Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO pH DA SOLUÇÃO DOS POROS DO CONCRETO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA ARMADURA

V. K. ORTOLAN
MSc. Eng. Civil
Unisinos/itt Performance
Rio Grande do Sul; Brasil
vortolan@unisinos.br

M. MANCIO
Prof. Dr. Eng. Civil
Unisinos/ PPGEC
Rio Grande do Sul; Brasil
mancion@gmail.com

B. F. TUTIKIAN
Prof. Dr. Eng. Civil
Unisinos/itt Performance
Rio Grande do Sul; Brasil
btutikian@terra.com.br

RESUMO

Substituições parciais do cimento Portland por elevados teores de adições pozolânicas resultam em diminuição da concentração de hidróxido de cálcio, levando a uma redução do pH da solução do poro e influenciando na formação dos filmes de passivação sobre o aço, fatores estes que são balizadores para o desenvolvimento de corrosão nas estruturas de concreto armado. Este trabalho teve por objetivo avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa quanto ao comportamento do pH e da resistência à corrosão em concreto armado por medição da resistência de polarização. Foram produzidos três traços de concreto com variações da substituição do cimento em massa por sílica ativa nos teores 0%, 5% e 10%. Registou-se o comportamento da resistência de polarização e do pH entre as idades de 3 dias e 91 dias. Os resultados mostram que, principalmente nas primeiras idades, as substituições parciais do cimento por sílica ativa melhoram o desempenho da passivação da armadura, mesmo com uma leve diminuição do pH. Assim observa-se que é possivel substituir parcialmente o cimento por sílica ativa, sem causar danos à passivação da armadura.
Palavras-chave: Concreto, pH, Armadura, Passivação.

ABSTRACT
Partial replacement of Portland cement by high levels of pozzolanic additions result in decreased concentration of calcium hydroxide, leading to a reduction in the pH of the pore solution and influencing the formation of passive films on steel, these factors are indicators for the development of corrosion in reinforced concrete structures. This study aimed to evaluate the effect of partial replacement of cement Portland by silica fume as the pH of behavior and corrosion resistance of reinforced concrete by measuring the polarization resistance. Three concrete mixtures with variations of the cement replacement in mass by the silica fume content 0%, 5% and 10% were produced. There was the behavior of polarization resistance and pH between ages 7 days and 91 days. The results show that, especially in early ages, partial replacements for silica fume cement improves the passivation of equipment performance, even with a slight decrease in pH. Thus it is observed that it is possible to partially replace cement by silica fume, without causing damage to equipment passivation.
Keywords: Concrete, pH, steel, passivation.

