Argamassas com incorporação de sílica e nanosílica: avaliação de propriedades mecânica e física

Rosana Schmalz¹, Fernanda G. S. Ferreira² e Valdecir Angelo Quarcioni³

¹ Mestranda, Universidade Federal de São Carlos, rosanaschmalz@gmail.com

² Professora Doutora, Universidade Federal de São Carlos, fgianotti@ufscar.br

³ Pesquisador Doutor, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, quarciva@ipt.br

Resumo: Por questões ambientais e financeiras, a durabilidade é uma das características fundamentais das estruturas de concreto. É possível garanti-la evitando o excesso de umidade no seu interior, uma vez que a água tem um papel importante no desencadeamento dos processos de degradação do concreto. A redução da permeabilidade pode ser obtida por meio do uso de adições, que atuam como modificadores da matriz cimentícia devido aos seus efeitos fíler e pozolânicos, e aditivos, que permitem a redução da relação água/aglomerante. Diante disso, o presente artigo buscou avaliar a influência da adição de sílica ativa e nanosílica nas propriedades mecânicas e nos parâmetros de durabilidade de argamassas, por meio de ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água por capilaridade. Os resultados apontam que o uso da nanosílica juntamente com a sílica ativa leva a um melhor comportamento tanto mecânico quanto físico das argamassas.

Palavras-chave: durabilidade, argamassa, nanosílica, sílica ativa.

Abstract: Due to environmental and financial reasons, durability is one of the fundamental features of concrete structures. It is possible to guarantee it by avoiding excess moisture inside them, since water plays an important role in concrete degradation processes. The permeability reduction can be obtained by some parameters, among them the use of mineral additions, which act as modifiers of the cement matrix basically due filler and pozzolanic effects, and chemicals additives that allow the reduction of the water / binder ratio. Therefore, the present article aimed to evaluate the influence of the silica fume and nanosilica additions on the mortars' mechanical properties and durability parameters, by means of compression tests and water absorption by capillarity. The results show that the nanosilica and silica fume conjunct use leads to better mortars' mechanical and physical behavior.

Keywords: durability, mortar, nanosilica, silica fume.

1. Introdução

A durabilidade das estruturas tem se destacado como uma das principais características a serem consideradas nos projetos de concreto armado, ocupando um papel tão importante quanto as propriedades mecânicas, uma vez que é essencial que a estrutura continue a desempenhar suas funções previstas e seja capaz de suportar o processo de deterioração a que estará exposta [1].

Garantir a durabilidade de uma edificação significa assegurar ou aumentar sua vida útil, o que é uma solução efetiva para a preservação dos recursos naturais [2]. Além da sustentabilidade, deve-se levar em consideração as questões financeiras, uma vez que cerca de 50% do total de recursos do setor da construção estão sendo aplicados em reparo e manutenção de estruturas existentes [3].

A água é fundamental tanto para a criação quanto para a destruição de muitos materiais naturais, caracterizando-se como o principal fator relacionado aos problemas de durabilidade do concreto, pois atua como causadora de processos físicos de degradação nos sólidos porosos e como veículo de transporte para agentes agressivos, tornando-se fonte de processos químicos de degradação [4].

Diante dessa realidade, este artigo aborda a influência da incorporação de sílica ativa e nanosílica na resistência mecânica e absorção de água de argamassas, uma vez que a absorção de água é um dos parâmetros utilizados para avaliação indireta da permeabilidade do material e, consequentemente, da sua durabilidade.

2. Revisão Bibliográfica

A NBR 15575-1 [5] define a durabilidade como a capacidade da edificação e de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas. Sendo ela extinta quando um produto deixa de cumprir as funções que lhe foram atribuídas, seja pela degradação que o leva a um estado insatisfatório de desempenho ou por sua obsolescência funcional.

Especificamente em relação às estruturas de concreto armado, a NBR 6118 [6] define durabilidade como sendo a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo projetista estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Deve-se levar em conta a interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção.

