Efeito da adição de sílica de casca de arroz na passivação de aço inserido em concreto

Pinkoski, Igor Miguel¹; Oliveira, Tassiane Apolinário²; Capraro, Ana Paula Brandão³; Medeiros, Marcelo Henrique Farias⁴

¹ Mestrando, Universidade Federal do Paraná, igor.pinkoski@gmail.com

² Mestranda, Universidade Federal do Paraná, tassioliveira88@gmail.com

³ Doutoranda, Universidade Federal do Paraná, anapcapraro@gmail.com

⁴ Professor, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com

Resumo: Nas estruturas de concreto armado o concreto envolve o aço proporcionando uma barreira física, que impede a entrada de agentes agressivos, e química, resultante da sua alta alcalinidade, a qual reduz a probabilidade de corrosão no metal. O principal fator que contribui para a proteção química é a formação de uma camada passiva superficial ao metal, cujo tempo de formação pode ser influenciado por diversas variáveis. Nesse artigo foram moldados cinco concretos: um de referência e quatro com substituição de sílica de casca de arroz ao cimento nos teores de 5, 10, 15 e 20% para avaliar a influência da adição na passivação do aço interno ao concreto. Realizou-se ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias e foram monitorados periodicamente, até os 120 dias, a resistividade elétrica, potencial e velocidade de corrosão. Nos resultados de resistência a adição causou redução nos valores em relação à referência, na idade analisada. Na resistividade constatou-se a alta reatividade pozzolânica da adição, evidenciado pelo aumento significativo dos valores nas idades mais avançadas. O traço com 20% de sílica aumentou sua resistividade em quase 5 vezes, comparado ao concreto referência, aos 120 dias. Os resultados de potencial e velocidade de corrosão destoaram quanto a passivação do aço, nos valores de potencial não houve indicação de passividade até a última idade analisada; já nos resultados de velocidade de corrosão o traço referência indica uma possível estabilização a partir dos 45 dias, enquanto os traços contendo sílica não apresentam essa tendência até os 120 dias.

Palavras-chave: tempo de passivação, adição pozzolânica, corrosão.

Abstract: In reinforced concrete, the concrete involves steel bars providing a physical barrier, which prevents the entry of aggressive agents, and chemical, resulting from its high alkalinity, which reduces the probability of corrosion in the metal. The main factor that contributes to the chemical protection is the formation of a superficial passive layer to the metal, whose formation time can be influenced by several variables. In this paper five concretes were made: a reference and four with rice husk ash in the percentages of 5, 10, 15 and 20%, in substitution to cement. The samples were tested for compressive strength at the age of 28 days and the electrical resistivity, corrosion potential and corrosion rate were monitored periodically, up to 120 days. In the compressive strength results the addition caused a diminution of resistance in relation to the reference, for the analyzed age. In the resistivity parameter the high pozzolanic reactivity of the addition was evidenced by the significant increase in the values at the most advanced ages. The trace with 20% of rice husk ash increased its resistivity by almost 5 times, compared to the reference concrete at 120 days. The results of corrosion potential and rate are not in agreement in relation to steel passivation, in the potential values there was no indication of passivity until the last analyzed age; in the results of corrosion rate the reference indicates a possible stabilization from 45 days, whereas the mixtures containing silica do not present this tendency until the 120 days.

Keywords: passivation period, pozzolanic addition, corrosion.

1. Introdução

O concreto tem como uma de suas características a alta alcalinidade, que é um dos fatores que faz com que a combinação deste material com barras de aço carbono seja eficiente, uma vez que o material fornece a proteção necessária para que não haja a corrosão do aço [1]. Além disso, quando atendidos critérios estabelecidos pela NBR 6118 e NBR 14931 [2,3], como a utilização de baixa relação água/cimento, a realização da atividade de compactação e a cura adequados, a penetração de agentes agressivos para o interior da matriz cimentícia é dificultada [4].