1. INTRODUÇÃO

Em face dos problemas de degradação das estruturas devido à corrosão das armaduras, das novas necessidades competitivas e das exigências de sustentabilidade no setor da construção civil, demanda-se uma maior durabilidade das estruturas de concreto armado.
Em um pensamento sustentável que a indústria cimenteira vem de encontro a esta consciência, pois para a produção de um quilograma de clínquer é lançado 0,9 quilogramas de CO_2 na atmosfera [1].
Se incorporado algum co-produto ou resíduo industrial na composição cimentícia, as médias de emissão de gás carbônico são inferiores [2], devido a redução do consumo de clinquer. A utilização de pozolanas com a cinza volante, sílica ativa na composição de materiais cimentícios, em geral, apresentam viabilidade econômica, técnica e ambiental [3].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Quanto à durabilidade das estruturas de concreto armado, o processo corrosivo é um dos principais agentes balizadores da vida útil. Esta deterioração se desenvolve no aço por vias de reações eletroquímicas espontâneas. Caso não haja mecanismos que impeçam o avanço da corrosão, será necessário uma produção adicional destes materiais metálicos para reposição do deteriorado [4] [5] [6].
Quando há alguma adição pozolânica rica em sílica, estes reagem com o hidróxido de cálcio, alterando as características físicas e químicas da pasta de cimento produzido apenas com clínquer [7]. A alteração química ocorre com o consumo do hidróxido de cálcio pela pozolana, originando silicato de cálcio hidratado, acrescento resistência à pasta de cimento e diminuindo a alcalinidade da solução dos poros [8][9]. Os efeitos físicos são ocasionados pela alteração da microestrutura e da zona de transição, preenchendo vazios deixados pelas partículas de cimento, melhorando a distribuição dos tamanhos dos poros, aumentando a resistência e a resistividade elétrica e diminuindo a permeabilidade do sistema [10][7]. A somatória destes efeitos repercute na melhora da zona de transição, aumentando o desempenho mecânico e durabilidade do concreto frente a ambientes agressivos, apenas de promover a redução da alcalinidade.
A fase líquida do concreto apresenta tipicamente pH entre 12,5 e 13,3, favorecendo a formação de um filme de passivação compacto e aderente à superfície da armadura [11]. Havendo um desequilíbrio no sistema por algum evento externo, o pH do concreto junto ao aço pode ser reduzido a menos de 11,5, possivelmente levando à deterioração do filme de passivação do aço e conduzindo a processos corrosivos [7][12]. Segundo Silva (2010), a redução do pH provocado pelas adições pozolânicas não são capazes de alcançar valores críticos para a despassivação da armadura [9].
Uma das técnicas para avaliar a condição de corrosão, é o princípio da resistência de polarização (Rp), que representa a inércia que um sistema possui em desenvolver o processo corrosivo, baseado nos parâmetros em inferir a velocidade de corrosão. Sendo que, quanto maior for a resistência de polarização, menos intensa será a velocidade de corrosão [13][14].
Outro método considerado importante para determinação da corrosão de estruturas de concreto armado é a resistividade elétrica. Este parâmetro está relacionado com os íons dissolvidos na fase líquida do concreto, com a capacidade deste meio em transportar corrente elétrica, com dependência do teor de umidade, da permeabilidade e do grau de ionização do concreto [15][13][7][16]. Em presença de pouco eletrólito, em avançado grau de hidratação ou quando há adições minerais, a resistividade do sistema é aumentada e a velocidade de corrosão é reduzida [17]. Quanto maior o valor da resistividade elétrica, menor será o risco de haver corrosão na estrutura de concreto armado.
Este trabalho tem o intento de quantificar o pH das soluções dos poros, correlacionando com o comportamento à corrosão do concreto armado para os diferentes traços com substituição parcial do cimento por sílica ativa.

2. MÉTODO E MATERIAIS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho são encontrados na região metropolitana de Porto Alegre/RS. Utilizou-se o cimento do tipo Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, por conter pouca quantidade de adições e apresentar um teor elevado de C_3S e maior disponibilidade de hidróxido de cálcio disponível para as reações pozolânicas. Cuja massa específica é de 3,12 g/cm³ e perda ao fogo de 3,35%. A composição química está disposta na Tabela 1, e foi obtida de forma quantitativa pelo ensaio de fluorescência de raios X.
A pozolana empregada neste estudo foi a sílica ativa proveniente da produção de sílica metálica, do tipo não densificada de coloração cinza clara, com massa especifica de 2,09 g/cm³ e perda ao fogo de 2,40%. A composição química está apresentada na Tabela 2, e foi determinada de modo qualitativo pelo ensaio de fluorescência de raios X.

Tabela 1 – Composição química do cimento

Composição Química do cimento	Teores (%)
Óxido de Alumínio (Al_2O_3)	3,479
Dióxido de Silício (SiO_2)	14,197
Oxido de Ferro (Fe_2O_3)	2,38
Óxido de cálcio (CaO)	55,687
Óxido de magnésio (MgO)	3,691
Trióxido de enxofre (SO_3)	2,026
Óxido de sódio (Na_2O)	0,477
Óxido de potássio (K_2O)	0,718

Tabela 2 – Composição química da sílica ativa

Composição Química da Sílica Ativa	Teores (%)
Silício (Si)	>50%
Potássio (K)	5 %< x <50%
Cálcio (Ca), Enxofre (S) e Ferro (Fe)	< 5%

A distribuição granulométrica da sílica ativa foi realizada pela técnica de difração a laser em via úmida com solução de hexametafosfato de sódio (5), com 60 segundos de ultrassom na potência de 40 Watts, o resultado dos diâmetros equivalentes é exposto na Tabela 3.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Tabela 3 – Diâmetros equivalentes da sílica ativa

Características físicas	Diâmetro (μm)
Diâmetro equivalente a 10% de massa acumulada	<6,29
Diâmetro equivalente a 50% de massa acumulada	19,71
Diâmetro equivalente a 90% de massa acumulada	34,38

