ANÁLISE DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COM CIMENTO COM ADIÇÃO POZOLÂNICA BASEADO NO MODELO DE ARCHIE E POWERS

I. M. PINKOSKI
Mestrando
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
igor.pinkoski@gmail.com

G. B. DOMINGUES
Mestranda
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
gabrielabdomingues@gmail.com

R. A. MEDEIROS-JUNIOR
Professor do Departamento de Construção Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
ronaldodemedeirosjr@yahoo.com.br

RESUMO

O emprego do concreto em ambientes agressivos requer o desenvolvimento de métodos que possibilitem a previsão da sua vida útil, considerando os mecanismos de degradação e agentes agressivos aos quais será exposto. Neste sentido, o ensaio de resistividade elétrica superficial permite a avaliação do concreto de forma não destrutiva, e sendo um método facilmente aplicável, viabiliza sua utilização e repetição no estudo da deterioração do concreto. Para os ensaios realizados neste estudo, foram confeccionados corpos de prova com quatro traços diferentes, variando entre teores de água cimento de 0,4; 0,42; 0,45 e 0,5, com significância verificada pela tabela ANOVA. O tipo de cimento empregado foi o CPIV 32, que contém teores de adição pozolânica em sua composição entre 15 e 50%. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistividade elétrica superficial aos 7, 14, 21 e 28 dias, sendo submetidos, também, ao ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias. Com o passar do tempo, verificou-se um aumento nas medidas de resistividade elétrica superficial, e também uma tendência de aumento da resistência à compressão axial e da resistividade elétrica superficial com a diminuição dos teores água/cimento utilizados. Os valores obtidos experimentalmente foram comparados a um modelo teórico e obteve-se uma correlação de 95,56% entre estes dados. Como os valores obtidos pelo modelo se aproximam dos valores obtidos experimentalmente, a técnica demostra potencial para a previsão de vida útil de concreto.
Palavras-chave: Resistividade elétrica. Modelo. Concreto. Durabilidade.

ABSTRACT

The use of concrete in aggressive environments requires the development of methods that allow the prediction of its service life, considering the mechanisms of degradation and aggressive agents to which it will be exposed. In this sense, the surface electrical resistivity test allows the concrete evaluation in a non-destructive testing, and being an easily applicable method, makes possible its use and repetition in the study of concrete deterioration. For the tests carried out in this study, specimens were prepared with four different traces, varying between water/cement ratios of 0.4; 0.42; 0.45 and 0.5, with significance verified by the ANOVA table. The cement used was CPIV 32, which contains pozzolanic composition between 15 and 50%. The test specimens were submitted to the surface electrical resistivity test at 7, 14, 21 and 28 days, and were submitted to the compressive strength test at 28 days. Over time, there was an increase in the electrical resistivity measurements, as well as a tendency to increase the compressive strength and the surface electrical resistivity with the reduction of the water/cement ratios. The values obtained experimentally were compared to a theoretical model and a correlation of 95.56% between these data was obtained. As the values obtained by the model approximate the values obtained experimentally, the technique demonstrates potential for the concrete life forecast.
Keywords: Electrical resistivity. Model. Concrete. Durability.

1. INTRODUÇÃO

O concreto, material amplamente usado no ramo da Construção Civil, tem entre as suas principais características a porosidade. O tamanho dos poros, a sua distribuição e a sua interconexão, refletem diretamente nas demais propriedades do material, como a resistência à compressão e a entrada de agentes agressivos (SENGUL, 2014).

A durabilidade das estruturas de concreto armado possui forte relação com a penetração de agentes agressivos, os quais migram para o interior do concreto através da rede de poros do material, e assim alteram as propriedades do material e reduzem a vida útil da estrutura (MEDEIROS-JUNIOR et al., 2014).