Em conjunto com a barreira física mencionada, as barras de aço carbono, quando inseridas no interior de um concreto são, com pH entre 12,5 e 13,5, passam por algumas reações químicas, as quais, inicialmente, proporcionam a interação entre os íons de ferro e a umidade, presentes nos poros do concreto, resultando na formação de uma fina camada aderente à superfície do metal. A camada formada é composta basicamente por óxidos de ferro, Fe_2O_3 , em sua porção interior, e Fe_3O_4 , em sua face mais externa, sendo regulada principalmente pela disponibilidade de oxigênio e pelo pH na solução de poros do concreto [5]. Além da formação destes óxidos, um composto que contribui em grande parte para a formação da camada de passivação do aço é o $\gamma\text{-FeOOH}$, estável em meio alcalino, como o fornecido pelo concreto, constituindo a camada mais externa do filme passivo fazendo a interface com a matriz cimentícia [6-7].

Concomitantemente a isso, alguns pesquisadores indicam que há, ainda, uma camada rica em portlandita que adere ao metal, cooperando para inibir as reações de oxidação do aço carbono e, devido ao seu elevado teor alcalino, auxilia na manutenção da camada de $\gamma\text{-FeOOH}$ [8-9].

Apesar do exposto, a corrosão da armadura em concreto armado é considerada a causa mais comum de deterioração de estruturas de concreto armado, sendo ela causada principalmente pela introdução de cloretos na matriz cimentícia ou pelo processo de carbonatação [10].

Ainda que ambos os processos ocasionem a corrosão metálica, seus métodos de ação são distintos. No caso da penetração de cloretos, estes íons podem entrar em contato com as barras metálicas por estarem contidos na água de amassamento do concreto ou pela penetração nos poros do material, reagindo, então, com a camada passiva que protege o metal, iniciando o processo de corrosão [11].

Já a carbonatação é resultante da penetração de dióxido de carbono, presente na atmosfera, no interior dos poros do concreto que, na presença de umidade, reage com a água formando ácido carbônico o qual, por sua vez, reage com os hidróxidos presentes na pasta de cimento, principalmente a portlandita, e com os silicatos anidros, resultando na formação de carbonato de cálcio. O composto carbonato de cálcio possui pH menor que o de seus reagentes na pasta, resultando na diminuição do pH do concreto e na dissolução da camada passiva do metal e, por consequência, iniciando o processo de corrosão no aço carbono [12].

Mesmo sem a ocorrência de um dos mecanismos de degradação mencionados previamente, outros fatores podem modificar o pH do concreto, tais como a

lixiviação de hidróxido de cálcio, pela água que flui entre os poros, e a concentração de íons hidroxila (OH^-) na matriz cimentícia [13-14]. A influência desses e de outros parâmetros pode afetar o tempo de formação do filme passivo, sua composição química, e pode torná-lo instável ou até danificá-lo [14-15]. Posto isto, as características de passivação do aço em meio alcalino ainda não são completamente compreendidas [14,16-17].

Pesquisas recentes nessa área avaliam o processo de formação do filme passivo utilizando soluções sintéticas de poros para simular o comportamento eletroquímico da solução contida no interior do concreto [14-20]. Porém, segundo Duffó e Farina [18] a solução sintética não representa exatamente o que ocorre na solução real de poros contida nos materiais cimentícios. A presença de adições minerais na mistura, por exemplo, promove mudanças nas características físico-químicas do material o que pode intervir na sua resposta eletroquímica [21-23]. Em vista do apresentado, o presente trabalho visou o monitoramento da passivação de barras de aço inseridas em concretos com diferentes teores de adição de sílica de casca de arroz, por meio dos parâmetros de potencial de corrosão, densidade de corrente e resistividade elétrica.

2. Materiais e métodos

O cimento usado na moldagem dos corpos de prova foi classificado como CPV – ARI pela NBR 5733 [24]. e na Tabela 1 está apresentada sua caracterização.

