



XVII Congresso Internacional sobre Patologia e  
Reabilitação das Construções

XVII Congreso Internacional sobre Patología y  
Rehabilitación de las Construcciones

XVII International Conference on Pathology and  
Constructions Rehabilitation

FORTALEZA (Brasil), 3 a 5 de junho de 2021

<https://doi.org/10.4322/CINPAR.2021.030>

## Resistividade elétrica em estruturas de concreto presentes em ambiente marinho: Estudo de caso da Ilha dos Arvoredos

### *Electrical resistivity in reinforced concrete structures present in marine environment: Case study of Arvoredos Island*

Thiago A. REICHERT<sup>1</sup>, Carlos E. T. BALESTRA<sup>2</sup>, Lucia BRESSIANI<sup>3</sup>, Silmara D. FEIBER<sup>4</sup>,  
Fúlvio N. FEIBER<sup>5</sup>, Elmagno C. S. SILVA<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, thiago.reichert@outlook.com

<sup>2</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, carlosbalestra@utfpr.edu.br

<sup>3</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, bressiani@utfpr.edu.br

<sup>4</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, sdfeiber@utfpr.edu.br

<sup>5</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, ffeiber@utfpr.edu.br

<sup>6</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, elmagno@utfpr.edu.br

**Resumo:** Metodologias de análise não destrutivas têm sido cada vez mais utilizadas no âmbito da avaliação de durabilidade e de vida útil de estruturas de concreto armado presentes em diferentes ambientes. Nesse ponto, a resistividade elétrica destaca-se entre os ensaios não destrutivos, uma vez que, considerando a corrosão como um processo eletroquímico, essas análises permitem estimar a provável taxa de corrosão das armaduras. Assim, o presente trabalho aborda um estudo de caso por meio da análise de resistividade elétrica superficial de estruturas presentes em diferentes zonas de agressividade marinha (zona de variação de maré, de respingos e de atmosfera marinha), construídas a mais de 40 anos e localizadas na Ilha dos Arvoredos, na cidade de Guarujá, São Paulo, Brasil, sob condições naturais de degradação. Para tanto, ensaios de resistividade elétrica superficial utilizando o método de quatro pontos foram conduzidos em diferentes estruturas, localizadas em diferentes altimetrias em relação ao nível máximo alcançado pela maré no local. Um pacômetro também foi utilizado com o objetivo de detectar a presença de armaduras e para balizar a escolha dos pontos de análise nas diferentes estruturas. Os resultados obtidos demonstram que os valores de resistividade elétrica variaram de maneira significativa entre os pontos analisados, dependendo da zona de agressividade marinha nas quais eles se encontravam, sendo que os menores valores foram obtidos em pontos de estruturas presentes em zona de variação de maré e zona de respingos, devido ao maior grau de saturação e concentrações iônicas presentes nos poros do concreto dessas estruturas.

**Palavras-chave:** Resistividade elétrica, Ambiente marinho, Corrosão das armaduras, Estruturas de concreto.

**Abstract:** Nondestructive methodologies have been increasingly used in the durability and service life assessment of reinforced concrete structures present in different environments. At this point, electrical resistivity stands out among the nondestructive tests, since, considering corrosion as an electrochemical process, these analyzes allow estimating the probable corrosion risk of the reinforcement. Thus, this work presents a case study through the analysis of surface electrical resistivity of structures present in different marine aggressive zones (tidal, splash, and marine atmosphere zones), built more than 40 years ago and located at Arvoredos Island, Guarujá - São Paulo, Brazil, under natural degradation conditions. Therefore, surface electrical resistivity tests using the four-point method were conducted on different structures, located at different altimetry in relation to the maximum tide at the Island. A pacometer was also used to detect the presence of reinforcement and to guide the choice of analysis points in the different structures.

The results obtained show that the electrical resistivity values varied significantly between the analyzed points, depending on the marine aggressive zone in which the structure was present, being the lowest values obtained in points of structures present in the tidal and splash zones, due to the higher saturation degree and ionic concentrations present in the concrete pores of these structures.

