ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COM CIMENTO CPII F-32: MÉTODO DE WENNER VERSUS MODELO BASEADO NAS LEIS DE ARCHIE E POWERS

T. A. OLIVEIRA
Mestranda
Universidade Federal do Paraná
Curitiba/Paraná; Brasil
tassiioliveira88@gmail.com

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

A. P. B. CAPRARO
Doutoranda
Universidade Federal do Paraná
Curitiba/Paraná; Brasil
anapcapraro@gmail.com

RESUMO

A necessidade de se estimar o quão duráveis são as estruturas de concreto quando estas estão sujeitas a ambientes agressivos gerou interesse no estudo de modelos de previsão de vida útil baseados no mecanismo de degradação atuante na estrutura. O parâmetro de resistividade elétrica para uso nos modelos é vantajoso, pela facilidade de execução do ensaio e por viabilizar o monitoramento do concreto de forma não destrutiva. Nesse estudo foram avaliados quatro traços de concreto utilizando cimento CPII F-32, com relação água/cimento variando entre 0,40 e 0,55, sendo o intervalo de 0,05. Os materiais foram analisados quanto a resistência à compressão axial, aos 28 e 56 dias, e resistividade elétrica superficial pelo método de Wenner, aos 7, 14, 28 e 56 dias. Os resultados de resistividade elétrica obtidos experimentalmente foram comparados ao modelo de estimativa baseado nas leis de Archie e Powers. Os resultados indicaram redução nos valores de resistividade elétrica superficial e de resistência mecânica na medida em que a relação água/cimento foi aumentada. Além disso, a resistividade elétrica dos concretos aumentou durante o tempo de análise. Comparando os resultados de resistividade elétrica (medido versus estimado) foi encontrada uma correlação entre os valores de 96,19%, confirmando a aplicabilidade das leis. O modelo empregado subestima os valores de resistividade elétrica em relação ao real, o que está a favor da segurança e confirma o potencial do parâmetro para projeção da vida útil de estruturas de concreto.
Palavras-chave: Resistividade elétrica. Modelo. Concreto. Durabilidade.

ABSTRACT

The need to estimate how durable are the concrete structures when are subject to aggressive environments has generated research interest related to the service life models based on the degradation mechanism that operates in the structure. The electrical resistivity for use in the models is advantageous, due to the easy implementation of the test and to enable the control of the concrete in a non-destructive testing. In this research four concrete mixtures were studied using CPII F-32 cement, with water/cement ratio varying between 0.40 and 0.55, with a range of 0.05. The specimens were analyzed for axial compressive strength (28 and 56 days) and surface electrical resistivity by Wenner method (7, 14 and 28 days). The values of electrical resistivity obtained experimentally were compared to the prediction model based on Archie and Powers laws. The results showed a reduction in both surface electrical resistivity and compressive strength as the water/cement ratio was increased. It was also observed that the electrical resistivity grew during the study. Comparing the electrical resistivity results (measured versus estimated), a correlation between values of 96.19% was found, validating the applicability of the laws. The employed model underestimates the actual

electrical resistivity of the samples, which is in favor of safety and confirms the potential of this variable in estimating the service life of concrete structures.
Keywords: Electrical resistivity. Model. Concrete. Durability.

1. INTRODUÇÃO

A degradação das estruturas de concreto, e a consequente redução de desempenho das mesmas, ocorrem pela interação desse composto com o meio no qual ele está inserido. A deterioração pode ser amenizada e/ou controlada com o uso de materiais de boa qualidade, projetos bem orientados ao uso e a exposição da edificação e medidas efetivas de manutenção.

Estudos de desenvolvimento e aplicação de modelos de vida útil de estruturas de concreto auxiliam no entendimento dos mecanismos de deterioração e do comportamento das estruturas ao longo do tempo. De acordo com Andrade (2004), os modelos que tentam prever a vida útil de uma estrutura atingida por um determinado mecanismo de degradação devem fornecer ao projetista informações suficientes para avaliar as mudanças que ocorrem ao longo do tempo, levando em consideração as características do meio ao qual a estrutura está exposta.