Tabela 1: Caracterização do cimento utilizado na pesquisa. (Fonte: o fornecedor)

Finura		Tempo de pega		Resistência à compressão (MPa)				Parâmetros Químicos (%)		
Blaine (cm^2/g)	#200 (%)	Início (min)	Fim (min)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	MgO	SO_3	P. F.
4710	0,3	250	310	22,2	37,1	41,5	49,2	2,9	2,6	3,5

Na Tabela 2 está demonstrada a análise química por fluorescência de raios-X da sílica de casca de arroz. Na Figura 1 está exposto o difratograma da sílica de casca de arroz, no qual foram identificados picos referentes à cristobalita (SiO_2), uma das formas polimórficas do dióxido de silício, indicando haver, além da estrutura vítrea, uma estrutura cristalina. Para investigar a reatividade da sílica de casca de arroz foi realizado o ensaio denominado Chapelle modificado, conduzido em conformidade com a NBR 15895 [25]. Neste ensaio, o resultado foi de 1.336 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de sílica de casca de arroz. Este valor é muito superior ao limite de 436 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de pozolana, estabelecido em estudo de Raverdy et. al. [26], confirmando a elevada capacidade de reação desta pozolana.

Tabela 2: Fluorescência de raio-X da sílica de casca de arroz.

Sílica de casca de arroz	Composição Química (%)										
	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	ZnO	MnO	CuO	Rb_2O
	88,94	4,18	0,11	1,10	2,42	0,24	2,08	0,01	0,88	0,02	0,02

Figura 1: Difratograma da sílica de casca de arroz

O trabalho contou com uma campanha experimental, a qual consistiu na moldagem de oito corpos de prova prismáticos (25x25x7) cm, de concreto armado, com duas barras de aço carbono com 8 mm de diâmetro, dispostas conforme a Figura 2. As peças de concreto foram moldadas com cobrimento de 3 cm, a fim de monitorar seus parâmetros eletroquímicos periodicamente. Conjuntamente, para classificação dos concretos, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos (10x20) cm para realização do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade.

Figura 2: Esquema e dimensões dos corpos de prova prismáticos de concreto armado

Adotou-se um traço de concreto de uma concreteira da região, com proporções de 1:3,05:3,74 (cimento:areia:brita) em massa, relação água/cimento de 0,59 e consumo de cimento de 290 kg/m³, escolhido com o objetivo de manter a resistência à compressão do concreto em 40 MPa. Os agregados utilizados são provenientes da região de Curitiba, sendo uma areia natural média de massa específica 2,62 g/cm³ [27], e uma brita 0 com massa específica 2,88 g/cm³ [28].

Mantendo o traço adotado e a proporção de aglomerante foram utilizados quatro diferentes teores de sílica de casca de arroz (5, 10, 15 e 20%) substituindo parcialmente, em massa, o cimento portland. Ao todo foram moldados dois corpos de prova prismáticos e três cilíndricos correspondentes a cada mistura. Na Tabela 3 estão apresentadas as quantidades, em massa, utilizadas para cada mistura de concreto.

O resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone ou “Slump test” [29] foi fixado em 10 ± 2 cm. Para manter esse intervalo fez-se uso do aditivo superplastificante na proporção de 0,3% em relação a massa de cimento.

Tabela 3: Composição das misturas em massa (quilogramas) para 1 m³ de concreto.

Séries de concreto estudadas	TRAÇO REFERÊNCIA	TRAÇO 5	TRAÇO 10	TRAÇO 15	TRAÇO 20
Cimento (kg)	290,00	275,50	261,00	246,50	232,00
Sílica de casca de arroz (kg)	-	14,50	29,00	43,50	58,00
Areia (kg)	985,73	985,73	985,73	985,73	985,73
Brita (kg)	1085,17	1085,17	1085,17	1085,17	1085,17
Água (kg)	119,88	119,88	119,88	119,88	119,88

As extremidades das barras de aço, que não ficaram inseridas nos corpos de prova prismáticos (Figura 2), foram protegidas com fita isolante e resina epóxi para evitar um início de corrosão proveniente do contato com os gases da atmosfera. No entanto, de modo a possibilitar um contato elétrico eficiente com cada barra intrínseca ao concreto, envolveu-se um fio de cobre para gerar uma conexão entre os dois metais, conforme Figura 3.

