

Influencia de la variación de temperatura en la resistividad eléctrica del hormigón y en la cinética de corrosión de la armadura en hormigón armado

L. C. Chiaradia^{1*} , F. C. R. Almeida¹ , M. T. P. Aguiar¹ , E. J. P. Figueiredo² 

* Autor de Contacto: engenheirolcc@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.709>

Recibido: 07/11/2023 | Correcciones recibidas: 28/11/2023 | Aceptado: 07/12/2023 | Publicado: 01/01/2023

RESUMEN

El trabajo evaluó la influencia de la variación de temperatura en las medidas de resistividad eléctrica y cinética de corrosión en estructuras de hormigón armado sometidas a cloruros. Los hormigones se caracterizaron física y mecánicamente a los 28 y 90 días. Después de 204 días, las muestras se sometieron a ciclos de temperatura de ida y vuelta de 55°C hasta -5°C. Los resultados indicaron que la cinética de corrosión y la resistividad eléctrica variaron con los cambios de temperatura. A temperaturas más altas, las trazas contaminadas con Cl⁻ mostraron una alta probabilidad de corrosión y una disminución en los valores de resistividad eléctrica, sin embargo, a temperatura negativa la probabilidad de corrosión fue insignificante y los valores de resistividad eléctrica fueron los más altos. **Palavras-chave:** hormigón armado; durabilidad; corrosión; resistividad eléctrica; temperatura.

Citar como: Chiaradia, L. C., Almeida, F. C. R., Aguiar, M. T. P., Figueiredo, E. J. P. (2024), " *Influencia de la variación de temperatura en la resistividad eléctrica del hormigón y en la cinética de corrosión de la armadura en hormigón armado* ", Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 1 – 12, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.709>

¹ Departamento de Materiais de Construção, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-Mg, Brasil.

² Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil.

Contribución de cada autor

Neste trabalho, o autor Figueiredo, E. J. P. contribuiu com a ideia original e orientação do trabalho e correções, os autores Aguiar, M. T. P. e Almeida, F. C. R. contribuíram com a co-orientação do trabalho auxiliando no desenvolvimento, tratamento de dados e escrita, o autor Chiaradia, L. C. contribuiu com o desenvolvimento da metodologia, experimentação, coleta de dados, tratamento de dados, redação do trabalho e apresentação final dos resultados.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2024 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2024.

Influence of temperature on the electrical resistivity of concrete and kinect corrosion of reinforcement

ABSTRACT

The work evaluated the influence of temperature on the concrete electrical resistivity measurements and corrosion kinetics in reinforced concrete structures subjected to chlorides. The concretes were mechanically characterized at 28 and 90 days. After 204 days, the specimens were subjected to temperature cycles ranging from 55 °C to -5 °C. The results indicated that the corrosion kinetics and electrical resistivity varied with the temperature changes. At higher temperatures, dosages contaminated with Cl⁻ showed a high probability of corrosion and a decrease in electrical resistivity values, however, at negative temperature, the probability of corrosion was insignificant and the electrical resistivity values were the highest.

Keywords: reinforcement concrete; durability; corrosion; electrical resistivity; temperature.

Influência da temperatura na resistividade elétrica do concreto e na cinética de corrosão da armadura

RESUMO

O trabalho avaliou a influência da variação de temperatura nas medidas de resistividade elétrica e na cinética de corrosão em estruturas de concreto armado sujeitos a cloretos. Os concretos foram caracterizados fisicamente e mecanicamente aos 28 e 90 dias. Após 204 dias, as amostras foram submetidas a ciclos de ida e volta de temperatura partindo dos 55°C até -5°C. Os resultados indicaram que a cinética de corrosão e a resistividade elétrica variaram com a alteração da temperatura. Em temperaturas mais elevadas, os traços contaminados com Cl⁻ demonstraram uma alta probabilidade de corrosão e uma diminuição dos valores de resistividade elétrica. Porém, na temperatura negativa a probabilidade de corrosão foi insignificante e os valores de resistividade elétrica os mais elevados

