





## Impacto das estratégias de projeto e monitoramento orientado à durabilidade no comportamento eletroquímico e microambiental da subestrutura de um palafito de concreto armado exposta a microclimas tropicais marinhos por sete anos.

J. A. Briceño-Mena<sup>1,2</sup> , A. A. Torres-Acosta<sup>3</sup> ,  
M. T. Castillo-Burguete<sup>4</sup> , P. Castro-Borges<sup>1\*</sup> 

\* Autor de Contato: [autor.contacto@email.com](mailto:autor.contacto@email.com) (marcado com um asterisco entre os autores)

DOI: <https://doi.org/>

Recebido: DD/MM/AA | Correções recebidas: DD/MM/AA | Aceito: DD/MM/AA | Publicado: DD/MM/AA

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar o impacto das estratégias de projeto e de monitoramento orientado à durabilidade nos resultados eletroquímicos e microambientais internos, no nível da armadura de algumas colunas, obtidos durante sete anos na quinta geração da subestrutura de um palafito pré-fabricada, segundo critérios que, à época, deram origem às normas NMX-530-ONNCCE-2018 e NMX-569-ONNCCE-2020 sobre durabilidade. Os resultados mostraram que, embora os elementos estejam completamente passivos, as estratégias de projeto, construção e monitoramento permitiram observar com clareza a influência de cada microambiente nas tendências eletroquímicas. Isso permitirá projetar estratégias específicas e econômicas para a manutenção preventiva, bem como facilitar a recalibração das projeções de vida útil conforme cada microambiente.

**Palavras-chave:** corrosão; durabilidade; infraestrutura; projeto; palafito.

**Citar como:** Briceño-Mena, J. A., Torres-Acosta, A. A., Castillo-Burguete, M. T., Castro Borges, P. (2026), "Impacto das estratégias de projeto e monitoramento orientado à durabilidade no comportamento eletroquímico e microambiental da subestrutura de um palafito de concreto armado exposta a microclimas tropicais marinhos por sete anos", Revista ALCONPAT, 16 (2), pp. 239 – 259, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1040>

<sup>1</sup> Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, México.

<sup>2</sup> Investigador por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Ciudad de México, México.

<sup>3</sup> Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores, Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro, Querétaro, México.

<sup>4</sup> Departamento de Ecología Humana, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, México.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor JABM contribuiu com a experimentação (60%), análise de dados (50%), redação da primeira versão (100%) e discussão dos resultados (40%). O autor AATA contribuiu com a ideia original (30%), o desenvolvimento das especificações e o projeto estrutural da palafita (70%), análise de dados (10%), discussão dos resultados (20%) e revisão do manuscrito (20%). A autora MTCB contribuiu com a ideia original (20%) e com a revisão do manuscrito (30%). O autor PCB contribuiu com a ideia original (50%), desenvolvimento das especificações e projeto estrutural (30%), experimentação (40%), análise de dados (40%), discussão dos resultados (40%) e revisão do texto (50%).

#### Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

## **Impact of design and durability monitoring strategies on the electrochemical and microenvironmental behavior of the substructure of a reinforced concrete stilt house exposed to marine tropical microclimates for seven years.**

### **ABSTRACT**

The objective of this work was to analyze the impact of design and durability monitoring strategies on the internal electrochemical and microenvironmental results, at the level of the reinforcement of some columns, obtained during seven years in the fifth generation of the substructure of a prefabricated stilt house, according to criteria that gave rise, at the time, to the NMX-530-ONNCCE-2018 and NMX-569-ONNCCE-2020 standards on durability. The results showed that, although the elements are completely passive, the design, construction, and monitoring strategies allowed to clearly see the influence of each microenvironment on electrochemical trends. This will allow the design of ad hoc and economical strategies for preventive maintenance, as well as facilitate the recalibration of service life projections according to each microenvironment.

**Keywords:** corrosion; durability; infrastructure; design; stilt house.

## **Impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en el comportamiento electroquímico y microambiental de la subestructura de un palafito de concreto reforzado expuesto a microclimas tropicales marinos por siete años.**

### **RESUMEN (letras de 13 pts. Times New Roman, negritas)**

El objetivo de este trabajo fue analizar el impacto de estrategias de diseño y seguimiento por durabilidad en los resultados electroquímicos y microambientales internos al nivel del refuerzo de algunas columnas, obtenidos durante siete años en la quinta generación de la subestructura de un palafito prefabricado, según criterios que dieron lugar, en su momento, a las normas NMX-530-ONNCCE-2018 y NMX-569-ONNCCE-2020 sobre durabilidad. Los resultados mostraron que, aunque los elementos están completamente pasivos, las estrategias de diseño, construcción y seguimiento permitieron observar con claridad la influencia de cada microambiente en las tendencias electroquímicas. Ello permitirá diseñar estrategias ad hoc y económicas para el mantenimiento preventivo, así como facilitar la recalibración de las proyecciones de vida de servicio según cada microambiente.

**Palabras clave:** corrosión; durabilidad; infraestructura; diseño; palafito.

### **Discussões e correções pós-publicação**

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2026.

### **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. +52 1 983 419 8241, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)  
Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-01 1717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

Impacto das estratégias de projeto e monitoramento orientado à durabilidade no comportamento eletroquímico e microambiental da subestrutura de um palafito de concreto armado exposta a microclimas tropicais marinhos por sete anos.

## 1. INTRODUÇÃO

As regiões costeiras do Golfo do México tornaram-se cenários críticos diante da intensificação de fenômenos meteorológicos extremos. Furacões, tempestades tropicais e inundações provocadas pela elevação das marés representam ameaças constantes à segurança e ao bem-estar econômico das comunidades que habitam essas zonas. Nesse contexto, as zonas costeiras do Golfo do México constituem um laboratório natural para o estudo da patologia das construções e do controle de qualidade, onde a interação permanente entre materiais estruturais e um ambiente marinho altamente agressivo - caracterizado por elevadas concentrações de cloretos, níveis de umidade relativa superiores a 80% e oscilações térmicas diárias - promove processos eletroquímicos agressivos, exigindo soluções técnicas fundamentadas em evidências científicas (Torres-Acosta & Martínez-Madrid, 2003).

Diante do desafio das construções atuais, nas quais os fenômenos naturais colocam em risco sua integridade, há mais de 20 anos a comunidade de San Crisanto, em Yucatán, é pioneira na implementação de soluções inovadoras em construção (Briceño-Mena et al., 2024; Castro-Borges et al., 2011). Em resposta às condições agressivas do entorno, foi desenvolvido um projeto no qual se projetaram e construíram palafitas de concreto armado, cujos projetos foram sendo aperfeiçoados ao longo de cinco gerações. Esse projeto, impulsionado pelo Cinvestav-Unidade Mérida, em colaboração com instituições como Cemex, Galvex e as Faculdades de Arquitetura e Engenharia Civil da UADY, buscou não apenas resistir à corrosão induzida pelo ambiente, mas também otimizar a durabilidade dessas estruturas por meio de estratégias de engenharia.

Embora se saiba que os elementos de uma estrutura estão sujeitos aos microclimas tropicais marinhos dessa região, até o momento não foram realizados trabalhos que revelem as contribuições de cada microclima sobre esses elementos. Essa informação, caso estivesse disponível, permitiria implementar estratégias de prevenção de danos específicas à influência de cada microclima e a cada tipo de elemento estrutural, possibilitando economias claras na manutenção preventiva, tanto em relação aos materiais quanto aos sistemas destinados a controlar os efeitos de cada microclima. O projeto dessas palafitas se fundamenta no uso de sapatas encaixotadas, estacas, colunas, lajes e vigas de concreto armado, elementos submetidos a agressões constantes dos microambientes tropicais marinhos. Por isso, é fundamental compreender e avaliar o comportamento eletroquímico e ambiental de seus componentes, especialmente no que se refere à velocidade e ao potencial de corrosão, à resistividade elétrica (Broomfield, 2023; Cao et al., 2019), bem como à temperatura e às umidades internas no nível da armadura.

Os palafitos foram projetados e construídas à luz dos critérios que hoje fundamentam as normas NMX-C-ONNCCE 530 e 569. Com o objetivo de obter uma visão integral do desempenho dessas estruturas, foi implementado, durante sete anos, um sistema de monitoramento que incluiu medições periódicas da umidade relativa e da temperatura interna do concreto no nível da armadura, parâmetros ambientais críticos. Essa abordagem permitiu analisar em detalhe a interação estrutura-microambiente em relação aos processos de degradação, bem como a eficácia e a eficiência das estratégias construtivas aplicadas para prolongar a vida útil das palafitas. Algumas dessas estratégias foram o tipo de pré-fabricação, as espessuras de revestimento, a orientação dos elementos estruturais, o acompanhamento de variáveis climáticas e eletroquímicas em seções definidas quanto à geometria, alturas e posicionamento de vigas e colunas.

Em síntese, o objetivo deste trabalho foi analisar parte dos resultados eletroquímicos e microambientais de algumas colunas obtidos na quinta geração da subestrutura de palafitos pré-fabricados, em função de estratégias específicas de projeto baseadas na durabilidade.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Detalhes construtivos.

A subestrutura do projeto é composta por elementos pré-fabricados, como vigas, colunas e blocos de fundação, produzidos em uma planta industrial localizada em Mérida, a 30 km da linha de costa. Essa abordagem de pré-fabricação permite o controle de qualidade em cada fase da produção, o que é essencial para garantir bom desempenho estrutural em ambientes marinhos severos. A produção industrial, combinada com o planejamento em campo, permite que cada componente atenda às especificações técnicas e de durabilidade requeridas para enfrentar as condições ambientais adversas do Golfo do México.

#### 2.1.1 Instalação de dispositivos embutidos de monitoramento (*fitters*).

Para monitorar com precisão as condições internas do concreto, foram desenvolvidos e integrados dispositivos denominados "fitters". Esses dispositivos, de projeto próprio, foram incorporados estrategicamente nas colunas e vigas da subestrutura, sem alterar as propriedades físicas nem a integridade estrutural do elemento. Eles permitem avaliar parâmetros críticos, como temperatura, umidade relativa e atividade de corrosão, sem necessidade de procedimentos destrutivos, fornecendo dados fundamentais para a análise da durabilidade.