A utilização da resistividade elétrica do concreto como parâmetro de modelo de vida útil é ainda um tema em discussão na comunidade científica. Nesse contexto, segundo Medeiros Junior (2014), a resistividade elétrica é um parâmetro atrativo para uso na modelagem da penetração de cloretos, principalmente devido à praticidade de execução da técnica e possibilidades de repetição.

O presente artigo procurou avaliar comparativamente a resistividade elétrica superficial de diferentes traços de concreto à resistividade elétrica esperada pelo modelo baseado nas leis de Archie e Powers, proposto por Andrade e D'Andréa (2011) para análise da vida útil de concretos sujeitos a corrosão pela entrada de íons cloreto. Para isto, foram estipulados quatro traços de concreto, com a utilização do cimento Portland CP II F-32, variando a relação água/cimento em 0,55;0,50;0,45;0,40.

2. METODOLOGIA

A campanha experimental deste estudo consistiu na moldagem de corpos de prova de concreto com o intuito de ensaiá-los à resistência à compressão axial aos 28 e 56 dias de idade e à resistividade elétrica do concreto aos 7, 14, 21, 28 e 56 dias de idade.

Foram adotados quatro traços de concreto, sendo a proporção em massa de 1:2:3 e relação água/cimento variando de 0,55 a 0,4, decrescendo 0,05 em cada série. Na Tabela 1 estão relações água/cimento utilizadas no estudo, bem como o consumo de cimento de cada traço.

Tabela 1 – Traços empregados no estudo

Séries	Relação água/cimento	Consumo de cimento
Série F55	a/c = 0,55	365,8 kg/m³
Série F50	a/c = 0,50	372,6 kg/m³
Série F45	a/c = 0,45	379,7 kg/m³
Série F40	a/c = 0,40	387,0 kg/m³

O resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone dos concretos, realizado em conformidade com a NBR NM 67 (1998), foi fixado em 100±20 mm. Portanto, um aditivo superplastificante MC-PowerFlow 2150 foi utilizado na proporção de 0,5% com relação à massa de cimento dos traços. O cimento empregado no estudo foi do tipo Portland composto, com massa específica igual a 3,00 g/cm³ e com adição de fíler, classificado como CPII F-32 de acordo com a NBR 11578 (1991).

Como agregado miúdo foi empregado uma areia natural, proviniente da região de São Luiz do Purunã. Nos ensaios de caracterização, a areia apresentou massa específica igual a 2,38 g/cm³ (NBR NM 52). O agregado graúdo utilizado foi uma brita 01 proveniente da região de Curitiba, Paraná, com massa específica de 2,72 g/cm³ (NBR NM 53).

Para realização dos dois ensaios do estudo, resistência à compressão axial e resistividade elétrica do concreto, foram moldados corpos de prova cilíndricos 100x200 mm, em conformidade com a NBR 5738 (2015).
Os corpos de prova foram mantidos em cura úmida até as idades previstas nos ensaios. A cura foi realizada em uma câmera úmida, com temperatura de (22±2) ºC e umidade relativa do ar maior que 95%. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada ensaio e condição selecionada.

2.1 Resistência à compressão axial

Após 28 e 56 dias de cura úmida, para as quatro séries de concreto estudadas, foi realizado o ensaio de resistência mecânica à compressão axial em acordo com as diretrizes estabelecidas pela normatização brasileira (NBR 5739: 2007), sendo o resultado final referente a média dos valores obtidos para os corpos de prova cilíndricos ensaiados por série de concreto. O procedimento foi executado em equipamento da marca Solotest com capacidade de 100 tf.

2.2 Resistividade elétrica superficial

Aos 7, 14, 21, 28 e 56 dias de idade dos concretos foi realizado o ensaio de resistividade elétrica superficial, com o método dos quatro eletrodos de Wenner utilizando equipamento da marca Proceq com faixa de medição entre 1 e 1000 kΩ.cm.

Os corpos de prova, nas idades discriminadas acima, foram retirados da câmara úmida, levemente secados com um pano, para se alcançar a condição saturada com superfície seca, e o equipamento foi aplicado perpendicularmente às superfícies.

