

## Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana

R. A. Medeiros-Junior<sup>1\*</sup> , G. S. Munhoz<sup>1</sup> , M. H. F. Medeiros<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [medeirosjunior.ufpr@gmail.com](mailto:medeirosjunior.ufpr@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

Recepção: 16/07/2018 | Aceitação: 27/02/2019 | Publicação: 30/04/2019

Editor Associado Responsável: Dr. Pedro Garcés Terradillos

### RESUMO

Essa pesquisa confronta as seguintes propriedades do concreto: absorção de água (por imersão e capilaridade), resistividade elétrica e resistência à compressão. Concretos com dois tipos de cimento foram ensaiados. Os resultados mostraram que os concretos com maior teor de pozolana apresentam maior resistividade e absorção por capilaridade, para relação água/cimento menor que 0,60. Esse comportamento é atribuído à redução no diâmetro dos poros. No entanto, para relação água/cimento de 0,60, concretos com menor teor de pozolana apresentaram maior absorção por capilaridade. Ademais, a resistência à compressão e a resistividade elétrica são inversamente proporcionais a relação água-cimento, enquanto que a absorção por imersão e capilaridade são diretamente proporcionais a relação água/cimento. Correlações com elevados coeficientes de determinação foram encontradas entre os ensaios.

**Palavras-chave:** durabilidade; concreto; absorção; resistividade; resistência à compressão.

**Citar como:** Medeiros-Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F. (2019), “*Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana*”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 152 – 162, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

<sup>1</sup> Department of Civil Construction, Federal University of Parana - UFPR, Curitiba, Brasil.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

## **Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan**

### **ABSTRACT**

This research confronts the following concrete properties: water absorptions (by immersion and capillarity), electrical resistivity and compressive strength. Concrete mixtures with two types of cement were tested. Results showed that concretes with higher content of pozzolan had higher resistivity and greater absorption by capillarity, for water/cement ratios lower than 0,60. This behavior is attributed to reduced pore diameters and microstructure densification. However, for water/cement ratio of 0,60, concrete with lower content of pozzolan presented higher absorption by capillarity. It was observed that the compressive strength and the electrical resistivity behaved inversely proportional to the water/cement ratio, and the absorption by immersion and capillarity are directly proportional to the water/cement ratio. Correlations with high determination coefficients were found between tests.

**Keywords:** durability; concrete; absorption; resistivity; compressive strength.

## **Correlación entre la absorción de agua, la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del hormigón con diferentes contenidos de puzolana**

### **RESUMEN**

Esta investigación correlaciona las siguientes propiedades: absorción de agua (por inmersión y capilaridad), resistividad eléctrica y resistencia a compresión. Se ensayaron dos tipos de hormigones con cementos diferentes. Los resultados mostraron que los hormigones con mayor contenido de puzolanas y relación agua-cemento menor que 0,60, presentaron mayor resistividad y absorción por capilaridad. Ese comportamiento se atribuye a la reducción del diámetro de los poros. Por otro lado, en los hormigones con relación agua/cemento de 0,60, pero con menor contenido de puzolanas, también se observó un aumento de la absorción por capilaridad. Como esperado, la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica fueron inversamente proporcionales a la relación agua/cemento, en cuanto que la absorción por inmersión y capilaridad se mostraron directamente proporcionales a la relación agua/cemento. Las correlaciones encontradas entre los ensayos tuvieron altos coeficientes de determinación.

**Palabras clave:** durabilidad; hormigón; absorción; resistividad; resistencia a la compresión.

## **1. INTRODUÇÃO**

A durabilidade das estruturas de concreto tem impacto direto na economia da indústria da construção civil. Portanto, é essencial compreender os mecanismos que causam a degradação dessas estruturas. Algumas das principais variáveis que controlam os processos de degradação no concreto são a resistividade elétrica, a absorção de água e a porosidade. A resistividade elétrica pode ser correlacionada com a taxa de corrosão e seu nível de deterioração, enquanto as absorções de água (por imersão e capilaridade) podem ser diretamente relacionadas à difusividade de íons agressivos na microestrutura do concreto. Além disso, a porosidade (tamanho dos poros, conectividade e tortuosidade) é, também, um aspecto importante que pode influenciar todas essas propriedades, incluindo a resistência à compressão (Hornbostel et al., 2013; Ye et al., 2017).

Ramezaniyanpour et al. (2011) estudaram a relação entre a resistividade do concreto, a absorção de água, a penetração de cloretos e a resistência à compressão, a fim de oferecer uma melhor

compreensão sobre essas propriedades. Os autores concluíram que a resistividade, a absorção de água e a penetração de cloretos podem ser correlacionadas. Entretanto, ao contrário do esperado, a resistência à compressão não pôde expressar uma correlação clara com a resistividade elétrica, uma vez que ambos os parâmetros possuíam variáveis (como o tipo de cimento) que não foram contabilizadas nesse estudo. Portanto, o presente artigo tenta preencher essa lacuna com o estudo de cimentos com diferentes teores de pozolana.

Ainda nessa perspectiva, Andrade e D'Andrea (2011), Silva et al. (2011), Ait-Mokhtar et al. (2013) e Sengul (2014) também estudaram extensivamente essas correlações. De acordo com suas pesquisas, devido à relação existente entre a porosidade, permeabilidade, nível de saturação, resistência mecânica, penetração de cloretos e a difusividade, a resistividade elétrica pode ser muito conveniente para a previsão de vida útil dos elementos de concreto.

A influência de diferentes tipos de cimento e adições minerais nas propriedades físico-elétricas do concreto foi investigada em diversos estudos (López e Castro, 2010; Yildirim et al., 2011; Lübeck et al., 2012; Hoppe Filho et al., 2013; Medeiros-Junior e Lima, 2016). Alguns deles testaram substituições parciais de cimento por escória de alto forno, sílica ativa e cinza volante. Em geral, os autores concluíram que maiores coeficientes de resistividade elétrica e menores absorções de água foram encontrados em concretos com substituições parciais por adições minerais devido ao refinamento dos poros, que reduz a conectividade. No entanto, os efeitos ainda não são totalmente compreendidos. A cura do concreto, por exemplo, pode desempenhar um papel importante nessas relações. Presuel-Moreno et al. (2013) e Sabbag e Uyanik (2018) concluíram que o processo de cura influencia a permeabilidade do concreto, refletindo em maiores taxas de absorção de água e resistividade elétrica, e menor resistência à compressão. Segundo esses autores, melhores resultados foram encontrados quando corpos de prova foram curados imersos em água ou, ao menos, armazenados em câmara úmida.