O agregado graúdo britado de origem basáltica de utilizado apresenta modulo de finura 5,75, massa específica 2,67 g/cm³, diâmetro máximo de 12,5 mm e se enquadra na zona granulométrica 4,75/12,5.
O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural de origem quartzosa com módulo de finura de 2,32, massa específica de 2,63 g/cm³, diâmetro máximo de 2,4 mm e enquadramento na zona utilizável.
Utilizou-se ainda armadura de aço carbono CA50 de diâmetro nominal igual a 12,5 nos corpos de prova avaliados quanto o comportamento à corrosão.

2.2 Produção das amostras

As proporções dos materiais constituintes são apresentadas na Tabela 4 para traço unitário. Juntamente é apresentado as proporções de substituições parciais do cimento por sílica ativa. Inclusive os fatores de controle, variou-se as substituições de cimento por sílica ativa nos teores de 5% e 10%

Tabela 4 – Traço unitário utilizados na pesquisa

Mistura	Quantidade de cimento em massa (kg)	Quantidade de substituição em massa	Quantidade em massa		
		Sílica ativa	Areia	Brita	a/agl
REF.	1	-	2,1	2,5	0,65
5% SA	0,97	0,03	2,1	2,5	0,65
10% SA	0,93	0,067	2,1	2,5	0,65

Salienta-se que a relação a/c fixada em 0,65, pois, segundo Kulakowski (2002), para obter a solução do poro suficiente para análise do pH, a relação a/c deve ser próxima de 0,7 [18].
Os corpos de prova submetidos à determinação da resistência à corrosão foram produzidos em concreto armado nas dimensões de 100 mm de altura, 260 mm de largura e 260 mm de comprimento, com uma barra de aço carbono inserido, conforme Figura 1. Produziu-se 2 amostras para cada traço de concreto.

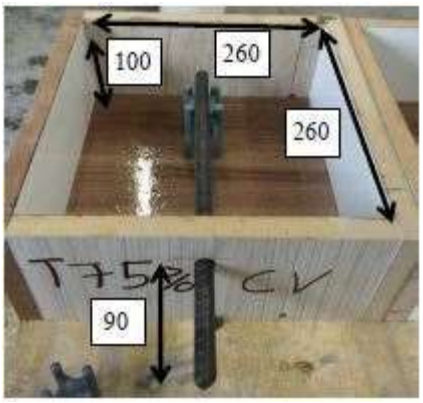


Figura 1 – Fôrma para ensaio de resistência à corrosão

Para verificação da evolução da resistividade, moldou-se corpos de prova cilíndricos de diâmetro 100 mm e 200 mm de altura, sem armadura, sendo duas amostras para cada traço.
Com a finalidade de obtenção da solução dos poros, para posterior determinação do pH, os corpos de prova para esta análise foram moldados em pasta de cimento, nas mesmas proporções de substituição parcial do cimento exposto na Tabela 4. As amostras possuíam geometria esférica de 40 mm de diâmetro e 80 mm de altura. Estes corpos de prova após desforma, me 24 horas, foram embalados em filmes plásticos e inseridos em sacos plásticos para evitar qualquer interação com o meio ambiente, e encaminhados a câmara úmida até a idade de ensaio.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