A instalação dos fitters foi realizada em duas etapas principais: primeiro, eles foram fixados diretamente à armadura dos elementos estruturais antes de serem posicionados nas fôrmas. Esse procedimento assegura contato adequado com o aço da armadura, permitindo medir com precisão o comportamento eletroquímico. Uma vez instalados, os elementos pré-fabricados com os fitters incorporados foram colocados nas fôrmas e procedeu-se à concretagem, assegurando que esses sensores ficassem perfeitamente encapsulados, sem gerar vazios nem interferências. Após a pega, verificou-se a correta integração dos dispositivos (Briceño-Mena et al., 2024). O uso dos fitters não apenas permitiu compreender o comportamento das estruturas em ambientes tropicais marinhos, como também estabeleceu bases para estratégias de monitoramento contínuo em tempo real. Essa abordagem pode ser replicada em outros projetos de infraestrutura costeira, assegurando um projeto mais resiliente e adaptado às condições específicas de cada ambiente. A Figura 1 mostra a disposição final dos fitters em uma coluna tipo.

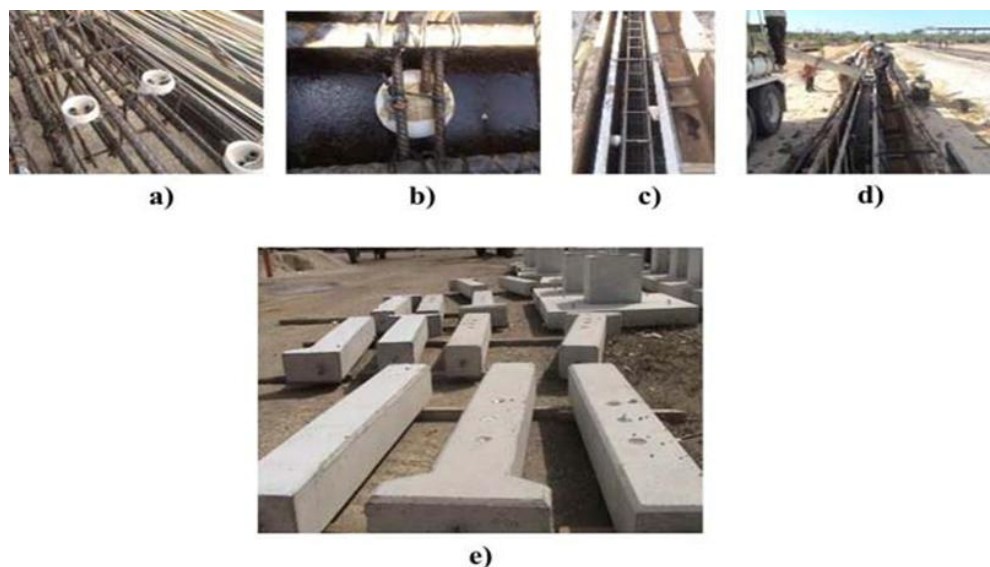


Figura 1. Instalação dos fitters.

Para garantir que as medições fossem representativas, os fitters foram posicionados a alturas de 40 cm, 80 cm e 110 cm acima do Nível de Piso Terminado (NPT). Além disso, foram definidos seis pontos de medição em cada coluna: três na barra Oeste e três na barra Este. Esses pontos estratégicos permitem obter um perfil da variação da corrosão ao longo da estrutura, o que é crucial para identificar as áreas mais vulneráveis e aplicar medidas preventivas. Neste trabalho, apresenta-se o caso das colunas. A Figura 2 mostra as posições dos fitters. É importante destacar que as faces de estudo das colunas A, B e C estavam protegidas pela laje da estrutura, enquanto as faces de estudo das colunas D, E e F estavam expostas ao tempo.

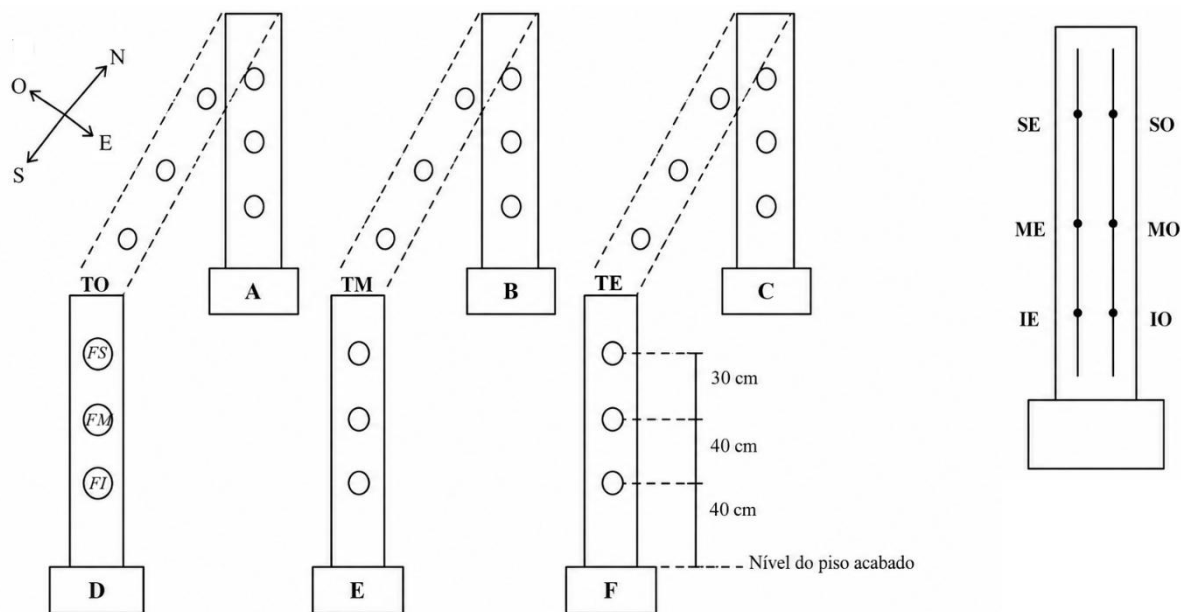


Figura 2. Croqui da subestrutura tipo palafito.

## 2.2 Técnicas de medição

O monitoramento sistemático dos parâmetros, tanto eletroquímicos quanto ambientais, é fundamental para compreender o estado da subestrutura de concreto armado e detectar precocemente os processos de corrosão induzidos pelo ambiente marinho. Com esse objetivo, estabeleceu-se um plano de medição periódico, em geral a cada três meses, embora em algumas ocasiões os intervalos tenham sido ampliados devido a condições externas. Antes de avaliar os indicadores eletroquímicos, registraram-se, em primeiro lugar, os parâmetros ambientais, uma vez que a umidade e a temperatura incidem diretamente sobre a velocidade de corrosão. Além disso, as superfícies de medição foram umedecidas para evitar que a secura alterasse os resultados. Para realizar essas medições, empregou-se um corrosímetro comercial, o Gcorr 6, que utiliza a técnica de resistência à polarização (Andrade & Alonso, 2004; Feliu et al., 2007; Trocónis de Rincón et al., 1997). Esse equipamento foi posicionado estrategicamente em cada elemento estrutural, assegurando que os dados fossem representativos.

### 2.2.1 Parâmetros eletroquímicos

O conjunto de medições eletroquímicas permite obter informações precisas sobre o comportamento do aço da armadura e a integridade do concreto (Ramón et al., 2021; Xia et al., 2022).

#### 2.2.1.1 Potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

O potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) é um parâmetro-chave para avaliar a probabilidade de corrosão nas armaduras embebidas no concreto. Esse potencial, medido em relação a um eletrodo de referência,

fornece informações sobre o estado do aço da armadura, embora esse valor, isoladamente, não indique a velocidade de corrosão. Trata-se de uma ferramenta diagnóstica fundamental, que deve ser interpretada em função das condições ambientais, como umidade, contaminação e qualidade do concreto. No contexto do ambiente costeiro, onde a estrutura está exposta à elevada salinidade e a flutuações de temperatura, o  $E_{corr}$  torna-se um indicador essencial para determinar zonas críticas que requerem manutenção preventiva. Os critérios de avaliação de  $E_{corr}$  podem ser observados na Tabela 1:

Tabela 1. Critérios de avaliação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) (NMX-C-495-ONNCCE-2015, reaprobadada em 2021)

$E_{corr}$ (mV vs Cu/CuSO <sub>4</sub> )	Descrição
> -200	10% de probabilidade de corrosão
-200 a -350	Incerteza
-350 a -500	90% de probabilidade de corrosão
< -500	Corrosão severa

### 2.2.1.2 Velocidade de corrosão ( $i_{corr}$ )

A velocidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) é um dos parâmetros mais críticos para avaliar a deterioração do aço da armadura. Esse valor, medido em microampères por centímetro quadrado ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) (Andrade & Alonso, 1996), indica a rapidez com que o aço perde material devido à corrosão, permitindo estimar a vida útil remanescente da estrutura. Em ambientes marinhos, como o do Golfo do México, a presença de cloretos e a umidade elevada podem aumentar significativamente a velocidade de corrosão. Em condições reais, valores superiores a  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  já são considerados elevados e podem reduzir a vida útil da estrutura. A seguir, na Tabela 2, são apresentados os critérios para avaliar a velocidade de corrosão.

Tabela 2. Critérios de avaliação da velocidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) (NMX-C-501-ONNCCE-2015, 2015).

Velocidade de corrosão		Nível de corrosão	Estado do concreto
( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	( $\mu\text{A}/\text{ano}$ )		
< 0.1	< 1	Desprezível	Concreto seco ou não carbonatado
0.1 – 0.5	1 – 5	Baixo	Concreto saturado ou ligeiramente úmido, carbonatado ou com cloretos
0.5 – 1.0	5 – 10	Moderado	Concreto com alto teor de umidade, carbonatado ou com cloretos
> 1.0	> 10	Alto	Concreto muito contaminado com cloretos

### 2.2.1.3 Resistividade elétrica ( $\rho$ )

A resistividade elétrica ( $\rho$ ) do concreto é outro indicador importante: mede a capacidade do concreto de resistir ao fluxo de corrente elétrica e está diretamente relacionada à sua porosidade e à capacidade de transportar agentes agressivos até o aço da armadura. Uma baixa resistividade indica maior risco de corrosão, pois facilita o transporte de cloretos e água até a armadura. Embora não exista consenso geral sobre o limite exato de resistividade abaixo do qual o risco de corrosão é desprezível, na prática utiliza-se a classificação da Tabela 3 como referência:

Tabela 3. Critérios de avaliação da resistividade elétrica ( $\rho$ ) (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).

