que a do cimento), a fim de analisar o seu efeito combinado com a nanossílica. Para comparação, o concreto referência (sem adição mineral) também foi avaliado.

Para um melhor entendimento, adotou-se a nomenclatura C56-N-S, sendo: C referente ao concreto; 56, à relação água/agl. de 0,56; N, teor de nanossílica (%) em substituição ao aglomerante em massa; e S, teor de sílica ativa (%) em substituição ao cimento em volume. Por exemplo, o traço denominado C56-1-10 se refere a um concreto com relação água/agl. igual a 0,56; teor de nanossílica de 1% e de sílica ativa de 10%. O

traço referência, que não possui adição, foi identificado como C56-REF.

Vale ressaltar que a nanossílica empregada encontra-se dispersa em uma solução aquosa, onde 50% da massa total é composta de nanopartículas de sílica e os outros 50% de água. Na definição dos traços, foi considerada como adição ao concreto apenas a porcentagem de nanossílica presente na solução, o restante que consiste nos 50% de água foi descontado da quantidade de água de amassamento.

A Tabela 5 apresenta a composição de cada traço e a média dos diâmetros de espalhamento obtidos. Embora a consistência das misturas tenha variado, adotou-se uma consistência mínima de (230 ± 10) mm.

O procedimento de mistura dos concretos empregado neste programa experimental é apresentado na Figura 1. Para tal, utilizou-se um misturador do tipo eixo vertical, que, pela energia de mistura, favorece uma melhor dispersão das partículas.

2.3 Ensaios realizados

Os ensaios realizados neste programa experimental foram executados em

► Tabela 3 – Características físicas e químicas da sílica ativa

Características químicas		Características físicas	
Características	Valor	Características	Valor
Equivalente alcalino em Na ₂ O (%)	0,7	Densidade (g/cm ³)	0,35
Perda ao fogo (%)	3,7	pH	7,9
SiO ₂ (%)	93,0	Umidade (%)	0,1
Na ₂ O (%)	0,2	Retido 45 mm (#325) (%)	3,7
Fe ₂ O ₃ (%)	0,5	Tamanho médio da partícula (µm)	0,8
CaO (%)	0,5	—	—
MgO (%)	0,4	—	—
Al ₂ O ₃ (%)	0,2	—	—
K ₂ O (%)	0,9	—	—

Fonte: Dow Corning Silício do Brasil

► Tabela 4 – Principais características da nanossílica

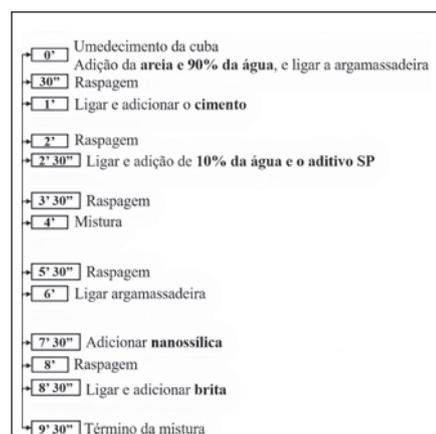
Características	Resultados
Aspecto	Líquido branco
Teor de sólidos (%)	50
pH	9,5
Tamanho médio da partícula (nm)	35
Massa específica (g/cm ³)	1,4
Viscosidade (v)	8

Fonte: AkzoNobel

concreto moldado em corpos de prova cilíndricos (Ø50 x 100mm), seguindo as normas e idades apresentadas na Tabela 6. O uso de corpos de prova nessas dimensões foi possível em função da dimensão máxima do agregado utilizado, que segundo Carvalho *et al.* (2017), não há diferença significativa entre resultados obtidos utilizando-se corpos de prova cilíndricos de Ø100 x 200 mm. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente através de Análise de Variância (ANOVA) e posteriormente submetidos ao teste de Tukey.

O ensaio de durabilidade dos concretos foi realizado em câmara de carbonatação acelerada, conforme retrata a Figura 2, com concentração de (15 ± 2)% de CO₂, umidade relativa entre 70% e 80%, e temperatura de (23 ± 2)°C. Tais condições, na realização deste ensaio, corresponderam às mesmas empregadas por Almeida (2013) e Santos (2019). A identificação da frente de carbonatação foi conduzida pelo método colorimétrico com aspersão de fenolftaleína.