**Keywords:** Electrical resistivity, Marine environment, Reinforcement corrosion, Concrete structures.

## 1. Introdução

A corrosão de armaduras é um processo eletroquímico que se caracteriza como uma das principais manifestações patológicas verificadas em estruturas de concreto armado. O fenômeno leva a um decréscimo das propriedades mecânicas das armaduras (resistência ao escoamento, resistência última e alongamento final), à medida que o grau de corrosão aumenta, afetando a capacidade portante das estruturas. No entanto, além da redução das propriedades mecânicas, a corrosão também gera produtos de caráter expansivo, produzindo tensões radiais às armaduras que não são suportadas pelo concreto, levando ao surgimento de fissuras e destacamento da camada de cobrimento, potencializando o ingresso de agentes do meio ambiente que intensificam o processo corrosivo (BALESTRA *et al.*, 2019b; IMPERATORE *et al.*, 2017).

Nesse contexto, deve ser pontuado, em primeiro lugar, que o pH alcalino da solução presente nos poros do concreto leva a formação de um filme passivante que reveste e protege as armaduras frente à corrosão. Entretanto, agentes agressivos advindos do meio externo, como, por exemplo, os cloretos presentes nas diferentes zonas de agressividade marinha, penetram através da camada de cobrimento e, ao atingir as armaduras acima de uma concentração limite (definida na literatura como igual a 0.4% em relação a massa de cimento (ANGST *et al.*, 2009)), a camada passivante é destruída localmente levando a formação de pontos de corrosão conhecidos como pites (APOSTOLOPOULOS *et al.*, 2013; ZHU; FRANÇOIS, 2014).

Os pites tratam-se de um tipo de corrosão localizada na superfície das barras que se aprofunda à medida que o processo corrosivo se intensifica levando, por vezes, a severos danos à seção transversal das barras sem apreciável variação de massa. Assim, mesmo barras com pequenos graus de corrosão podem apresentar significativa redução em suas propriedades mecânicas. Além disso, o processo corrosivo gera excentricidades entre as seções sucessivas das armaduras corroídas, dificultando uma distribuição homogênea de esforços de tração ao longo de seu comprimento (BALESTRA *et al.*, 2016; FRANÇOIS *et al.*, 2013).

Considerando a problemática da corrosão das armaduras, ensaios não destrutivos (END) vêm sendo utilizados com o objetivo de estimar a probabilidade de corrosão, visando à obtenção de informações para subsidiar a tomada de decisões quanto às ações necessárias na conservação, manutenção e reabilitação de estruturas de concreto armado. Nesse ponto, a determinação da resistividade elétrica superficial através do método de quatro pontos (método de Wenner) tem se mostrado uma técnica de simples execução com resultados expeditos e de fácil interpretação, sendo essa uma das técnicas mais aplicada para estruturas de concreto armado (HORNBOSTEL *et al.*, 2013).

A resistividade elétrica é uma característica inerente ao material, sendo definida como a capacidade do material em opor-se à passagem de corrente elétrica. Assim, quanto maior a resistividade elétrica, menor será o fluxo iônico e, conseqüentemente, menor a provável taxa de corrosão à qual a estrutura em concreto armado estará sujeita. O método de quatro pontos é esquematizado na Figura 1, no qual os eletrodos externos geram uma corrente que é medida pelos eletrodos internos (ANDRADE; D'ANDREIA, 2010). O Quadro 1 apresenta parâmetros normativos no que tange a provável taxa de corrosão das armaduras e a resistividade elétrica superficial segundo a norma RILEM TMC 154-EMC (2000).

