

# Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos

*Electrical resistivity of concrete by chloride migration test: comparison with the four-electrode method*

Laís Mariana Wosniack 

Ligia Vitória Real 

Melissa Dione Silva 

Gustavo Macioski 

Juarez Hoppe Filho 

Marcelo Henrique Farias de Medeiros 

## Resumo

Um dos principais parâmetros utilizados no monitoramento da corrosão do aço em estruturas de concreto armado é a resistividade elétrica. O objetivo deste estudo é comparar a resistividade elétrica medida pelo método dos quatro eletrodos com a que pode ser calculada mediante os resultados do ensaio de migração de cloretos, baseada nas leis de Ohm. Dessa forma, é possível validar a obtenção dessa propriedade por meio dos resultados do ensaio de migração de cloretos. Para isso, foram moldados corpos de prova de concreto com a substituição parcial do cimento Portland, no teor de 10% em massa, pelas seguintes adições pozolânicas: sílica ativa, cinza da casca do arroz, metacaulim e cinza volante. Os resultados mostraram que as adições pozolânicas influenciaram os valores de resistividade elétrica obtidos, e amostras contendo adições mais reativas atingiram resistividades elétricas superiores às do traço de referência. A comparação das técnicas indicou que os valores não foram significativamente diferentes entre si. Isso implica que a resistividade elétrica do concreto pode ser obtida de forma confiável quando se realiza o ensaio de migração de íons cloretos.

<sup>1</sup>Laís Mariana Wosniack  
<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná  
Curitiba - PR - Brasil

<sup>2</sup>Ligia Vitória Real  
<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná  
Curitiba - PR - Brasil

<sup>3</sup>Melissa Dione Silva  
<sup>3</sup>Universidade Federal do Paraná  
Curitiba - PR - Brasil

<sup>4</sup>Gustavo Macioski  
<sup>4</sup>Universidade Federal do Paraná  
Curitiba - PR - Brasil

<sup>5</sup>Juarez Hoppe Filho  
<sup>5</sup>Universidade Federal do Oeste da  
Bahia  
Barreiras - BA - Brasil

<sup>6</sup>Marcelo Henrique Farias de  
Medeiros  
<sup>6</sup>Universidade Federal do Paraná  
Curitiba - PR - Brasil

Recebido em 09/07/20  
Aceito em 16/02/21

**Palavras-chave:** Corrosão. Migração de íons. Adições pozolânicas. Concreto. Durabilidade.

## Abstract

*One of the main parameters used for the monitoring of steel corrosion in reinforced concrete structures is electrical resistivity. This study aims to compare the electrical resistivity measured by the four-electrodes method with the resistivity calculated by the chloride migration test, based on Ohm's laws. In this way, it would be possible to validate obtaining this property by chloride migration test results. For this purpose, concrete specimens were cast with the partial replacement of Portland cement, 10% by mass, by the following supplementary cementitious materials: silica, rice husk ash, metakaolin and fly ash. The results showed that the supplementary cementitious materials have an influence on the electrical resistivity values obtained, and samples containing more reactive additions reached electrical resistivities higher than the reference mix sample. A comparison of the techniques indicated that the values did not differ significantly. That implies that the electrical resistivity of concrete can be reliably obtained by performing the chloride ion migration test.*

**Keywords:** Corrosion. Ion migration. Supplementary cementitious materials. Concrete. Durability.

## Introdução

A resistividade elétrica é um dos principais parâmetros utilizados no monitoramento do desenvolvimento da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. Ela pode ser decisiva na velocidade de corrosão, pois controla o fluxo de íons que se difundem pelo concreto através da solução aquosa presente nos poros (BALESTRA *et al.*, 2020; GUDIMETTLA; CRAWFORD, 2016).

A resistividade elétrica pode ser definida como a resistência ao fluxo de corrente elétrica em um corpo (BROOMFIELD, 2007) e é uma propriedade que representa o inverso da condutividade elétrica (MEDEIROS, 2001; SALEHI; GHODS; BURKAN ISGOR, 2016). Para todos os materiais porosos, existe relação direta entre a resistividade elétrica e a difusividade iônica (AZARSA; GUPTA, 2017; LU, 1997). Portanto, trata-se de um parâmetro relacionado com a resistência do concreto à penetração de agentes agressivos tais como o dióxido de carbono e íons cloreto. Por esse motivo, a resistividade elétrica tem sido usada no desenvolvimento de modelos para a predição da vida útil de estruturas de concreto armado (ANDRADE, 2004; ANDRADE; D'ANDREA, 2011).

São diversos os fatores que podem influenciar essa propriedade, como umidade da amostra, tipo de cimento ou adição mineral, geometria da amostra, presença de barras e distância das bordas da amostra (HELENE, 1993; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014, 2016; MEDEIROS, 2001; MEDEIROS *et al.*, 2017; SENGUL, 2014; VALDES *et al.*, 2017). Concretos em zona de maré, por exemplo, podem apresentar redução de até 90% na resistividade superficial quando comparados aos de zonas atmosféricas, sem contato direto com a água (BALESTRA *et al.*, 2019), pois um aumento em 10% no grau de saturação da amostra pode causar redução de até 70% na resistividade (LI; XU; ZENG, 2016; LÓPEZ; GONZÁLEZ, 1993).

O modelo de vida útil baseado na resistividade elétrica superficial do concreto proposto por Andrade (2004) tem como parâmetros a resistividade do concreto saturado, a porosidade, a capacidade de combinação de cloretos do concreto em avaliação e as características do ambiente a que a estrutura será exposta. Os resultados do ensaio de resistividade podem ser avaliados usando os limites prescritos pelo Boletim 192 do CEB (COMITÉ... 1989), que indica o risco de corrosão de uma estrutura de concreto armado em função dos valores de resistividade obtidos. É importante ressaltar que os valores apresentados na Tabela 1, a seguir, foram determinados em ensaios laboratoriais com corpos de prova completamente saturados em água, condição normalmente não encontrada em campo.

Este trabalho tem por objetivo comparar a resistividade elétrica medida pelo método dos quatro eletrodos com a resistividade elétrica calculada por meio dos resultados do ensaio de migração de cloretos em corpos de prova de concreto diante da importância desse parâmetro na durabilidade do concreto. O intuito é validar a obtenção da resistividade elétrica determinada pela aplicação das leis de Ohm (1ª e 2ª leis) aos resultados do ensaio de migração de cloretos.

Apesar de a obtenção da resistividade a partir do ensaio de migração já ter sido realizada por outros autores (ANDRADE, 1993; HOPPE FILHO *et al.*, 2013), não foi possível encontrar na literatura nenhum trabalho que compare essa metodologia com leituras diretas de resistividade (superficial ou volumétrica). Assim, ainda há a necessidade de validação desse método e sua comparação com técnicas vigentes de resistividade, bem como da compreensão de como a presença de adições minerais de diferentes reatividades pode afetar o cálculo da resistividade mediante o ensaio de migração de cloretos.

Contudo, destaca-se que este trabalho não propõe substituir o uso do método dos quatro eletrodos, uma vez que ele é rápido e de fácil execução. Porém, a contribuição do trabalho é viabilizar a geração de uma informação adicional aos resultados do ensaio de migração de cloretos já realizado, evitando, assim, ensaios diretos de resistividade adicionais, como normalmente realizados em pesquisas.

Tabela 1 - Recomendações para avaliar o risco de corrosão nas armaduras de concreto

Resistividade do concreto (kΩ.cm)	Risco de corrosão
>20	Negligenciável
10 a 20	Baixa probabilidade
5 a 10	Alta probabilidade
< 5	Muito alta probabilidade

Fonte: adaptada de CEB (COMITÉ..., 1989).

Alguns autores defendem que a reação pozolânica é capaz de alterar significativamente a microestrutura do concreto, uma vez que adições minerais no concreto reagem com o hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação das fases silicato ( $C_3S$  e  $C_2S$ ) do cimento, formando novas fases hidratadas e melhorando a durabilidade ante muitos agentes agressivos (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013; MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017). Isso ocorre porque o produto da reação pozolânica é eficiente no preenchimento de vazios capilares, aumentando a resistência mecânica e a impermeabilidade da pasta endurecida (HOPPE FILHO *et al.*, 2017b; MEHTA; MONTEIRO, 2013). Além da alteração na microestrutura, o consumo da reserva alcalina e a consequente variação do pH do concreto é capaz de influenciar a condutividade elétrica do concreto, assim como o mecanismo de corrosão do aço (HOPPE FILHO *et al.*, 2013; MACIOSKI *et al.*, 2016). Por esse motivo, a presença de adições minerais no concreto poderia influenciar significativamente o valor da resistividade elétrica obtida durante o ensaio de migração de cloretos. Assim, é necessário verificar como adições minerais de diferentes graus de reatividade são capazes de influenciar nas leituras da resistividade elétrica obtidas pelos diferentes métodos.