Palavras-chave: a concreto armado; durabilidade; corrosão; resistividade elétrica; temperatura.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón armado están expuestas a diversas condiciones ambientales, como variaciones de humedad, variaciones de temperatura y contacto con elementos agresivos (Andrade et al., 1988; Yousuf et al., 2017). Estos factores pueden provocar la corrosión de las armaduras, que es uno de los principales problemas de las construcciones de hormigón armado. Perjudica la durabilidad de las estructuras y puede provocar reparaciones costosas. En algunos casos, puede ser necesario reemplazar total o parcialmente las armaduras y/o refuerzos estructurales con el fin de extender la durabilidad y prolongar la vida útil del hormigón armado (Helene, 1993; Laurentino et al., 2021). Esto ocurre porque los productos derivados de la corrosión son expansivos, generan grietas en el concreto, reducen la adherencia entre la armadura y el concreto, además de provocar una pérdida de sección en la armadura, dañando la capacidad portante de la estructura (Gjørv, 2015; Chauhan y Sharma, 2019).

A la hora de evaluar la durabilidad, respecto a la corrosión de las armaduras, se debe tener en cuenta la caracterización del hormigón y el ambiente donde estará expuesto. La correcta elección de los materiales y definición compatible de los métodos constructivos a utilizar, así como el mantenimiento a lo largo de su uso, también influye en el comportamiento de la estructura a lo largo de su vida útil (Figueiredo y Meira, 2013).

Los iones de cloruro desempeñan un papel importante en el proceso de despasivación de la película protectora de la armadura de acero. La corrosión inducida por cloruros es una de las causas más comunes y preocupantes de degradación de las estructuras de hormigón armado, al ser del tipo picaduras, formadas en zonas localizadas y profundas (Torres, 2011). En estos puntos donde los cloruros, junto con el agua y el oxígeno, entran en contacto con el acero, se forman zonas anódicas, se produce el movimiento de iones, provocando la reducción de la barra y en consecuencia la reducción de su sección y pérdida de su resistencia (Figueiredo, 2005).

Diferentes ensayos analizan el estado de corrosión de las armaduras y las condiciones de movilidad iónica dentro del hormigón. Los ensayos no destructivos para determinar la resistividad eléctrica y evaluar la corrosión se utilizan ampliamente para la inspección y monitoreo de estructuras, ya que son rápidos y fáciles de realizar. Con estas técnicas es posible obtener información respecto de las condiciones internas del concreto y el proceso corrosivo del refuerzo (Wosniack et al., 2021).

Sin embargo, los resultados obtenidos a través de las pruebas de monitoreo pueden cambiar debido a variaciones en la temperatura del concreto. Este parámetro influye directamente en la movilidad iónica y, en consecuencia, en la cinética de corrosión. Comprender cómo se comporta la estructura frente a la acción de agentes agresivos a diferentes temperaturas contribuye a la comprensión e interpretación de los resultados de las pruebas realizadas en diferentes condiciones climáticas (Chauhan y Sharma, 2019). Raphael y Shalon (1971) en su estudio demostraron que por cada aumento de 20°C en la temperatura el proceso corrosivo se duplica. Tuutti (1982) investigó los efectos de las bajas temperaturas en las estructuras de concreto y concluyó que la tasa de corrosión del acero se reduce 10 veces. cada disminución del orden de 20 °C (a temperaturas inferiores a 0 °C); Alhozaimy et al. (2014), concluyeron que el aumento de temperatura provocó cambios en la película pasivante de la armadura, desestabilizando las fases de óxido de tal manera que potencia el proceso corrosivo.

Noort, (2016); Mendes, (2018) y Medeiros y Júnior, (2019), concluyeron que la relación a/c influye en los valores de resistividad eléctrica en el hormigón de manera inversamente proporcional, siendo menor la relación a/c, mayor es la resistividad del el hormigón.

En este contexto, esta investigación analiza el efecto de la relación agua/cemento y la variación de temperatura sobre la resistividad eléctrica y cinética de corrosión de armaduras en concreto contaminado y no contaminado con cloruros.