Para a realização do ensaio de medida da profundidade de carbonatação,



► Tabela 7 – Resistência à compressão dos concretos

Idade de ensaio (dias)	Resistência à compressão	Idade				
		C56-REF	C56-1-0	C56-5-0	C56-10-0	C56-1-10
7	Valor médio (MPa)	39,34	38,86	40,20	42,13	37,84
	Desvio padrão (MPa)	0,59	1,62	1,32	0,71	0,75
	C.V.* (%)	1,49	4,17	3,29	1,68	1,99
	Diferença significativa com C56-REF**	—	Não	Não	Não	Não
28	Valor médio (MPa)	45,96	46,34	47,20	47,77	46,20
	Desvio padrão (MPa)	1,25	0,91	2,57	2,05	1,98
	C.V.* (%)	2,73	1,97	5,44	4,30	4,28
	Diferença significativa com C56-REF**	-	Não	Não	Não	Não
63	Valor médio (MPa)	46,78	49,15	53,30	52,44	49,24
	Desvio padrão (MPa)	0,49	1,26	0,17	1,16	1,00
	C.V.* (%)	1,06	2,57	0,32	2,21	2,03
	Diferença significativa com C56-REF**	—	Não	Sim	Sim	Não

* Coeficiente de variação; ** Resultado do Teste de Tukey – Sim: há diferença significativa; Não: não há diferença significativa.

apresentou um ganho de 27% em relação à mistura de referência.

A incorporação de nanossílica à mistura colaborou para o aumento da resistência à compressão do concreto, fato este, também observado na pesquisa de Saloma, Iswandi e Mikrajuddin (2013), cujos resultados também indicam o aumento da resistência à compressão dos concretos, à medida que se eleva o teor de adição de nanossílica.

A adição combinada de sílica ativa e nanossílica não promoveu um aumento relevante na resistência à compressão no concreto com os teores incorpo-

rados neste programa experimental (C56-1-10), porém, Andrade (2017) ao analisar combinações diversas obteve os melhores resultados aos 28 dias para o traço contendo 10% de sílica e 3% de nanossílica. Portanto, nota-se que a alteração dos teores de adições pode contribuir para melhores resultados, quando sílica ativa é incorporada no concreto junto à nanossílica.

3.2 Absorção de água por capilaridade

Concluído o ensaio de absorção de

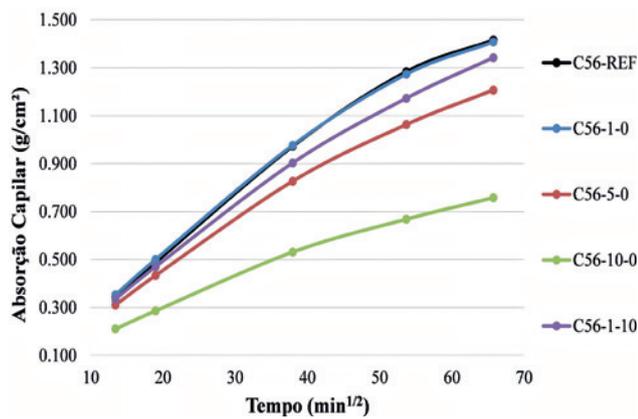
água por capilaridade, produziu-se a Tabela 8 e o gráfico exposto na Figura 3, que expressam os resultados obtidos. Para cada traço foram ensaiados três corpos de prova.

Assim como no ensaio de resistência à compressão axial, os concretos que apresentaram os melhores resultados no ensaio de absorção de água por capilaridade foram os traços com adição de 5% e 10% de nanossílica. Ao final das 72h de experimento, o concreto que apresentou o menor índice de absorção capilar foi o C56-10-0, com 46% de redução, seguido