2.3 Métodos

2.3.1 Ensaios de avaliação da corrosão

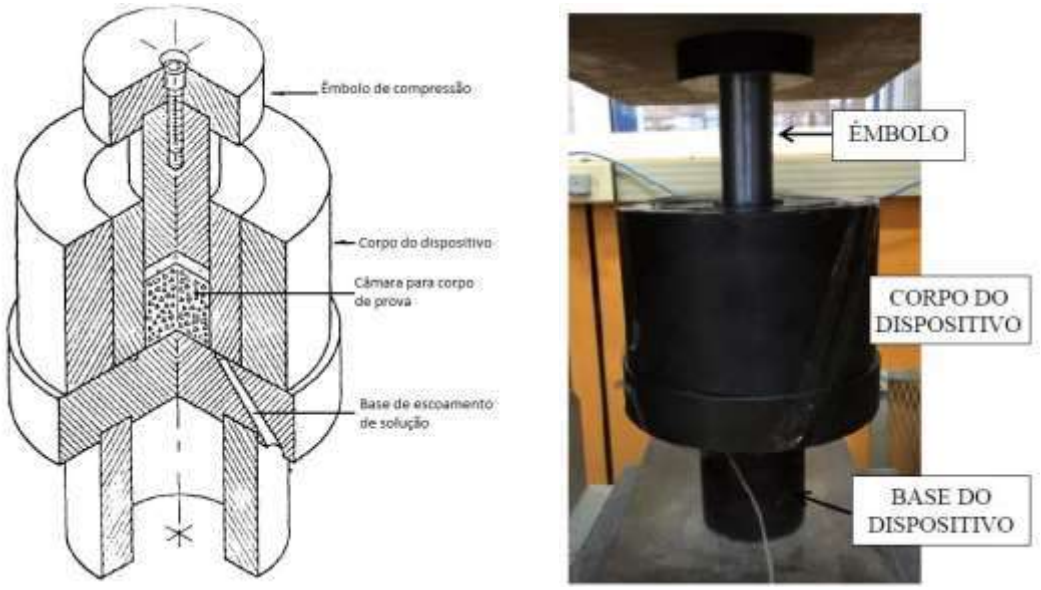
A resistência de polarização foi determinada pelo parâmetro de densidade de corrente de corrosão, utilizando o método não destrutivo com o auxílio do equipamento GECOR 8, fabricado pela NDT James Instruments Ltda e disponibilizado pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o ensaio foi realizado neste mesmo laboratório.
Para este ensaio empregou-se apenas o sensor A, que utiliza como eletrodo de referência o sulfato de cobre saturado com água deionizada.
A fim de obter o valor da resistência polarização (Rp), a Equação 1 foi utilizada, juntamente com os valores resultados da densidade de corrente (i_{corr}) e com a constante de Stern-Geary (B) de 52 mV.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$ Equação 1

Estas determinações foram realizadas nas idades de 3, 7, 28, 42, 56, 70, 84 e 91 dias.
Para a verificação da resistividade do concreto, utilizou-se o equipamento RESIPOD, fabricante Proceq, que segue o princípio de Wenner, também chamado de método dos quatro eletrodos. As quatro sondas de medição do equipamento segue o espaçamento de 50 mm. Adotou-se o padrão de leitura de duas medições em cada amostra nas idades de 3, 7, 28, 42, 46 e 70 dias, em pontos específicos do corpo de prova, sendo um oposto a outro.

2.3.2 Extração da solução dos poros

Para a extração da solução dos poros, utilizou-se de um equipamento similar ao desenvolvido por Barneyback e Diamond (1981), reproduzido por Kulakowski (2002), a Figura 2a esclarece esquematicamente o funcionamento do equipamento, e a Figura 2b apresenta o equipamento utilizado e desenvolvido por Kulakowski (2002). [18] [17]



(a) (b)

Figura 2 – (a) Esquema simplificado do equipamento para extração da fase líquida dos poros. (b) Vista do dispositivo utilizado posicionado na prensa hidráulica.
Fonte: Adaptado de Barneyback e Diamond (1981) [19]

Para tal, os corpos de prova de forma cilíndrica produzidos de pasta de cimento, nas proporções apresentadas na Tabela , nas dimensões de 40 mm de diâmetro e 80 mm de altura. Extrai-se a solução para as idades 3 dias, 7 dias, 38 dias e 91 dias.
Para a obtenção da solução, se faz necessário a aplicação de uma carga com o objetivo de promover tensões de confinamento no corpo de prova expelindo assim a solução dos poros. A tensão máxima aplicada pela prensa hidráulica foi de 300 MPa.

Extraiu-se ainda solução às 4 horas de hidratação do cimento, como neste momento a pasta não apresentava consistência totalmente endurecida, a extração ocorreu de forma manual.