2. MATERIALES Y PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales.

Se utilizó cemento Portland de alta resistencia inicial (CP V ARI) debido al bajo nivel de adiciones (90-100% clinker + sulfato de calcio, en masa).

Como agregados se utilizó arena de cuarzo (fina) y piedra triturada de gneis (gruesa), según la caracterización presentada en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización física de los áridos.

Propiedad	Arena de cuarzo	Brita Gnaisse
Unidad de masa	1,301 kg/dm ³	1,388 kg/dm ³
Masa específica	2,604 kg/dm ³	2,646 kg/dm ³
Absorción	0,60 %	0,50 %
Módulo de finura	2,068	5,603
Diámetro máximo	1,2 mm	12,55 mm
Coefficiente nulo	50,04 %	47,52 %

Como refuerzo se utilizaron barras de acero CA50, con un diámetro nominal de 10 mm. El diámetro fue elegido por su amplio uso comercial en el mercado de la construcción. Antes de su uso, las barras fueron cortadas al tamaño preestablecido y sometidas al proceso de limpieza de acuerdo con la norma G-1/03 (ASTM, 2017).

Se utilizaron cuatro características básicas que difieren en la relación a/c y la contaminación por cloruro. En el hormigón contaminado se añadió al agua de amasado un 1,65% de cloruro de sodio en relación a la masa de cemento, para llegar a un 1% de cloruros en la composición del hormigón, debido a la composición atómica del cloro en el compuesto NaCl.

Las características se presentan en la tabla 2. Para lograr trabajabilidad en concreto con una relación a/c de 0.45, se utilizó un aditivo superplastificante de segunda generación (Sika® Viscocrete®), con pH = 4.5 ± 1.0 y libre de iones cloruro.

Tabla 2. Restos de hormigón (a granel).

Identificación	Cemento	Arena	Brita	Agua	Aditivo	NaCl
0,60 ref.	1	2	2,5	0,60	-	-
0,60 Cl⁻	1	2	2,5	0,60	-	0,0165
0,45 ref.	1	2	2,5	0,45	0,003	-
0,45 Cl⁻	1	2	2,5	0,45	0,003	0,0165

Todas las mezclas fabricadas alcanzaron medidas de 105±5mm en las pruebas de asentamiento del cono, presentando así similar consistencia y trabajabilidad.

Se moldearon probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud para la caracterización del hormigón, analizando la resistividad eléctrica al ser sometido a ciclos de temperatura, y probetas prismáticas de 20 cm de longitud, 20 cm de ancho y 7 cm de altura, con una capa de cobertura de 30 mm en dos lados de la pieza de prueba, para exposición a ciclos de temperatura para evaluar el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión.

Los cuerpos cilíndricos fueron desmoldados después de 24 horas de moldeo y los cuerpos prismáticos después de 48 horas según lo indica la norma NBR 5738 (ABNT,2015). Luego del desmolde, las probetas fueron identificadas y colocadas para su curado en una cámara húmeda con una temperatura de 24°C ±5°C y una humedad de 95% ±5%. Los cuerpos permanecieron en estas condiciones hasta las etapas de caracterización física y mecánica que tuvieron lugar a los 28 y 90

días de edad y hasta la exposición a ciclos de temperatura que tuvieron lugar a partir de los 204 días de edad.

2.2 Programa Experimental.

La caracterización física y mecánica de los hormigones se realizó en probetas cilíndricas mediante ensayos de resistencia a la compresión (ABNT NBR 5739, 2018), módulo de elasticidad por frecuencia de resonancia forzada (ASTM C215, 2019), absorción de agua e índice de vacíos (ABNT NBR 9778, 2009) a las edades de 28 y 90 días. Paralelamente, las probetas se mantuvieron en cámara húmeda y se monitorearon hasta que mostraron un estado activo de corrosión del refuerzo en muestras contaminadas (un período de 204 días).

Luego, las muestras fueron sometidas a exposición a ciclos de temperatura para analizar la resistividad eléctrica superficial (AASHTO T358, 2015), el potencial de corrosión (ASTM C876, 2015) y la velocidad de corrosión (mediante el método de polarización lineal con un intervalo de escaneo de ± 15 mV en relación con la potencial de circuito abierto). de la muestra prismática.