O objetivo dessa pesquisa é investigar as possíveis correlações entre a absorção de água do concreto (por imersão e capilaridade), a resistividade elétrica e a resistência à compressão, comparando dois tipos de cimento com diferentes teores de cinza volante (12,5% e 27,0%). Portanto, esse estudo procura determinar a intensidade das correlações entre essas variáveis por meio dos coeficientes de correlação e como essas relações são afetadas pelos diferentes teores de pozolana.

Por fim, os resultados obtidos com essa pesquisa são úteis para melhor compreender a relação entre os parâmetros associados à durabilidade das estruturas de concreto e sua resistência à compressão, que é a principal variável no controle de qualidade de projetos e na construção de edifícios.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Materiais**

Nesse estudo, duas misturas com diferentes teores de pozolana foram testadas. O Traço I, composto por cimento Portland IP modificado com pozolana (12,5% de cinza volante) e o Traço II, composto por cimento Portland-pozolânico IP-MS (27,0% de cinza volante). A composição química e as propriedades físicas de ambos os cimentos estão listadas na Tabela 1. Além disso, as principais características dos agregados miúdo e graúdo são mostradas na Tabela 2. Areia natural foi utilizada como agregado miúdo, proveniente do Rio Iguazu, Porto Amazonas.

Tabela 1. Características mecânicas, físicas e químicas do cimento.

Propriedades e Características	Unidade	Traço I: Cimento Portland Modificado	Traço II: Cimento Portland Pozolânico
Teor de cinza volante	%	12,5	27,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6,22	9,77
SiO <sub>2</sub>	%	21,98	29,17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,08	3,84
CaO	%	54,46	45,04
MgO	%	3,68	2,94
SO <sub>3</sub>	%	2,54	2,27
Perda ao fogo	%	5,40	3,54
CaO livre	%	0,66	0,61
Resíduos insolúveis	%	11,04	25,62
Teor alcalino (Na <sub>2</sub> O e K <sub>2</sub> O)	%	0,85	1,15
Expansibilidade	mm	0,24	0,26
Tempo de início de pega	h:min	4:20	4:26
Tempo de fim de pega	h:min	5:06	5:11
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3.560	4.193
# 200	%	1,83	0,49
# 325	%	8,33	2,78
Resistência à compressão (1 dia)	MPa	11,8	13,0
Resistência à compressão (3 dias)	MPa	25,3	25,9
Resistência à compressão (7 dias)	MPa	32,1	32,9
Resistência à compressão (28 dias)	MPa	41,0	45,4

Tabela 2. Características dos agregados utilizados.

Características dos agregados	Unidade	Traço I		Traço II	
		Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo
<b>Tipo</b>	-	Areia natural	Brita basáltica	Areia natural	Brita granítica
<b>Dimensão Máxima Característica</b>	mm	2,36	19	2,36	19
<b>Massa específica</b>	g/cm <sup>3</sup>	2,35	2,71	2,65	2,71
<b>Absorção de água</b>	%	1,88	0,40	0,70	0,20

De acordo com Bem et al. (2018), aditivos químicos podem afetar as propriedades elétricas do concreto. Portanto, não foram utilizados nesta pesquisa. A dosagem, em massa, das misturas de concreto foi fixada em 1:1,4:2,1 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo). O consumo (kg/m<sup>3</sup>) dos materiais utilizados em cada traço é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Traços dos espécimes de concreto.

Código	Traço I			Traço II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
<b>Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	489,8	480,0	470,6	484,9	471,2	458,3	446,0
<b>Agregado miúdo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	685,7	672,0	658,8	678,9	659,7	641,5	624,4
<b>Agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1028,6	1008,0	988,2	1018,3	989,5	962,3	936,6
<b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>	195,9	240,0	282,4	203,7	226,2	247,5	267,6
<b>Relação água/cimento</b>	0,40	0,50	0,60	0,42	0,48	0,54	0,60

Os corpos de prova de concreto consistiram em amostras cilíndricas, medindo Ø100 mm x 200 mm de altura. Essa geometria foi escolhida devido aos dados tabelados do fator de correção de forma, que é necessário para determinar a resistividade elétrica. De acordo com a norma UNE 83988-2 (2014), para essa geometria, o fator é 0,377.

Os concretos foram moldados seguindo as recomendações da norma brasileira NBR 5738 (2015). Assim, 24 horas após a moldagem, as amostras foram desmoldadas e curadas em câmara úmida (umidade relativa  $\geq 95\%$  e temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) por, no mínimo, 28 dias. Finalmente, como três corpos de prova foram utilizados para cada teste realizado, os resultados discutidos nesse estudo são a média de três repetições.

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Resistividade elétrica

O ensaio não destrutivo de resistividade elétrica foi realizado de acordo com a norma europeia UNE 83988-2 (2014), que estabelece a configuração do experimento para a técnica de quatro pontos (método de Wenner). Nessa abordagem, quatro eletrodos são colocados sobre a superfície da amostra. Então, o concreto é submetido a uma corrente elétrica aplicada entre os dois eletrodos externos. Dessa forma, a diferença resultante no potencial elétrico pode ser medida pelos dois eletrodos internos. Para cada amostra foram necessárias três medidas com um ângulo de  $120^{\circ}$  de distância entre elas. Os corpos de prova estavam em condição saturada com superfície seca durante o experimento.

### 2.2.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nos mesmos corpos de prova utilizados nos experimentos de resistividade elétrica. Além disso, os procedimentos de ensaio foram seguidos conforme descrito na norma brasileira NBR 5739 (2018). Nesse contexto, as amostras foram colocadas em uma prensa hidráulica, onde foram carregadas por compressão até a ruptura. Durante o ensaio, foi utilizado um equipamento com capacidade de carga de 1000 kN, com taxa de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s.