A durabilidade inadequada manifesta-se pela deterioração e pode ocorrer tanto de fatores externos quanto internos ao concreto. As ações podem ser físicas, químicas ou mecânicas, podendo ocorrer sinergia entre elas, ou seja, o processo de deterioração do concreto raramente será decorrente de uma única causa [1].

A presença da água é determinante para o processo de deterioração e sabe-se que quanto maior a facilidade com que ela penetra nos sólidos porosos, maior a velocidade de degradação da estrutura. Silva [7] esclarece que o tamanho e o volume dos poros, bem como sua continuidade, são fatores essenciais para garantir a vida útil e a qualidade das edificações de concreto.

Diante disso, é essencial a obtenção de concretos com menor índice de vazios e com poros desconectados, que resultam em baixa permeabilidade, dificultando assim o fluxo de água no interior da estrutura e, conseqüentemente, minimiza o processo de degradação.

Entre os fatores que influenciam o sistema de distribuição dos poros, está o uso de aditivos e adições minerais. Os aditivos superplastificantes, são capazes de reduzir a quantidade de água de amassamento necessária para uma mesma trabalhabilidade e consistência, o que torna possível a adoção de uma baixa relação água/cimento (a/c), obtendo-se menor permeabilidade do concreto. Enquanto as adições melhoram a resistência à fissuração térmica, devido ao baixo calor de hidratação, refinam os poros e fortalecem a zona de transição [4].

A sílica ativa é um subproduto da produção do ferro silício e o silício metálico, constituída de partículas com diâmetro médio de 0,1 e 0,2 μm , sendo mais fina que as partículas do cimento Portland, conferindo a ela os efeitos pozolânicos e fíler [8]. Essa combinação de efeitos favorece a microestrutura dos materiais cimentícios, resultando na redução da porosidade e da permeabilidade, densificação da pasta de cimento e melhora da zona de transição. Tais fatores melhoram o desempenho desses materiais em relação à durabilidade e propriedades mecânicas [9].

Atualmente, além da sílica ativa, tem-se estudado a utilização da nanosílica, cujas partículas são ainda mais finas que a sílica ativa, com diâmetro entre 3 a 150 nm [10]. O autor cita também que a nanoescala das partículas favorece que mais átomos fiquem localizados na sua superfície, aumentando a área de superfície exposta, que resulta em aumento significativo na reatividade química.

Portanto, o presente artigo estuda a influência do uso de sílica ativa e nanosílica nas propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade de argamassas.

3. Procedimento experimental

O procedimento experimental foi dividido em três etapas: caracterização dos materiais, definição dos traços e ensaios com argamassas no estado endurecido, para verificação das propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade.

3.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados nas misturas foram: cimento Portland, agregado miúdo, nanosílica, sílica ativa e aditivo superplastificante.

O cimento utilizado foi o CP V ARI Plus fabricado pela Holcim do Brasil S/A. As caracterizações física e química realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT, estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2 e indicam que o material está em conformidade com o especificado pela NBR 5733 [11].

Tabela 1: Resultados de caracterização física do CP V ARI Plus

Parâmetros		Valores obtidos	Limites NBR 5733
Massa específica (NM 23/01)		3,12 g/cm ³	**
Início de pega (NBR NM 65/03)		135 min	> 120 min
Fim de pega (NBR NM 65/03)		210 min	< 600 min
Água para pasta de consistência normal		31,5 %	**
Finura	Retido 75µm (#200)	0,1 %	> 6,0 %
	Área Específica*	473 m ² /kg	> 300 m ² /kg
Resistência à compressão (f _{cj})	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 Norma.

Tabela 2: Composição química do CP V ARI Plus

Constituintes	Valores obtidos (% em massa)	Limites NBR 5733 (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	3,79	< 4,5 %
Anidrido 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 5733 [11] não estabelece valores limites.

¹ A NBR 15577 [12] limita o teor de Equivalente Alcalino (em Na₂O) em 0,6%.

Como agregado miúdo utilizou-se a areia fina, a qual foi caracterizada fisicamente no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT, cujos resultados são

apresentados na Tabela 3. O ensaio de distribuição granulométrica da areia foi realizado conforme especificado na NBR NM 248 [18], cuja curva está ilustrada na Figura 1.