Figura 3: Esquema da proteção e contato elétrico realizados nas extremidades das barras de aço carbono inseridas nos corpos de prova prismáticos de concreto

Posteriormente a moldagem, todos os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida com temperatura controlada de 22 ± 2 °C e umidade relativa do ar acima de 95% durante todo o período do experimento.

Após os 28 dias de cura úmida realizou-se o ensaio de resistência mecânica à compressão axial em acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma brasileira NBR 5739 [30], sendo o resultado dado pela média dos valores encontrados para três corpos de prova cilíndricos. O procedimento foi executado em equipamento da marca Solotest com capacidade para 100 Tf.

Com uma periodicidade de 15 dias os corpos de prova prismáticos foram avaliados com utilização de um equipamento GECOR 10 (Figura 4a), por meio do qual foram obtidos resultados para os parâmetros de potencial da corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente elétrica (I_{corr}). Utilizou-se, conjuntamente, um equipamento RESIPOD da marca Proceq para obtenção do parâmetro de resistividade elétrica (ρ).

Para cada barra dos corpos de prova foram realizadas três leituras de potencial de corrosão e densidade de corrente elétrica, sendo o resultado final referente a uma média entre as leituras adquiridas para os dois corpos de prova correspondentes a cada série de concreto.

Os resultados de resistividade elétrica foram obtidos por meio do método dos quatro eletrodos de Wenner, sendo realizada uma média entre os valores dos dois corpos de prova prismáticos correspondentes a cada série de concreto. Em cada corpo de prova foram realizadas três leituras entre as duas barras de aço carbono, para evitar a influência da barra de aço no ensaio (Figura 4b).

Figura 4: a) Leitura de potencial de corrosão e densidade de corrente elétrica em uma das barras de aço carbono do corpo de prova prismático de concreto com equipamento GECOR 10. b) Leituras de resistividade elétrica, entre as barras de aço carbono, em um corpo de prova prismático de concreto com equipamento Proceq.

3. Resultados e discussões

Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias, para as cinco misturas de concreto estudadas, estão apresentados na Figura 5.

Figura 5: Resistência à compressão axial dos concretos estudados aos 28 dias.

A análise dos resultados permitiu inferir que a adição de sílica de casca de arroz nos quatro teores (5, 10, 15 e 20%) resultou numa redução da resistência mecânica analisada em relação ao concreto de referência, sem adição. Como as misturas foram confeccionadas utilizando o método de substituição parcial do cimento Portland, os traços com maior teor de sílica de casca de arroz possuem menor quantidade de clínquer para hidratação, o que pode reduzir a formação dos cristais

de silicato de cálcio hidratado aos 28 dias, uma vez que a reação pozolânica é lenta [31-32].

Comparando os resultados de resistência à compressão entre os traços contendo sílica de casca de arroz, não foi possível constatar diferenças significativas entre eles, comprovado pela tabela ANOVA. No entanto, o comportamento observado onde há uma crescente até o traço de 10% e uma decrescente nos traços com 15 e 20% é análogo ao comportamento relatado por Habeeb e Mahmud [33] ao analisar misturas de concreto com adição de cinza de casca de arroz nos mesmos teores de substituição apresentados neste trabalho.

Na Figura 6 estão apresentados os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial utilizando o método de Wenner para as cinco séries de concreto, aos 15, 30, 45, 60 e 120 dias.

Figura 6: Resistividade elétrica superficial para as séries de concreto estudadas aos 15, 30, 45, 60 e 120 dias.

Analisando os resultados obtidos observou-se que aos 15 dias os traços contendo 5 e 10% de sílica de casca de arroz tiveram um valor de resistência reduzido comparando com o traço de referência, comprovado pela tabela ANOVA. Essa redução deve-se ao fato de que nos traços (T5 e T10) a resistividade encontrada corresponde majoritariamente às reações de hidratação do clínquer e estas possuem menos cimento em sua mistura em relação a mistura de referência.