Resistividade (k $\Omega$ cm)	Probabilidade de corrosão
> 100 - 200	O concreto é muito denso, de modo que sua porosidade interconectada é extremamente baixa, assim como o transporte de agentes agressivos até o aço da armadura. As velocidades de corrosão desse aço são muito baixas, independentemente do teor de cloretos ou do nível de carbonatação. Não há distinção entre aço em estado ativo ou passivo.
50 - 100	O concreto apresenta baixa porosidade interconectada, dificultando o transporte de agentes agressivos até o aço da armadura. As velocidades de corrosão desse aço são baixas.
10 a 50	O concreto apresenta porosidade interconectada significativa, permitindo que o transporte de agentes agressivos até o aço da armadura seja rápido. As velocidades de corrosão desse aço são moderadas ou altas em concretos carbonatados ou com cloretos.
< 10	O concreto apresenta porosidade interconectada excessiva, permitindo que o transporte de agentes agressivos até o aço da armadura seja extremamente rápido. As velocidades de corrosão desse aço são muito altas em concretos carbonatados ou com cloretos. A resistividade não é o parâmetro que controla o processo de corrosão. O valor da velocidade de corrosão obtido com a NMX-C-501-ONNCCE-2015 reflete o limite superior da velocidade de corrosão nesse concreto para um determinado teor de cloretos ou nível de carbonatação.

#### 2.2.1.4 Parâmetros ambientais do concreto

A avaliação dos parâmetros ambientais, como a umidade relativa e a temperatura interna do concreto, é indispensável para compreender a dinâmica da corrosão. Em zonas costeiras, essas variáveis estão sujeitas a flutuações significativas que afetam diretamente a estabilidade do concreto e a integridade do aço da armadura (Bouteiller et al., 2012; Chauhan & Sharma, 2019; Villagrán Zaccardi et al., 2013). Para essas análises, empregou-se um sensor digital da marca Vaisala, que mede com precisão a umidade e a temperatura a uma profundidade de 6 cm no interior do concreto. A sonda foi inserida nos fitters, de modo que as medições refletissem as condições reais do interior do concreto, sem serem afetadas pelas condições externas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os sete anos de monitoramento da subestrutura palafítica, os parâmetros eletroquímicos e ambientais revelaram dados-chave sobre seu desempenho, permitindo observar comportamentos consistentes com elevados níveis de durabilidade. Os dados obtidos demonstram a efetividade do projeto e dos materiais empregados para resistir às condições agressivas do ambiente tropical marinho do Golfo do México.

#### 3.1 Potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

Os valores de  $E_{corr}$  da Figura 3 oscilaram entre +150 mV e -150 mV (vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>), situando-se consistentemente na faixa de < 10% de probabilidade de corrosão segundo os critérios da NMX-C-495-ONNCCE-2015 (reaprovada em 2021). A disposição, como mostrado na Figura 2, corresponde às colunas A, B e C localizadas ao Norte, e às colunas D, E e F localizadas ao Sul. A

coluna A apresentou os valores pontuais mais negativos (-150 mV) no início da exposição e ao final do período estudado, enquanto a coluna C registrou, de forma constante, valores entre -50 mV e -120 mV, sem superar o limiar de incerteza da norma. Em sentido oposto, a coluna D, exposta ao tempo, apresentou os valores pontuais mais positivos, o que sugere maior passivação do aço, possivelmente decorrente de uma exposição prolongada ao processo de secagem (Bouteiller et al., 2012). Embora isso possa estar associado a condições ambientais que favorecem a passivação do aço, é necessário realizar uma interpretação conjunta da velocidade de corrosão e da resistividade, permitindo observar com maior precisão a termodinâmica e a cinética do processo de corrosão.

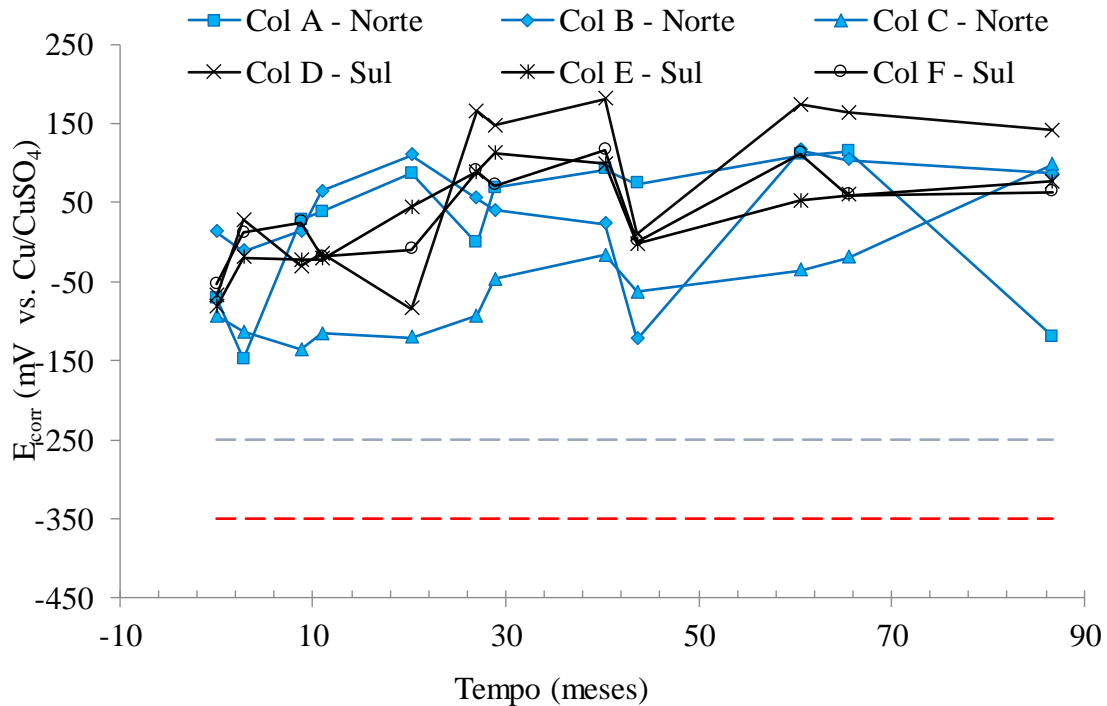


Figura 3.  $E_{corr}$  vs. tempo.

Como o potencial de corrosão é um parâmetro que indica a probabilidade de corrosão, as medições pontuais podem indicar uma tendência do comportamento eletroquímico, mas devem ser complementadas por outras técnicas ou estratégias de análise. Para auxiliar na interpretação dos resultados, recorreu-se a um gráfico acumulado, apresentado na Figura 4, que constitui uma ferramenta qualitativa (Briceño-Mena et al., 2025) e que, na presença de grande quantidade de dados, poderia ser utilizado com critérios estatísticos, como os empregados na recomendação técnica RILEM (RILEM TC-154 ECM, 2024). Essa figura mostra que um elemento com potenciais pontuais mais negativos não apresenta necessariamente maior probabilidade de corrosão quando comparado àqueles que têm comportamento uniforme ao longo do tempo (Chauhan & Sharma, 2019), como é o caso da coluna C, que apresenta tendência acumulada marcada para valores negativos, porém estáveis.

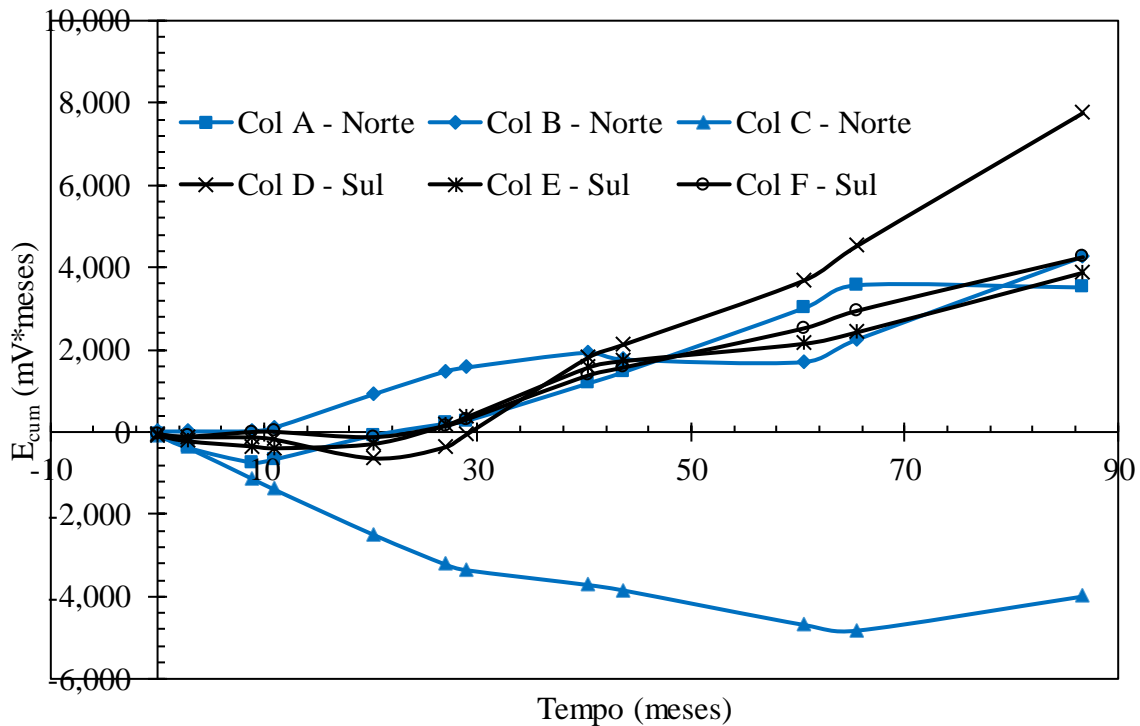
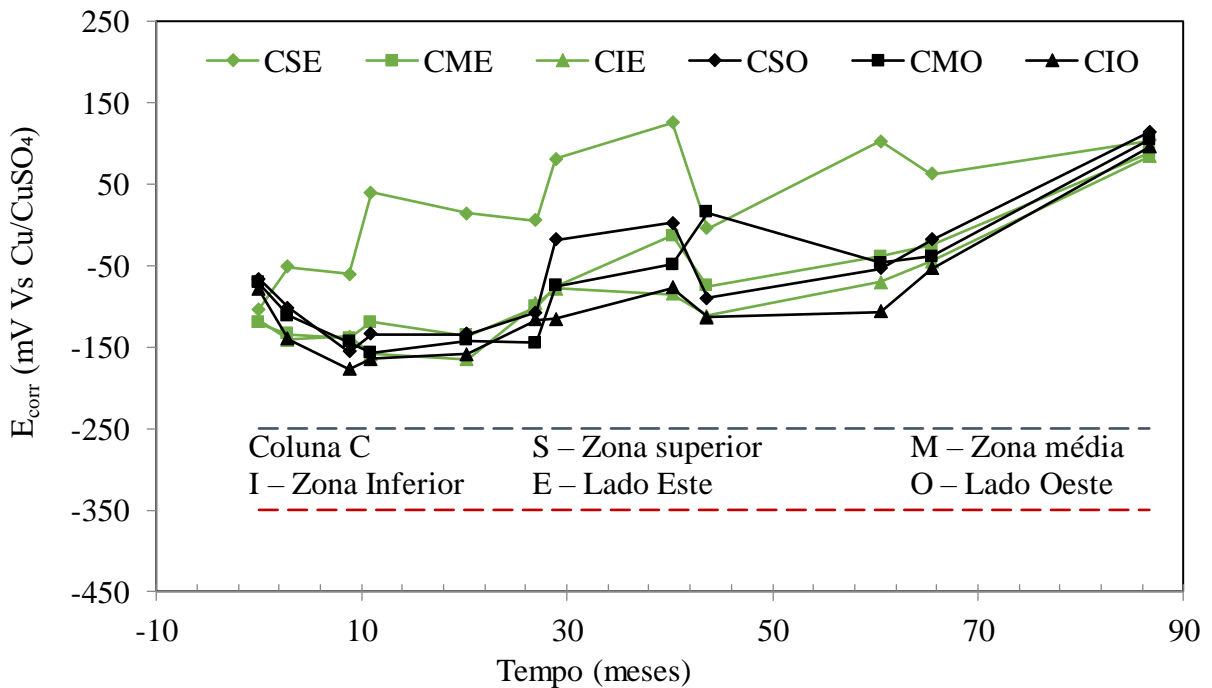