Mediante a problemática exposta, o presente trabalho analisa a resistividade elétrica de estruturas de concreto presentes em diferentes zonas de agressividade marinha, que permaneceram a mais de 40 anos sob degradação natural na Ilha dos Arvoredos, Guarujá, São Paulo, Brasil. Construídas entre 1950 e 1974 com o objetivo de subsidiar pesquisas nas áreas relacionadas à Biologia, essas estruturas foram analisadas, em 2016, quanto à problemática da corrosão de armaduras em estruturas presentes no ambiente marinho, ocasião nas quais, diversas medidas de resistividade foram realizadas (BALESTRA *et al.*, 2019a). Com este trabalho, espera-se contribuir para um melhor entendimento acerca da resistividade elétrica superficial em

estruturas reais de concreto presentes nas diferentes zonas de agressividade marinha, utilizando, para tanto, parâmetros normativos internacionais.

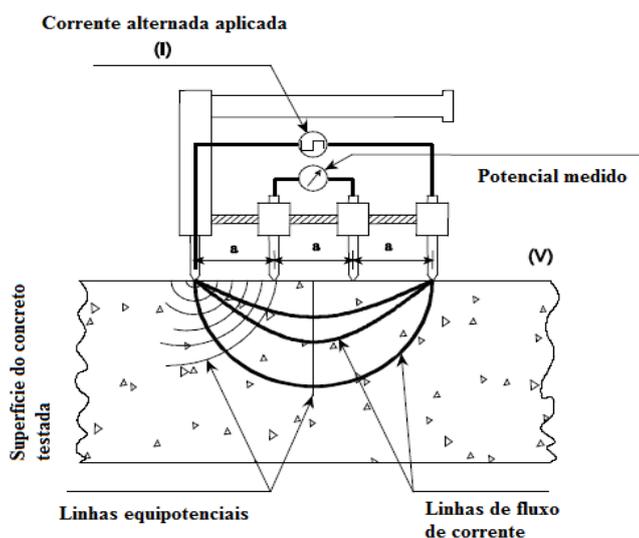


Figura 1 – Representação da resistividade elétrica através do método de 4 pontos

Quadro 1 – Relação entre a provável taxa de corrosão e a resistividade elétrica superficial (RILEM, 2000)

Provável taxa de corrosão	Resistividade elétrica superficial ( $k\Omega \cdot cm$ )
Alta	< 10
Moderada	10 - 50
Baixa	50 - 100
Desprezível	> 100

## 2. Materiais e Métodos

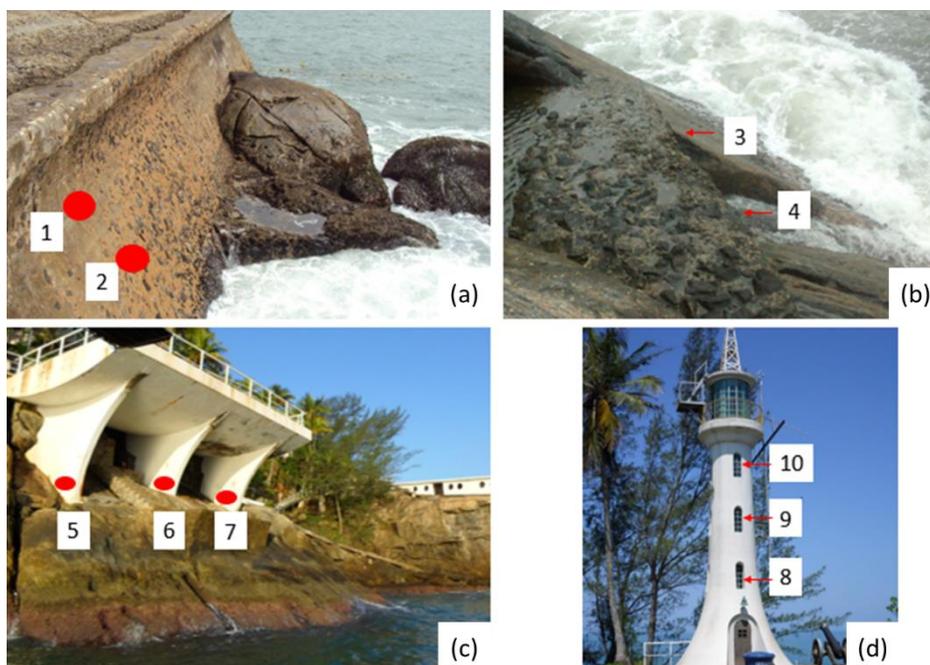
Para este trabalho, foram analisadas estruturas de concreto armado presentes, sob degradação natural, em diferentes zonas de agressividade marinha (zona de variação de maré, zona de respingos e zona de atmosfera marinha) na Ilha dos Arvoredos, localizada no litoral brasileiro. Nesse sentido, a Figura 2 apresenta as diferentes estruturas analisadas, incluindo os pontos analisados, ao passo que o Quadro 2 apresenta a identificação das estruturas e a zona de agressividade marinha na qual cada estrutura está presente.