Tabela 3: Resultados de caracterização física da areia fina

Parâmetros	Metodologia	Valores obtidos
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 [13]	2,64
Massa unitária seca e solta (kg/m ³)	NBR NM 45 [14]	1505
Massa unitária compactada (kg/m ³)	NBR NM 45 [14]	1704
Absorção de água (%)	NBR NM 30 [15]	0,34
Material pulverulento (%)	NBR NM 46 [16]	1,33
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 [17]	Solução mais clara que a padrão

Figura 1: Curva de distribuição granulométrica da areia fina

A areia fina apresentou módulo de finura de 1,33 e diâmetro máximo de agregado de 0,6 mm, sendo que a curva de distribuição granulométrica está fora da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 [19]. Manteve-se seu uso por se tratar de uma areia fina comercializada na cidade de São Carlos-SP.

A nanosílica utilizada no presente trabalho está dispersa em um aditivo líquido superplastificante à base de policarboxilato, comercializada pela Silicon Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA, cuja caracterização consta na ficha técnica do fabricante e está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de caracterização da nanosílica

Produto	Nanosílica
Aspecto	Líquido homogêneo cor pele
Massa específica (g/cm ³)	1,06
Teor de resíduos sólidos (%)	31,5
pH	2,6
Cloretos solúveis em água (%)	≤ 0,15

Fonte: Silicon Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA.

A sílica ativa utilizada nas misturas é fabricada pela Dow Corning Silício do Brasil, caracterizada física e quimicamente, conforme ficha técnica do fabricante (Tabela 5).

Tabela 5: Resultados de caracterização física e química da sílica ativa

Parâmetros físicos		Parâmetros químicos	
Densidade (g/cm ³)	0,35	Equivalente alcalino, em Na ₂ O (%)	0,7
		Perda ao fogo (%)	3,7
pH	7,9	SiO ₂ (%)	93,0
		Na ₂ O (%)	0,2
Umidade (%)	0,1	Fe ₂ O ₃ (%)	0,5
		CaO (%)	0,5
Retido 45 mm (# 325) (%)	3,7	MgO (%)	0,4
		Al ₂ O ₃ (%)	0,2
		K ₂ O	0,9

Fonte: Dow Corning Silício do Brasil.

O aditivo superplastificante utilizado para compor os traços de referência foi o MasterGlenium® Sky 150, à base de éter policarboxílico com especificações conforme Tabela 6.

Tabela 6: Caracterização do aditivo superplastificante MasterGlenium® Sky 150

Produto	MasterGlenium® Sky 150
Aspecto	Líquido branco turvo
pH	7,5 – 9,5
Densidade (g/cm ³)	1,055 – 1,085
Sólidos (%)	28,0 – 31,0

Fonte: BASF S.A.

3.2 Definição dos traços e moldagem dos corpos de prova

Todas argamassas foram dosadas com traço 1:3,2 (cimento: agregado miúdo) e relação água/aglomerante (a/agl) igual a 0,4. Para o estudo da influência dos aditivos e adições, foram definidos 8 traços (Tabela 7) com as seguintes composições, sendo os últimos traços de referência.

- A4N1,7 a A4N2,1: argamassas de cimento + areia fina + Nanosílica (N = 1,7%, 1,9% e 2,1%) e relação a/agl igual a 0,4;
- A4S10N2,1 a A4S10N3,0: argamassas de cimento + Sílica Ativa (S = 10%) + areia fina + Nanosílica (N = 2,1%, 2,5% e 3,0%) e relação a/agl igual a 0,4;
- A4G1,7 e A4G1,9: argamassas de cimento + areia fina + MasterGlenium® Sky 150 (G = 1,7% e 1,9%) e relação a/agl igual a 0,4.

Destaca-se que os valores de consistência variaram de 185 mm a 205 mm, em função do teor de aditivo utilizado.