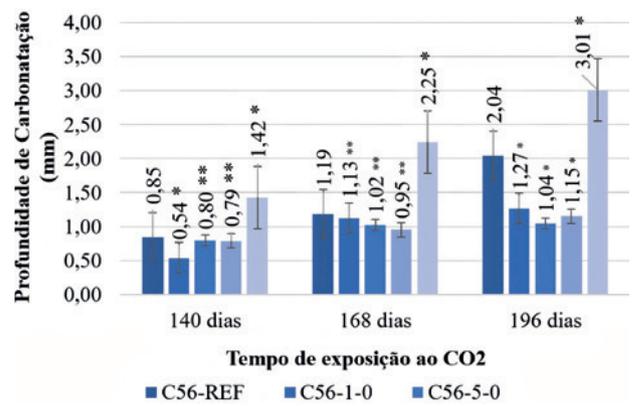
► Tabela 8 – Absorção de água por capilaridade dos concretos aos 28 dias

Concretos	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					Altura de ascensão (cm)	Diferença significativa com o C56-REF*
	3h	6h	24h	48h	72h		
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	Não
C56-5-0	0,310	0,434	0,827	1,063	1,207	7,6	Sim
C56-10-0	0,211	0,286	0,531	0,668	0,757	4,9	Sim
C56-1-10	0,335	0,470	0,903	1,172	1,342	8,6	Não

* Resultado do Teste de Tukey – Sim: há diferença significativa; Não: não há diferença significativa.



► **Figura 3**
Absorção de água por capilaridade dos concretos aos 28 dias



Análise estatística (Teste de Tukey) – diferença significativa em relação ao traço de referência: *sim; **não.

► **Figura 4**
Profundidade de carbonatação dos concretos

pelo traço C56-5-0, com redução de 15%, ambos comparados com o traço de referência (C56-REF). Os demais teores de adição não apresentaram diferença significativa após a análise estatística dos resultados.

Zahedi, Ramezani pour e Ramezani pour (2015); Joshaghani e Moeini (2017) estudaram as propriedades físicas de compósitos cimentícios com incorporação de nanossilica nos teores máximos de adição de 5% e 6%, respectivamente, sendo que quanto maiores os teores de substituição, menores os índices de absorção de água obtidos, assim como observado nesta pesquisa.

3.3 Durabilidade frente à ação de CO₂

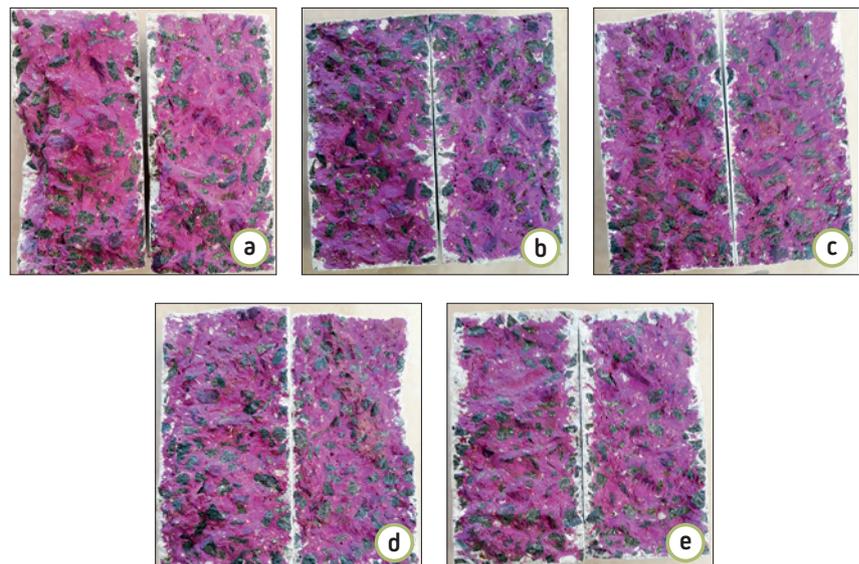
Os primeiros resultados foram mensurados com 140 dias do início do ensaio, que foi finalizado ao completar 196 dias, quando também foi realizada a última medida da frente de carbonatação. A Figura 4 apresenta a profundidade de carbonatação encontrada em cada traço de concreto ao longo do período de ensaio. A Figura 5 retrata o avanço da frente de carbonatação.

Após a realização do ensaio de carbonatação acelerada, apesar de

pequena, foi possível identificar frente de carbonatação em todos os traços. O traço com adição combinada de 1% de nanossilica e 10% de sílica ativa (C56-1-10) apresentou uma frente de carbonatação maior que o traço de referência (C56-REF), com diferença considerada significativa em todas as idades. Neste, acredita-se que o grande teor de adição tenha colaborado para o avanço do ataque de CO₂. Samimi *et al.* (2018) afirmam

que a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional ao teor de adições, devido ao teor de hidróxido de cálcio presente.