2.3.3 Obtenção do pH da solução

Com a solução extraída devidamente reservada em um recipiente isento do contato com o ambiente externo. A análise da concentração de íons OH^- das amostras coletadas ocorreu com o emprego de titulação pelo método de titulometria volumétrica por neutralização.
Para neutralizar a solução alcalina extraída dos poros, empregou-se ácido clorídrico (HCl) com concentração de 0,0102N. Como indicador químico utilizou-se uma solução alcóolica de fenolftaleína a 1% (em massa). Este indicador, quando em pH alcalino, apresenta coloração vermelho-carmim; e em pH inferior a 9 apresenta aparência incolor. Adicionou-se 3 ml de solução fenolftaleína em 0,5 ml da amostra extraída, completando a diluição com 50 ml de água deionizada.
Ao trocar a cor da solução de vermelho-carmim para incolor, tem-se o volume de ácido consumido na titulação para neutralizar o volume de 0,5 ml diluído da solução, pois a água deionizada e a fenolftaleína são neutras. O controle da neutralização ocorre de forma visual.
Com o volume consumido do ácido, pode-se determinar a concentração em moles por litro de OH- da solução neutralizada pela Equação 2.

$$nº\ moles\ de\ OH^- = \frac{(N \times V_{ac} \times V_i)}{(massa\ atômica\ de\ OH^-)} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:
N = concentração do ácido em Normal;
Vac = volume consumido de ácido para neutralizar a solução;
Vi = volume da amostra titulada (volume diluído).
A partir da concentração de íons OH^- obtida com a Equação 2, pode-se alcançar o pH da solução estuda com a Equação 3.

$$pH = -\log\left(\frac{10^{-14}}{[OH^-]}\right) \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:
$[OH^-]$ = concentração de íons OH^- em mol/litro.

3. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados dos pH e das resistências de polarização das misturas obtidas nas diversas idades estudas.

Tabela 3 – Resultas do pH e da Resistência de polarização

Mistura	Referência		5% SA		10% SA	
Idade	pH	Rp (kΩ.cm²)	pH	Rp (kΩ.cm²)	pH	Rp (kΩ.cm²)
4 horas	13,23	-	13,23	-	13,22	-
3 dias	13,63	61	13,46	177	13,30	418
7 dias	13,68	59	13,30	86	13,13	272
28 dias	13,60	650	13,32	867	13,00	274
42 dias	-	240	-	314	-	412
56 dias	-	208	-	379	-	565
70 dias	-	171	-	289	-	332
84 dias	-	338	-	361	-	583
91 dias	13,64	248	13,26	387	12,62	494

Observam-se pequenas, mas consistentes, alterações nos valores do pH quando comparados à idade da solução, bem como o teor de substituição. Cabe lembrar que os valores de pH variam conforme um escala logarítmica. Assim, uma variação unitária no valor do pH –variando, por exemplo, de 13,6 para 12,6 como ocorre aos 28 dias para o traço 10% SA, em comparação com o REF- corresponde a uma redução de dez vezes na concentração de íons OH^- da solução.
Como esperado, nota-se um aumento do pH nas primeiras idades analisadas, entre 4 horas e 3 dias, de todas as misturas. Tal variação deve-se ao fato que, às 4 horas, o cimento ainda está se dissolvendo e apenas as reações de hidratação dos

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

aluminatos estão ocorrendo, enquanto aos 3 dias a hidratação dos silicatos já se iniciou, pois a alcalinidade da solução é mais elevada.
Passadas 4 horas da mistura, percebe-se uma redução no valor do pH para as amostras com sílica ativa apresentam pH semelhante ao traço de referência, o que é consistente com a pequena redução no consumo de cimento destas amostras e com a maior reatividade na sílica ativa.
Na idade de 3 dias, em todas as misturas com substituição parcial do cimento, o pH encontra-se inferior ao valor referência. Este comportamento é consistente com o início das reações pozolânicas, onde há um consumo dos hidróxidos provenientes da hidratação do cimento, mas também devido ao menor teor de cimento nas misturas com adições. Outro fato que reforça que a reação pozolânica depende da ocorrência da hidratação dos silicatos, é que aos 3 dias, há um pico máximo nos valores do pH em todas as misturas com adições minerais, após há uma consistente redução do pH destas misturas ao longo do tempo.
A mistura utilizada como referência, sem substituição do cimento por pozolanas, obteve nas primeiras idades, entre 4 horas e 3 dias, um acentuado aumento do pH, sendo que, após esta idade, o pH praticamente não sofre alteração até os 91 dias.
Após os 3 dias é que a diferença no teor de substituição irá provocar influência no valor do pH, sendo que a mistura com maior teor de substituição, obteve menor valor de pH em todas as idades, já a mistura com menor teor, obteve maior pH. Este comportamento já era esperado, pois há diminuição da quantidade de cimento, todavia, há um maior consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas.
Evidencia-se, ainda, que ao término do período de análises, aos 91 dias, as soluções 10%SA apresenta o menor valor de pH em relação à amostra referência e em relação às misturas de mesmo material de substituição (com menores teores).
Tem-se, então, que com o aumento progressivo do teor de substituição de cimento por sílica ativa há um decréscimo da concentração de íons hidroxilas da solução, há uma redução da porcentagem total de cátions alcalinos da solução a partir dos 3 dias de idade, para todas as soluções analisadas.
A Figura 3 apresenta a evolução da resistência de polarização juntamente com comparação ao desenvolvimento do pH.