Los ciclos de temperatura se realizaron variando la temperatura, donde las probetas fueron sometidas a un ciclo de ida y vuelta iniciando desde una temperatura de 55°C, hasta -5°C en una cámara climática con control de temperatura y humedad. Las temperaturas de estabilización para la realización de los ensayos fueron: 55°C, 40°C, 22°C, 10°C, 5°C y -5°C.

Para medir la temperatura superficial e interna de las probetas se utilizó un termómetro infrarrojo de superficie y termopares insertados en el interior del hormigón durante el moldeo, a la misma profundidad que las barras de acero. El tiempo de exposición de las muestras a las temperaturas fue necesario para obtener una estabilización de la temperatura en la superficie y en el interior de la muestra. Se permitió una variación de $\pm 2^\circ\text{C}$ para cada rango de temperatura definido en el estudio. La humedad se fijó en un 80%, de modo que había una alta humedad interna en los poros del hormigón, pero sin saturarlos, lo que permitía la penetración del oxígeno.

Todos los ensayos se realizaron por triplicado y los resultados se analizaron estadísticamente utilizando el método de análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de pares (prueba de Tukey), cuando fue necesario.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Caracterización del hormigón.

La Tabla 3 presenta los resultados promedio de las propiedades analizadas en los ensayos de caracterización del concreto en las dos edades analizadas.

Mediante análisis estadístico se pudo comprobar que no hubo evolución significativa en los valores de absorción de agua en la traza 0,60 contaminada en las diferentes edades. Los valores de muestras contaminadas y no contaminadas a/c 0,45 pueden considerarse estadísticamente equivalentes cuando se comparan a la misma edad.

Los resultados del índice de vacío para las dos edades de los rasgos analizados solo mostraron una variación estadísticamente relevante para el rasgo con relación a/c contaminada de 0,45.

En los resultados de resistencia a la compresión, sólo la traza contaminada 0,45 no mostró una evolución estadísticamente significativa de los resultados al comparar los resultados en las dos edades.

Tabla 3. Caracterización de hormigones en estado endurecido.

Característica	0,60 ref.		0,60 Cl ⁻		0,45 ref.		0,45 Cl ⁻	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Edad								
Absorción de agua (%)	7,76	7,41	6,82	6,72	4,81	4,55	4,92	4,55
Índice de nulidad (%)	16,47	15,98	14,59	14,36	10,69	10,15	10,92	10,14
Resistencia a la compresión (MPa)	33,00	39,00	35,00	40,00	57,00	66,00	49,00	54,00
Módulo de elasticidad (GPa)	36,00	35,00	36,00	35,00	36,00	36,00	37,00	37,00

Al comparar los resultados de los rasgos con una relación a/c de 0.60, se pudo verificar mediante la prueba de Tukey que no existe diferencia estadística entre los resultados para los rasgos contaminados y no contaminados a la misma edad.

Los módulos de elasticidad no variaron entre los rasgos y edades analizados, lo que puede explicarse por el método adoptado.

3.2 Ciclos de temperatura.

El ciclo de variación de temperatura inició a los 204 días de edad, cuando se observaron signos de actividad corrosiva en las probetas contaminadas con cloruros. En la Figura 1 se muestran los valores del potencial de corrosión de las probetas con y sin contaminación por cloruros, así como los rangos de corrosión de las armaduras según la norma C876-15 (ASTM, 2015).