Figura 4. E<sub>cum</sub> vs. tempo.

Por outro lado, quanto à altura e à orientação das colunas, a Figura 5 apresenta os resultados individuais das colunas C, localizada ao Norte, e D, localizada ao Sul. Observa-se, na coluna C, que, com exceção da medição realizada no lado Este da parte superior, a maioria dos dados se mantém em níveis mais negativos sem atingir os limiares; portanto, não estaria ocorrendo corrosão. Na coluna D, a distribuição dos dados é semelhante em todos os pontos de medição.



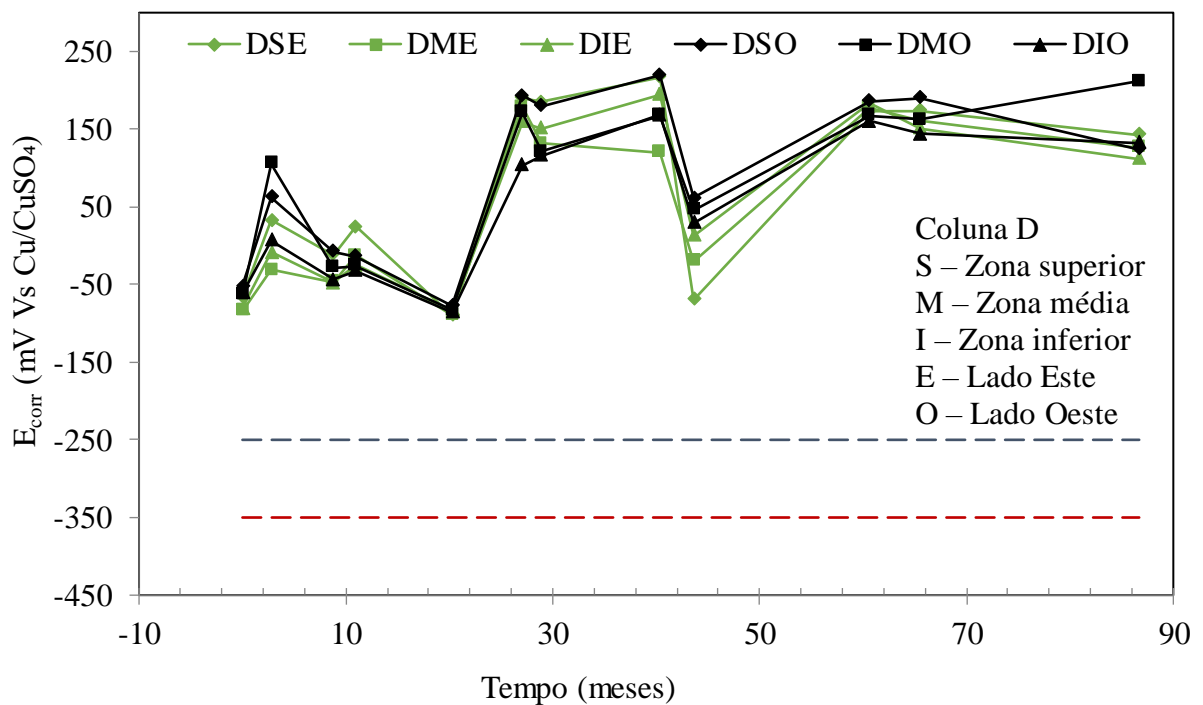


Figura 5.  $E_{\text{corr}}$  vs. tempo das colunas C e D.

A análise detalhada do potencial de corrosão mostra, de acordo com os critérios da NMX-530-ONNCCE-2018 e da NMX-495-ONNCCE-2015 (reaprovada em 2021), que após 7 anos expostos a um ambiente tropical marinho da Península de Yucatán há manutenção estável, em todos os casos, na zona de passividade, a ser verificada com outras técnicas devido às possíveis alterações termodinâmicas no comportamento eletroquímico que poderiam não estar de acordo com as alterações cinéticas.

### 3.2 Velocidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ )

As velocidades gerais de corrosão variaram entre  $0,003 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  e  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , classificadas como desprezíveis segundo a NMX-C-501-ONNCCE-2015, como se observa na Figura 6. As colunas F e D atingiram seus valores máximos ( $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) sem comprometer a integridade da armadura, devido à tendência geral do estudo. Por outro lado, a coluna B atingiu o menor valor, embora de forma isolada, diferentemente da coluna C, que apresenta comportamento constante.

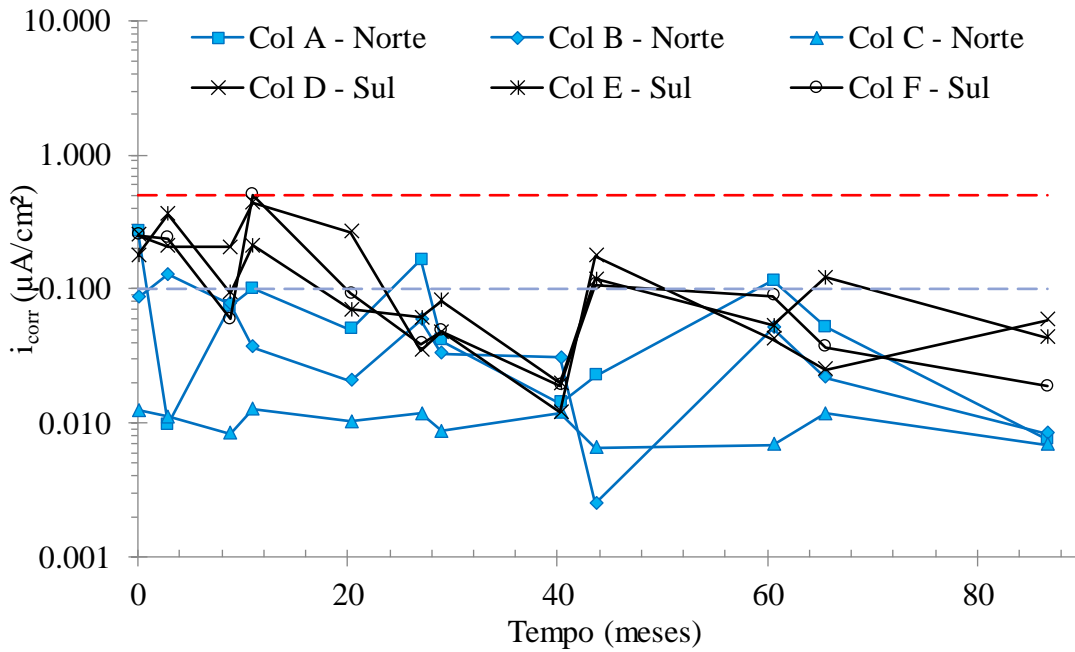


Figura 6.  $i_{corr}$  vs. tempo.

A figura anterior apresenta variação dos dados; por isso, para realizar uma análise mais consistente, utiliza-se a velocidade de corrosão acumulada (Figura 7) (Andrade et al., 2012; Castro-Borges et al., 2013, 2017). Nessa figura, observa-se uma clara diferença entre as colunas localizadas ao Norte e ao Sul, sendo que as expostas ao tempo, ao Sul, apresentam maiores velocidades de corrosão. A coluna D é a mais desfavorável, pois nos primeiros 20 meses observou-se uma alteração de inclinação, mais positiva, que posteriormente se estabilizou, indicando que ainda não há processos corrosivos. Em sentido oposto, as colunas ao Norte apresentam comportamento estável durante o período de estudo.