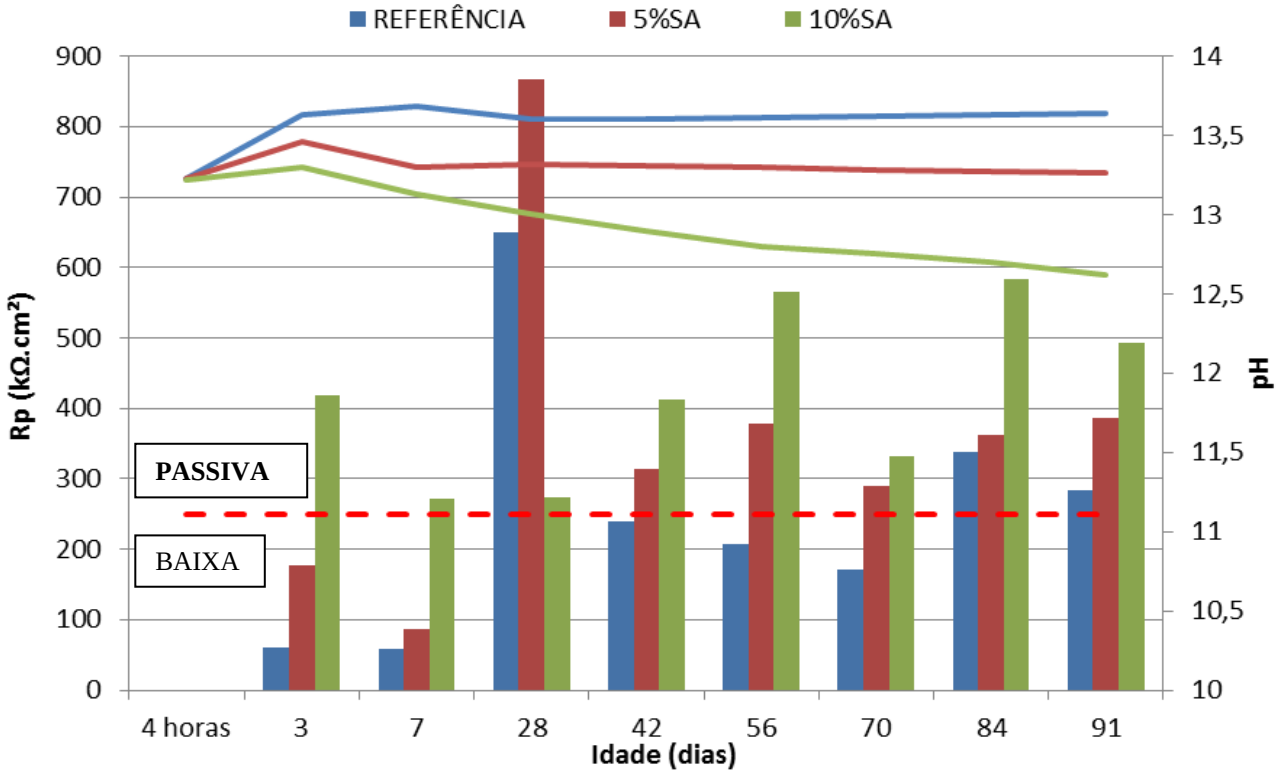


Figura 3 – Evolução da resistência de polarização e do pH

Nas primeiras idades de 3 e 7 dias, observa-se um risco de corrosão baixo, à medida que sucedem as reações de hidratação do cimento a probabilidade de corrosão declina para níveis de passivação, e assim se mantem até o término do período do trabalho.
A amostra referência apresenta leve declínio da qualidade de proteção, passando da zona passiva para a região de baixo risco de corrosão aos 42 dias e mantendo até os 70 dias, terminando o estudo na zona passiva. Tens que esta amostra há maior suscetibilidade de corrosão entre as amostras analisadas.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Vale salientar que ao longo do período de estudo, as amostras com substituição parcial do cimento por sílica ativa apresentam tendência de desempenho melhor quanto à concretos sem substituições.
Com base nos resultados obtidos, suspeita-se que as armaduras de todos os concretos penduram no estado passivo em todo o período estudado. Presume-se que nos primeiros dias, o concreto armado apresenta probabilidade maior de corrosão, pois neste período está ocorrendo à formação do filme de passivação sobre a superfície do aço.
Percebe-se uma propensão das pozolanas na influência positiva do desempenho a proteção da corrosão, independentemente do tipo de pozolana e do seu teor de utilização. Estes resultados complementam o estudo de Oliveira (2007) no qual se notou que as adições são capazes de melhorar o desempenho dos concretos frente à corrosão, com resistência de polarização superior ao concreto sem substituição [20]. Ainda observa que o efeito diminutivo do valor do pH parece não ter significância quanto a perda da proteção contra a corrosão.
De fato, em todas as idades estudadas, exceto aos 28 dias, a redução do pH, nas faixas estudas, aparenta não influenciar para diminuição da resistência à corrosão, pois a mistura com menor valor do pH apresenta maior valor da resistência de polarização.

4. CONCLUSÃO

Visualiza-se maior influência da sílica ativa nas primeiras idades, até o sétimo dia, quando o filme de passivação está sendo formado e atingindo sua estabilização. Nestes instantes, observou-se comportamento claro do aumento da resistência de polarização quando o pH é reduzido por causa da substituição parcial de cimento pela adição mineral.
A redução do valor do pH pela substituição parcial do cimento por sílica ativa, ocasionará na melhora do desempenho da resistência à corrosão do concreto armado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ARAUJO, V. R. B. S. *et al.* Estudo de prospecção do concreto verde. **Congresso Brasileiro de Prospecção Tecnológica**, 2013. v. 6, p. 106–114.