## Materiais e métodos

### Caracterização dos materiais

A análise química por fluorescência de raios X do cimento Portland e das adições minerais utilizadas é apresentada na Tabela 2. Optou-se por utilizar o cimento Portland CP V-ARI devido a seu baixo teor de adição – até 5% de filler calcário em relação à massa de clínquer (ABNT, 1991). Os valores de densidade de área específica BET do cimento podem ser encontradas na Tabela 3. De acordo com a composição química das adições, é possível constatar que estas atendem aos requisitos químicos exigidos no Brasil (ABNT, 2014).

Empregou-se como agregado miúdo uma areia natural de quartzo, com massa específica de 2,63 g/cm (ABNT, 2009a), massa unitária de 1,54 g/cm (ABNT, 2006), módulo de finura de 2,34 (ABNT, 2003) e classificação de distribuição granulométrica na zona ótima (ABNT, 2009b). O agregado graúdo de origem granítica utilizado apresentou massa específica de 2,64 g/cm e absorção de 0,4% (ABNT, 2009c), massa unitária de 1,47 g/cm (ABNT, 2009c) e dimensão máxima característica de 19 mm (ABNT, 2003).

Para o ajuste da consistência dos concretos foi utilizado aditivo superplastificante de terceira geração, com composição básica de solução de policarboxilato em meio aquoso. O aditivo apresentou teor de cloretos < 0,1%, teor de álcalis < 1,0%, densidade de 1,07 ± 0,02 g/L e pH de 4,5 ± 1,0.

Além da análise química por fluorescência de raios X (Tabela 2), a caracterização das adições minerais foi realizada pelos ensaios de massa específica (ABNT, 2017), teor de hidróxido de cálcio fixado pelo método Chapelle modificado (ABNT, 2010a) e área específica BET (AMERICAN..., 2014).

O ensaio de Chapelle modificado é um método de avaliação da atividade pozolânica baseado na quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de pozolana (mg  $Ca(OH)_2/g$  pozolana). Esse método é usualmente adotado na avaliação da reatividade de adições minerais e expressa a facilidade da adição em combinar-se quimicamente com o hidróxido de cálcio (GOBBI, 2014; HOPPE FILHO *et al.*, 2017a, 2017b, 2017c). O método BET, de acordo com Odler (2003), é largamente utilizado para determinar a área superficial específica de materiais sólidos com diferentes tamanhos de partículas, pela determinação do volume de gás nitrogênio adsorvido na superfície da amostra. Os resultados desses ensaios podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 2 - Composição química do cimento e adições minerais (% de massa)

Material	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO
Cimento CP V-ARI	10,45	1,36	3,71	73,21	3,59	-	0,26	3,05	3,66
Metacaulim	45,86	-	3,90	0,14	46,05	-	2,22	1,69	-
Sílica ativa	92,49	2,76	0,13	0,51	1,91	-	-	2,08	-
Sílica de casca de arroz	88,94	4,18	0,11	1,10	2,42	0,24	-	2,08	-
Cinza volante	57,8	3,00	6,2	1,6	26,30	0,10	1,30	0,30	0,80

Tabela 3 - Caracterização físico-química do cimento e das adições minerais

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Chapelle modificado (mg/g)	Área específica BET (m <sup>2</sup> /g)
Sílica ativa	2,18	1.542	20,24
Sílica de casca de arroz	2,12	1.336	14,69
Metacaulim	2,50	1.193	23,26
Cinza volante	2,20	408	1,09
Cimento CP V-ARI	3,09	-	1,07

Adições minerais podem ser consideradas reativas (pozolanas) quando os valores de consumo de hidróxido de cálcio são superiores a 330 mg CaO/g de adição (equivalente a 436 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g de adição), conforme estabelecido por Raverdy *et al.* (1980). Para o metacaulim adota-se o valor de referência de 700 mg de Ca(OH)<sub>2</sub> consumido por grama de material para ser classificado como material pozolânico (ABNT, 2010b). Contudo, para os demais materiais pozolânicos, não há especificação de um valor mínimo de fixação (ou consumo) de hidróxido de cálcio em normativa brasileira para que um material possa ser considerado uma pozolana.

Isso posto, as adições de sílica ativa, sílica de casca de arroz e metacaulim podem ser consideradas pozolanas reativas (MEDEIROS *et al.*, 2015; MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017). A cinza volante não apresentou reatividade suficiente no ensaio Chapelle modificado (408 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g de adição) para a classificação como adição mineral pozolânica, o que pode estar relacionado com sua baixa área específica BET.

### Preparo das amostras

A relação água-aglomerante (a/a) dos concretos foi determinada considerando a condição mais agressiva de exposição – Classe IV (ABNT, 2015). Assim, fixou-se a relação a/a em 0,45, consumo mínimo de cimento de 360 kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão mínima de 40 MPa. Foram moldados corpos de prova de concreto com diferentes proporções de mistura, conforme apresentado na Tabela 4, respeitando-se as seguintes nomenclaturas:

- TCPV: referência, composto por cimento (CP V-ARI) sem adições;
- TSA: substituição de 10%, em massa, de cimento por sílica ativa (SA);
- TSCA: substituição de 10%, em massa, de cimento por sílica de casca de arroz (SA);
- TM: substituição de 10%, em massa, de cimento por metacaulim (M); e
- TCV: substituição de 10%, em massa, de cimento por cinza volante (CV).

A quantidade de aditivo superplastificante foi ajustada de forma a manter a trabalhabilidade constante para todos os concretos e padronizar o adensamento. O abatimento de tronco de cone (*slump test*) de todos os concretos foi igual a 130±30 mm (ABNT, 1998).

### Resistividade elétrica

O método dos quatro eletrodos e o ensaio de migração de cloretos foram usados para a determinação da resistividade elétrica. A Tabela 5 mostra as principais características dos dois procedimentos.

### Ensaio de resistividade pelo método dos quatro eletrodos

O método Wenner, dos quatro pontos ou dos quatro eletrodos, é a técnica mais conhecida e empregada para a obtenção da resistividade elétrica superficial do concreto (ANDRADE; D'ANDREA, 2011; CHU; CHEN, 2016; LÜBECK *et al.*, 2012; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014; SALEHI; GHODS; BURKAN ISGOR, 2016). Na geofísica, essa técnica é largamente utilizada para a medida da eletrorresistividade de grandes volumes de solo e pode ser aplicada em diferentes configurações (variação dos espaçamentos entre eletrodos), como previsto pela NBR 7117 (ABNT, 2012a).

A técnica pode ser realizada com a aplicação de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA) de baixa frequência (menores de 200 Hz), visando garantir o acoplamento entre os condutores. O uso de um sinal sinusoidal, como CA, apresenta a vantagem de evitar a ocorrência de reações químicas de oxidação e

de deposição de metais na superfície da sonda. Portanto, variações nas leituras podem ocorrer quando utilizada CC no ensaio por um longo período (MANFRIN; PEROTONI; PAIVA, 2018; THOMAS *et al.*, 2018).

O ensaio consiste em posicionar quatro eletrodos em contato direto com a superfície do concreto, preferencialmente saturada, visando eliminar a interferência da variação da umidade nas leituras realizadas, conforme proposto pelas normativas vigentes. No ensaio, uma corrente é aplicada entre os dois eletrodos externos, e, conseqüentemente, uma voltagem é captada pelos eletrodos internos, como apresentado na Figura 1.

A resistividade elétrica é medida mediante a leitura de uma corrente elétrica gerada pela diferença de potencial (ddp) entre eletrodos posicionados sobre a superfície do concreto (SANTOS, 2006). Para o ensaio em amostras cúbicas com eletrodos equidistantes, ela pode ser calculada pela Equação 1 (LENCIONI, 2011; MEDEIROS, 2001):

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad \text{Eq. 1}$$

Na qual:

$\rho$ : resistividade elétrica superficial ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$a$ : distância entre eletrodos (cm);

$R$ : resistência elétrica aparente ( $\Omega$ );

$V$ : diferença de potencial (V); e

$I$ : intensidade de corrente (A).

Para o ensaio de resistividade elétrica foram moldados corpos de prova cúbicos de aresta igual a 250 mm, tendo como base as recomendações dos estudos de Gowers e Millard (1999), Lencioni e Lima (2010) e Medeiros (2001). Segundo esses autores, nessas dimensões a geometria da peça não influencia nas medições, pois se simula um meio semi-infinito. Dessa forma, não foi preciso utilizar a correção do fator de forma proposto pela UNE 83988-2 (ASOCIACIÓN..., 2014a). A Figura 2 apresenta um dos corpos de prova cúbicos e a realização do ensaio de resistividade elétrica por meio do método de quatro eletrodos.