Já nos traços contendo maior porcentagem de sílica de casca de arroz (T15 e T20), a redução foi menos acentuada com relação ao traço de referência mesmo eles contendo um teor de sílica elevado, em substituição ao cimento, o que supostamente reduziria ainda mais esses resultados. Essa redução atenuada pode ser explicada pelas características da adição utilizada que proporciona um refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros da matriz cimentícia, tornando a matriz mais homogênea [22; 31].

No decorrer do tempo de monitoramento (30, 45, 60 e 120 dias), houve acréscimo nos valores de resistividade elétrica obtidos em relação ao traço de referência e uma diferença pronunciada destes entre os traços, provavelmente devido a hidratação contínua do cimento que reduz os poros e vazios da matriz cimentícia

pela formação dos compostos hidratados e pela velocidade tardia de ocorrência das reações pozolânicas, principalmente quando há altas porcentagens de adição na mistura, conforme apontado por Mehta e Monteiro [31].

Somado a isso, verificou-se que, a medida que a porcentagem de sílica de casca de arroz aumentou na mistura, os valores de resistividade elétrica aumentaram significativamente, como no caso do traço T20 no qual o valor de resistividade aos 120 dias teve um aumento de quase 5 vezes em relação ao valor obtido aos 120 dias para o traço sem adição. Esse efeito pode ser explicado devido à alta reatividade pozolânica da adição, comprovada por Gobbi [34], a qual causa uma maior afinidade de reação com o hidróxido de cálcio da pasta resultando em novos compostos que a densificam ocasionando uma maior resistência à passagem de corrente elétrica no concreto.

Os valores de potencial de corrosão e velocidade de corrosão obtidos aos 15, 30, 45, 60 e 120 dias para os cinco traços analisados estão apresentados na Figura 7.

Figura 7: Potencial (a) e velocidade de corrosão (b) para as séries de concreto estudadas aos 15, 30, 45, 60 e 120 dias.

Ao examinar os resultados de potencial de corrosão obtidos notou-se que as amostras encontram-se na zona de incerteza, na qual podem haver indícios de corrosão, ou na zona de corrosão, onde a probabilidade de estar corroendo é de 90%, conforme os limites estabelecidos pela ASTM C876-15 [35]. Observando os resultados de velocidade de corrosão, as amostras situam-se nas regiões de corrosão baixa e moderada, conforme os limites estabelecidos pelo Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado [36].

Deve-se destacar que, não foi verificado um comportamento similar entre os diferentes traços estudados, nem uma tendência linear entre os valores dos dois parâmetros estudados. Esses efeitos observados indicam que não houve estabilização dos processos de formação da camada protetora ao redor do metal, ou seja, a passivação do aço não foi concluída até a idade monitorada (120 dias) e um acompanhamento dos parâmetros nas idades seguintes é aconselhável.

No parâmetro de potencial de corrosão mesmo a amostra de referência, sem adição, não apresenta propensão para atingir a zona com probabilidade de corrosão

menor do que 10% (entre 0 e -200 mV) aos 120 dias de análise. Já no parâmetro de velocidade de corrosão apenas o concreto de referência encontra-se, aos 45, 60 e 120 dias, na zona de corrosão baixa o que pode indicar uma tendência de estabilização e possível passivação do aço presente na mistura.

Comparando com outras pesquisas, o tempo de passivação do aço carbono em solução de poros de concreto varia entre 5 e 10 dias [14-15;20]; em estudos realizados em argamassa e pasta de cimento verificou-se um tempo de passivação variando entre 7 e 60 dias [37-38]. Essa variação de resultados indica que o efeito das reações que ocorrem na matriz cimentícia sobre a passividade do aço não é compreendido em sua totalidade, e que a contínua hidratação do cimento pode influenciar na resposta eletroquímica do material.