Como o ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos de (100x200) mm, foi aplicado um fator de forma de 0,377, valor este recomendado pela UNE 83988-2 (2012) para um equipamento com espaçamento de 50 mm entre os eletrodos. Em cada corpo de prova foram realizadas 5 leituras, a fim de se tratar estatisticamente os resultados. Para este ensaio foram consideradas válidas as leituras obtidas quando os valores individuais não diferiram da média em mais de 10%.

2.3 Resistividade elétrica pelo modelo baseado nas leis de Archie e Powers

Para comparação dos resultados obtidos experimentalmente com um modelo matemático de previsão de vida útil, foi empregado o modelo apresentado por Andrade (2004) fazendo uso da metodologia introduzida por Andrade e D'Andréa (2011). Os avanços do modelo de Andrade (2004), baseados na lei de Archie (1942) e fazendo uso da equação de Powers et. al. (1959), permitem determinar um valor esperado de resistividade elétrica para o concreto baseado em parâmetros do próprio material, conforme Equação 1.

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

Onde:
ρ = resistividade elétrica esperada, em Ω.m;
a = constante, adimensional;
ρ_0 = resistividade da solução nos poros do concreto, em Ω.m;
ε = porosidade do concreto, adimensional;
τ = conectividade e tortuosidade dos poros, adimensional.

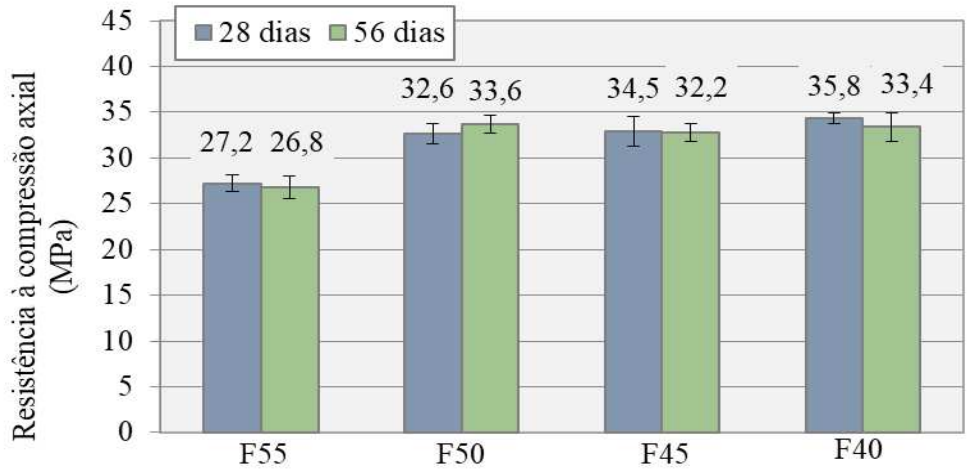
Com intuito de avaliar apenas o efeito dos diferentes traços de concreto na resistividade elétrica calculada pelo modelo, utilizando o fator de porosidade do concreto (ε), os demais parâmetros foram fixados. Sendo assim, o valor adotado para a constante (a) foi igual a 1, seguindo recomendações de Garboczi (1990). O parâmetro referente a tortuosidade e conectividade dos poros (τ) foi obtido a partir dos valores propostos por D'Andréa (2010), sendo 1,7 para o cimento CPII F-32. E o valor de resistividade da solução nos poros do concreto (ρ_0) foi mantido fixo e igual a 0,5 Ω.m, de acordo com o recomendado por Buenfeld et. al. (1986), Goñi e Andrade (1990) e reconhecido por Andrade (2014). Portanto, introduzindo ao modelo os dados de

porosidade (ε) das quatro séries de concreto estudadas, as resistividades elétricas esperadas foram determinadas, em Ω.m.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos para a resistência mecânica à compressão axial aos 28 e 56 dias, para as quatro séries estudadas, estão apresentados na Figura 1, sendo estes valores uma média dos resultados de três corpos de prova para cada série.