Tabela 4 - Proporções de mistura unitárias, em massa, dos concretos

Traço	CPV	SA	SCA	M	CV	Areia	Brita	a/a
TCPV	1,00	-	-	-	-	2,25	3,00	0,45
TSA	0,90	0,10	-	-	-			
TSCA	0,90	-	0,10	-	-			
TM	0,90	-	-	0,10	-			
TCV	0,90	-	-	-	0,10			

Tabela 5 - Características das amostras utilizadas nos ensaios

Ensaio	Normativa de referência	Idade (dias)	Quantidade de amostras	Dimensões (cm)
Método dos quatro eletrodos	UNE 83988-2 (ASOCIACIÓN..., 2014a)	28	5	25x25x25
Migração de cloretos	C1202 (AMERICAN..., 2019a) modificado para 30V	28	4	Ø10x20 (fatias de Ø10x5)

Figura 1 - Esquema do ensaio de quatro pontos para medir resistividade

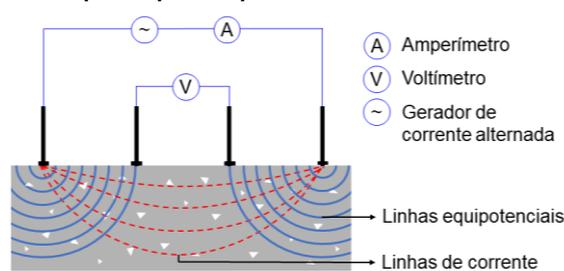


Figura 2 - Ensaio de resistividade elétrica



(a) Corpo de prova cúbico



(b) Realização do ensaio dos quatro elementos

O experimento foi realizado com espaçamento entre eletrodos equivalente a 50 mm. O equipamento utilizado (Resipod, Proceq) tem frequência de 40 Hz e corrente entre 10  $\mu\text{A}$  e 200  $\mu\text{A}$ . As leituras foram realizadas em cada uma das faces laterais dos cubos, gerando 6 leituras para cada um dos 5 corpos de prova.

As amostras foram desformadas com 1 dia de idade e permaneceram em câmara úmida até o momento das leituras, aos 28 dias de idade. Dessa forma, todas as medições de resistividade elétrica foram realizadas com o concreto saturado, logo após a remoção da câmara ainda com a superfície molhada, respeitando-se as recomendações das normas espanhola UNE 83988-2 (ASOCIACIÓN..., 2014a) e americana AASHTO T358 (AMERICAN..., 2019b).

### Ensaio de migração de cloretos modificado

O ensaio de resistividade elétrica é governado pelo mecanismo de transporte por migração iônica, logo a compactidade da microestrutura da pasta é a principal causa da obstrução à passagem da corrente elétrica (ISAIA *et al.*, 2017). Além disso, Meira e Ferreira (2019) colocam o ensaio de migração de cloretos como um caminho para testar o concreto com relação à resistência ao desenvolvimento da corrosão de armaduras por ataque por cloretos. Com base no trabalho de Medeiros, Hoppe Filho e Helene (2009), que comprova que a retirada de três fatias de um mesmo corpo de prova cilíndrico ( $\text{Ø}10 \times 20$  cm) não compromete a precisão dos resultados, foram extraídas duas fatias centrais de cada corpo de prova, ao contrário da prática de muitos pesquisadores que utilizam apenas uma fatia central.

Conforme as recomendações de preparo de amostras da C1202 (AMERICAN..., 2019a), as laterais das fatias foram revestidas com silicone e passaram por um processo de saturação, utilizando vácuo e imersão. O procedimento consistiu em colocar todas as fatias em um dessecador conectado a uma bomba de vácuo, que permaneceu ligada por 3 h, preencher o recipiente até cobrir totalmente as fatias com água destilada, ligar a bomba de vácuo por 1 h, desligar a bomba de vácuo e deixar o recipiente em repouso por  $18 \pm 2$  h (MEDEIROS; HELENE, 2009). A Figura 3 apresenta etapas do processo de preparo dos corpos de prova para o ensaio de migração.

Posteriormente, cada fatia foi colocada entre pares de células de acrílico, que foram seladas com silicone e conectadas a eletrodos de cobre (Figura 4a). Uma célula foi preenchida com 300 ml de solução aquosa de 3% de NaCl, e a outra com 300 ml de solução aquosa de 0,3 N de NaOH (Figura 4b). A ligação elétrica de cada célula foi baseada no princípio de atração dos polos contrários, em que o polo positivo atrai os íons cloreto (negativos). Assim sendo, o polo negativo foi ligado à célula com solução aquosa de NaCl, e o polo positivo foi ligado à célula com solução aquosa de NaOH, como apresentado na Figura 4b.

As células ligadas em paralelo foram conectadas a uma fonte de tensão contínua, que aplicou uma diferença de potencial (ddp) de 30 V por 12 h, sendo a corrente elétrica circulante em cada um dos corpos de prova monitorada em intervalos preestabelecidos, seguindo as recomendações de Luping e Nilsson (1993). Esses autores, em conjunto com Medeiros *et al.* (2013), defendem que a ddp de 60 V prescrita no ensaio da C1202 (AMERICAN..., 2019a) deve ser reduzida para 30 V para diminuir qualquer interferência na condutividade iônica em decorrência do calor gerado pela passagem da corrente elétrica no eletrólito.

Figura 3 - Processo de saturação das fatias de concreto para o ensaio de resistência à penetração de cloretos por migração

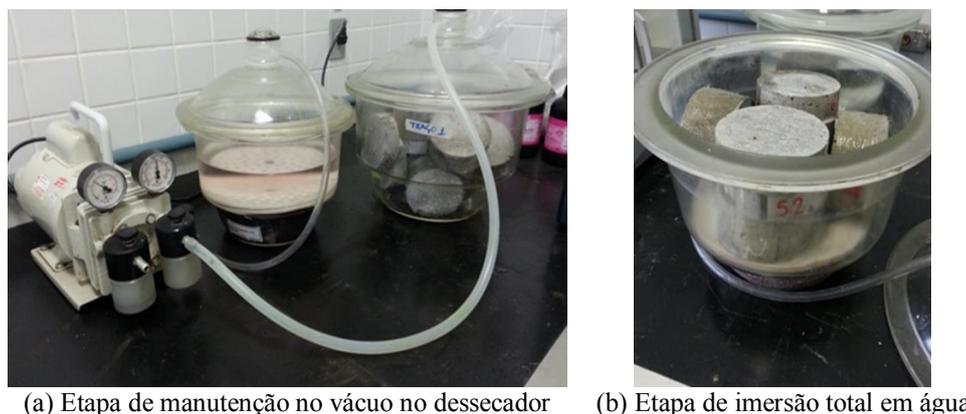
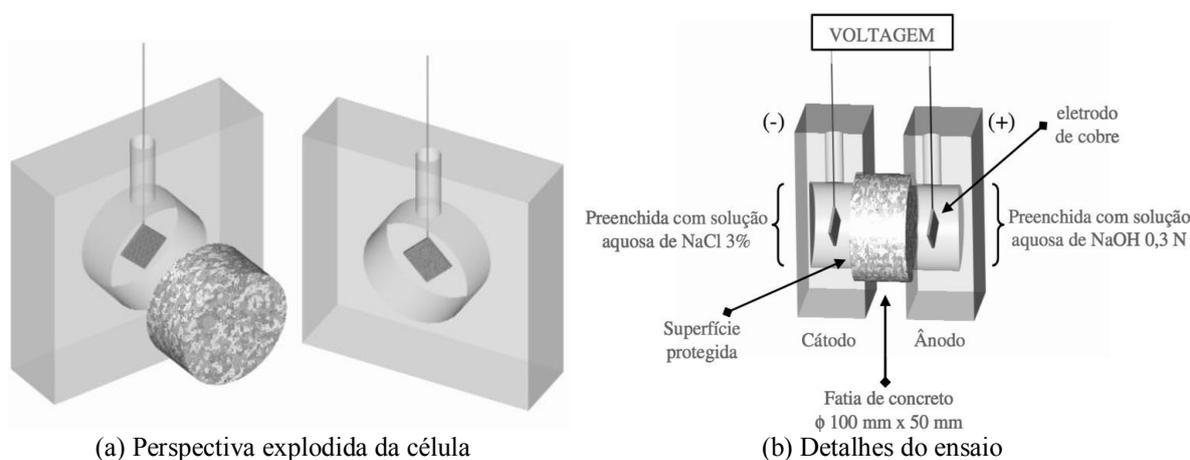


Figura 4 - Arranjo experimental da célula do ensaio de migração de íons cloro



Fonte: Medeiros, Hoppe Filho e Helene (2009).