Neste contexto se tem a resistividade elétrica, uma propriedade que indica o quanto um material se opõe à passagem de corrente elétrica, de modo que quanto maior for a resistividade, mais difícil será a passagem de corrente elétrica. Para o concreto, essa propriedade traduz não apenas a resistência à passagem de corrente elétrica, mas também a resistência à passagem de agentes agressivos, que muitas vezes estão dissolvidos em soluções aquosas, como o cloreto (MEDEIROS-JUNIOR et al., 2014). Assim, a resistividade elétrica superficial do concreto (RES) é um fator de uso relevante em modelagens de penetração de agentes agressivos no concreto.

O ensaio que permite a medição da RES destaca-se por ser não destrutivo, permitindo o acompanhamento contínuo de um mesmo elemento ao longo do tempo, e, ainda, por ser de simples execução e de baixo custo.

Medeiros-Junior e Lima (2016) explicam que apesar dos diversos estudos já publicados acerca da relação entre o concreto e a RES, como o de Hossain (2005) que investigou correlações entre porosidade, difusividade de cloreto e resistividade elétrica em pastas de cimento, ainda são necessárias mais pesquisas que investiguem a evolução da resistividade do concreto ao longo do tempo e suas consequências para o concreto, em especial para o comportamento da rede de poros. Os autores ainda fazem alusão à importância de se estudar o comportamento da RES em concretos com diferentes tipos de cimento, como os com adição de pozolana ou com resistência à sulfatos.

Adições pozolânicas, como a cinza volante, a sílica ativa e o metacaulim, provocam a segmentação e o refinamento dos poros do concreto com o aumento da idade (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Deste modo, tem-se a redução da permeabilidade do concreto e o aumento da densidade e da resistência da zona de transição entre pasta e agregado (WINCK et al. 2000). Esta combinação das ações físicas e químicas da pozolana eleva a RES do concreto e dificulta o ingresso de agentes agressivos no mesmo (PEREIRA, 2001).

A adição de pozolana destaca-se, ainda, no caso específico de ataque por cloretos, pois apresenta boa capacidade de fixação destes elementos, reduzindo o teor de cloreto livre, que é o responsável direto pela corrosão das armaduras (ISAIA, 1995). O benefício do emprego de cimento com adição de pozolana, como é o caso do CPIV, estende-se ao meio ambiente, uma vez que o reaproveitamento do resíduo pozolânico traduz-se em menor exploração dos recursos naturais, menor consumo de energia, e economia financeira (ISAIA E HELENE, 1993).

Neste sentido o presente trabalho busca investigar a evolução da RES em concretos com cimento CPIV (com adição de pozolana) nos primeiros 28 dias de idade, sob cura em câmara úmida, considerando quatro diferentes relações água/cimento (0,40; 0,42; 0,45; 0,50), de modo a contribuir para uso da resistividade em estudos de durabilidade do concreto. É testado, ainda, a metodologia proposta por Andrade e D'Andrea (2011) para determinação do traço do concreto e da relação a/c em função de uma RES pré-estabelecida.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo foram moldados corpos de prova de concreto com traço característico de 1:2:3 em massa, variando-se, então, a relação água/cimento adotada de forma a compor quatro traços diferentes, variando entre 0,4 e 0,55, como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição de traços

Concreto	Cimento	Areia	Brita	Relação água/cimento	Consumo de cimento (kg/m³)
1	1	2	3	0,50	362,2
2				0,45	369,0
3				0,42	373,2
4				0,40	376,1

Fonte: Autores.

Os corpos de prova foram moldados com o objetivo de constatar sua resistência à compressão axial aos 28 dias de cura, assim como aferir a resistividade elétrica do material no decorrer desse período, sendo tomadas medidas nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias. Para tal, o resultado obtido no ensaio de abatimento de cone de concreto (Slump Test), realizado de acordo com a NBR NM 67 (1998), foi fixado em valores compreendidos entre 80 e 160 mm.

A fim de possibilitar a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e resistividade superficial, os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, de acordo com as especificidades na norma NBR 5738 (2015), permanecendo em uma câmara úmida com umidade relativa do ar superior a 95% e temperatura controlada de (22± 2) ºC.