Somado a isso, de acordo com Vieira [39], teores elevados de adições minerais impactam no pH da solução dos poros do concreto e influenciam nos parâmetros de corrosão. Logo, os resultados observados para os traços com sílica de casca de arroz podem ser explicados pela desestabilização na concentração de álcalis presentes na pasta de cimento, visto que a atividade pozolânica, proporcionada pela adição, tende a consumir o hidróxido de cálcio para formação de novos compostos [31; 35; 39-41].

4. Conclusões

Do presente trabalho podem ser listadas as conclusões apresentadas na sequência:

A presença da adição reduziu a resistência à compressão do concreto em relação ao traço de referência, aos 28 dias, devido a menor quantidade de cristais de silicato de cálcio hidratado formados na matriz cimentícia como consequência da utilização de sílica de casca de arroz em substituição ao cimento, diminuindo a quantidade de clínquer disponível.

A alta reatividade pozolânica da adição de sílica de casca de arroz ficou evidente nos resultados de resistividade elétrica com maiores teores de adição (15% e 20%) a partir dos 30 dias de análise, sendo observado, na amostra com 20%, um acréscimo de quase 5 vezes nos valores do parâmetro em relação ao traço de referência, sem adição.

Quanto ao parâmetro de potencial de corrosão não houve indício de passivação em nenhum dos concretos analisados, podendo ser explicado pela contínua hidratação do cimento e pela variação na quantidade de álcalis presentes na matriz cimentícia proporcionada pela adição.

Em relação a velocidade de corrosão, o concreto de referência demonstrou uma tendência de estabilidade a partir dos 45 dias indicando uma possível passivação do aço, diferente dos outros traços que não apresentaram continuidade nos resultados até a última idade analisada.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a infraestrutura e o suporte em recursos humanos fornecidos pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e pelos Institutos Lactec, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da UFPR.

6. Referências

- [1] Medeiros, M. H. F.; Cardoso, F. A.; Hino Jr., J. R.; Hoppe Filho, J. (2012) O compósito que deu certo: Concreto + Aço = Concreto Armado. *Concreto & Construções*, 68:68-74.
- [2] NBR 6118 (2014) Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] NBR 14931 (2004) Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] Talakokula, V.; Bhalla, S.; Ball, R. J.; Bowen, C. R.; Pesce, G. L.; Kurchania, R.; Bhattacharjee, B.; Gupta, A.; Paine, K. (2016) Diagnosis of carbonation induced corrosion initiation and progression in reinforced concrete structures using piezo-impedance transducers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 242:79-91.
- [5] Hansson, C. M. (1984) Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 14:574-584.
- [6] Montemor, M. F.; Simoes, A. M. P.; Ferreira, M. G. S. (2003) Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. *Cement and Concrete Composites*, 25:491-502.
- [7] Zakroczymski, T.; Fan, C.; Szklarska-Smialowska, Z. (1985) Kinetics and mechanism of passive film formation on iron in 0.05 M NaOH. *Journal of the Electrochemical Society*, 132:2862-2867.
- [8] Al Khalaf, M. N.; Page, C. L. (1979) Steel/mortar interfaces: microstructural features and mode of failure. *Cement and Concrete Research*, 9:197-207.
- [9] Page, C. L. (1975) Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine structures. *Nature*, 258:514-515.
- [10] Moreno, M.; Morrism W.; Alvarez, M.G.; Duffo, G.S. (2004) Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: effect of carbonation and chloride content. *Corrosion Science*, 46:2681–2699.
- [11] Yu, L.; François, R.; Gagné, R. (2016) Influence of steel–concrete interface defects induced by top-casting on development of chloride-induced corrosion in RC beams under sustained loading. *Materials and Structures*, 49:5169-5181.
- [12] Liu, R.; Jiang, L.; Xu, J.; Xiong, C.; Song, Z. (2014) Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions. *Construction and Building Materials*, 56:16-20.
- [13] Gawin, D.; Pesavento, F.; Schrefler, B. A. (2008) Modeling of cementitious materials exposed to isothermal calcium leaching, considering process kinetics and advective water flow. Part 1: Theoretical model. *International Journal of Solids Structures*, 45:6221-6240.