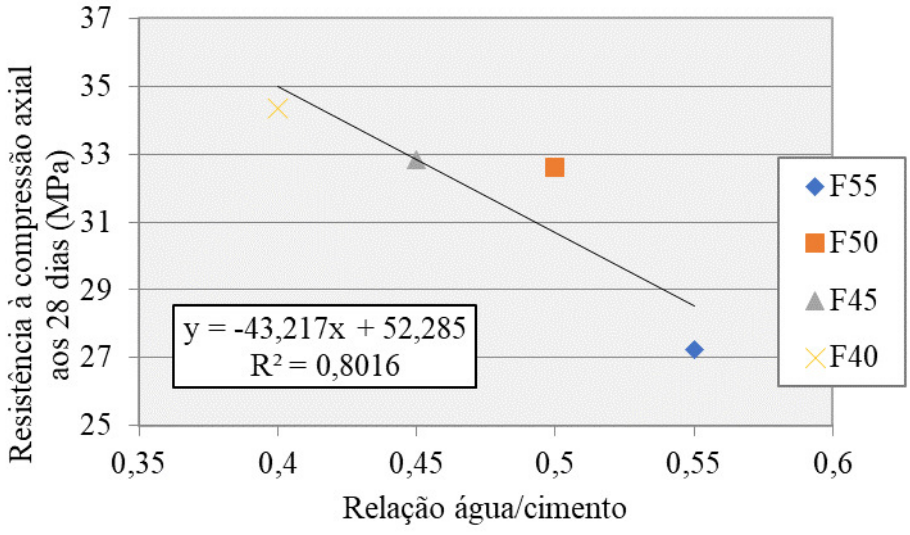
Figura 1 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 e 56 dias das séries estudadas.



Analisando os resultados aos 28 dias, nota-se o aumento da resistência à compressão axial com a redução da relação água/cimento. O resultado era esperado uma vez que ao diminuir a quantidade de água houve aumento do consumo de cimento por metro cúbico e redução dos espaços vazios presentes na pasta. Aos 56 dias não houve diferença estatística significativa para nenhuma das séries, segundo o teste de Tukey com 95% de confiança, quando feita a comparação com a idade anterior.

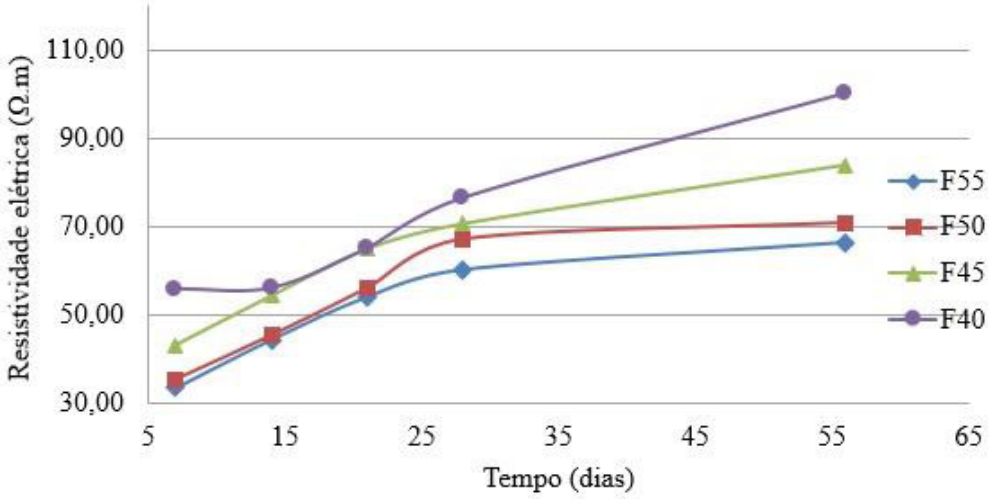
Neville (2016) apresenta um gráfico em que a resistência à compressão axial versus a relação água/cimento tem a forma aproximada de uma hipérbole. Neste estudo foi aplicada a linha de tendência linear para as resistências obtidas aos 28 dias (Figura 2), tendo um coeficiente de determinação considerável (R^2= 0,8016).

Figura 2 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias versus relação água/cimento.