### 2.2.3 Absorção de água por imersão

O teste de absorção de água por imersão, realizado apenas para as amostras do Traço II, obedeceu às prescrições da norma brasileira NBR 9778 (2009). O experimento teve início com a secagem das amostras em estufa ( $T=105^{\circ}\text{C}$ ), até a variação de massa ser menor que 0,10 g. Em seguida, a massa seca em estufa foi registrada. Na sequência, os corpos de prova cilíndricos foram imersos em água durante 72 horas. A imersão foi realizada de acordo com a norma brasileira: 1/3 da altura das amostras imersa nas primeiras 4 horas, 2/3 nas 4 horas subsequentes e, finalmente, a imersão total da amostra de concreto nas 64 horas restantes. Assim, a taxa de absorção de água por imersão,

em porcentagem, representa a diferença entre a massa da amostra após a imersão (72h) e sua massa seca em estufa.

### 2.2.4 Absorção de água por capilaridade

O objetivo desse procedimento é monitorar o aumento da massa das amostras devido à absorção de água por capilaridade. Dessa forma, o ensaio é iniciado com a secagem das amostras em estufa ( $T=105^{\circ}\text{C}$ ), até a variação de massa ser menor que 0,10 g, segundo a NBR 9779 (2012). Depois disso, os corpos de prova foram colocados em uma camada de água de  $(5 \pm 1)$  mm, com fundos expostos, e suas massas foram aferidas após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de exposição. Essas medidas também foram usadas para determinar a absorvidade ( $S$ ), de acordo com a Eq.1.

$$S = \frac{V_{\text{água}}}{A \times \sqrt{t}} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde,  $V_{\text{água}}$  representa o volume de água absorvida por capilaridade, em  $\text{mm}^3$ ;  $A$  representa a área da face da amostra em contato com a água, em  $\text{mm}^2$ ; e  $t$  é o período de exposição, em horas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Resistividade elétrica e resistência à compressão

A Tabela 4 mostra a resistividade elétrica e a resistência à compressão para cada traço e relação água/cimento, aos 28 dias. De acordo com a Tabela 4, quanto maior a relação água/cimento, menor a resistividade elétrica e a resistência à compressão. À medida que a relação água/cimento aumenta, a porosidade interna da microestrutura do concreto e sua conectividade também aumentam. Portanto, quanto maior a permeabilidade do concreto, menor é a resistência mecânica, assim como a resistência ao fluxo de corrente elétrica. Esse comportamento já foi constatado por vários estudos (Mehta e Monteiro, 2006; Ait-Mokhtar et al., 2013; Olsson et al., 2013).

Tabela 4. Resistividade elétrica e resistência à compressão.

Código	Traço I			Traço II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
<b>Resistividade elétrica</b> (k $\Omega$ .cm)	8,3	5,5	4,3	14,9	11,5	9,7	8,7
<b>Resistência à compressão</b> (MPa)	45,2	33,2	21,4	49,3	41,0	32,0	27,9

Medeiros-Junior e Lima (2016) e Yu et al. (2017) também relataram o aumento da relação água/cimento com o aumento da porosidade dos corpos de prova. Dessa forma, a resistência ao fluxo de corrente elétrica diminui quando mais água está presente dentro dos poros de concreto. Para garantir isso, foi realizado o teste de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP) nas amostras G0,42 e G0,54. Os resultados mostraram que a porosidade foi de 23,6% e 36,3%, respectivamente. Além disso, os diâmetros médios dos poros foram de 43,9 nm e 48,8 nm, para cada concreto testado.

O Traço II apresentou os maiores valores de resistividade e resistência à compressão entre as misturas testadas (Tabela 4). A maior quantidade de pozolana no Traço II contribuiu com o refinamento dos poros, restringindo sua conectividade. Este efeito contribuiu diretamente para a redução da permeabilidade e aumentou a resistência contra o fluxo de corrente elétrica. Resultados semelhantes foram encontrados por López e Castro (2010), Yildirim et al. (2011) e Medeiros-Junior et al. (2014). Além disso, a substituição parcial do cimento por pozolana resultou no

consumo do hidróxido de cálcio -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - em uma combinação química denominada Reação Pozolânica. Esse processo hidrata as misturas cimentícias de forma gradual e lenta, contribuindo para o aumento da resistência mecânica ao longo do tempo, conforme comprovam Medeiros-Junior e Lima (2016).

Finalmente, a fim de confirmar as diferenças observadas nos resultados obtidos para cada tipo de cimento adotado, os valores da Tabela 4 foram submetidos a um tratamento estatístico. A Análise de Variância (ANOVA) com fator único e significância de 5% demonstrou que a resistividade elétrica e a resistência à compressão foram estatisticamente diferentes para cada grupo testado.

Isto posto, um gráfico com curvas para cada traço foi criado, correlacionando a resistividade elétrica com a resistência à compressão (Figura 1). Além disso, para descrever o comportamento dessas variáveis, optou-se por uma abordagem logarítmica. Esse foi o melhor ajuste de dados, e também foi utilizado por outros estudos (Andrade e D'Andrea, 2011; Wei e Xao, 2014; Medeiros-Junior et al., 2014).

Na Figura 1, ambos os parâmetros são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a resistência à compressão, maior a resistividade elétrica. Esse comportamento também foi observado por Dinakar et al. (2007) e Lubeck et al. (2012), e está relacionado com a clara influência que a porosidade tem sobre ambas as propriedades. Além disso, a boa correlação gráfica mostrada na Figura 1 (ambos os R-quadrado acima de 0,98) reafirma essa relação.