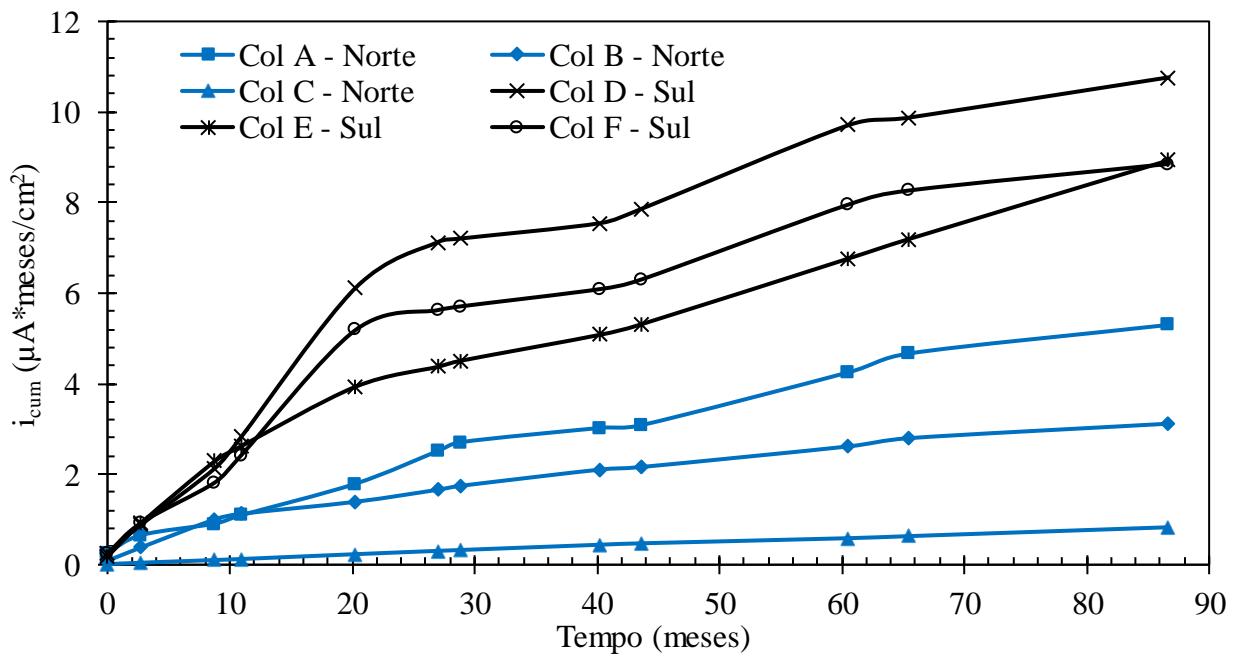


Figura 7.  $i_{cum}$  vs. tempo.

Para compreender o exposto, analisam-se os comportamentos observados nas colunas C e D (Figura 8). Nesse caso, a coluna C mostra continuidade nas medições, com valores na faixa de 0,01  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . No caso da coluna D, observa-se que, no início, as velocidades de corrosão estavam próximas aos limiares devido ao processo de passivação que ocorre em ambientes naturais, para posteriormente alcançar valores estáveis abaixo do limiar.

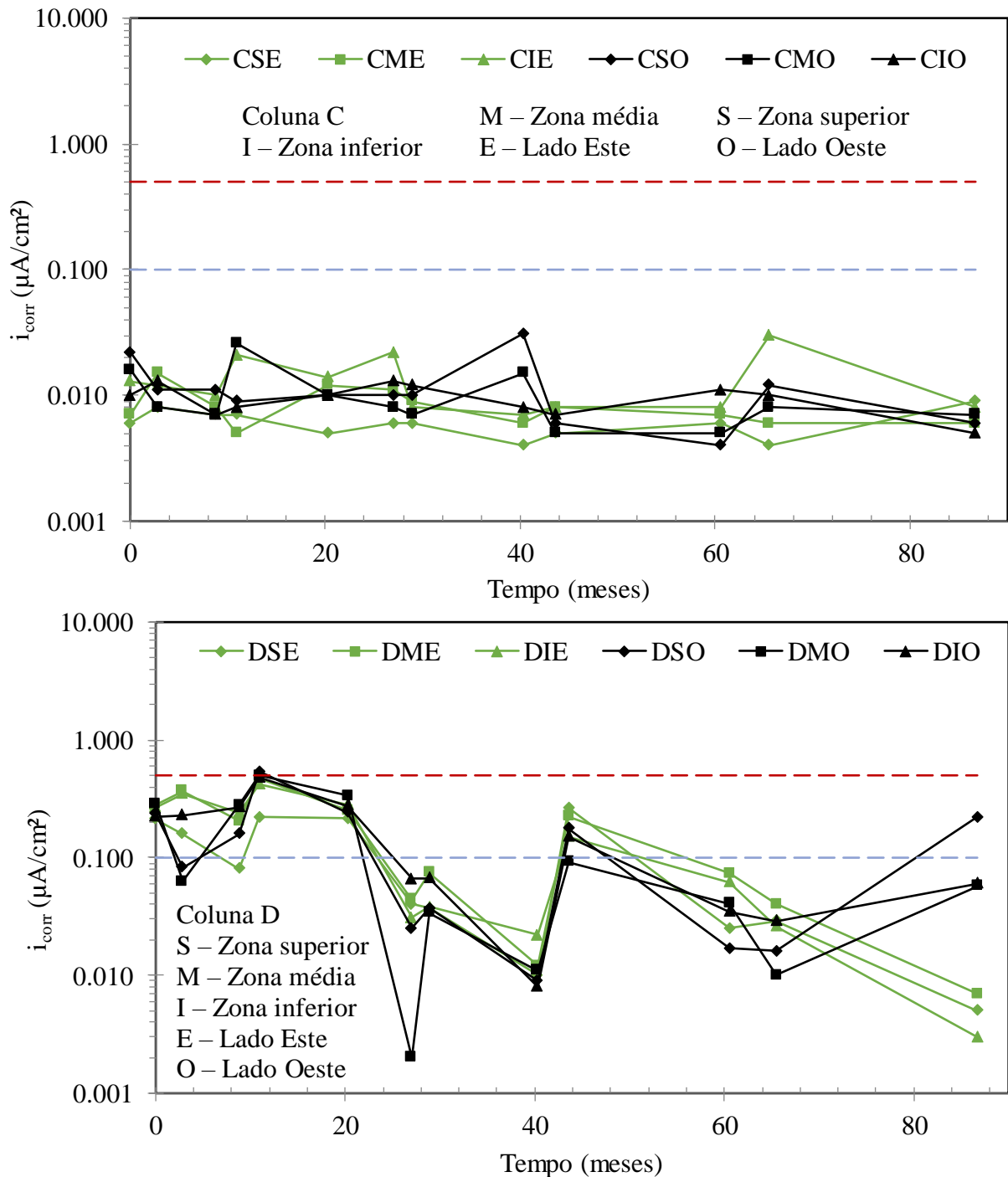


Figura 8.  $i_{\text{corr}}$  vs. tempo das colunas C e D.

### 3.3 Resistividade

Os valores de resistividade oscilaram entre 10 e 150  $k\Omega \cdot cm$  (Figura 9). A coluna B destacou-se com 150  $k\Omega \cdot cm$ , indicando uma matriz de concreto de alta densidade. Apesar de não haver um ciclo constante de medições, pode-se observar a influência da estação chuvosa, na qual, em alguns casos, a resistividade diminuiu até 20% de seu valor médio, recuperando os níveis originais no período de seca.

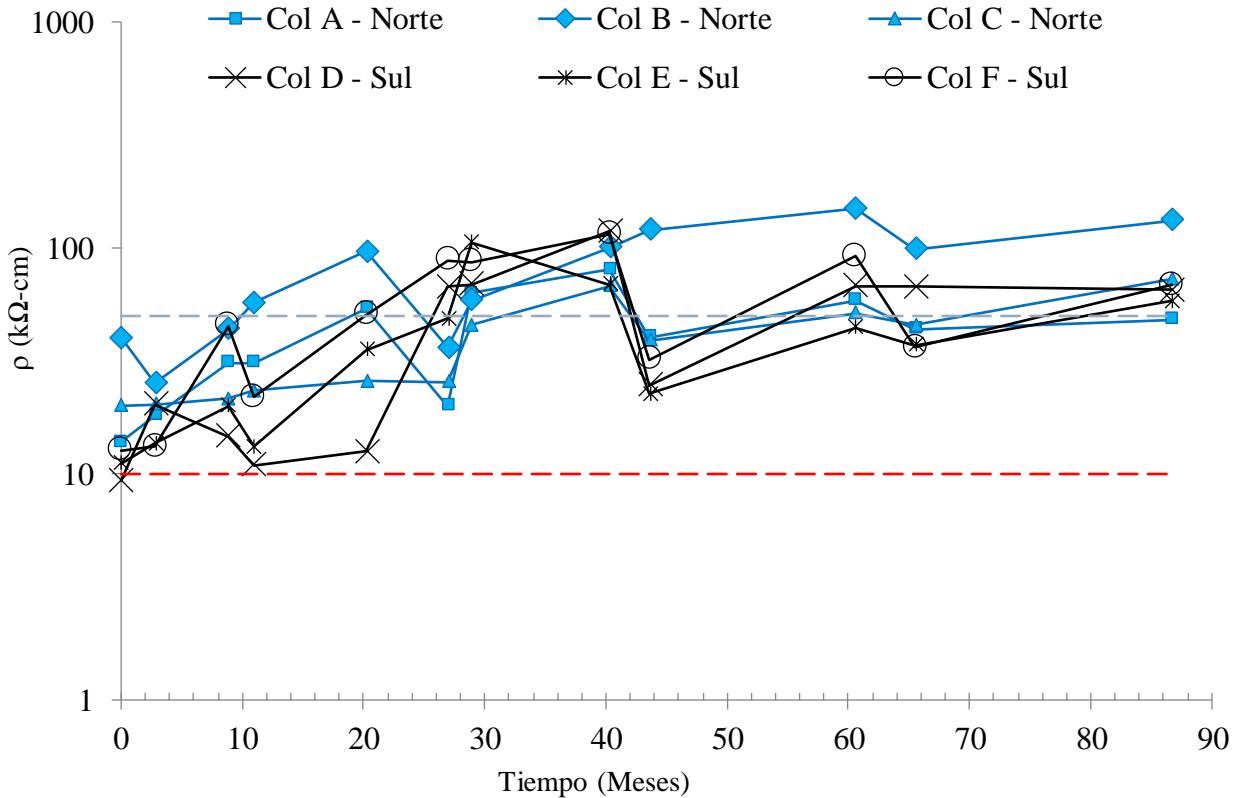


Figura 9.  $\rho$  vs. tempo.

Na Figura 10, são apresentados os dados acumulados das resistividades das colunas (Briceño-Mena et al., 2025). Diferentemente do observado na velocidade de corrosão, não se verifica uma diferença clara entre as zonas Norte e Sul. Entretanto, nota-se que a coluna B, localizada ao Norte, apresenta maior resistividade. Embora, assim como no caso do potencial de corrosão, a resistividade acumulada se mostre um parâmetro qualitativo durante a etapa de iniciação, espera-se observar sua influência quantitativa à medida que a estrutura possa se aproximar da despassivação.