Os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial realizado pelo método de Wenner com aplicação do coeficiente de fator de forma recomendado pela UNE 83988-2 (2012) de 0,377, para as quatro séries de concreto, nas idades de 7, 14, 21, 28 e 56 dias estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial, para os quatro traços de concreto estudados, nas idades de 7, 14, 21, 28 e 56 dias.



A análise dos resultados permitiu inferir que houve um aumento da resistividade elétrica superficial das amostras com o tempo de ensaio. Esse comportamento deve-se ao processo de hidratação do cimento, conforme apontado por Andrade e D'Andréa (2011), no qual o endurecimento gradativo do concreto gera uma matriz cimentícia densificada e preenchida pelos produtos das reações de hidratação, o que aumenta o parâmetro de resistividade do material no decorrer do tempo.

Simultaneamente, foi possível observar que os valores de resistividade elétrica superficial diminuíram a medida que a relação água/cimento das amostras aumentou em consonância com os resultados do ensaio de resistência à compressão. Polder (2001) apontou que a proporção de água na mistura modifica as características da microestrutura do material, o que pode alterar as propriedades elétricas do concreto. Sendo assim, quanto maior a relação água/cimento maior será o volume de poros do concreto e a permeabilidade do meio e, consequentemente, menor será a resistividade elétrica (SANTOS, 2006; LENCIONI; LIMA; 2010).

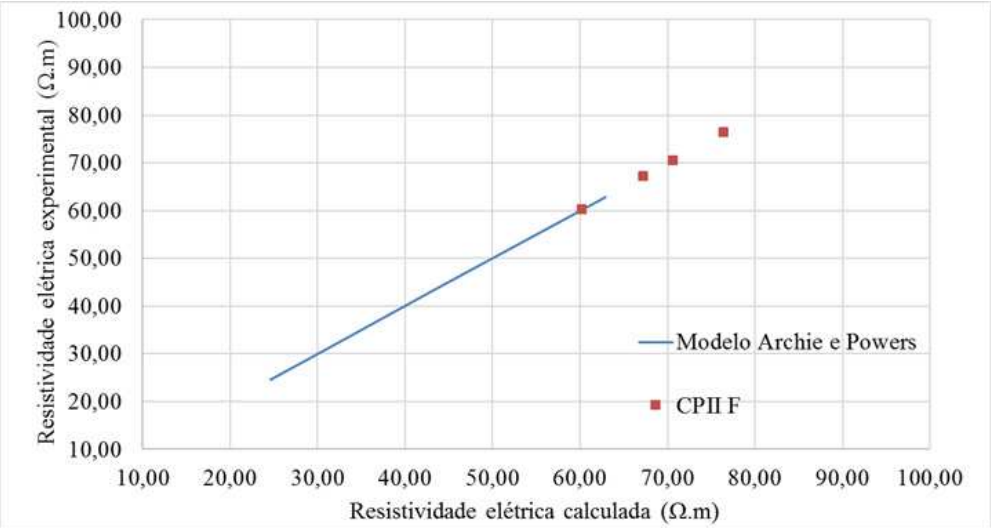
Aplicando a metodologia proposta por Andrade e D'Andréa (2011), baseada nas leis de Archie e Powers, foram encontrados os valores de resistividade elétrica apresentados na Tabela 2, sendo estes esperados para uma idade de 28 dias.

Tabela 2 – Valores de resistividade elétrica esperados pelo modelo baseado nas leis de Archie e Powers, para as quatro séries de concreto estudadas

Séries	a/c	A	ε_p (% vol.)	Vol. Pasta (m^3)	Vol. Concreto (m^3)	Vol. (pasta/conc.)	ε	ρ (Ω.m)
F55	0,55	0,101	0,317	0,00300	0,00942	0,319	0,101	24,64
F50	0,50	0,087	0,284	0,00289	0,00942	0,306	0,087	31,86
F45	0,45	0,073	0,248	0,00276	0,00942	0,293	0,073	43,27
F40	0,40	0,058	0,208	0,00342	0,01225	0,279	0,058	62,88

Na Figura 4 está disposta uma comparação entre os resultados de resistividade elétrica propostos pelo modelo das leis de Archie e Powers e os valores de resistividade elétrica superficial medidos nas amostras de concreto aos 28 dias.