Alguns autores sugerem a realização do ensaio com voltagens entre 10 V e 15 V (ANDRADE, 1993; MCGRATH; HOOTON, 1996; SPIESZ; BROUWERS, 2012), enquanto normativas de ensaios de migração de cloretos em estado estacionário, como a UNE 83987 (ASOCIACIÓN..., 2014b), sugerem o uso de uma ddp de 12 V. Baixa tensão evita o problema de aquecimento da amostra, mas geralmente aumenta a duração do ensaio. Assim, para concretos de alto desempenho, o tempo de ensaio precisa ser ampliado para até 8 semanas devido à menor velocidade de ingresso de íons (GUIGNONE *et al.*, 2019). As células do ensaio de migração de cloretos ligadas em paralelo podem ser observadas na Figura 5.

O ensaio de migração de cloretos fornece valores de corrente passante medidas a cada 30 min. Seguindo a proposição do trabalho de Hoppe Filho *et al.* (2013), essas medições de corrente passante podem ser utilizadas para calcular a resistividade elétrica do concreto mediante a Equação 2:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{L} \quad \text{Eq. 2}$$

Na qual:

$\rho$ : resistividade elétrica calculada ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$R$ : resistência elétrica do circuito ( $\Omega$ );

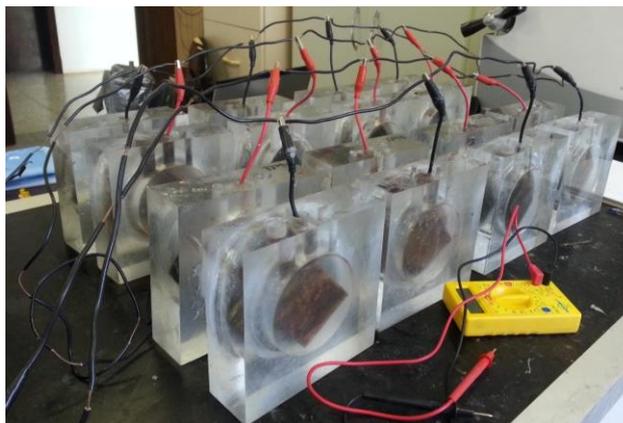
$S$ : área da seção transversal da fatia ( $\text{cm}^2$ );

$L$ : comprimento da fatia (cm);

$V$ : diferença de potencial (V); e

$I$ : intensidade de corrente (A).

Figura 5 - Células do ensaio de migração de cloretos ligadas em paralelo



Portanto, a resistência elétrica aparente do circuito foi determinada pela razão entre a diferença de potencial e a corrente passante. Apesar de o ensaio de migração de cloretos durar 12 h, foram utilizados apenas os valores de corrente passante medidos nas últimas 6 h do ensaio. Dessa forma, utilizam-se na aplicação da 1ª lei de Ohm ( $V = R.i$ ) resultados estabilizados de corrente elétrica circulante nos corpos de prova dos diferentes concretos. A área transversal da seção corresponde ao diâmetro médio (10 cm) e o comprimento da fatia equivalem a sua espessura (5 cm).

Considerando que o método de ensaio é baseado na aplicação de uma diferença de potencial entre duas superfícies e que a resistência ao fluxo de elétrons ocorre em toda a seção da amostra, os resultados de resistividade obtidos com o ensaio de migração de cloretos pela Equação 2 podem ser considerados equivalentes ao do ensaio de resistividade elétrica volumétrica proposto pela NBR 9204 (ABNT, 2012b), dada a equivalência do arranjo experimental e do cálculo efetuado (ANDRADE, 1993; HOPPE FILHO *et al.*, 2013).

## Tratamento de dados

Inicialmente foi utilizado o critério de Chauvenet para a identificação e posterior remoção dos dados espúrios entre os dados coletados (OLIVEIRA, 2008). Esse critério foi aplicado sobre os valores obtidos de cada corpo de prova.

Após a remoção dos dados espúrios foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk (S-W) com fator de confiança de 95%, para verificar se os dados se enquadravam em uma distribuição gaussiana normal (GHASEMI; ZAHEDIASL, 2012). Para o ensaio dos quatro eletrodos, foram reunidos os dados coletados de todas as amostras de um mesmo traço para formar um grupo de dados, e em cada grupo foi aplicado o teste S-W. Quanto aos valores do ensaio de migração de cloretos, foi aplicado o teste S-W sobre os valores de cada amostra de maneira individual. Essa diferença no tratamento de dados decorre de os resultados do ensaio dos quatro eletrodos serem coletados de maneira separada para cada corpo de prova, enquanto no ensaio de migração de cloretos havia pares de amostras que foram extraídas de um mesmo corpo de prova, além do fato de que os cálculos de resistividade dependiam de fatores individuais das amostras, como a espessura da fatia.

Pelo teorema do limite central, a distribuição amostral das médias é aproximadamente normal se houver mais de 30 amostras (MCCLAVE; SINCICH, 2012), portanto toda a análise estatística do trabalho se baseou na distribuição gaussiana das amostras. Contudo, a eliminação de dados fora da distribuição implica maior consistência na comparação de médias e na consequente análise dos dados. Assim, nos casos em que o teste S-W indicou que os dados se encontravam fora da distribuição normal, houve o descarte desses valores, pois houve indícios de que ocorreram problemas na coleta de dados ou durante a fase de tabulação dos números.

Posteriormente, foram calculadas as médias simples e o desvio padrão das médias para cada traço de ambos os ensaios. Finalmente, a comparação entre as médias resultantes de cada traço obtida pela resistividade elétrica medida com os quatro eletrodos e pela resistividade elétrica calculada pelo ensaio de migração de cloretos foi realizada através dos testes de análise de variância (ANOVA) e comparação múltipla de médias por Tukey. Por fim, o teste de hipóteses e o índice de regressão linear são utilizados para comparação dos métodos avaliados.

## Resutados e discussões

### Resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos

Sendo 5 corpos de prova cúbicos para cada traço, no total foram obtidas 30 leituras de resistividade elétrica aos 28 dias por traço. A aplicação do tratamento dos dados com o critério de Chauvenet indicou a presença de um dado espúrio dentro de cada traço, ou seja, houve apenas uma leitura dentro de uma das amostras de cada traço que apresentou valor destoante. Após a remoção desses dados, foram recalculadas as respectivas médias e erros associados. A Tabela 6 apresenta os valores médios da resistividade elétrica, com 95% de confiança sobre os dados, em que aparecem os valores das médias e a quantidade de dados utilizados para os dados brutos e os obtidos após a aplicação do critério de Chauvenet.

Pode-se observar na Tabela 6 que houve diminuição no erro associado para cada medição, tornando a amostragem mais homogênea. Na sequência, foi aplicado o teste S-W com 95% de confiança sobre os dados, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.

Quando o teste S-W apresenta significância superior a 0,05, pode-se dizer que a distribuição é normal. Com os resultados apresentados na Tabela 7, observa-se que todos os traços apresentaram distribuição normal. Utilizando os valores das médias após a eliminação dos dados espúrios, foi elaborada a Figura 6, que apresenta os valores das médias da resistividade elétrica medida aos 28 dias pelo método dos quatro eletrodos.

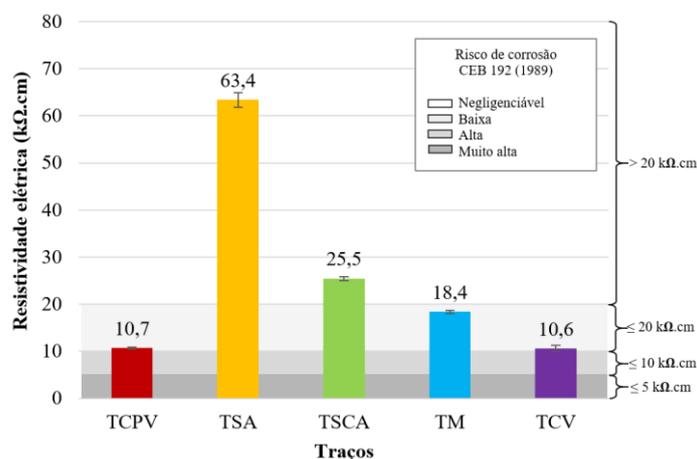
Tabela 6 - Resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos, antes e depois do tratamento de dados espúrios

	Traços	TCPV	TSA	TSCA	TM	TCV
Antes do tratamento	Resistividade (k $\Omega$ .cm)	10,71±0,21	63,59±1,63	25,57±0,43	18,43±0,34	10,74±0,70
	Amostras	30	30	30	30	30
Após o tratamento	Resistividade (k $\Omega$ .cm)	10,68±0,20	63,37±1,59	25,45±0,37	18,38±0,33	10,59±0,64
	Amostras	29	29	29	29	29

Tabela 7 - Teste de normalidade do ensaio de quatro eletrodos

Traços	Significância S-W
TCPV	0,9326
TSA	0,7006
TSCA	0,4808
TM	0,1929
TCV	0,2068

Figura 6 - Resistividade elétrica dos concretos medida aos 28 dias de cura úmida pelo método dos quatro eletrodos



Analisando a Figura 6 e associando as medições com os limites sugeridos pelo CEB (COMITÉ..., 1989), pode-se verificar que os traços de TSA e TSCA desenvolveram as maiores resistividades elétricas e se enquadram na faixa negligenciável de risco de corrosão aos 28 dias. Os demais traços se situam na faixa de baixo risco de corrosão, com destaque para o traço TM, que está muito próximo de atingir 20 kΩ.cm, que é o limite para alcançar a faixa de probabilidade negligenciável de desenvolver a corrosão.