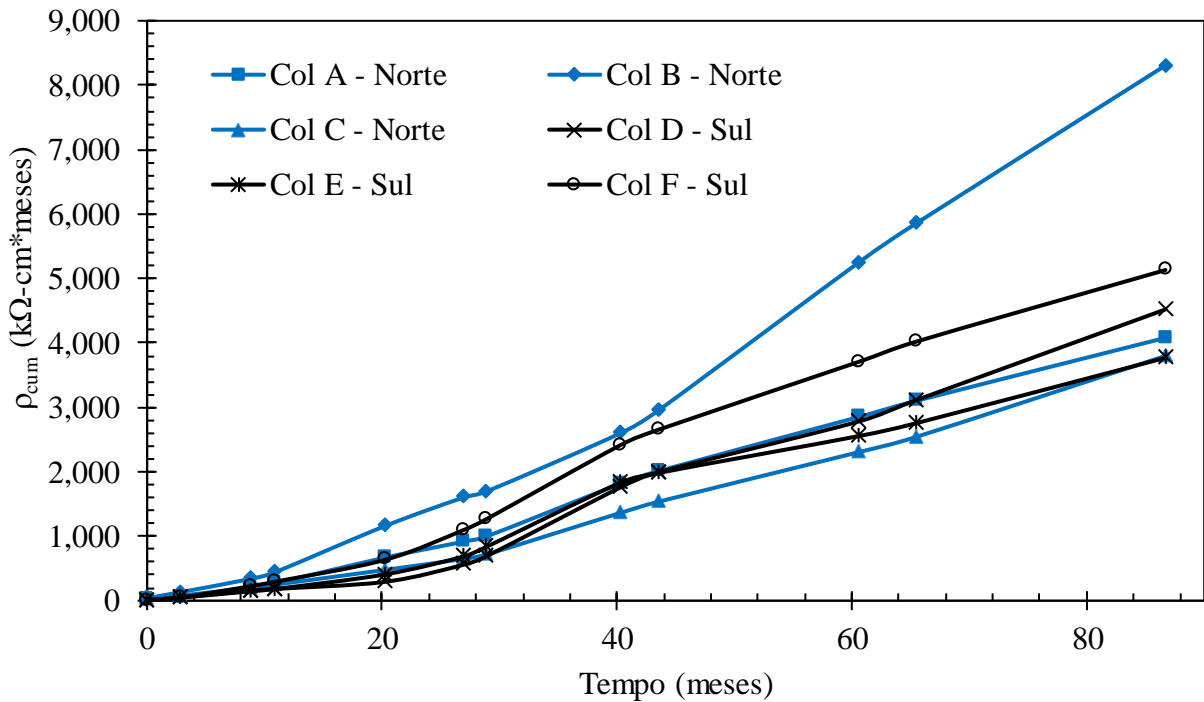
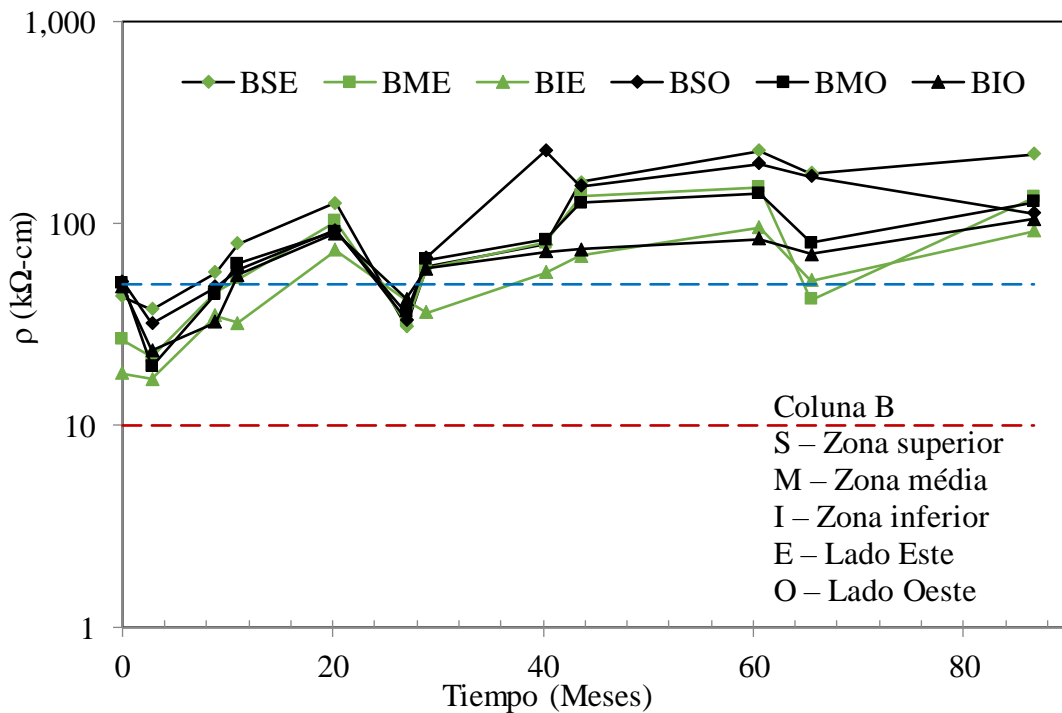


Figura 10.  $\rho_{cum}$  vs. tempo.

Na Figura 11, apresenta-se a resistividade elétrica da coluna B, na qual as resistividades em idade inicial superaram o limiar superior, o que explicaria o observado nos acumulados. No caso da coluna D, somente a partir dos 30 meses foram obtidas resistividades consideráveis, que se mantiveram nesse estado até o final do período reportado.



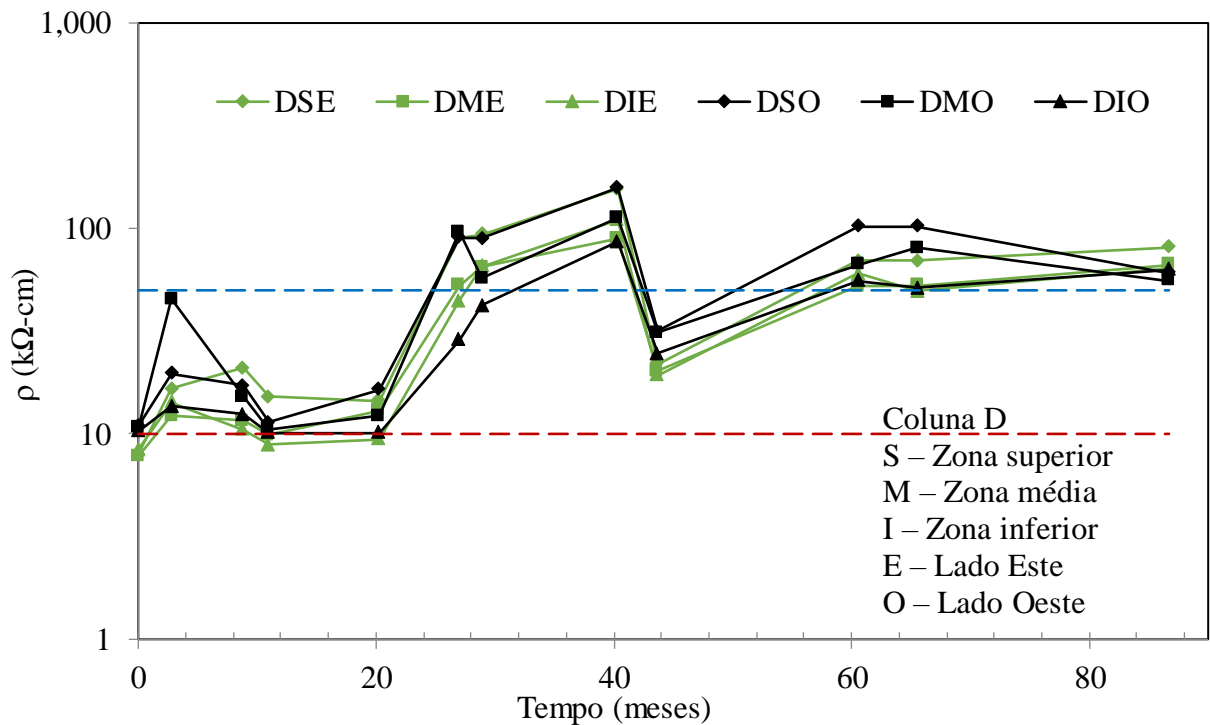


Figura 11.  $\rho_{cum}$  vs. tempo das colunas B e D.

### 3.4 Umidade e temperatura

A Figura 12 mostra que a umidade interna oscilou entre 60% e 90%, com umidade relativa média de 74% e picos na segunda metade do ano, coincidindo com a estação chuvosa, como se observa nos três principais picos obtidos nos meses de junho e julho, o que é fundamental para avaliar a probabilidade de corrosão em áreas particularmente vulneráveis (Pacheco-Torgal et al., 2019). A umidade relativa média das colunas localizadas na zona Norte é de 72%, enquanto as localizadas no lado Sul, expostas ao tempo, apresentam umidade relativa média de 76%.

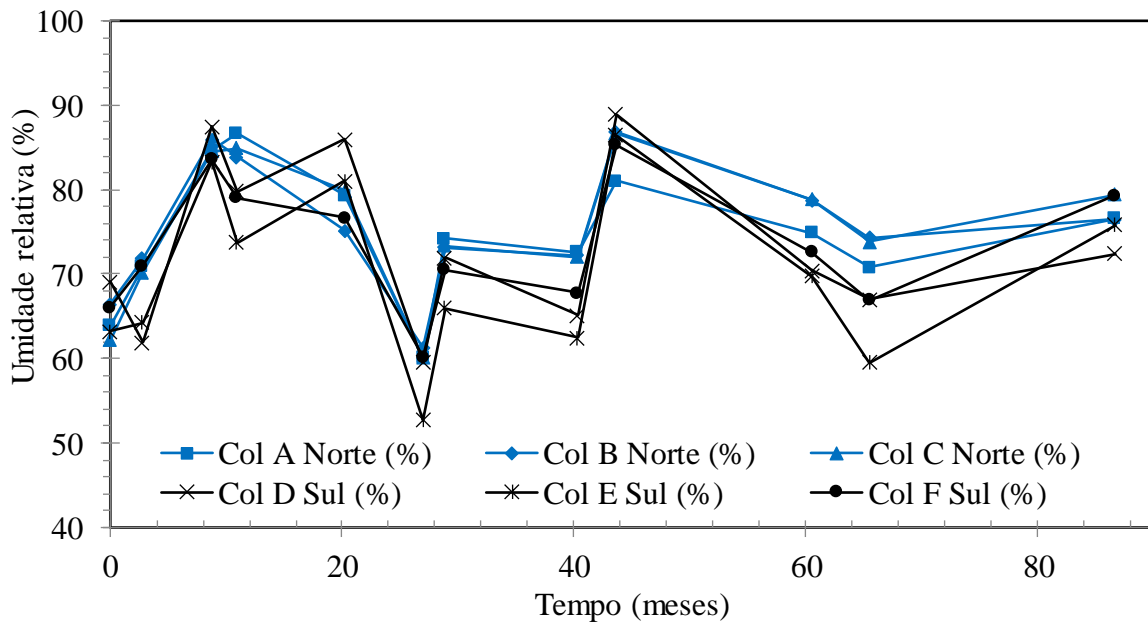


Figura 12. UR vs. tempo.