2.1 Aglomerante

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com a utilização de cimento Portland do tipo CP-IV 32, caracterizado por ter adição de pozolanas, e cujos teores de materiais constituintes respeitam o apresentado na Tabela 1. A massa específica do cimento utilizado é de 2,82 g/cm³.

Tabela 1: Caracterização química do cimento CP IV 32

Perda ao Fogo (%)	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	CaO Livre (%)	Equivalente Alcalino (%)	Resíduo Insolúvel (%)
3,38	9,73	29,28	4,06	45,85	2,86	2,23	0,56	1,18	25,53

Fonte: Itambé (2017).

2.2 Agregados

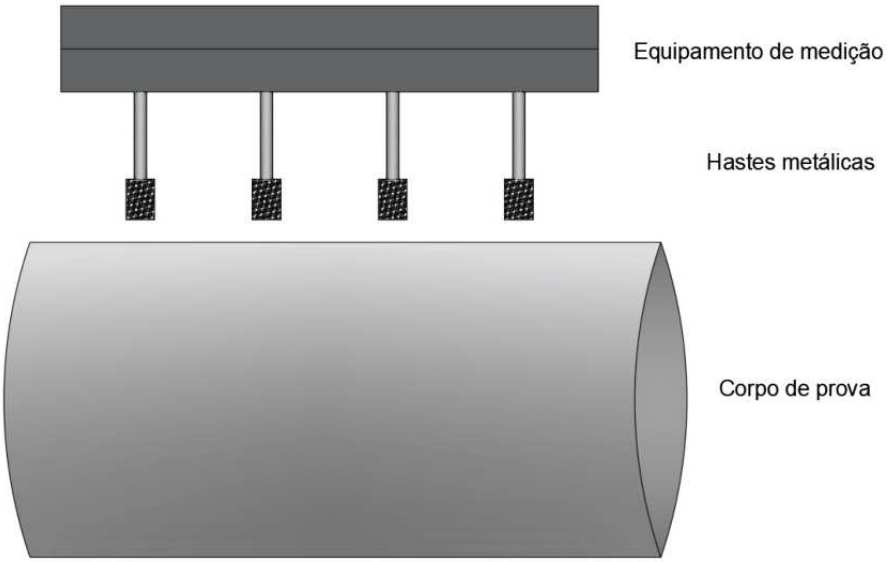
O agregado graúdo utilizado para a confecção do concreto foi uma brita 1, proveniente da região de Curitiba, com massa específica de 2720 kg/m³, caracterizado de acordo com a NBR NM 53 (2009). Para o agregado miúdo, foi utilizada uma areia proveniente também da região de Curitiba, com massa específica de 2380 kg/m³, caracterizada de acordo com a NBR NM 52 (2009). Não foram utilizados aditivos químicos nas moldagens dos concretos.

2.3 Resistividade elétrica superficial

O ensaio de resistividade elétrica superficial foi realizado com o auxílio de um equipamento da marca Proceq, o qual utiliza o método dos quatro eletrodos de Wenner, posicionados com distâncias iguais entre si (= 50mm), cuja faixa de medição compreende valores entre 1 e 1000 kΩ.cm. Para tal, os corpos de prova, mantidos em câmara úmida, foram ensaiados em condição saturado superfície seca, sendo então devolvidos ao interior da câmara úmida ao fim das medições.

A realização do ensaio se deu com o posicionamento do equipamento perpendicularmente à superfície do corpo de prova no sentido da maior dimensão da amostra, como ilustrado na Figura 1, sendo que, o ensaio foi efetuado aos 7, 14, 21 e 28 dias de modo a acompanhar o desenvolvimento da resistividade elétrica superficial com o passar do tempo, realizando-se 5 medidas em cada corpo de prova, e obtendo a média entre estes valores para cada uma das duas amostras.

Figura 1 – Ilustração do posicionamento do aparelho de medição de RES sob o corpo de prova.



Fonte: Autores.