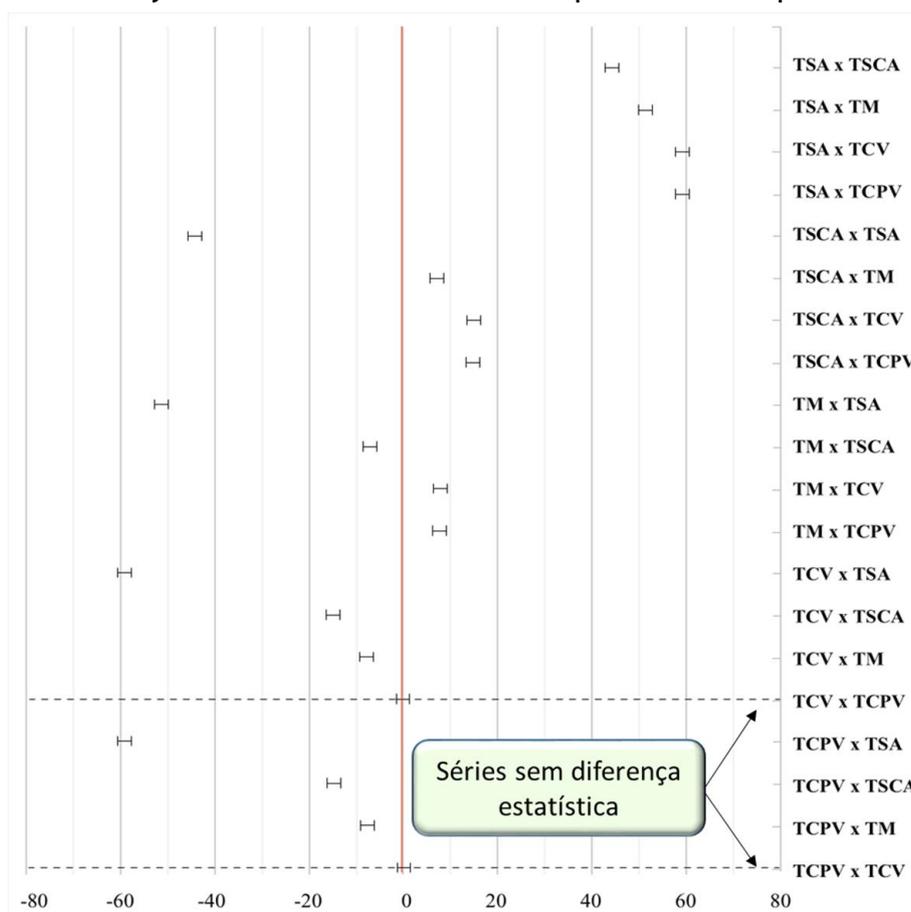
Ao utilizar a análise de variância (ANOVA) sobre os valores das resistividades dos traços (Tabela 8), foi possível verificar com 95% de confiança que existe pelo menos um contraste significativo entre as médias dos traços ( $F > F_{crit}$ ).

O próximo passo foi aplicar o teste de Tukey para verificar a ocorrência de pares de traços que não fossem significativamente diferentes entre si. O resultado é apresentado na Figura 7, em que foram destacados os casos nos quais os valores apresentaram semelhança (séries que cruzam o eixo de origem).

Tabela 8 - ANOVA entre resistividades elétricas medidas nos diferentes concretos

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	F	F <sub>crit</sub>
Entre os grupos	55.868,351	4,000	13.967,088	2.976,272	2,436
Dentro dos grupos	656,994	140,000	4,693		
Total	56.525,344	144,000			

Figura 7 - Teste de Tukey sobre resistividade elétrica medida pelo método dos quatro eletrodos



Desse modo, observando a Figura 7, os valores da resistividade elétrica dos traços TCV e TCPV não foram significativamente diferentes entre si. Esse resultado sugere que a utilização de 10% de cinza volante no TCV não interfere na resistividade elétrica quando comparado ao concreto de referência (TCPV). Esse comportamento pode ser explicado pelo diâmetro elevado da adição mineral, que não foi capaz de preencher os vazios entre os grãos de cimento (efeito filer), tendo em vista a similaridade das áreas específicas BET do cimento e da cinza volante apresentadas na Tabela 3. Destaca-se ainda que a adição apresentou baixa reatividade (que impediu sua classificação como pozolana) e, por consequência, limitou a formação de novas fases hidratadas e o refinamento de poros, impedindo um aumento significativo na reatividade do traço. Destaca-se que isso é válido para 28 dias de idade e para a cinza volante de baixa reatividade usada neste trabalho. Balestra *et al.* (2020) observaram valores de resistividade elétrica em estruturas de concreto convencional em ambiente marinho que variaram de 1,3 k $\Omega$ .cm a 36,2 k $\Omega$ .cm, valores próximos aos obtidos neste estudo.

Isaia *et al.* (2017) observaram que a adição de cinza de casca de arroz moída promoveu aumento de 40% a 89% na resistividade elétrica superficial. Já Ghosh e Tran (2015) observaram que 7% a 10% de substituição do cimento por metacaulim e sílica ativa em misturas ternárias com 20% de cinzas volantes ou 35% de escória proporcionam uma solução ótima para alcançar valores de resistividade superficial elevada. Elahi *et al.* (2010), por sua vez, afirmaram que misturas binárias e ternárias de cimento Portland mostraram aumento da resistividade de 3 a 13 vezes em relação ao concreto sem adições.

Dessa forma, os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, uma vez que as adições de metacaulim, cinza da casca de arroz e sílica ativa apresentaram aumento na resistividade elétrica de 73%, 139% e 495% respectivamente em comparação com a referência (TCPV). Esses resultados são coerentes com os dados do ensaio de determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado, pois as adições mais reativas desenvolveram as resistividades elétricas mais altas. Esse fator está associado ao refinamento e à melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, o que certamente contribuiu para torná-la mais densa e, consequentemente, dificultar a passagem da corrente elétrica. Além disso, a redução da portlandita, consumida na reação pozolânica, tende a reduzir a condutividade da água dentro dos poros do concreto. Esses argumentos indicam que a capacidade de fixar cal das adições pozolânicas é um fator de influência na resistividade elétrica do concreto.

## Resistividade elétrica pelo ensaio de migração de cloretos

Conforme mostrado na Equação 2, são necessários os valores de corrente elétrica passante, diferença de potencial, área e espessura da peça avaliada para realizar o cálculo da resistividade elétrica. Considerando 4 amostras por proporção de mistura e intervalo de 30 min por leitura de corrente passante, nas últimas 6 h de ensaio foram obtidas 12 leituras por amostra e 48 leituras por traço. Inicialmente, foi aplicada a Equação 2 sobre todas as leituras de corrente passante das últimas 6 h do ensaio e, dessa forma, obtiveram-se as resistividades calculadas para todas as amostras de cada uma das proporções de mistura. Na sequência, foram calculadas as médias e desvios padrão para cada proporção de mistura.

A análise da presença de dados espúrios foi realizada com o critério de Chauvenet, aplicado sobre os valores de resistividade calculada de cada amostra. A utilização desse critério indicou a presença de um dado espúrio dentro das amostras dos traços TSA e TCV, e dois dados espúrios nas amostras dos demais traços. Após a remoção desses dados, foi aplicado o teste S-W sobre cada amostra, cujos resultados são apresentados na Tabela 9 em conjunto com as respectivas médias de cada amostra.