Figura 4 – Resistividade elétrica medida aos 28 dias e estimada pelo modelo baseado nas leis de Archie e Powers



A comparação entre os resultados obtidos pelo ensaio de resistividade elétrica e pelo modelo resultou em uma boa correlação dos dados (R^2 = 0,96), o que corrobora com as relações encontradas por Andrade e D'Andréa (2011) para outras amostras de concreto. O valor de correlação pode ser justificado pelo tipo de cimento utilizado (CPII F) que possuí fíler em sua composição em uma porcentagem máxima de 10% (NBR 11578: 1991), o que causa menos alterações na matriz cimentícia do concreto do que em materiais dosados com cimentos que contém maiores teores de adições em sua composição, onde há um maior refinamento dos poros levando a um acréscimo nos valores de resistividade (LIU et. al., 2013; MEDEIROS-JUNIOR et. al., 2014).

Os valores calculados pelo modelo baseado nas leis de Archie e Powers são consideravelmente menores em relação aos valores adquiridos experimentalmente, sendo que a comparação mais próxima foi da série F40 (relação água/cimento de 0,40) onde os resultados divergiram cerca de 21%. Visto isso, o modelo está a favor da segurança e o parâmetro de resistividade elétrica é promissor para uso em cálculos de projeção de vida útil.

4. CONCLUSÕES

Mantendo as mesmas proporções de materiais secos, a quantidade de água presente na mistura influencia na resistência mecânica do material e na resistividade elétrica de forma similar, ou seja, a medida que a relação água/cimento foi reduzida os valores de resistência à compressão e resistividade elétrica superficial aumentaram. Além disso, os resultados do ensaio de resistividade elétrica aumentaram no decorrer do tempo de análise devido às reações de hidratação do cimento.

Na análise comparativa de resistividade elétrica entre os resultados experimentais aos 28 dias e os valores propostos pelo modelo baseado nas leis de Archie e Powers foi verificada uma correlação de R^2 = 0,96 para as duas variáveis. O modelo subestima os valores de resistividade elétrica em relação a realidade, com uma aproximação máxima de 21% na série F40 (relação água/cimento de 0,40), o que indica que esta propriedade é apropriada para auxílio na projeção de vida útil das estruturas.

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 Construção 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.

ARCHIE, G. E. **The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.** AIME Transactions, v. 146, p. 54-62, 1942.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

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

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 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. 2009.

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

BUENFELD, N. R.; NEWMAN, J. B.; PAGE, C. L. **The resistivity of mortar immersed in sea-water.** Cement and Concrete Research, v. 16, p. 511-524, 1896.

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

D'ANDRÉA, R. **Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica (in Spanish).** Tese (doutorado). Polytechnic University of Madrid, Instituto de Ciencias de la Construction Eduardo Torroja CSIC, Madrid, Spain, 2010.

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

GOÑI, S.; ANDRADE, C. **Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides.** Cement and Concrete Research, v. 20, p. 525-539, 1990.

LENCIONI, J. W.; LIMA, M. G. **Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto–Estado-da-Arte.** In: VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS. Anais… Córdoba, Argentina. 2010.

LIU, Z.; ZHANG, Y.; LIU, L.; JIANG, Q. **An analytical model for determining the relative electrical resistivity of cement paste and C–S–H gel.** Construction and Building Materials, v. 48, p. 647-655, 2013.

MEDEIROS JUNIOR, R. A. **Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos.** Tese (Doutorado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. **Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento.** Revista ALCONPAT, v. 4, n. 2, p. 116-132, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2ª Edição- Editora Bookman. Porto Alegre, 2016.

POLDER, R. B. **Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation.** Construction and Building Materials, v. 15, n. 2, p. 125-131, 2001.

POWERS, T. C; COPELAND, L. E.; MANN, H. M. **Capillary continuity or discontinuity in cement pastes.** Journal of P.C.A, Research and Development Laboratories, v. 1, n. 2, p. 38-48, 1959.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília, 2006.