A norma selecionada para orientar a aferição da resistividade elétrica superficial através do método de Wenner foi a UNE 83988-2 (2012), uma vez que não existem normas nacionais que tratem disto. Entretanto a UNE 83988-2 (2012) preconiza a utilização de corpos de prova prismáticos, e para a medição da resistividade elétrica superficial em corpos de prova cilíndricos a norma sugere que se multiplique os valores obtidos por um coeficiente de forma, que para este caso, onde os corpos de prova possuem dimensões de ϕ 10x20 cm, o coeficiente a ser adotado é 0,377.

2.4 Modelo de Andrade

Para testar a metodologia proposta por Andrade e D'Andrea (2011) para determinação do traço do concreto e da relação a/c em função de uma RES pré-estabelecida, buscou-se correlacionar os resultados que foram obtidos com a realização dos ensaios nos corpos de prova, com o valor de RES previsto pelos autores segundo as características dos concretos estudados. Para tal foi empregada a metodologia apresentada por Andrade e D'Andréa (2011), selecionada por possibilitar a comparação dos resultados obtidos empiricamente com os resultados obtidos experimentalemente, a qual tem por base o modelo matemático de previsão de vida útil proposto por Andrade (2004), que sugere a determinação da resistividade elétrica do concreto, por meio da equação 1.

$$\rho = a.\rho_0.\varepsilon^{\tau} \quad (1)$$

Onde:
ρ = resistividade elétrica superficial, em Ω.m;
a = constante relacionada com o tipo de formação rochosa dos agregados;
ρ0 = resistividade intrínseca da solução dos poros no interior da matriz cimentícia, em Ω.m;
ε = porosidade do concreto, em porcentagem (%);
τ = tortuosidade dos poros do concreto, adimensional.

A fim de estimar o valor de resistividade elétrica, o valor de tortuosidade aplicado para o cimento CP IV foi testado, através de um processo iterativo, até se chegar a um valor de tortuosidade dos poros que fornecesse valores de resistividade com tendência similar aos valores obtidos experimentalmente, conforme apresentado na seção de resultados. Baseado no proposto por Andrade (2014), o valor de resistividade da solução dos poros de concreto foi fixado em 0,5 Ω.m, assim como, consoante com o apresentado por Garboczi (1991), a constante (a), foi fixada com o valor 1. Finalmente, a variável de entrada restante para obtenção dos resultados, o fator de porosidade do concreto (ε), que basicamente é função da porosidade da pasta de cimento (ε_P), foi obtido através das equações 2 e 3.

$$\varepsilon_p(\%volume) = \frac{(a/c) - 0{,}36\alpha}{(a/c) + 0{,}32}.100 \quad (2)$$

Onde:
ε_P = porosidade da pasta de cimento hidratado, em porcentagem (%);
a/c = relação água/cimento;
α = grau de hidratação do cimento.

$$\varepsilon = \varepsilon_p.\gamma = \varepsilon_p.\frac{Vol_{pasta}}{Vol_{concreto}} \quad (3)$$

Onde:
ε = porosidade do concreto, em porcentagem (%);
V_{pasta} = volume de pasta;
$V_{concreto}$ = volume de concreto.