Pode-se observar na Tabela 9 que algumas amostras não passaram no teste S-W, com significância inferior a 0,05. As amostras que falharam nesse teste são TM\_1, TCV\_4 e TCPV\_3, justificando o descarte delas. Após unir os valores de todas as amostras que compõem cada proporção de mistura, foram calculadas as respectivas médias e desvios padrão. Esses cálculos foram feitos para os dados brutos e para os dados após os tratamentos estatísticos, cujos resultados são apresentados na Tabela 10, com 95% de confiança sobre os dados.

Na Tabela 10 pode-se observar que houve pequena variação nos valores médios de resistividade calculada entre os dados brutos e os que passaram por análise estatística, mesmo nos casos em que foi descartada uma das amostras dos traços (TM, TCV e TCPV). O desvio padrão da média para o traço TCV teve o maior aumento após passar pela análise estatística.

De maneira geral, todos os traços apresentaram valores com baixa variabilidade, indicando que nas 6 h finais do experimento as amostras estavam em equilíbrio com a solução na qual estavam imersas. A Figura 8

apresenta os valores da resistividade elétrica calculada através dos dados do ensaio de migração de cloretos aos 28 dias de idade.

Pode-se observar na Figura 8 que as proporções de mistura TSA e TSCA desenvolveram as maiores resistividades elétricas aos 28 dias, sendo o valor calculado do TM um pouco inferior ao observado no TSCA. As proporções de mistura TCV e TCPV atingiram resistividades elétricas próximas entre si, com o TCV tendo apresentado o menor valor, possivelmente pela baixa reatividade da adição pozolânica utilizada na composição do concreto.

As proporções de mistura TSA e TSCA apresentaram resistividade elétrica considerada como risco de corrosão negligenciável ( $\rho > 20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ), de acordo com os limites sugeridos pelo CEB (COMITÉ..., 1989). A proporção de mistura TM se enquadrou no risco baixo de desenvolvimento de corrosão, e as proporções TCV e TCPV ficaram na faixa de alto risco de desenvolvimento de corrosão. A análise de variância entre os dados obtidos neste ensaio também indicou a presença de pelo menos uma diferença importante entre as resistividades elétricas calculadas, conforme pode ser observado na Tabela 11, uma vez que o valor de F é maior do que  $F_{\text{crit}}$ .

Tabela 9 - Resistividade elétrica média calculada e teste de normalidade

Traços	Resistividade ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ )	Significância S-W
TCPV_1	9,34±0,03	0,1241
TCPV_2	9,12±0,06	0,0499
<b>TCPV_3*</b>	<b>8,37±0,03</b>	<b>0,0123</b>
TCPV_4	8,87±0,14	0,0492
TSA_1	74,21±0,35	0,1813
TSA_2	73,32±0,25	0,4277
TSA_3	75,94±0,25	0,8338
TSA_4	75,56±0,14	0,5773
TSCA_1	20,09±0,10	0,2878
TSCA_2	19,83±0,10	0,9379
TSCA_3	21,98±0,16	0,6355
TSCA_4	20,59±0,14	0,9375
<b>TM_1*</b>	<b>19,63±0,05</b>	<b>0,0100</b>
TM_2	19,14±0,07	0,6377
TM_3	17,40±0,12	0,7746
TM_4	17,39±0,09	0,4001
TCV_1	8,25±0,02	0,1750
TCV_2	8,67±0,04	0,0719
TCV_3	9,46±0,04	0,0516
<b>TCV_4*</b>	<b>8,99±0,03</b>	<b>0,0193</b>

Nota: \*dados espúrios pelo teste de Shapiro-Wilk (S-W)

Tabela 10 - Média e desvio padrão da resistividade elétrica pelo método do ensaio de migração de cloretos antes e depois da eliminação de dados espúrios

	Traços	TCPV	TSA	TSCA	TM	TCV
Antes do tratamento	Resistividade ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ )	8,94±0,12	74,78±0,35	20,63±0,26	18,41±0,31	8,84±0,14
	Amostras	44	44	44	44	44
Após o tratamento	Resistividade ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ )	9,11±0,08	74,74±0,35	20,64±0,27	17,99±0,30	8,81±0,18
	Amostras	31	43	42	32	32

Figura 8 - Resistividade elétrica dos concretos calculada pelo ensaio de migração de cloretos aos 28 dias de cura úmida

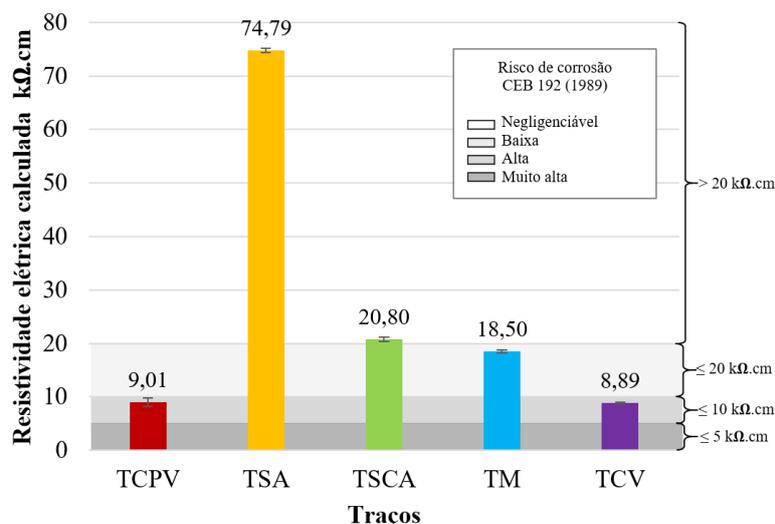


Tabela 11 - ANOVA entre resistividades elétricas calculadas

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	F	F <sub>crit</sub>
Entre os grupos	122.070,4898	4	30.517,622	44.861,004	2,423
Dentro dos grupos	119,0473576	175	0,680		
Total	122.189,5372	179			

A Figura 9 apresenta o resultado da utilização do teste de Tukey. Assim como no ensaio de resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos, as resistividades elétricas calculadas no ensaio de migração de cloretos dos traços TCV e TCPV não mostraram diferenças significativas entre si, enquanto se pode observar que os demais traços contrastaram nas comparações. Isso sugere que as adições impactaram na resistividade elétrica dos corpos de prova, em especial nos casos em que as reações eram mais reativas.

Os valores de resistividade elétrica obtidos no ensaio de migração de cloretos variaram de 9 kΩ.cm a 74 kΩ.cm. Hoppe Filho *et al.* (2013), que também utilizaram o ensaio de migração de cloretos para o cálculo da resistividade do concreto, observaram resistividades de 10 kΩ.cm a 58 kΩ.cm, semelhante aos valores observados neste trabalho. Os autores ainda comprovaram que a substituição do cimento por 50% de cinza volante gerou aumento de 380% na resistividade elétrica do concreto, o que não foi observado neste trabalho devido à baixa reatividade química (Chapelle modificado) e à área específica BET da adição utilizada, como discutido anteriormente. Não foi possível encontrar outros trabalhos que tenham utilizado o ensaio de migração de cloretos para o cálculo da resistividade.

### Comparação entre a resistividade elétrica medida e a calculada

A Figura 10 apresenta a comparação entre a resistividade elétrica com o método dos quatro eletrodos Werner e com o ensaio de migração de cloretos. Após teste de hipóteses, considerando um intervalo de confiança de 95%, apenas os resultados de resistividade elétrica obtidos no traço com sílica ativa (TSA) apresentaram diferença estatisticamente significativa. Assim, a variação em porcentagem dos valores calculados em relação aos medidos para o traço TSA foi de 18% aos 28 dias. Isso indica que o cálculo da resistividade mediante o ensaio de migração de cloreto é confiável para concretos convencionais (resistividades abaixo de 80 kΩ.cm).

Ainda que a obtenção da resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloreto tenha sido realizada em geometria cilíndrica, diferente da amostra cúbica utilizada no ensaio da resistividade superficial pelo método de Wenner, não foi possível comprovar diferenças estatisticamente significativas entre as metodologias utilizadas na obtenção da propriedade avaliada. Logo, é possível afirmar que os resultados obtidos pelos dois métodos são equivalentes para os demais casos. Essa semelhança é evidente na Figura 11,

que apresenta a correlação entre a resistividade elétrica medida (quatro eletrodos) e a calculada (migração de cloretos).

Na Figura 11, o coeficiente de determinação obtido ( $R^2$ ) foi de 0,9319, indicando que existe correlação positiva extremamente forte entre os resultados obtidos. Ainda é possível observar que o ajuste linear dos dados apresentou coeficiente angular de 1,0531, e, portanto, os ensaios de resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos e pela migração de cloretos podem ser considerados semelhantes.