Quadro 2 – Identificação das estruturas analisadas

Identificação da estrutura	Identificação dos pontos	Zona de agressividade marinha
Reservatório	1 e 2	Zona de variação de maré
Patamar	3 e 4	Zona de respingos
Plataforma	5, 6 e 7	Zona de atmosfera marinha/Respingos
Farol	8, 9 e 10	Zona de atmosfera marinha

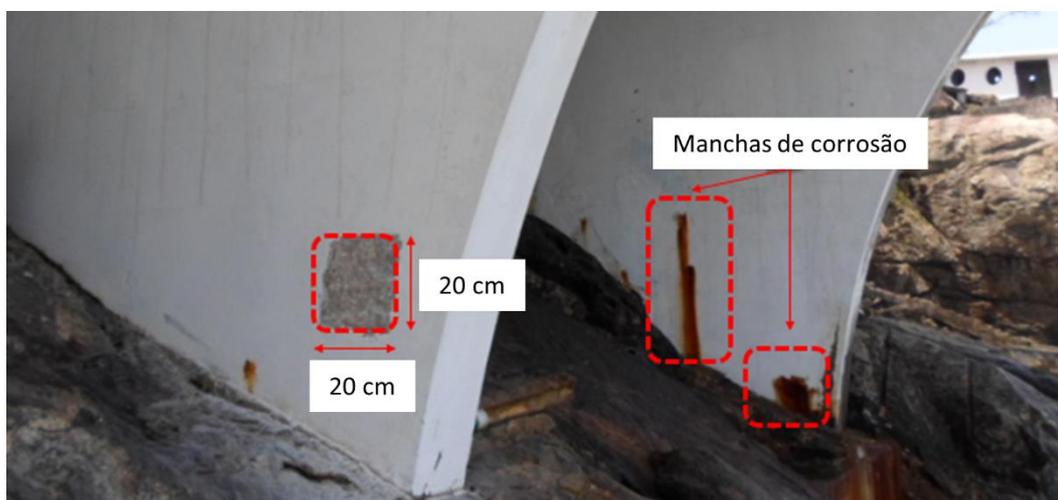
O Reservatório, destinado ao estudo de tartarugas marinhas, trata-se de uma estrutura com paredes com aproximadamente 1 metro de espessura em concreto construída em zona de variação de maré. O Patamar é uma estrutura construída em zona de respingos que tinha como função fornecer pontos de apoio de escoramento para a construção da plataforma. A Plataforma, por sua vez, é uma estrutura construída junto a um guindaste que tinha como função permitir a guarda de pequenas embarcações no caso de condições desfavoráveis à navegação. Nessa estrutura, foi analisada a região inferior de seus pilares, que ora permanecem em zona de respingos (quando a maré está alta e o mar agitado) e ora permanecem em zona

de atmosfera marinha (quando a maré está baixa). Por fim, foram realizadas análises no Farol da ilha, construído no ponto mais alto da formação rochosa e localizado em zona de atmosfera marinha. Vale destacar que a fachada externa do Farol é completamente revestida por pastilhas cerâmicas e, portanto, as medições de resistividade foram executadas nas paredes de concreto internas da estrutura.