Tabela 7: Composição dos traços de argamassa

Argamassas	Traço unitário					Consistência (mm)
	Cimento	S	Areia	N (%)*	G (%)*	
A4N1,7	1	-	3,20	1,7	-	185
A4N1,9	1	-	3,20	1,9	-	205
A4N2,1	1	-	3,20	2,1	-	205
A4S10N2,1	1	0,0748	3,56	2,1	-	185
A4S10N2,5	1	0,0748	3,56	2,5	-	190
A4S10N3,0	1	0,0748	3,56	3,0	-	180
A4G1,7	1	-	3,20	-	1,7	195
A4G1,9	1	-	3,20	-	1,9	200

* em relação à massa de aglomerante.

Legenda: S = sílica ativa; N = nanosílica; G = MasterGlenium® Sky 150.

Os materiais foram misturados de acordo com o seguinte procedimento: umedeceu-se a cuba e adicionou-se a areia; ligou-se a batedeira e adicionou-se 90% da água durante 30 segundos, deixando bater por 1 minuto; desligou-se a batedeira para raspar as laterais e o fundo por 30 segundos; ligou-se novamente e adicionou-se o cimento durante 30 segundos, deixando bater por 1 minuto; desligou-se a batedeira para raspar as laterais e o fundo por 30 segundos; ligou-se novamente e adicionou-se o aditivo e 10% da água, deixando bater por 1 minuto; desligou-se a batedeira para raspar as laterais e o fundo por 30 segundos; ligou-se novamente, deixando bater por mais 1 minuto e 30 segundos. O tempo total de mistura foi de 6 minutos.

Vale ressaltar que para as argamassas com adição de sílica ativa foi realizada uma homogeneização desta com o cimento antes da mistura.

Imediatamente após a mistura, as argamassas foram moldadas em moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento, acondicionados em ambiente de laboratório por 24 horas, com umidade relativa em torno de 60% e temperatura aproximada de 25°C, e então desmoldados e levados à cura úmida, onde permaneceram até as idades previstas nos ensaios no estado endurecido.

3.3 Ensaios com argamassas

3.3.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica das argamassas foi avaliada através de ensaios de resistência à compressão simples, segundo NBR 5739 [20], nas idades de 1, 7 e 28 dias. Para cada idade foram moldados três corpos de prova e os valores de resistência à compressão são dados pelo valor médio dos três resultados.

3.3.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade das argamassas foi medida aos 7 e 28 dias, conforme especificações da NBR 9779 [21]. Foram moldados três corpos de prova para cada idade e os valores do índice de absorção de água e a máxima ascensão capilar são dados pelo valor médio dos três resultados.

4. Resultados e discussão

4.1 Resistência mecânica

Os resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão simples estão apresentados na Tabela 8 e a Figura 2 representa a evolução da resistência ao longo dos dias.

Tabela 8: Resistência à compressão das argamassas

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)		
	1 dia	7 dias	28 dias
A4N1,7	20,7	43,8	43,5
A4N1,9	22,2	40,6	32,7
A4N2,1	21,4	38,2	34,4
A4S10N2,1	25,7	43,6	44,5
A4S10N2,5	19,1	36,5	49,8
A4S10N3,0	18,6	50,8	44,6
A4G1,7	23,7	43,7	41,2
A4G1,9	24,2	35,7	40,7

Os valores obtidos indicam que a adição isolada de nanosílica não resulta em acréscimos na resistência à compressão das argamassas, por exemplo, as

argamassas A4N1,9 e A4N2,1 que apresentaram resultados inferiores aos traços de referência (A4G1,7 e A4G1,9).

Entretanto, ao comparar a argamassa A4N2,1 com a A4S10N2,1, ambas com o mesmo teor de nanosílica, sendo uma delas com 10% de adição de sílica ativa e outra apenas com cimento, nota-se um ganho de 10 MPa na resistência à compressão aos 28 dias (de 34,4 a 44,5 MPa). Além disso, todas as misturas que continham sílica ativa apresentaram valores maiores aos 28 dias que as demais argamassas.

Figura 2: Evolução da resistência à compressão das argamassas

Nota-se que, para a maioria dos traços, aos 7 dias obteve-se um alto valor de resistência à compressão, o qual não se manteve aos 28 dias, apresentando, inclusive, um decréscimo, como é o caso das argamassas A4N1,9; A4N2,1; A4S10N3,0 A4G1,9.