Contudo, de acordo com Azarsa e Gupta (2017), a correlação entre os ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica pode ser calculada teoricamente como 0,33. Ghosh e Tran (2015) e Gudimettla e Crawford (2016) avaliaram experimentalmente as duas técnicas e obtiveram coeficientes lineares entre 0,29 e 0,48. Dessa forma, a determinação da resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos não pode ser considerada equivalente à resistividade volumétrica, ainda que seja calculada de tal forma, sendo seu resultado equivalente à resistividade superficial, como demonstrado anteriormente pelo coeficiente angular de 1,0531.

Por fim, verificou-se a existência de tendência entre os valores obtidos para a resistividade elétrica e a capacidade de fixar cal das adições minerais utilizadas no concreto, determinada pelo ensaio Chapelle modificado, conforme apresentado na Figura 12.

Observa-se na Figura 12 que a resistividade do concreto é aumentada de forma exponencial em função da reatividade da adição mineral utilizada. Pela relação apresentada, seria possível estimar a resistividade do concreto, com substituição de 10% do cimento Portland por pozolana, em função da reatividade (obtida no ensaio Chapelle modificado), conforme equação proposta.

**Figura 9 - Teste de Tukey sobre resistividade elétrica dos concretos calculada pelo ensaio de migração de cloretos**

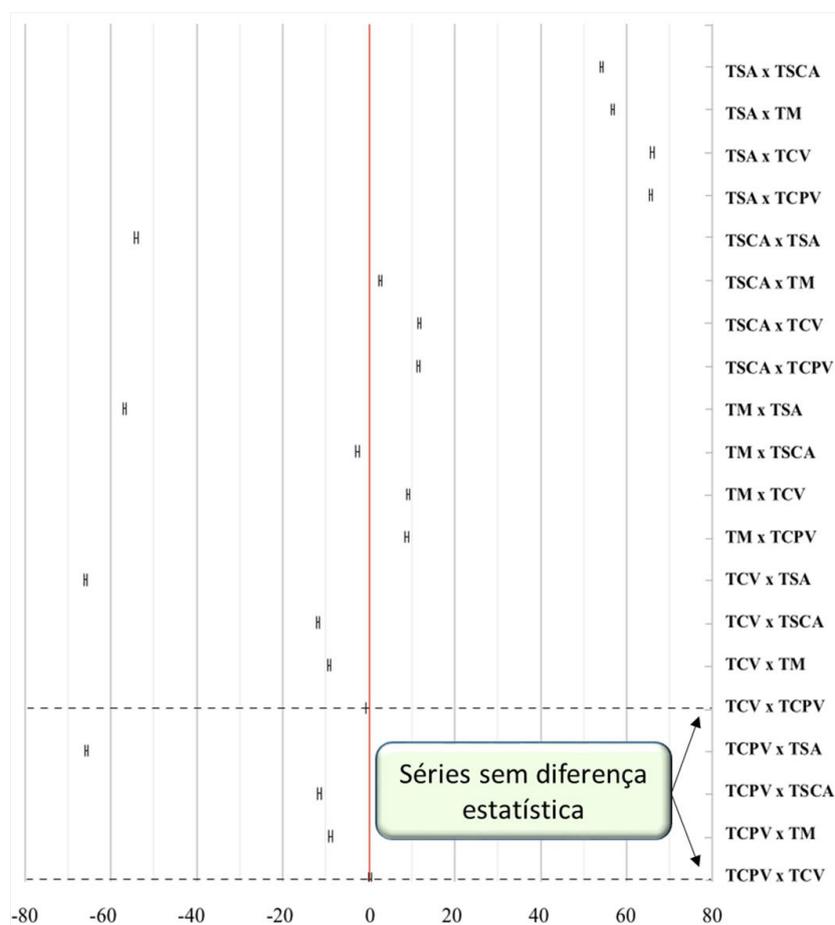


Figura 10 - Comparação entre resistividade elétrica medida pelo método dos quatro eletrodos e calculada pelo ensaio de migração de cloretos

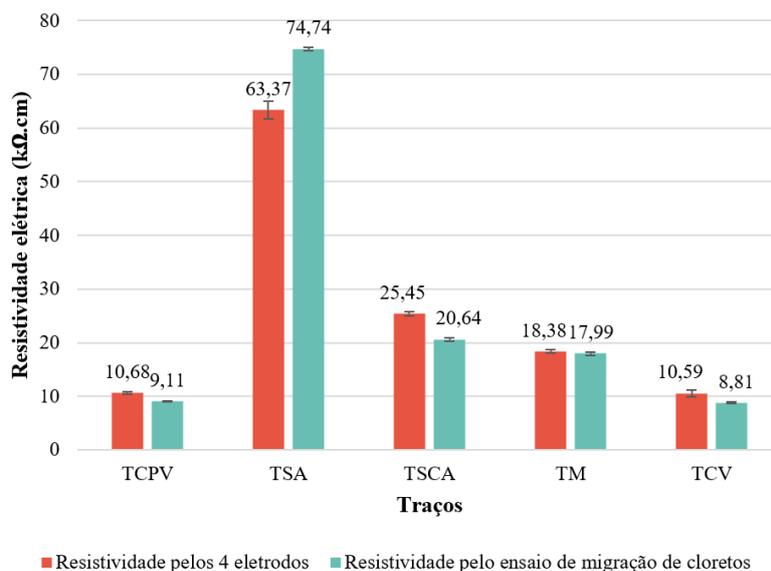


Figura 11 - Correlação linear entre a resistividade elétrica medida (quatro eletrodos) e calculada (migração de cloretos)

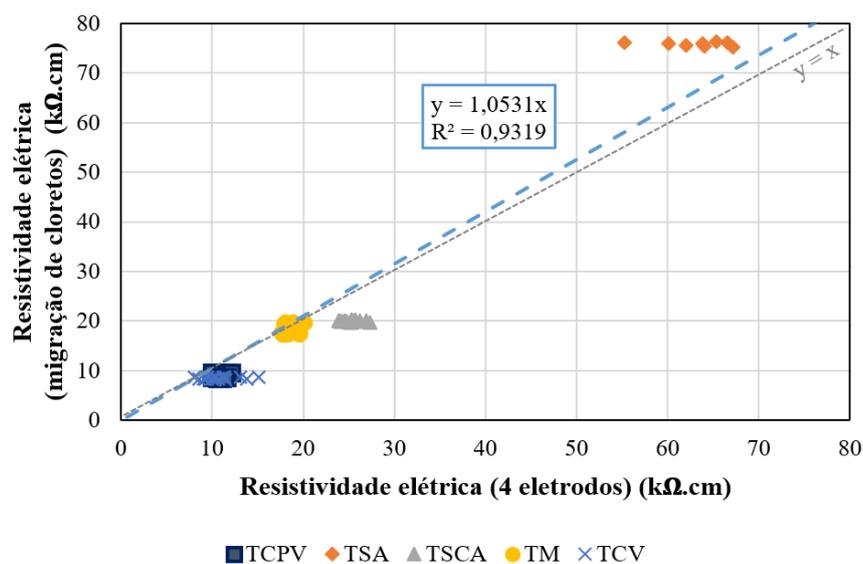
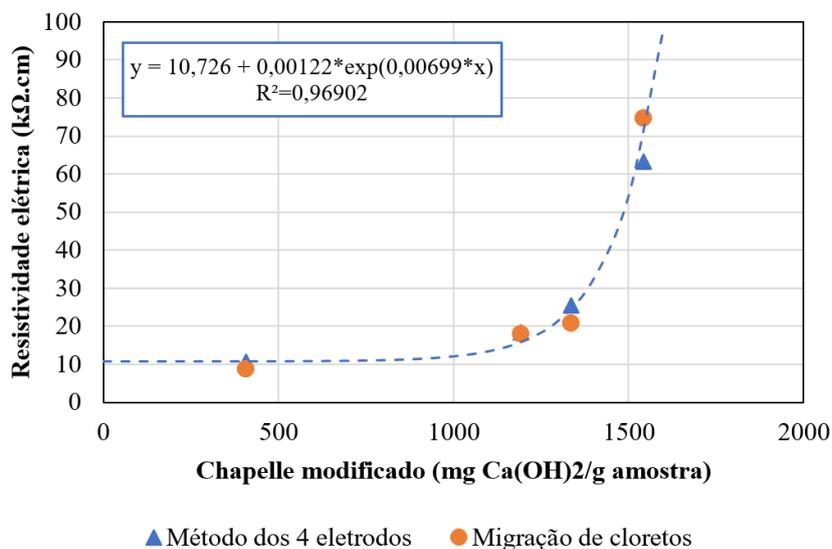


Figura 12 - Correlação entre a resistividade elétrica e a reatividade das adições pelo ensaio Chapelle modificado