**Figura 2** – Estruturas analisadas nas diferentes zonas de agressividade marinha:  
(a) Reservatório; (b) Patamar; (c) Plataforma; (d) Farol

Anterior aos ensaios de resistividade elétrica superficial, ensaios de pacometria foram realizados com o objetivo identificar a posição das barras de aço nas estruturas, de modo a balizar a escolha dos pontos para a realização do ensaio de resistividade elétrica. Assim, um pacômetro, com capacidade de detecção de barras a uma profundidade máxima de 150 mm, foi passado pela superfície das estruturas permitindo identificar as armaduras por meio de avisos sonoros, emitidos pelo equipamento quando a presença de uma barra era constatada. Com isso, as posições das barras foram delimitadas por meio de marcações executadas diretamente sobre a superfície das estruturas. Após isso, foram escolhidos pontos de análise, com área de 20 cm x 20 cm, onde não houvesse a presença de armaduras, sendo removidas as camadas de pintura da estrutura sempre que necessário, conforme exemplificado na Figura 3.



**Figura 3** – Exemplo de ponto de análise para resistividade elétrica

Definidos os pontos de análise, um equipamento de resistividade elétrica superficial dotado de 4 ponteiros foi utilizado. Nesse caso, as superfícies das estruturas de concreto foram umedecidas por meio de *spray* de água, de modo a melhorar o contato dos eletrodos do equipamento com a superfície do concreto, e o equipamento foi acionado no sentido paralelo às armaduras sobre a superfície das estruturas, permitindo realizar a determinação da resistividade elétrica superficial do ponto analisado. Os dados foram registrados em planilhas de campo para posterior análise.

### 3. Resultados e Discussão

Com base nos dados obtidos através do ensaio de resistividade elétrica, o Quadro 3 apresenta os resultados de resistividade elétrica superficial dos 10 pontos analisados segundo suas respectivas zonas de agressividade marinha. É possível inferir, por meio desses resultados, que estruturas mais próximas a água do mar apresentam menores valores de resistividade elétrica superficial em relação às estruturas localizadas em zonas que não entram em contato direto com a água do mar. Desse modo, conclui-se que tal fato está relacionado a presença de umidade nos poros do concreto.

**Quadro 2** – Resultados de resistividade elétrica superficial dos diferentes pontos analisados

Identificação da estrutura	Zona de agressividade marinha	Identificação dos pontos	Resistividade elétrica superficial ( $k\Omega \cdot cm$ )
Reservatório	Zona de variação de maré	1	6.3
		2	2.1
Patamar	Zona de respingos	3	2.5
		4	2.2
Plataforma	Zona de atmosfera marinha/Respingos	5	10.5
		6	19.8
		7	15.0
Farol	Zona de atmosfera marinha	8	174.8
		9	492.0
		10	608.9

Em outras palavras, estruturas de concreto presentes na zona de variação de maré e zona de respingos apresentam-se, com maior frequência, com seus poros saturados, facilitando, conseqüentemente, a mobilidade iônica nessas estruturas e contribuindo para os menores valores de resistividade observados. De fato, ao analisar as medições para as paredes internas do Farol, que permanecem protegidas inclusive das chuvas, observa-se que os valores de resistividade elétrica são amplamente superiores em relação aos valores verificados nas demais zonas de agressividade, o que pode ser justificado tendo em vista o menor grau de umidade verificado nos poros da estrutura do Farol.

Analisando os resultados obtidos no Quadro 3, e comparando com os valores de referência descritos no Quadro 1, é possível notar que as estruturas presentes em zona de variação de maré e zona de respingos estão sujeitas a uma elevada taxa de corrosão de suas armaduras, tendo em vista que os valores verificados são inferiores a  $10 k\Omega \cdot cm$ . Nesse ponto, em inspeção visual, foi possível constatar a presença de corrosão das armaduras nessas estruturas, sendo verificadas, inclusive, manchas de corrosão em suas superfícies (Figuras 3 e 4), manifestação característica de um processo avançado de corrosão com significativo grau de umidade nos poros do concreto.