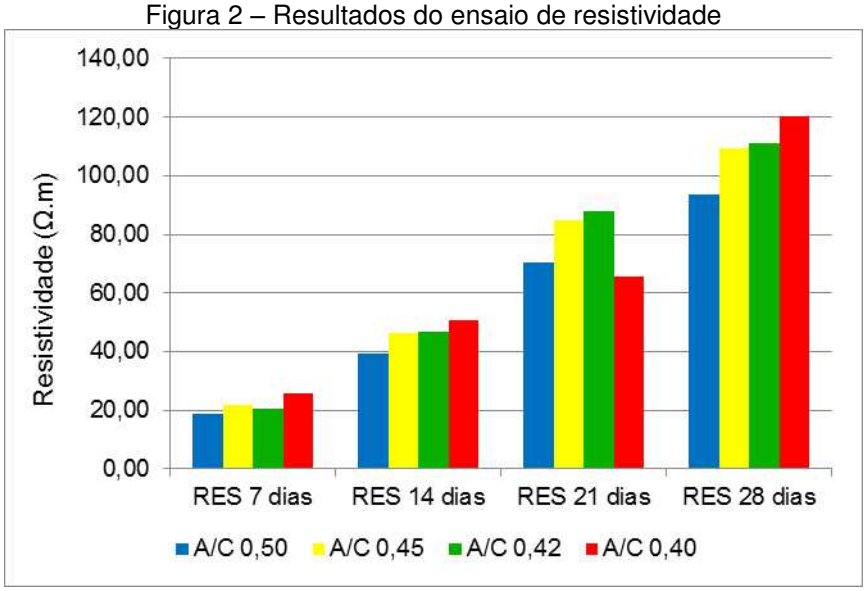
2.5 Resistência à compressão axial

Durante o período de 28 dias de cura, os corpos de prova de concreto foram mantidos sob condições de cura úmida, sendo então submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial realizados em conformidade com a NBR 5739 (2007), de onde foi obtida a média de valores de resistência para as duas amostras ensaiadas.

3. RESULTADOS

Os resultados dos testes de resistividade do concreto para as relações água cimento de 0,40; 0,42; 0,45 e 0,50; nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Resultados do ensaio de resistividade



Fonte: Autores.

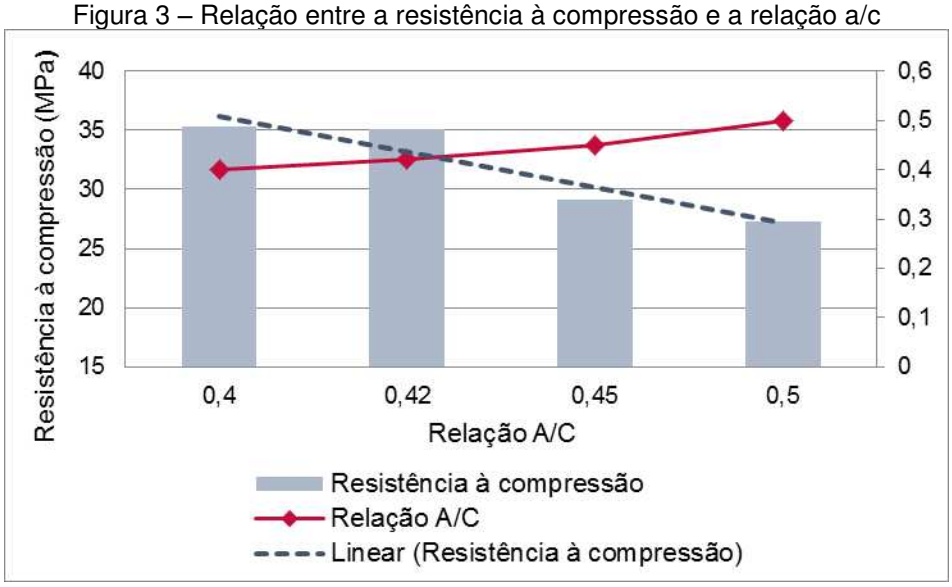
É possível observar o aumento da resistividade ao longo do tempo em todas as amostras, o que ocorre em decorrência da hidratação do cimento e do endurecimento do concreto. Isto indica, conforme observado por Medeiros-Junior e Lima (2016), que a rede de poros interconectados do concreto tende a ser reduzida com o passar do tempo, diminuindo, também, a condutividade do material.

Além disso, é possível, também, observar uma tendência de crescimento da resistividade de maneira inversamente proporcional ao incremento da relação água/cimento, o que está relacionado principalmente, de acordo com Lencioni e Lima (2010) e Santos (2006), com o maior volume de poros no interior do concreto e a maior permeabilidade deste. A permeabilidade resulta da conectividade entre os poros e da distribuição das dimensões destes, que podem ter diversas origens, entre elas a evaporação da água do concreto, a microfissuração devido à exsudação e a retração por secagem, todas fortemente influenciadas pela quantidade de água presente no concreto, de modo que quanto maior for esta quantidade maior será a porosidade (Petry, 2004).