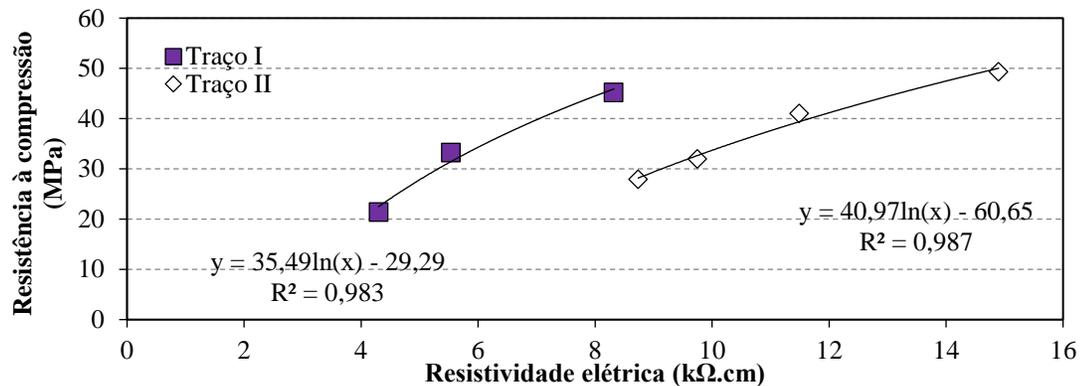


Figura 1. Correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão.

Além disso, quando ambas as misturas são comparadas com a mesma faixa de resistência à compressão, também pode ser observado que a curva de correlação para o Traço II tem uma inclinação mais suave. Isso se deve ao maior conteúdo de pozolana no Traço II, que criou uma microestrutura mais densa com maior resistividade elétrica.

### 3.2 Absorção de água por imersão

As absorções de água por imersão foram de 3,67%, 4,32%, 5,69% e 6,36% para as amostras G0,42, G0,48, G0,54 e G0,60, respectivamente. Portanto, à medida que a relação água/cimento aumentou, também aumentaram os coeficientes de absorção. Isso já havia sido observado por Zhang e Zong (2014), Castro e Ferreira (2016), Gans (2017) e Pinto et al. (2018), e se deve, principalmente, à porosidade na microestrutura do concreto e à sua permeabilidade, uma vez que ambos são parâmetros significativamente influenciados pela relação água/cimento.

Além disso, de acordo com o Comité Euro-International du Béton (CEB 192, 1989), o concreto pode ser qualitativamente classificado como bom, médio ou ruim, de acordo com o nível de absorção por imersão. A Figura 2 correlaciona os resultados obtidos por meio dos experimentos com tais níveis. Na Figura 2, enquanto as maiores relações água/cimento (0,60 e 0,54) estão associadas a um concreto de baixa qualidade, os valores mais baixos desse parâmetro (0,42 e 0,48) permitiram classificar o concreto com uma qualidade média.

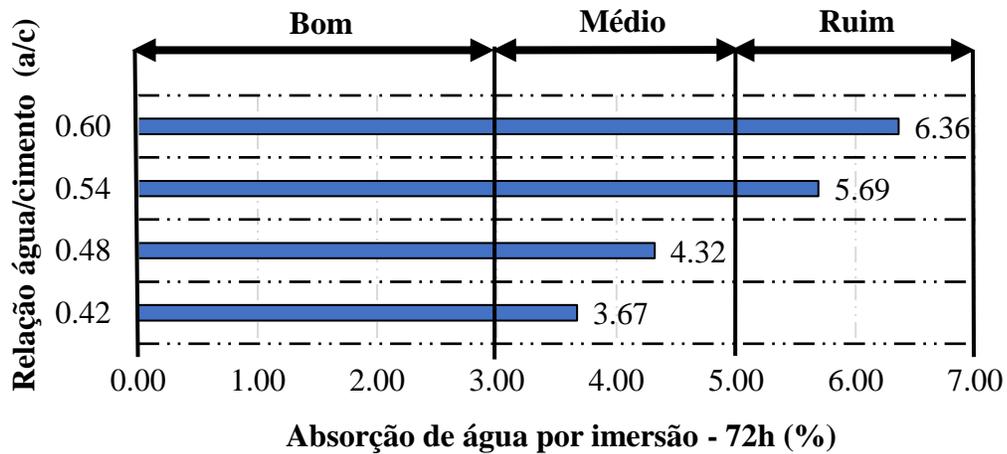


Figura 2. Absorção de água por imersão e qualidade do concreto de acordo com os critérios propostos pela CEB192 (1989).

A Figura 3 mostra a correlação entre a absorção de água por imersão e a resistividade elétrica. Similarmente à Figura 1, uma abordagem logarítmica descreveu melhor o comportamento de ambas as grandezas.

A boa correlação obtida na Figura 3 retrata o comportamento inverso entre a absorção de água por imersão e a resistividade elétrica. Assim, a água absorvida na microestrutura do concreto aumenta sua condutividade elétrica e, conseqüentemente, reduz sua resistividade elétrica. A Figura 4 correlaciona a absorção de água por imersão e a resistência à compressão, usando uma abordagem logarítmica.

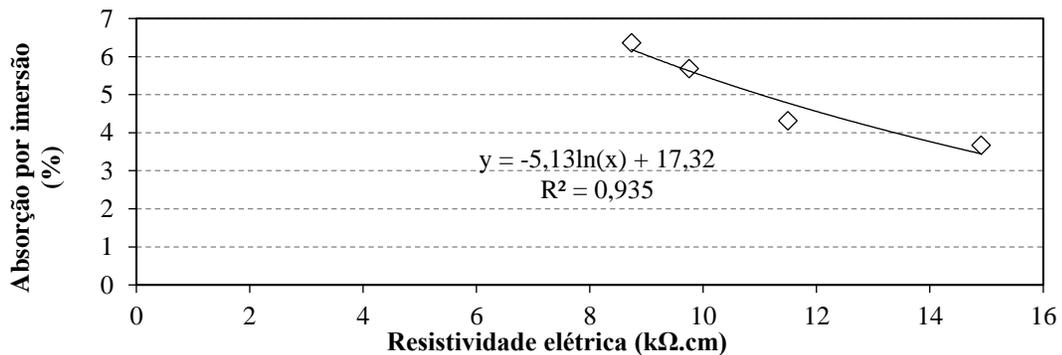


Figura 3. Correlação entre a resistividade elétrica e a absorção por imersão.