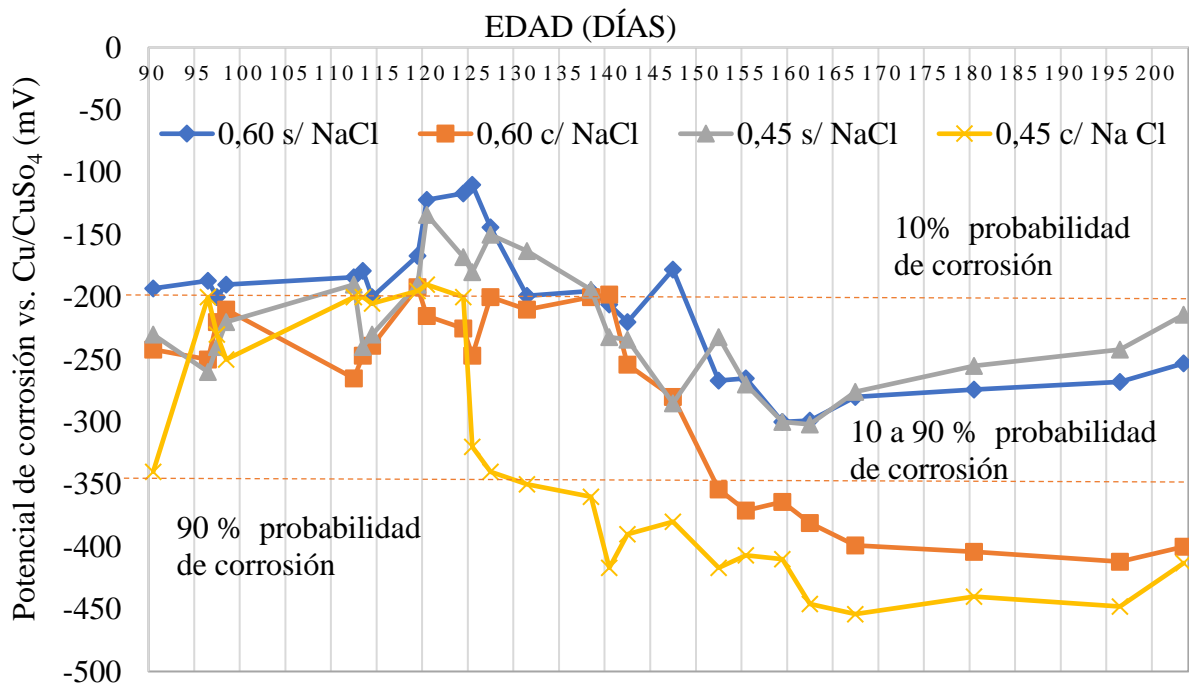


Figura 1. Potencial de corrosión durante la fase de monitoreo.

Luego de confirmarse el inicio del proceso corrosivo en las probetas reforzadas contaminadas por cloruros, se inició la etapa de exposición de las probetas. La Figura 2 muestra los valores del potencial de corrosión medidos para las mezclas no contaminadas con Cl⁻ en función de la variación de temperatura del concreto.

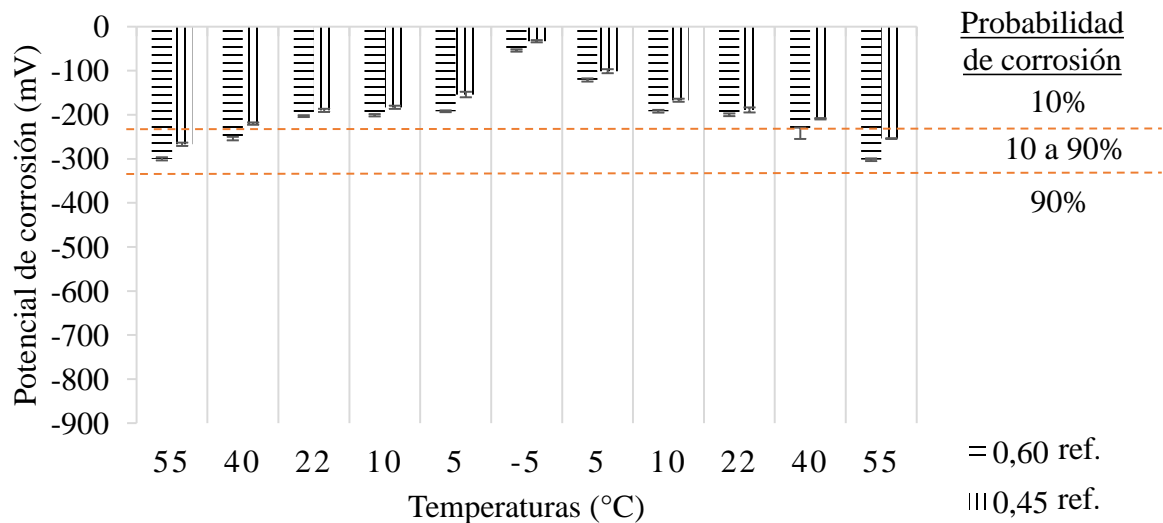


Figura 2. Potencial de corrosión (electrodo de Cu/CuSO₄) diferentes temperaturas en trazas no contaminadas por cloruros (ref.).