A análise de variância (ANOVA) foi realizada e demonstrou que as diferenças entre os valores de resistividade para todas as quatro relações a/c testadas são significativas, para um nível de confiabilidade de 95%.

Os resultados dos testes de resistência à compressão estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Relação entre a resistência à compressão e a relação a/c

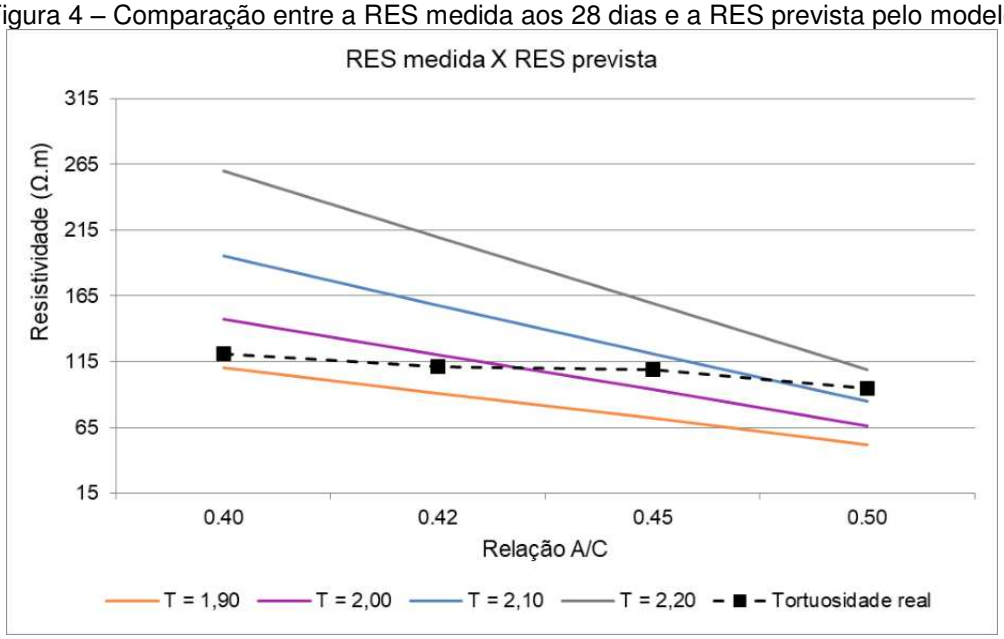


Fonte: Autores.

De acordo com a Figura 3, é possível observar a tendência no decréscimo da resistência conforme maior é o teor de água utilizado na mistura. A resistência à compressão do concreto com relação a/c 0,5 foi 33% inferior a resistência do concreto com relação a/c 0,4.

Na Figura 4 estão apresentados os valores de RES aferidos neste estudo, e os valores teóricos previstos por Andrade (2010). Como não se tem consolidado na literatura valores de tortuosidade para o cimento CPIV, e este também não foi fornecido pelo fabricante, foram testados quatro valores diferentes de tortuosidade afim de se verificar o que melhor se ajusta.

Figura 4 – Comparação entre a RES medida aos 28 dias e a RES prevista pelo modelo



Fonte: Autores.

De acordo com a Figura 4, o valor adequando de tortuosidade está entre 1,9 e 2,0, pois essa faixa de valores ajusta o modelo utilizado aos dados experimentais. Esse valor é bastante próximo do que foi obtido por Andrade (2010), valores de tortuosidade entre 1,7 e 2,7; sendo que, para o valor de tortuosidade igual a 2, foi obtida a maior correlação entre os resultados, com 95,56% de correspondência entre os resultados experimentais obtidos e a reta confeccionada de acordo com o modelo utilizado por Andrade e D'Andréa (2011), seguindo, assim, a tendência observada para Resistividade Elétrica Superficial por Andrade (2010).