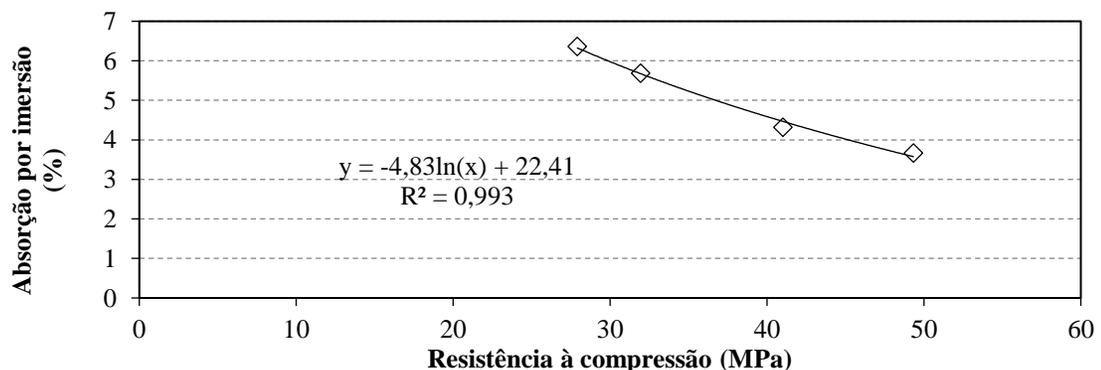


Figura 4. Correlação entre resistência à compressão e absorção por imersão.

De acordo com a Figura 4, à medida que a absorção de água por imersão aumenta, a resistência à compressão diminui. As curvas da Figura 3 e da Figura 4 têm o mesmo comportamento, pois os parâmetros que influenciam esses ensaios são semelhantes. Portanto, quanto maior a relação água/cimento, maior é a porosidade e sua conectividade. Isso implica na redução da resistência à compressão e resistividade elétrica, enquanto a absorção de água por imersão é aumentada.

Em resumo, comparando os valores de R-quadrado de ambos os gráficos (Figuras 3 e 4), pode-se notar que a absorção de água por imersão é melhor correlacionada com a resistência à compressão, do que com a resistividade elétrica. Isso pode estar relacionado com a dependência que a resistividade elétrica tem com a composição química da solução presente dentro dos poros do concreto (Ramezani-pour et al., 2011; Presuel-Moreno et al., 2013; Sabbag e Uyanik, 2018). Esse comportamento explica a baixa dispersão obtida na curva de regressão mostrada na Figura 3, embora tenha sido encontrado um alto coeficiente R-quadrado ( $R^2 = 0,935$ ).

### 3.3 Absorção de água por capilaridade

As Figuras 5 e 6 mostram a variação da água absorvida por capilaridade ao longo do tempo para os Traços I e II, respectivamente. A absorção de água por capilaridade aumentou ao longo da exposição de 72 horas, em ambas as misturas. No entanto, à medida que a amostra aproximou sua capacidade máxima de absorção, uma tendência de estabilização foi identificada. Esse comportamento pode ser observado por diferentes inclinações nas curvas ao longo do tempo. Geralmente, o aumento no nível de absorção foi maior nas primeiras 12 horas de experimento.

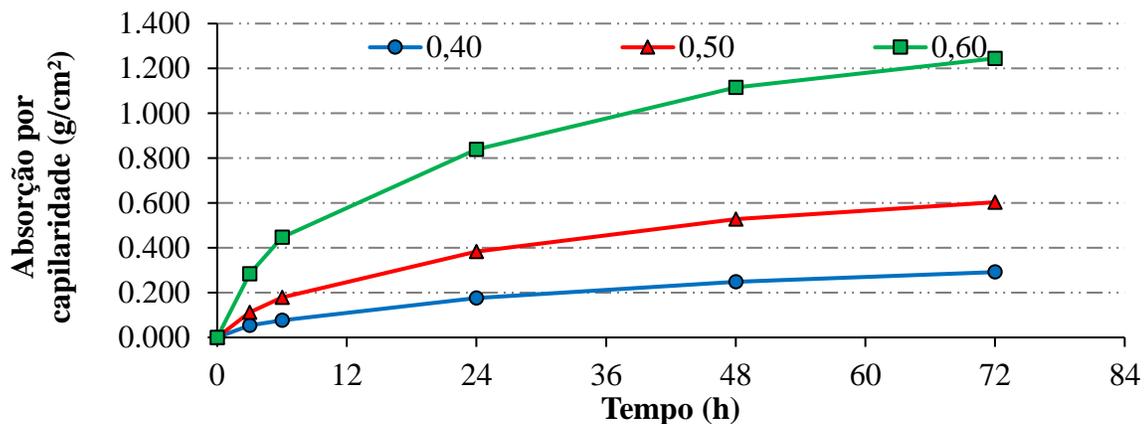


Figura 5. Absorção por capilaridade ao longo do tempo - Traço I.

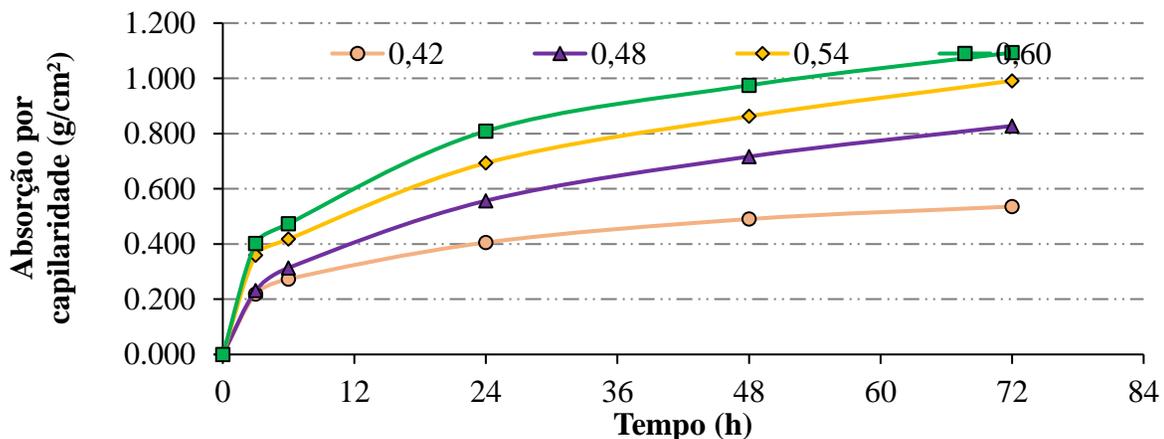


Figura 6. Absorção por capilaridade ao longo do tempo - Traço II.