O teor ótimo de nanosílica a ser utilizado, juntamente com 10% de adição de sílica ativa, é 2,5%, uma vez que atingiu 49,8 MPa de resistência, enquanto que para 2,1% e 3,0% esse valor foi em torno de 44,5 MPa. Considerando o efeito isolado de nanosílica, o maior valor de resistência à compressão atingido foi de 43,5 MPa, para o teor ótimo de 1,7% e, para os teores superiores, os valores obtidos foram inferiores à 35 MPa.

4.2 Absorção de água por capilaridade

Os coeficientes de absorção por capilaridade para todas as leituras e altura da ascensão capilar atingidas após 72 horas estão apresentados nas Tabelas 9 e 10 e as Figuras 3 e 4 ilustram a absorção capilar em função tempo.

Tabela 9: Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 7 dias

Argamassas	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					h (cm)
	3h	6h	24h	48h	72h	
A4N1,7	0,104	0,158	0,323	0,427	0,493	4,5
A4N1,9	0,119	0,173	0,349	0,457	0,526	4,7
A4N2,1	0,093	0,149	0,335	0,452	0,524	4,7
A4S10N2,1	0,068	0,099	0,206	0,280	0,328	9,4
A4S10N2,5	0,080	0,114	0,225	0,295	0,340	9,0
A4S10N3,0	0,084	0,116	0,212	0,280	0,326	9,4
A4G1,7	0,109	0,156	0,303	0,405	0,469	4,4
A4G1,9	0,087	0,130	0,280	0,378	0,444	9,5

Tabela 10: Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias

Argamassas	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					h (cm)
	3h	6h	24h	48h	72h	
A4N1,7	0,110	0,159	0,313	0,423	0,457	9,3
A4N1,9	0,110	0,158	0,313	0,426	0,498	9,3
A4N2,1	0,103	0,153	0,309	0,398	0,482	9,1
A4S10N2,1	0,083	0,119	0,222	0,299	0,337	9,3
A4S10N2,5	0,089	0,131	0,252	0,339	0,377	9,2
A4S10N3,0	0,079	0,116	0,228	0,311	0,353	9,1
A4G1,7	0,064	0,101	0,222	0,309	0,364	8,8
A4G1,9	0,068	0,106	0,237	0,330	0,376	8,8

Figura 3: Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 7 dias

Figura 4: Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias

A Figura 5a. mostra um comparativo entre os valores de absorção de água por capilaridade após 72 h de ensaio para as argamassas com 7 e 28 dias de idade. A Figura 5b. mostra a ascensão capilar máxima medida nas argamassas, para as mesmas condições.

Figura 5: a) Coeficientes de absorção capilar após 72 horas para as argamassas de 7 e 28 dias de idade. b) Alturas máximas de ascensão capilar após 72 horas para as argamassas nas idades de 7 e 28 dias

Os resultados apresentados mostram que a absorção de água nas argamassas aos 7 dias foi menor para aquelas que continham nanosílica e sílica ativa na sua composição. O menor coeficiente de absorção de água foi obtido na argamassa A4S10N3,0 (0,326 g/cm²) e o maior, na argamassa A4N1,9 (0,526 g/cm²), superando inclusive o máximo valor obtido nos traços de referência (0,469 g/cm²). De um modo geral, os traços contendo apenas nanosílica apresentaram a maior absorção de água aos 7 dias. Já aos 28 dias, as argamassas obtiveram uma

redução no índice de absorção, exceto para os traços contendo nanosílica e sílica ativa, que apresentaram um discreto aumento: A4S10N2,1; A4S10N2,5 e A4S10N3,0.

Além disso, o outro parâmetro analisado foi a altura máxima da ascensão capilar. A Figura 5.b mostra que, aos 7 dias as argamassas que continham nanosílica apresentaram valores menores, enquanto que, para as demais, verificou-se que a umidade ascendia por quase toda a altura dos corpos de prova, embora tenham absorvido menor quantidade de água. Aos 28 dias, todas as argamassas apresentaram ascensão capilar de aproximadamente 9 cm.