**Figura 4** – Detalhe de mancha de corrosão das armaduras

Assim, com base nos valores de resistividade elétrica superficial apresentados nos Quadros 1 e 3, é possível definir um nível de relevância quanto ao risco de degradação das estruturas para as distintas zonas de agressividade marinha. Nesse caso, em ordem crescente de agressividade, pode-se estabelecer: Zona de respingos ⇒ Zona de variação de maré ⇒ Zona de atmosfera marinha (próxima a zona de respingos) ⇒ Zona de atmosfera marinha protegida.

#### **4. Conclusões**

O presente trabalho aborda uma análise a respeito da resistividade elétrica superficial em estruturas presentes em diferentes zonas de agressividade marinha, sob degradação natural por mais de 40 anos. As principais conclusões são:

- Estruturas de concreto presentes em zona de variação de maré e de respingos apresentaram os menores valores de resistividade elétrica superficial, tendo em vista que seus poros frequentemente apresentam elevado grau de umidade, contribuindo para diminuir a resistência ao fluxo iônico no concreto;
- Estruturas de concreto protegidas, como as paredes internas do farol analisado, apresentaram valores de resistividade elétrica muito superiores em relação a outras estruturas desprotegidas;
- Com base nos resultados obtidos, uma escala de agressividade foi proposta para o ambiente marinho, sendo a zona de respingos a mais agressiva e a zona de atmosfera marinha protegida a menos agressiva sob a perspectiva da resistividade elétrica superficial.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Fundação Fernando Lee e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Toledo pelo apoio à pesquisa.

#### **Referências Bibliográficas**

- Andrade, C., R. d'Andreia, R. (2010). Electrical Resistivity as microstructural parameter for the modelling of service life of reinforced concrete structures, 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, Delft, The Netherlands, 2010.
- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete – A review. *Cem. Concr. Res.*, 39 (12), 1122-1138. DOI 10.1016/j.cemconres.2009.08.006.
- Apostolopoulos, C.A., Demis, S., Papadakis, V.G. (2013). Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – mechanical performance and pit depth analysis. *Constr. Build. Mater.*, 38, 139-146. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.087.

- Balestra, C.E.T., Lima, M.G., Medeiros-Junior, R.A. (2016). Corrosion degree effect on nominal and effective strengths of reinforcement naturally corroded. *J. Mater. Civ. Eng.*, 28, 04016103. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001599.
- Balestra, C.E.T., Reichert, T.A., Pansera, W.A., Savaris, G. (2019a). Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures present for more than 40 years in different marine aggressive zones. *Constr. Build. Mater.*, 198, 345-358. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.271.
- Balestra, C.E.T., Reichert, T.A., Savaris, G. (2019b). Contribution for durability studies based on chloride profiles analysis of real marine structures in different marine aggressive zones. *Constr. Build. Mater.*, 206, 140-150. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.067.
- François, R., Khan, I., Dang, V.H. (2013). Impact of corrosion on mechanical properties of steel embedded in 27-year-old corroded reinforced concrete beams. *Mater. Struct.*, 46, 899-910. DOI 10.1617/s11527-012-9941-z.
- Hornbostel, K., Larsen, C.K., Geiker, M.R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. *Cem. Concr. Compos.*, 39, 60-72. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019.
- Imperatore, S., Rinaldi, Z., Drago, C. (2017). Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel rebars. *Constr. Build. Mater.*, 148, 219-230. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.209.
- RILEM TMC 154-EMC (2000). Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion: Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete. *Mat. Struct.*, 33, 603-611. DOI 10.1007/BF02480599.
- Zhu, W., François, R. (2014). Experimental investigation of the relationships between residual cross-section shapes and the ductility of corroded bars. *Constr. Build. Mater.*, 69, 335-345. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.059.