A Figura 13 apresenta os resultados acumulados da umidade relativa; observa-se que as colunas localizadas ao Norte apresentam maior umidade. Entretanto, toda as colunas apresentam a mesma tendência.

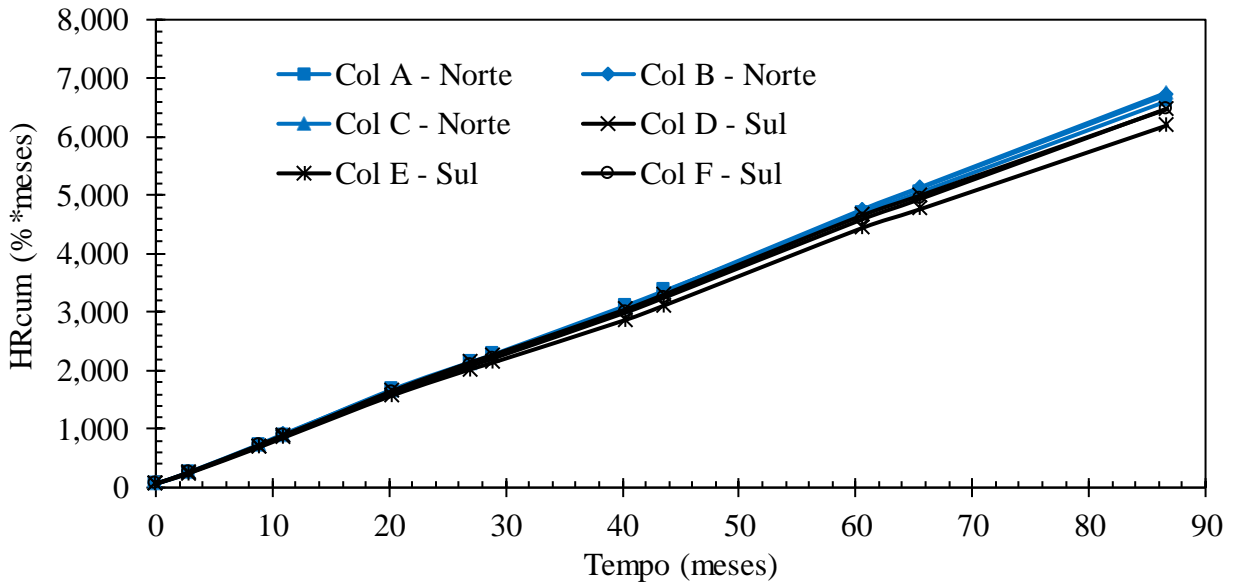


Figura 13. URcum vs. tempo.

Por sua vez, a Figura 14 apresenta as temperaturas registradas nas colunas; estas variaram entre 26 °C e 34 °C, com temperatura média de 29 °C para as colunas localizadas na zona Norte e de 30 °C para aquelas localizadas na zona Sul, sem que se observassem alterações ou variações notáveis em função das estações seca ou chuvosa. Essas observações reforçam a importância do monitoramento contínuo em estruturas costeiras, nas quais os gradientes ambientais podem variar substancialmente conforme a exposição.

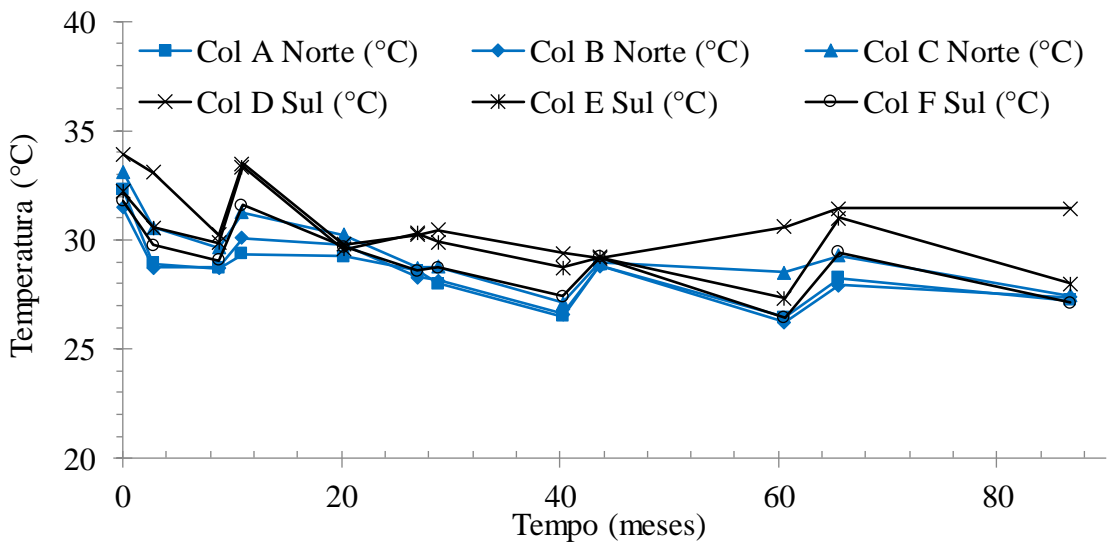


Figura 14. Temperatura vs. tempo.

A Figura 15 apresenta as tendências acumuladas da temperatura. Assim como observado nas medições pontuais, as temperaturas das colunas localizadas ao Norte são menores.

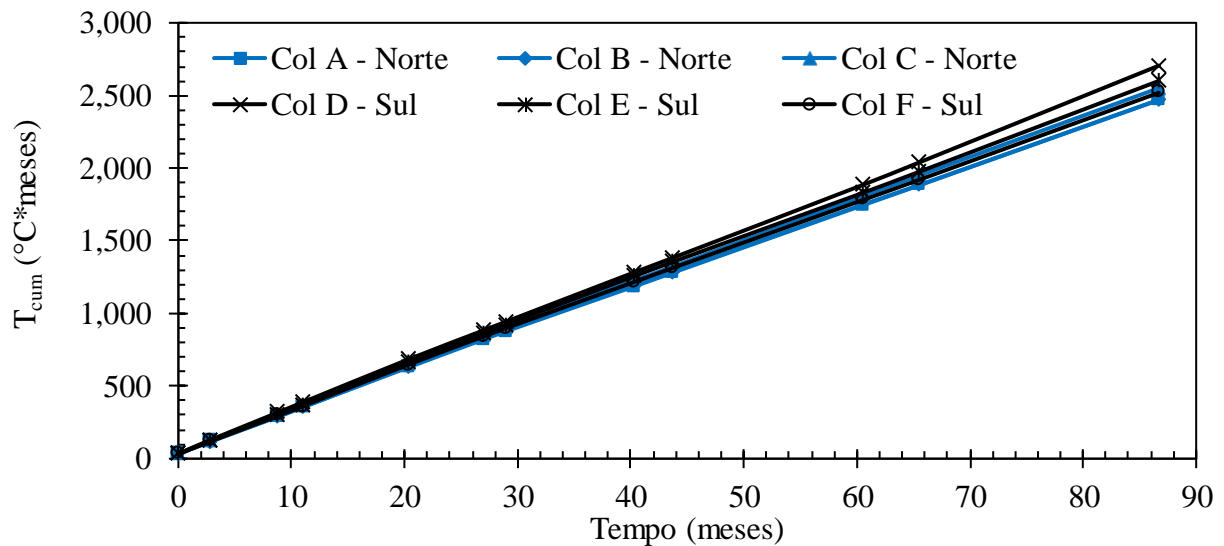


Figura 15. T<sub>cum</sub> vs. tempo.

Ao longo dos sete anos de monitoramento, os dados das medições eletroquímicas e elétricas pontuais em zonas específicas dos elementos apresentam variabilidade associada às condições ambientais. Por exemplo, as alterações observadas quando a resistividade elétrica diminui (Figura 9) e a velocidade de corrosão aumenta (Figura 6) correspondem aos períodos de maior umidade relativa (Figura 12) e temperatura (Figura 14). Isso representa uma resposta do concreto e do aço ao seu comportamento físico e eletroquímico, respectivamente, diante das alterações externas do clima refletidas no microclima interno do concreto armado (Cabrera-Madrid et al., 2014).

Essa análise, ao longo do período de estudo, também permitiu observar diferenças nas localizações dos pontos de medição: nas colunas posicionadas no lado Norte, com face de análise orientada para o Sul, sob a laje, e nas colunas posicionadas no lado Sul, com face de análise orientada para o Sul, fora da laje, podem-se distinguir os microclimas em função da orientação. As colunas do lado Sul apresentaram maiores velocidades de corrosão acumuladas devido à exposição direta ao ambiente, por não contarem com a proteção física da laje, o que se evidencia nas dispersões das medições de umidade relativa.

### 3.5 Impacto das estratégias adotadas nos parâmetros medidos.

Quando foram projetadas e construídas as diferentes gerações do palafito, buscava-se uma forma de realizar um acompanhamento ordenado que permitisse, ao longo dos anos, discriminar a influência das variáveis concebidas no projeto, como orientação geográfica, posição em relação à altura, proteção ou não contra o influxo marinho, proteção ou não contra a sombra e a insolação. Isso não seria alcançado apenas com a instalação dos “fitters”, mas também com medições que pudessem ser realizadas em diferentes estações do ano ao longo dos anos. Da mesma forma, seria possível analisar como as mudanças climáticas incidiriam nas variáveis estudadas.

Como se sabe, o ambiente externo da estrutura se reflete no interior do concreto em diferentes profundidades (Castro-Borges & Veleza, 2015). Existe um tempo de defasagem entre o clima externo e seu reflexo no clima interno, que é difícil de medir. No entanto, considerando que os parâmetros de durabilidade são internos, conhecer as variações climáticas junto ao aço da armadura é fundamental para identificar correlações entre o ambiente e o comportamento eletroquímico.