Apesar de as retas apresentarem 95,56% de correlação, é possível ainda inferir, com a Figura 4, que os valores de RES medidos experimentalmente não seguem a mesma tendência linear decrescente como o proposto pelo método, isso possivelmente está relacionado com os teores elevados de material pozolânico contido no cimento do tipo CP IV, causando alterações no refinamento dos poros e, por consequência, na resistividade medida.

4. CONCLUSÃO

A resistividade elétrica superficial, de maneira similar a resistência à compressão, varia de acordo com a relação água/aglomerante utilizada na confecção do concreto, uma vez que, uma menor quantidade de poros no interior do material, resultante da utilização de uma baixa relação água/cimento, produz uma matriz mais densa e, por consequência, oferece mais resistência à passagem de corrente elétrica, provocando um aumento na resistividade.

No decorrer do tempo de ensaio, também verificou-se um aumento na RES entre as idades medidas, resultante da hidratação dos compostos cimentícios e a consequente densificação do concreto.

Ao comparar os resultados de resistividade obtidos para as amostras aos 28 dias com os valores obtidos por meio do modelo utilizado por Andrade e D'Andréa (2011), adotando-se o valor de tortuosidade (τ) = 2, obteve-se uma correlação de 95,56% entre os resultados, indicando uma grande similaridade entre os resultados esperados pelo modelo e os obtidos experimentalmente. Porém, apesar desta similaridade, experimentalmente não foi observado um decréscimo linear com o aumento da relação água/cimento, como esperado pelo modelo, estando potencialmente relacionado com a adição de materiais pozolânicos na confecção do cimento CP IV, garantindo alterações no refinamento dos poros, assim como alterações no processo de hidratação.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. **Calculation of initiation and propagation periods of service-life of reinforcements by using the electrical resistivity**. In: International Symposium on Advances in Concrete through Science and Eng. RILEM Symposium. Illinois, 2004.

ANDRADE, C. **Controle de qualidade de elementos pré-fabricados, usando resistividade elétrica**. In: ICCX International Concrete Conference & Exhibition, Latin America. Florianópolis, 2014.

ANDRADE, C.; D'ANDRÉA, R. **La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y su durabilidade**. Revista ALCONPAT, v. 1, n. 2, p. 93-101, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: elaboração: referências. Rio de Janeiro, 2002a. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

COMITÉS TÉCNICOS DE NORMALIZACIÓN. **UNE 83988-2**. Durabilidad del hormigón – determinación de la resistividad – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Espanha, 2012.

GARBOCZI, E. J. **Permeability, diffusivity and microstructural parameters**: A critical review. Cement and Concrete Research, v.20, p. 591-601, 1990.

HOSSAIN, K. M. A. **Correlations between porosity, chloride diffusivity and electrical resistivity in volcanic pumice-based blended cement pastes**. Advances In Cement Research, [s.l.], v. 17, n. 1, p.29-37, jan. 2005. Thomas Telford Ltd.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho**: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. São Paulo, 1995. 280p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. L. **Durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas**. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1993, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 1993. P.13-33.

ITAMBÉ. **Relatórios de ensaios de cimento – CP-IV-32.** Disponível em: http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=370&chave=2017-10 Acesso em: 27 de fevereiro de 2018.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. et al. **Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento**. Revista Alconpat, [s.l.], v. 4, n. 2, p.116-128, 30 maio 2014. Revista ALCONPAT.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. **Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement**. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 107, p.11-16, mar. 2016. Elsevier BV.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto–Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª edição. São Paulo: Pini. 673p, 2008.

PEREIRA, Valéria Gomes Álvares. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos**: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura. 2001. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Program de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PETRY, Simone Bassan. **Estudo da permeabilidade à água na camada de cobrimento de protótipos de concretos com altos teores de cinza volante.** 2004. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SENGUL, O. **Use of electrical resistivity as an indicator for durability**. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 73, p.434-441, dez. 2014. Elsevier BV.

WINCK, M. L.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Estudo comparativo entre adições calcárias e pozolânicas sobre a penetração de cloretos em concreto armado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza: IBRACON, 2000.