## Conclusão

Após a avaliação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos e, de forma indireta, pelo ensaio de migração de cloretos em concretos com diferentes adições minerais, este trabalho de pesquisa experimental apresenta as constatações a seguir:

- a utilização de diferentes adições pozolânicas impacta nos valores de resistividade elétrica medidos pela técnica dos quatro eletrodos e calculados pelo ensaio de migração de cloretos;
- as adições mais reativas desenvolvem resistividades elétricas superiores às da proporção de mistura de referência, enquanto a proporção com 10% de cinza volante não é significativamente diferente da referência;
- a reatividade pozolânica é um fator capaz de influenciar na resistividade elétrica devido ao refinamento e à melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, contribuindo para tornar a pasta mais densa e dificultar a passagem da corrente elétrica;
- na comparação entre as resistividades elétricas médias medidas e calculadas, utilizando teste de hipóteses, é possível concluir com 95% de confiança que os valores não são significativamente diferentes entre si para a maioria dos concretos (resistividades abaixo de 80 kΩ.cm);
- é possível obter índice de regressão com forte correlação entre os métodos de ensaio de resistividade elétrica e entre a resistividade elétrica e a reatividade da adição mineral; e
- a determinação da resistividade elétrica do concreto com o ensaio de migração de íons cloreto é viável desde que sejam utilizados valores de corrente elétrica obtidos na metade final do período de ensaio.

## Referências

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T 358**: surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, 2019b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1069**: standard test method for specific surface area of Alumina or Quartz by Nitrogen adsorption. West Conshohocken, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1202**: standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist Chloride ion penetration. West Conshohocken, 2019a.
- ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993.

- ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON CONCRETE SCIENCE AND ENGINEERING: A TRIBUTE TO ARNON BENTUR, Evanston, 2004. **Proceedings [...]** Evanston, 2004.
- ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. **Revista ALCONPAT**, v. 1, n. 2, p. 90-98, 2011.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83987**: durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo: determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido: método multirregimen. Genova, 2014b.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83988-2**: durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica: parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner. Genova, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894**: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2010b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: materiais pozolânicos: determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado: método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregado para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204**: concreto endurecido: determinação da resistividade elétrica-volumétrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1-30, 2017.
- BALESTRA, C. E. T. *et al.* Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 230, 2020.
- BALESTRA, C. E. T. *et al.* Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: proposal of parameters based on field structures. **Ocean Engineering**, v. 187, 2019.
- BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete**: understanding, investigation and repair. 2<sup>nd</sup>. ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

- CHU, H.; CHEN, J. The experimental study on the correlation of resistivity and damage for conductive concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 67, p. 12-19, 2016.
- COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. N° 192: diagnosis and assessment of concrete structures: state-of-art report. Switzerland: FIB – International Federation for Structural Concrete, 1989.
- ELAHI, A. *et al.* Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 3, p. 292-299, 2010.
- FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. **BT06**: corrosión de armadura de estructuras de hormigón. Boletín Técnico. México: Alconpat, 2013.
- GHASEMI, A.; ZAHEDIASL, S. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. **International Journal of Endocrinology and Metabolism**, v. 10, n. 2, p. 486-489, 2012.
- GHOSH, P.; TRAN, Q. Correlation between bulk and surface resistivity of concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 9, n. 1, p. 119-132, 2015.
- GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pela NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012**: uma análise crítica a partir de métodos complementares. Curitiba, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, 1999.
- GUDIMETTLA, J.; CRAWFORD, G. Resistivity tests for concrete: recent field experience. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 4, 2016.
- GUIGNONE, G. C. *et al.* Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Matéria**, v. 24, n. 4, 2019.
- HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (parte I): índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria**, v. 22, n. 3, p. 1-18, 2017b.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (parte II): índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios X (DRX) e termogravimetria (TG/DtG). **Matéria**, v. 22, n. 3, 2017c.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 3, p. 411-418, 2013.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Reactivity assessment of residual rice-husk ashes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, 2017a.
- ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, abr./jun. 2017.
- LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto**: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios. São José dos Campos, 2011. Tese (Doutorado) - Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.
- LENCIONI, J. W.; LIMA, A. G. Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto: estado-da-arte. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 6., Córdoba, 2010. **Anais [...]** Córdoba: Cinpar, 2010.
- LI, Q.; XU, S.; ZENG, Q. The effect of water saturation degree on the electrical properties of cement-based porous material. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 35-47, 2016.
- LÓPEZ, W.; GONZÁLEZ, J. A. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 2, p. 368-376, 1993.
- LU, X. Application of the Nernst-Einstein equation to concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 293-302, 1997.

- LÜBECK, A. *et al.* Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 392-399, 2012.
- LUPING, T.; NILSSON, L. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 1, p. 49-53, 1993.
- MACIOSKI, G. *et al.* Analysis of steel bars corrosion as a function of the environment pH. **Revista Alconpat**, v. 6, n. 3, p. 223-234, 2016.
- MANFRIN, S. K.; PEROTONI, M. B.; PAIVA, C. F. E. Emprego de um sistema autônomo de medição da resistividade (condutividade) do solo: sonda geofísica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., Salvador, 2018. **Anais [...]** Salvador: ABMS, 2018.
- MCCLAVE, J. T.; SINCICH, T. T. **Statistics**. 12<sup>th</sup>. ed. Florida: Pearson Education, 2012.
- MCGRATH, P. F.; HOOTON, R. D. Influence of voltage on chloride diffusion coefficients from chloride migration tests. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 8, p. 1239-1244, 1996.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11-16, 2016.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, v. 4, n. 2, p. 113-128, 2014.
- MEDEIROS, M. H. F. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, v. 12, p. 55-64 2001.
- MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 864-885, 2017.
- MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) com cal usando difração de raios X. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 19-29, jul./set. 2015.
- MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 1, p. 53-65, 2013.
- MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1476-1484, 2009.
- MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P. Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. **Marine Structures**, v. 22, n. 2, p. 128-141, 2009.
- MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 125-139, out./dez. 2017.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4<sup>th</sup> ed. Berkeley: McGraw-Hill Education, 2013.
- MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 223-248, out./dez. 2019.
- ODLER, I. The BET-specific surface area of hydrated Portland cement and related materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 2049-2056, 2003.
- OLIVEIRA, E. D. Comparação das diferentes técnicas para a exclusão de “outliers”. In: CONGRESSO DA QUALIDADE EM METROLOGIA REDE METROLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO, São Paulo, 2008. **Anais [...]** São Paulo, 2008.
- RAVERDY, M. *et al.* Appréciation de l’activité pouzzolannique des constituants secondaires. In: CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA CHIMIE DES CIMENTS, Paris, 1980. **Proceedings [...]** Paris, 1980.
- SALEHI, M.; GHODS, P.; BURKAN ISGOR, O. Numerical investigation of the role of embedded reinforcement mesh on electrical resistivity measurements of concrete using the Wenner probe technique. **Materials and Structures**, v. 49, n. 1-2, p. 301-316, 2016.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a avaliação da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto armado**. Brasília, 2006. Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2006.

SENGUL, O. Construction and building materials: use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434-441, 2014.

SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Influence of the applied voltage on the rapid chloride migration (RCM) test. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 8, p. 1072-1082, 2012.

THOMAS, R. J. *et al.* Comparison of chloride permeability methods for alkali-activated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 104-111, 2018.

VALDES, A. C. *et al.* Efeito do grau de hidratação, tipo de adição mineral e grau de saturação do concreto nas leituras de resistividade elétrica. **Revista Técnico Científica do CREA-PR**, p. 18, 2017.

## Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão às agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária, pelo apoio financeiro, à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e ao Grupo de Pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC).

### Laís Mariana Wosniack

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Prédio do CESEC, Sala 02 | Curitiba - PR - Brasil | CEP 81530-000 | Tel.: (41) 3361-3445 | E-mail: laismw@gmail.com

### Ligia Vitória Real

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | E-mail: ligivr@gmail.com

### Melissa Dione Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | E-mail: melissadione73@gmail.com

### Gustavo Macioski

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Telefone: (41) 3361-3445 | E-mail: gmacioski@gmail.com

### Juarez Hoppe Filho

Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias | Universidade Federal do Oeste da Bahia | Rua Professor José Seabra de Lemos, 316 | Barreiras - BA - Brasil | CEP 47808-021 | Tel.: (41) 3614-3145 | E-mail: juarez.hoppe@gmail.com

### Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Departamento de Construção Civil | Universidade Federal do Paraná | Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Prédio do CESEC, Sala 02 | Curitiba - PR - Brasil | CEP 81530-000 | Tel.: (41) 3361-3218 | E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

## Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.