Além disso, era necessária uma análise complementar do monitoramento pontual, isto é, o acompanhamento acumulado. Embora não haja uma interpretação cinética, mas sim termodinâmica, os resultados discutidos dos acumulados nas figuras anteriores demonstraram que, graças a eles, é possível discriminar a influência do clima nos parâmetros eletroquímicos segundo a orientação geográfica, a altura de medição nas colunas, a proteção ou não contra a brisa marinha, ou contra a sombra e a insolação. Com os dados obtidos após sete anos, agora é possível, inclusive, intervir na estrutura para conhecer seu comportamento frente a cloretos e carbonatação e, com isso, modelar sua vida útil a partir dos sete anos, ou tomando como início o ano zero. Isso fará parte de outro trabalho que será publicado em breve.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente estudo, desenvolvido durante sete anos de monitoramento contínuo, forneceu informações valiosas sobre o comportamento eletroquímico e ambiental de uma subestrutura tipo palafito exposta às condições agressivas do Golfo do México. Os resultados obtidos não apenas confirmam a eficácia do projeto e dos materiais empregados, mas também oferecem elementos técnicos para a construção de infraestruturas costeiras resilientes. A seguir, apresentam-se as conclusões sobre os principais achados.

- Os valores de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) oscilaram entre  $-150\text{ mV}$  e  $+150\text{ mV}$  em relação ao eletrodo de referência  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , indicando baixa probabilidade de corrosão ( $<10\%$ ) em todas as colunas monitoradas, de acordo com a  $\text{NMX-C-495-ONNCCE-2015}$  (reaprovada em 2021). Esse comportamento reflete a efetividade do projeto estrutural em ambientes marinhos agressivos, caracterizados por altas concentrações de cloretos e umidade relativa em torno de  $80\%$ .
- A instalação de dispositivos integrados de monitoramento (fitters) demonstrou ser uma solução eficaz e não destrutiva para avaliar parâmetros do concreto, como umidade, temperatura e atividade elétrica e eletroquímica ( $E_{corr}$ ,  $i_{corr}$  e  $\rho$ ). Sua instalação não alterou as propriedades eletroquímicas nem a integridade estrutural do concreto, validando sua implementação em futuros projetos.
- As colunas protegidas (localizadas ao Norte, A, B e C) apresentaram estabilidade destacada em seus valores de  $i_{corr}$  (entre  $0,01$  e  $0,1\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), atribuída à proteção física proporcionada pela laje superior.
- As colunas expostas (localizadas ao Sul, D, E e F) apresentaram picos temporários de até  $0,5\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , atribuídos à estação chuvosa, gerando aumentos na umidade relativa (até  $90\%$ ). Contudo, esses valores se estabilizaram durante os períodos secos e em etapas posteriores do estudo.
- A umidade interna do concreto oscilou entre  $60\%$  e  $90\%$ , com picos durante a temporada de furacões, o que teve efeitos diretos na atividade eletroquímica.
- Os aumentos de  $i_{corr}$  e as reduções da resistividade elétrica ( $\rho$ ) durante os meses chuvosos são consistentes com estudos prévios sobre a influência da umidade nos processos corrosivos em ambientes marinhos.
- As temperaturas registradas variaram entre  $26\text{ }^\circ\text{C}$  e  $34\text{ }^\circ\text{C}$  e, até o momento, não mostraram influência significativa sobre os parâmetros eletroquímicos, confirmando que, em climas tropicais, a umidade é o principal fator na ativação dos processos corrosivos, enquanto as variações térmicas têm efeito menos significativo.
- A pré-fabricação industrial dos elementos estruturais proporcionou uniformidade nas

propriedades do concreto, com redução de defeitos construtivos, como porosidade e fissuras, que costumam ser mais comuns em construções in loco, permitindo resistividade superior a 100 k $\Omega$ -cm.

- Embora não haja interpretação cinética, mas sim termodinâmica, os resultados discutidos dos acumulados nas figuras anteriores demonstraram que, por meio deles, é possível discriminar a influência do clima nos parâmetros eletroquímicos segundo a orientação geográfica, a altura de medição nas colunas, a proteção ou não contra a brisa marinha, ou contra a sombra e a insolação.
- Com os dados obtidos após sete anos, agora é possível inclusive intervir na estrutura para conhecer seu comportamento frente a cloretos e carbonatação e, com isso, modelar sua vida útil a partir dos sete anos, ou tomando como início o ano zero. Isso será parte de outro trabalho a ser publicado em breve.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Pesquisa e de Estudos Avançados (Cinvestav), à Secretaria de Ciência, Humanidades, Tecnologia e Inovação (Sechiti). À Eng. Mercedes Balancán, à M.C. Alexia Zozaya, à M.C. Jasset Puc e ao Eng. Ricardo Martín pelo apoio na coleta de dados.

## 6. REFERÊNCIAS

- Andrade, C., & Alonso, C. (1996). *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*. In Construction and Building Materials. 10(5).
- Andrade, C., & Alonso, C. (2004). *Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*. Materials and Structures. 37(9):623–643. <https://doi.org/10.1007/BF02483292>
- Andrade, C., Rebolledo, N., & Pedrosa, F. (2012). *From the instantaneous corrosion rate to a representative value*. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012, 59–63. <https://doi.org/10.1201/B12750-10>
- Aumento de las Temperaturas. (2019). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bouteiller, V., Cherrier, J. F., L’Hostis, V., Rebolledo, N., Andrade, C., & Marie-Victoire, E. (2012). *Influence of humidity and temperature on the corrosion of reinforced concrete prisms*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 16(3–4):471–480. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.668004>
- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castillo-Burguete, M. T., Torres-Acosta, A.A., & Castro-Borges, P. (2024). *Construcción y caracterización de un palafito de concreto en el Golfo de México: Un enfoque en durabilidad y sostenibilidad*. Memorias del XI Congreso Nacional de Alconpat México “20 años de Congresos Nacionales de Alconpat México, VI, Control de Calidad, paper CC-394-MX, pp. 321–333, 10-12 de septiembre de 2024, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.
- Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Pérez-García, E. J., Nieves-Mendoza, D., & Castro-Borges, P. (2025). *Electrochemical Differences in the Passivity State of Reinforced Concrete for Two Mix Design Methods*. Buildings, 15(8):1293. <https://doi.org/10.3390/buildings15081293>
- Briceño-Mena, J.A., Puc-Vázquez, J. A., Castro-Borges, P., Castillo-Burguete, M.T. (2024). *Concrete durability in vulnerable coastal communities: The role of the Participatory Action Research (PAR) for social appropriation*. Proceedings of the 10th International Conference on CONcrete under SEvere Conditions – Environment and Loading, September 25-27, Chennai, India pp. 69-72.

- Broomfield, J. P. (2023). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223016>
- Cabrera-Madrid, J. A., Balancán-Zapata, M., Torres-Acosta, A. A., Castro-Borges, P. (2014). *Effect of tropical marine microclimates on depassivation and corrosion-induced cracking of reinforced concrete*. Int. J. Electrochem. Sci., 9, 8211 – 8225.
- Cao, Y., Gehlen, C., Angst, U., Wang, L., Wang, Z., & Yao, Y. (2019). *Critical chloride content in reinforced concrete — An updated review considering Chinese experience*. In Cement and Concrete Research 117:58–68. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.020>
- Castro-Borges, P., Balancán-Zapata, M., & López-González, A. (2013). Analysis of tools to evaluate chloride threshold for corrosion onset of reinforced concrete in tropical marine environment of Yucatán, México. Journal of Chemistry. <https://doi.org/10.1155/2013/208619>
- Castro-Borges, P., Balancán-Zapata, M., & Zozaya-Ortiz, A. (2017). *Electrochemical meaning of cumulative corrosion rate for reinforced concrete in a tropical natural marine environment*. Advances in Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1155/2017/6973605>
- Castro-Borges, P., Dickinson, F., Castillo, T., Torres Acosta A. A. & García, C. (2011). *Investigación participativa para crear viviendas durables*, en Memorias del XI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XII Congreso de Control de Calidad en la Construcción, La Antigua Guatemala, Guatemala, 4 a 6 de Octubre, ISBN 978-9929-40-175-4, Trabajo 307 MX, Vol 2, Patología
- Castro-Borges, P. & Veleva, L. (2015). *Time of wetness and temperature as tools to evaluate corrosion risk in concrete blocks exposed to a humid tropical environment*, en Journal of Construction. 4(2), August.
- Chauhan, A., & Sharma, U. K. (2019). *Influence of temperature and relative humidity variations on non-uniform corrosion of reinforced concrete*. Structures, 19:296–308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.016>
- Feliu, V., González, J. A., & Feliu, S. (2007). *Corrosion estimates from the transient response to a potential step*. Corrosion Science, 49(8):3241–3255. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.004>
- Huracanes - Corescam. (n.d.). Retrieved April 7, 2025, from <https://corescam.org/ecosistemas/huracanes/>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2021). *NMX-C-495-ONNCCE-2015 Industria de La Construcción – Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Medición de Potenciales de Corrosión Del Acero de Refuerzo Sin Revestir, Embebido En Concreto - Especificaciones y Método de Ensayo*. México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2015). *NMX-C-501-ONNCCE-2015. Industria de La Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión En Campo - Especificaciones y Método de Ensayo*. México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019 Industria de la construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y método de ensayo*. México
- Trocónis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., & Díaz, I. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. *Durabilidad de la Armadura*. CYTED.
- Ramón, J. E., Castillo, & Martínez, I. (2021). *On-site corrosion monitoring experience in concrete structures: Potential improvements on the current-controlled polarization resistance method*. Materiales de Construcción, 71(344). <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11221>

RILEM TC-154 ECM. (2024). *RILEM TC-154 ECM: ON-SITE CORROSION CONDITION ASSESSMENT, MONITORING AND PREDICTION* - Half-Cell Potential Measurements - Recommendation on practical execution.

Torres-Acosta, A. A., & Martínez-Madrid, M. (2003). *Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment*. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, 15(4):344–353. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200315:4344>

Villagrán Zaccardi, Y. A., Bértora, A., & Di Maio, A. A. (2013). *Temperature and humidity influences on the on-site active marine corrosion of reinforced concrete elements*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 46(9):1527–1535. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9994-z>

Xia, D. H., Deng, C. M., Macdonald, D., Jamali, S., Mills, D., Luo, J. L., Strebl, M. G., Amiri, M., Jin, W., Song, S., & Hu, W. (2022). *Electrochemical measurements used for assessment of corrosion and protection of metallic materials in the field: A critical review*. In Journal of Materials Science and Technology. 112:151–183. Chinese Society of Metals. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.004>