[2] LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010. Tese de Doutorado.
[3] COSTA, E. B. DA *et al.* Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, jun. 2013. v. 13, n. 2, p. 75–86.
[4] ANDRADE, M. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.
[5] GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1996.
[6] HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1993. Tese de Doutorado.
[7] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2º. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
[8] BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. Durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. **Durabilidade do concreto**. São Paulo: Jean-Pierre Olliver e Angélique Vichot, 2014, p. 255–326.
[9] SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2ª. ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2010, v. 1p. 791–825.
[10] DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 1p. 261–311.
[11] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 222R. Protection of metals in concrete against corrosion**. ACI Committee Reports, 2001.
[12] PEREIRA, V. C. DE O.; MONTEIRO, E. C. B. Avaliação da capacidade de proteção de adições minerais em relação à corrosão de armaduras à corrosão de armaduras devido à carbonatação. **Construindo**, 2011. v. 3, p. 12–16.
[13] CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo; Goiânia, GO: Pini ; Editora UFMG, 1997.
[14] RILEM TC 154-EMC. Recommendations: Test methods for on-site corrosion rate measurement of polarization resistance method. **Materials and Structures**, 2004. v. 37, p. 623–643.
[15] AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **ASTM G57. Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method**. [S.l.]: ASTM International, 2012.
[16] RILEM TC 154-EMC. Recommendations: Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **Materials and Structures**, 2000. v. 33, p. 603–611.
[17] WRITING, D. A.; MOHAMAD, N. A. Electrical resistivity of concrete-a literature review. **R&D Serial**, 2003. 2457.
[18] KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Tese de Doutorado.

[19] BARNEYBACK, R. S.; DIAMOND, S. Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, mar. 1981. v. 11, n. 2, p. 279–285.
[20] OLIVEIRA, A. M. **Avaliação do desempenho de concreto com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos**. Goiânia: Universidade Federal da Goiás, 2007.