Além disso, a absorção de água por capilaridade aumentou com a relação água/cimento. Dessa forma, conforme comprovado anteriormente pelo teste MIP, um concreto mais poroso contribui diretamente com a absorção e percolação da água.

Ademais, a fim de determinar a absorvidade do concreto, os resultados obtidos com a absorção pelo experimento de capilaridade foram usados na Eq. (1). A absorvidade dos corpos de prova variou de 0,034 a 0,147 g/(cm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>). A Figura 7 ilustra a correlação e a variação desse parâmetro de acordo com a relação água/cimento.

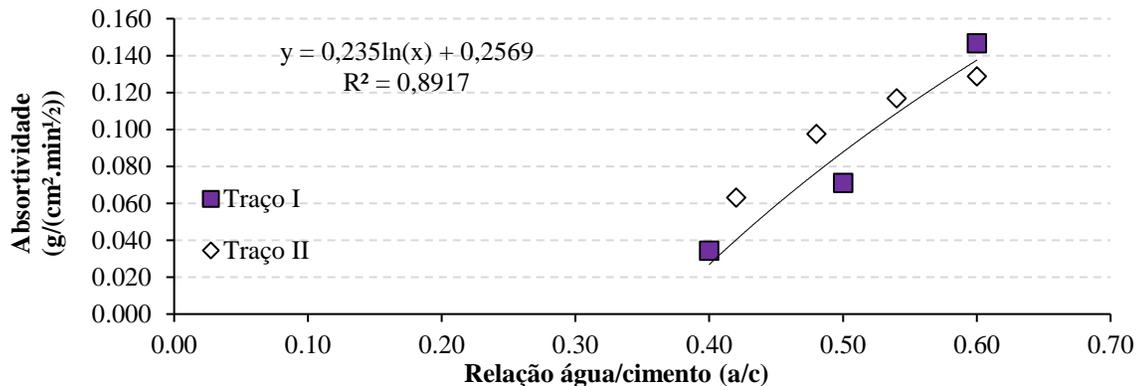


Figura 7. Variação de absorvidade com diferentes relações água/cimento.

Como mostrado na Figura 7, maiores relações água/cimento apresentaram maiores valores de absorvidade. Isso ocorreu, principalmente, devido ao aumento da porosidade. No entanto, comparando os dois traços, pode-se notar que o Traço II (com maiores quantidades de pozolana) teve coeficientes de absorção por capilaridade maiores do que o primeiro. Isso é observado visualmente nos pontos acima da linha de tendência, mostrada na Figura 7.

A principal razão para maiores coeficientes no Traço II foi o refinamento dos poros e a redução de seus diâmetros. Consequentemente, em associação com a tensão superficial da água, forças capilares mais fortes estiveram presentes e, consequentemente, mais água foi absorvida (Mehta e Monteiro, 2006; Yildirim et.al., 2011; Medeiros et.al., 2017).

Da mesma forma, Pinto et al. (2018) observaram o mesmo comportamento ao analisar a influência da carbonatação na absorção de água por capilaridade. Segundo López e Castro (2010), Chen et al. (2014) e Leung et al. (2016), quanto maior a substituição de cimento por pozolana, melhor a microestrutura se desenvolve e, portanto, menos porosa fica.

Em contrapartida, comparando os resultados da relação água/cimento igual a 0,60, observa-se que o comportamento de absorvidade foi o oposto, com o Traço I (com menor teor de pozolana) desenvolvendo coeficientes maiores. Isso também foi relatado por Olsson et al. (2013), e pode estar relacionado à tortuosidade dos poros. Nesse caso, maiores teores de substituição por pozolanas induzem a poros mais tortuosos, como observado por Medeiros-Junior e Lima (2016). Assim, apesar de suas forças capilares serem mais fortes, sua absorção pelos coeficientes de capilaridade é menor.

Em resumo, o efeito dos diâmetros reduzidos dos poros capilares associados à tensão superficial da água foi o principal responsável pelo aumento da absorção capilar em menores relações água/cimento (absorvidade do Traço II > Traço I). Por outro lado, para maiores relações água/cimento, a tortuosidade dos poros foi o principal fator que levou a menores coeficientes de absorção no Traço II.

Além disso, a absorção de água por capilaridade foi correlacionada com outras propriedades do concreto. A Figura 8 mostra a absorção capilar após 72 horas e a correlação com a resistividade elétrica. A Figura 9 apresenta o comportamento da absorção capilar versus a resistência à compressão.

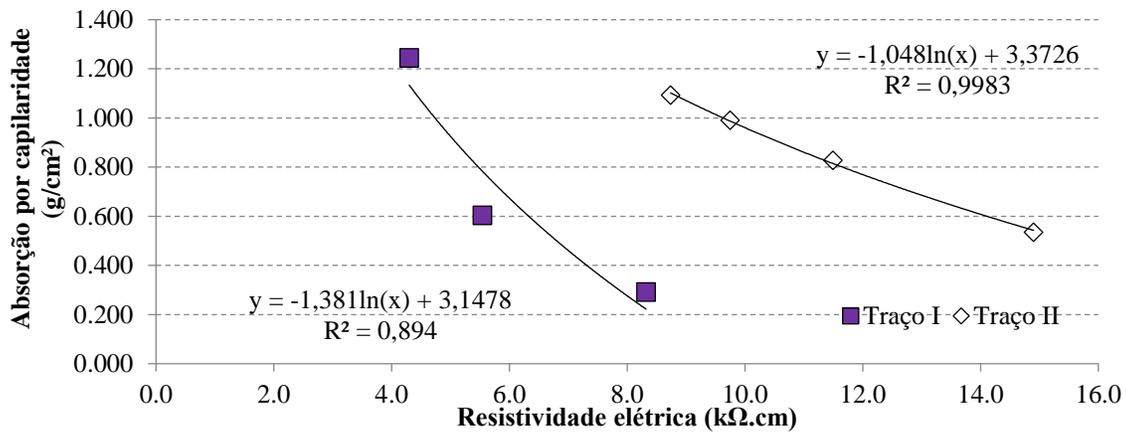


Figura 8. Correlação entre a resistividade elétrica e a absorção de água por capilaridade.