- [14] Sun, X. H.; Zuo, X. B.; Yin, G. J.; Jiang, K.; Tang, Y. J. (2017) Electrochemical and microscopic investigation on passive behavior of ductile iron in simulated cement-mortar pore solution. *Construction and Building Materials*, 150:703-713.
- [15] Williamson, J.; Isgor, O. B. (2016) The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar. *Corrosion Science*, 106:82-95.
- [16] Ghods, P., Isgor, O. B., Mcrae, G., Miller, T. (2009) The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, 31:2-11.
- [17] Alhozaimy, A.; Hussain, R. R.; Al-Negheimish, A., Al-Zaid, R., Singh, D. D. N. (2014) Effect of Simulated Concrete Pore Solution Chemistry, Chloride Ions, and Temperature on Passive Layer Formed on Steel Reinforcement. *ACI Materials Journal*, 111.
- [18] Duffó, G. S.; Farina, S. B. (2016) Electrochemical behaviour of steel in mortar and in simulated pore solutions: Analogies and differences. *Cement and Concrete Research*, 88:211-216.
- [19] Poursaee, A. (2016) Temperature dependence of the formation of the passivation layer on carbon steel in high alkaline environment of concrete pore solution. *Electrochemistry Communications*, 73:24-28.
- [20] Shi, J., Sun, W., Jiang, J., Zhang, Y. (2016) Influence of chloride concentration and pre-passivation on the pitting corrosion resistance of low-alloy reinforcing steel in simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, 111:805-813.
- [21] Raisdorfer, J. W. (2015) *Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- [22] Martins, A. M. (2016) *Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão de armaduras*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil.
- [23] Valdés, A. C.; Gadler, F.; Oliveira, I. A.; Medeiros, M. H. F. (2017) Efeito do grau de hidratação, tipo de adição mineral e grau de saturação do concreto nas leituras de resistividade elétrica. *Revista Técnico-Científica (CREA-PR)*, 1.
- [24] NBR 5733 (1991) Cimento Portland de alta resistência inicial. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [25] NBR 15895 (2010) Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [26] Raverdy M., Brivot F., Paillere A. M., Dron, R. (1980) *Appreciation de l'activité pouzzolanique des con-stituants secondaires*. In: 7th Int. Congr. Chem. Cem. Paris.

- [27] NBR NM 52 (2009) Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [28] NBR NM 53 (2009) Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [29] NBR NM 67 (1998) Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [30] NBR 5739 (2007) Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [31] Mehta, P.K.; Monteiro, P.J. (2014) *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2d ed. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- [32] Hoppe Filho, J.; Gobbi, A.; Pereira, E.; Tanaka, R. S.; Medeiros, M. H. F. (2017) Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). *Matéria-Rio de Janeiro*, 22: 1-19.
- [33] Habeeb, G. A.; Mahmud, H. B. (2010) Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. *Materials research*, 13:185-190.
- [34] Gobbi, A. (2014) *Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- [35] ASTM C876-15 (2015) Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Standard Worldwide, EUA.
- [36] Trocónis, O.; Romero, A.; Andrade, C.; Helene, P.; Díaz, I. (1997) Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. In: *CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura*, Rio de Janeiro, Brasil.
- [37] Lambert, P.; Page, C. L.; Vassie, P. R. W. (1991) Investigations of reinforcement corrosion. 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete. *Materials and Structures*, 24:351-358.
- [38] Poursaei, A.; Hansson, C. M. (2007) Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. *Cement and Concrete Research*, 37:1127-1133.
- [39] Vieira, F. M. P. (2003) *Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa*. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- [40] Hoppe Filho, J.; Garcez, M. R.; Medeiros, M. H. F.; Silva Filho, L. C. P.; Isaia, G. C. (2017) Reactivity Assessment of Residual Rice-Husk Ashes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29:04017003.

- [41] Hoppe Filho, J.; Gobbi, A.; Pereira, E.; Quarcioni, V. A.; Medeiros, M. H. F. (2017) Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. *Materia-Rio de Janeiro*, 22:1-18.