Os traços com 5% (C56-5-0) e com 10% (C56-10-0) de adição de nanossilica foram os que exibiram as menores frentes de carbonatação. Nesse caso, o efeito físico foi o que mais influenciou, lembrando que esses dois traços também apresentaram as melhores propriedades físicas e mecânicas.



► **Figura 5**
Frente de carbonatação dos concretos: a) C56-REF; b) C56-1-0; c) C56-5-0; d) C56-10-0 e e) C56-1-10



Diniz (2018) afirma que, em matrizes cimentícias com grande presença de hidróxido de cálcio, o efeito químico é o que rege a carbonatação, como ocorreu no traço com adição combinada de 1% de nanossílica e 10% de sílica ativa (C56-1-10). O autor afirma ainda que, conforme o teor de hidróxido de sódio é reduzido, o que exerce maior influência no ataque de CO₂ passa a ser o efeito físico, relacionado ao diâmetro dos poros, justamente o que foi notado nos concretos C56-5-0 e C56-10-0.

4. CONCLUSÕES

A nanossílica colaborou significativamente com o aumento da resistência à compressão dos concretos, mes-

mo com um fator água/agl. de 0,56, que pode ser considerado alto, foi possível notar a influência da adição. O mesmo ocorreu no ensaio de absorção de água por capilaridade, onde a presença da nanossílica permitiu a redução do coeficiente de absorção, indicando que, ao incorporar esse material, altera-se a conexão dos poros do concreto.

Para o fator água/agl. utilizado neste programa experimental, prevaleceu o efeito físico da adição da nanossílica, que contribuiu para reduzir a frente de carbonatação. Mesmo sendo uma adição relacionada ao consumo de portlandita devido às reações pozolânicas, neste caso, o efeito da adição de nanossílica nos maiores te-

ores dificultou a penetração e ataque de CO₂. A incorporação combinada de sílica ativa e nanossílica, no entanto, não forneceu bons resultados frente à ação dióxido de carbono.

Por fim, conclui-se que para os tipos de concretos estudados nesta pesquisa a adição de nanossílica forneceu uma melhora de suas propriedades físicas, mecânicas e da durabilidade frente à ação do CO₂. Algo que se tornou mais evidente nos traços com os teores de 5% e 10% de incorporação de nanossílica.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Dow Corning Silício do Brasil, à AkzoNobel e ao PPGECiv/UFSCar. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, F. do C. R. Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concretos com substituição parcial do agregado miúdo pela areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar – ACBC. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- [2] ANDRADE, D. DA S. Microestrutura de pastas de cimento Portland com incorporação de nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, 2017.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.
- [4] _____. NBR15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 71p.
- [5] CARVALHO, J. M. F.; CAMPOS, P. A. M.; BATISTA, J. O. S.; NATALI, J. F. SOUZA, F. S.; PEIXOTO, R. A. F. Estudo comparativo de resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com agregados graúdos da zona granulométrica 9,5/25 utilizando corpos de prova cilíndricos Ø5x10 cm e Ø10x20 cm. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. Anais... São Paulo: IBRACON, 2017.
- [6] 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.
- [7] DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 08, p.261–309.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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. Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy, 2010.
- [11] PEREIRA, F. do C. Estudo da carbonatação de concretos com adição de nanossílica. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] SÁNCHEZ, E.; BERNAL, J.; LEÓN, N. MORAGUES, A. Propriedades reológicas e mecânicas de um concreto autoadensável, com a adição de nano sílica e de micro sílica (sílica ativa). *ALCONPAT*, v. 6, n. 1, p. 1 – 14, 2016.
- [15] SANTOS, M. O. dos. Estudo de concretos com adição de nanossílica submetidos à ação combinada de cloretos e CO₂. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- [16] 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.
- [17] ZANON, T.; SCHMALZ, R.; F. G. S. FERREIRA. Avaliação dos efeitos da nanossílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto. *ALCONPAT*, v. 8, n. 2, p. 138 – 149, 2018.