De acordo com a Figura 8, a absorção de água por capilaridade diminui à medida que a resistividade elétrica aumenta, para ambos os traços testados. Da mesma forma, de acordo com a Figura 9, a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão são parâmetros inversamente relacionados. Também foram encontrados bons coeficientes R-quadrado, o que reitera a dependência entre as duas variáveis.

Ademais, a Figura 10 mostra a correlação entre a absorção de água por imersão versus a absorção por capilaridade. Ambas as medidas de absorção estão diretamente relacionadas e, de acordo com a Figura 10, uma alta dependência pode ser identificada entre elas, consolidando a influência de ambas as propriedades na absorção e percolação de água na microestrutura do concreto.

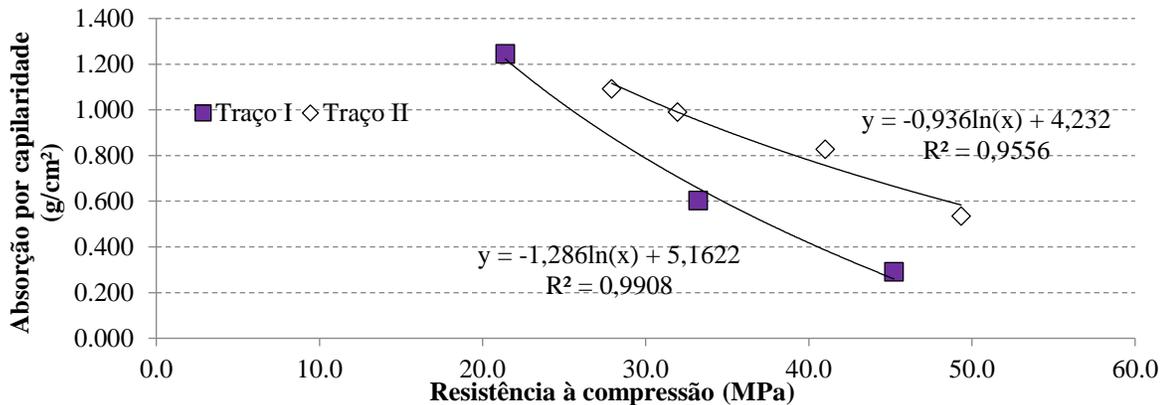


Figura 9. Correlação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade.

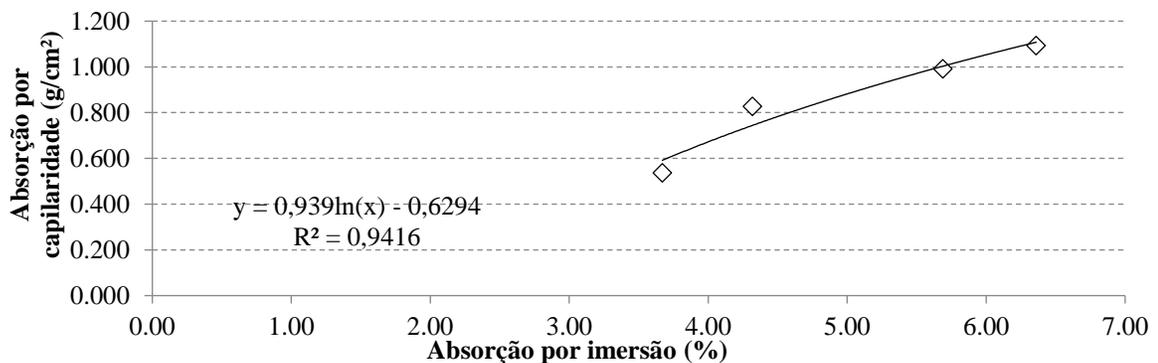


Figura 10. Correlação entre a absorção de água por imersão e por capilaridade.

Por fim, a Tabela 5 resume todas as equações de tendência logarítmica obtidas com as correlações. De acordo com a Tabela 5, a maioria dos coeficientes R-quadrado encontrados foi maior que 0,900. Isso é consequência da dependência entre todos os parâmetros estudados (resistividade elétrica, resistência à compressão, absorção de água por imersão e por capilaridade) e a porosidade do material, embora essa correlação não seja exclusiva. No entanto, as equações na Tabela 5 devem ser extrapoladas com muita cautela, pois são válidas inicialmente apenas para os materiais e considerações adotadas nesta pesquisa. Não obstante, o estudo da validação dessas equações, bem como outros materiais, é altamente encorajado.

Tabela 5. Equações de correlação dos parâmetros avaliados.

Parâmetros	Equação	Traço	R <sup>2</sup>
Resistência à compressão ( $f_c$ ) e Resistividade elétrica ( $p$ )	$f_c = 35,49\ln(p)-29,29$	I	0,983
	$f_c = 40,97\ln(p)-60,65$	II	0,987
Absorção por imersão ( $A_i$ ) e Resistividade elétrica ( $p$ )	$A_i = -5,13\ln(p)+17,32$	II	0,935
Absorção por imersão ( $A_i$ ) e Resistência à compressão ( $f_c$ )	$A_i = -4,83\ln(f_c)+22,41$	II	0,993
Absorção por capilaridade ( $A_c$ ) e Resistividade elétrica ( $p$ )	$A_c = -1,38\ln(p)+3,15$	I	0,895
	$A_c = -1,05\ln(p)+3,38$	II	0,998
Absorção por capilaridade ( $A_c$ ) e Resistência à compressão ( $f_c$ )	$A_c = -1,29\ln(f_c)+5,16$	I	0,991
	$A_c = -0,94\ln(f_c)+4,23$	II	0,956
Absorção por capilaridade ( $A_c$ ) e Absorção por imersão ( $A_i$ )	$A_c = 0,94\ln(A_i)-0,63$	II	0,942

#### 4. CONCLUSÃO

As seguintes conclusões foram obtidas com o desenvolvimento deste estudo:

- Existe uma relação de dependência entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica, que foi comprovada pelo coeficiente R-quadrado acima de 0,98 em ambos os traços. Assim, a resistividade elétrica e a resistência à compressão do concreto tendem a crescer juntas, ao menos até a idade investigada neste artigo.
- A absorção de água por imersão foi inversamente proporcional à resistência à compressão e à resistividade elétrica do concreto. Além disso, a absorção por imersão foi diretamente proporcional à relação água/cimento.
- O mesmo comportamento pode ser observado na absorção de água por capilaridade. Coeficientes de correlação superiores a 0,89 foram observados nesse caso.
- Concretos com maior teor de pozolana apresentaram maior resistividade e absorção por capilaridade, para relações água/cimento menores que 0,60. Esse comportamento é atribuído à redução dos diâmetros dos poros e à densificação da microestrutura. No entanto, concretos com menor teor de pozolana apresentaram maior absorção por capilaridade para relação água/cimento de 0,60, devido à menor tortuosidade dos poros.
- Ficou provado que a correlação entre os parâmetros deve ser utilizada separadamente para cada tipo de cimento com diferentes teores de pozolana, uma vez que as curvas de correlação foram construídas para cada um dos dois tipos de cimento utilizados nesse artigo. A única exceção foi a correlação entre a absorção e a relação água/cimento, que permitiu um ajuste entre os dois traços como um único grupo (R-quadrado = 0,89).

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo seu apoio à infraestrutura para o desenvolvimento desta pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Benboudjema, F., Burlion, N., Capra, B., Carcasses, M., Colliat, J. B., Cussigh, F., Deby, F., Jacquemot, F., Larrard, T., Lataste, J. F., Bescop, P. L., Pierre, M., Poyet, S., Rougeau, P., Rougelot, T., Sellier, A., Yanez-Godoy, H. (2013), *Experimental investigation of the variability of concrete durability properties*. Cement and Concrete Research. 45:21-36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.11.002>
- Andrade, C., D'andrea, R. (2011), *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*, Revista ALCONPAT, 1(2), 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Asociación Española de Normalización (2014). *UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner*. Madrid.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 9778: Argamassa/concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Bem, D. H., Lima, D. P. B., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of chemical admixtures on concrete's electrical resistivity*. International Journal of Building Pathology and Adaptation. 36(2):174-187. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-11-2017-0058>
- Castro, A., Ferreira, F. (2016), *Effect of particle packing in the durability of high performance concretes*. Ingeniería de Construcción. 31(2):91-104. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200003>
- Chen, C. T., Chang, J. J., Yeh, W. C. (2014), *The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete*. Construction and Building Materials. 71:35-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009>
- Comité Euro-International du Béton. (1989). *CEB Bull 192: Diagnosis and assessment of concrete structures — state of the art report*. Lausanne.
- Dinakar, P., Babu, K. G., Santhanam, M. (2007), *Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes*. Cement and Concrete Composites. 29(2):136-145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.10.005>
- Gans, P. S. (2017), *“Correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à Compressão do concreto exposto a ciclos de molhagem e Secagem com cloretos e sulfatos”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Hoppe Filho, J., Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Helene, P., Isaia, G. C. (2013), *High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(3):411-418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000596](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000596)

- Hornbostel, K., Larsen, C. K., Geiker, M. R. (2013), *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review*. Cement and Concrete Composites. 39:60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., Anwar, M. P. (2016), *Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume*. Construction and Building Materials. 113:369-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.071>
- López, M., Castro, J. T. (2010), *Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo*. Ingeniería de Construcción, 25(3):419-431. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000300006>
- Lubeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S., Siqueira, H. C. (2012), *Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag*. Cement and Concrete Composites. 34(3):392-399. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>
- Medeiros, M. H. F., Raisdorfer, J. W., Hoppe Filho, J., Medeiros-Junior, R. A. (2017), *Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2(4):1-9. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G. (2016), *Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement*. Construction and Building Materials. 107:11-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., Medeiros, M. H. F., Real, L. V. (2014), *Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento*. Revista ALCONPAT, 4(2), 113-128. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2006), *“Concrete – Microstructure, Properties and Materials”*. McGraw Hill, New York City, United States, cap. 5, pp. 121-198.
- Olsson, N., Baroghel-Bouny, V., Nilsson, L. O., Thiery, M. (2013), *Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements*. Cement and Concrete Composites. 40:40-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.001>
- Pinto, S. R., Macedo, A. L. A., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 3(3):1-10. <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0032-6>
- Presuel-Moreno, F., Wu, Y. Y., Liu, Y. (2013), *Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time*. Construction and Building Materials. 48:874-882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.094>
- Ramezaniyanpour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., Moodi, F. (2011), *Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength*. Construction and Building Materials. 25(5):2472-2479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>
- Sabbag, N., Uyanik, O. (2018), *Determination of the reinforced concrete strength by electrical resistivity depending on the curing conditions*. Journal of Applied Geophysics. 155:13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>
- Sengul, O. (2014), *Use of electrical resistivity as an indicator for durability*. Construction and Building Materials. 73:434-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>
- Silva, P. C., Ferreira, R. M., Figueiras, H. (2011). *“Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure”* in: Freitas, V. P., Corvacho, H., Lacasse, M. (Eds.), XII International Conference on Durability of Building Materials and Components, FEUP Edições, Porto: Distrito de Porto (PT), 8 p.
- Wei, X., Xao, L. (2014), *Kinetics parameters of cement hydration by electrical resistivity measurement and calorimetry*. Advances in Cement Research. 26(4):187-193. <https://doi.org/10.1680/adcr.13.00034>

- Ye, H., Jin, N., Jin, X. (2017), *An Experimental Study on Relationship among Water Sorptivity, Pore Characteristics, and Salt Concentration in Concrete*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 61:530-540. <https://doi.org/10.3311/PPci.9621>
- Yildirim, H., Ilica, T., Sengul, O. (2011), *Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration*. Construction and Building Materials. 25(3):1282-1288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.023>
- Yu, B., Liu, J., Chen, Z. (2017), *Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity*. Construction and Building Materials. 138:101-113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.100>
- Zhang, S. P., Zong, L. (2014), *Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials*. Advances in Materials Science and Engineering. 2014:1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/650373>