Baixos coeficientes de absorção de água associados à elevados valores de ascensão capilar podem ser explicados pelo refinamento dos poros da argamassa, uma vez que quanto menor o seu diâmetro, maior a pressão capilar e consequentemente, maior a ascensão de água nos materiais cimentícios [7]. As Figuras 6 e 7 mostram os corpos de prova, após ruptura, em que é possível visualizar a ascensão de água no seu interior.

Figura 6: Corpos de prova do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 7 dias, após ruptura: a) com nanosílica, b) com nanosílica e sílica ativa e c) referência.

Figura 7: Corpos de prova do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias, após ruptura: a) com nanosílica, b) com nanosílica e sílica ativa e c) referência.

5. Conclusão

A influência da sílica ativa e da nanosílica nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas foi avaliada por meio dos ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água por capilaridade. Os resultados obtidos indicaram que:

- A resistência à compressão das argamassas aos 28 dias é maior quando são utilizadas nanosílica e sílica ativa em conjunto. O uso isolado de nanosílica resultou em valores inferiores ao traço de referência;
- Os coeficientes de absorção de água foram menores para as argamassas compostas com nanosílica e sílica ativa, seguidos dos traços de referência e daquelas contendo somente nanosílica;
- Houve perda de resistência mecânica entre os 7 e 28 dias em quatro das oito argamassas estudadas. Observou-se também aumento do coeficiente de absorção de água em três argamassas, todas compostas por nanosílica e sílica ativa. A fim de se confirmar tais comportamentos, serão realizados novos ensaios;
- O uso combinado de nanosílica e sílica ativa resulta em um efeito sinérgico de densificação da microestrutura da matriz cimentícia, devido aos efeitos filer e pozolânico. Este comportamento será investigado posteriormente por meio da caracterização da microestrutura dessas argamassas.

6. Agradecimentos

À Holcim do Brasil S/A., à Silicon Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA, à Dow Corning Silício do Brasil e à BASF S/A. pelos materiais doados para o desenvolvimento da pesquisa, ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, pela parceria para realização dos ensaios e à FIPT – Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pela concessão da Bolsa de Pesquisa à mestranda, dentro do Programa Novos Talentos.

7. Referências

- [1] Neville, A. M. (2015) Propriedades do Concreto. Bookman Editora, 2015.
- [2] Mehta, P. K. (2001) Reducing the Environmental Impact of Concrete. Concrete International, v.23, no 10, Oct. p.61-66.
- [3] Ueda, T.; Takewaka, K. (2007) Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. Structural Engineering International, v. 4, p. 359-366.
- [4] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2014) Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON.
- [5] NBR 15575-1 (2013) Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [6] NBR 6118 (2014) Projeto de estruturas de concreto armado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.

- [7] Silva, F. G. (2006) Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [8] Dal Molin, D. C. C. (2011) Adições Minerais. Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1, cap. 08, p. 261-309. São Paulo: IBRACON.
- [9] Vieira, F. P; Kulakowski, M. P; Dal Molin, D. C. C.; Vilela, A. C. F. (2007) Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de microssílica.
- [10] Delgado, A.; Talero, R.; Téllez, E.; Bayarri, R.; Fortuño, J. M.; Pompiano, R. B. (2012) Nanosílice estabilizada y microsílice para materiales cementantes expuestos al ambiente marino. Aplicación al caso del Mar Caribe. p. 1-16.
- [11] NBR 5733 (1991) Cimento Portland – Alta Resistência Inicial. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [12] NBR 15577 (2008) Agregados - Reatividade álcali-agregado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [13] NBR NM 52 (2009) Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [14] NBR NM 45 (2006) Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [15] NBR NM 30 (2001) Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [16] NBR NM 46 (2003) Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [17] NBR NM 49 (2001) Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [18] NBR NM 248 (2003) Agregados: Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [19] NBR 7211 (2001) Agregados para concreto – Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [20] NBR 5739 (2007) Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [21] NBR 9779 (2012) Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.