Para las dos relaciones a/c en las muestras no contaminadas, se pudo notar que con el aumento de temperatura los valores de potencial de corrosión obtenidos migraron desde un 10% de probabilidad de corrosión a la zona de incertidumbre (10 a 90%), especialmente a la temperatura más alta. Se puede observar que a lo largo del ciclo ninguna traza no contaminada alcanzó la zona de alta probabilidad de corrosión. La traza con relación a/c 0,60 presentó valores más electronegativos en comparación con la traza con relación a/c 0,45.

La Figura 3 muestra los valores del potencial de corrosión de trazas contaminadas con Cl⁻ en función de la variación de temperatura del hormigón.

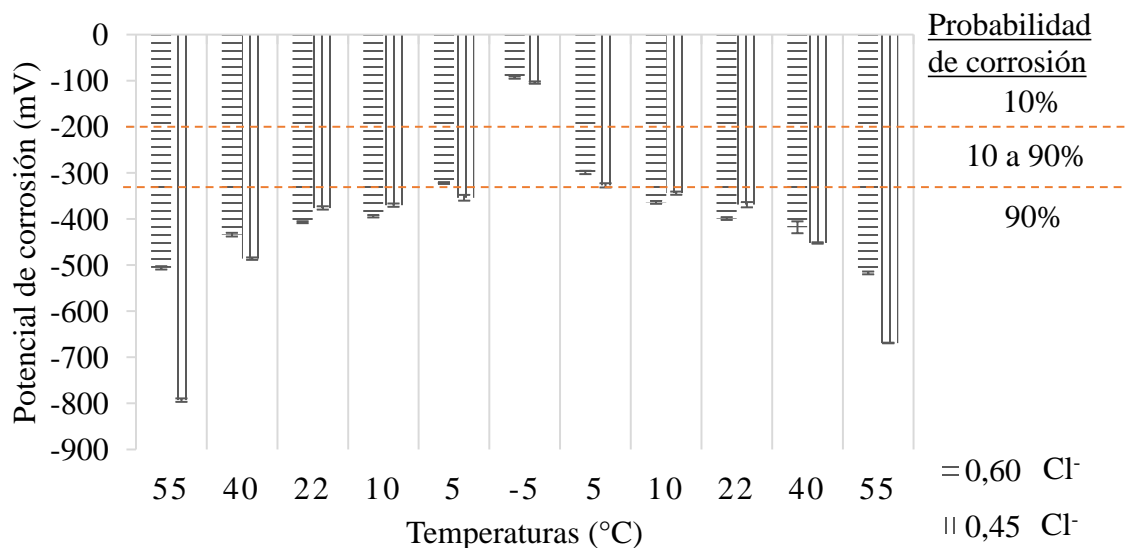


Figura 3. Potencial de corrosión (electrodo de Cu/CuSO₄) diferentes temperaturas en trazas contaminadas por cloruros (Cl⁻).

Através da análise dos resultados pode se inferir que leituras realizadas abaixo da temperatura de 10°C geraram valores que se localizam na zona da incerteza para os traços contaminados. E na temperatura negativa os resultados indicaram uma probabilidade de corrosão de 10% mesmo estando as armaduras despassivadas. Por outro lado, em temperaturas acima de 22°C existiu uma tendência de se observar resultados mais electronegativos, especialmente à temperatura mais

elevada (55°C). Nos traços contaminados com cloretos não foi observado a tendência do traço com menor relação a/c permanecer com valores menos eletronegativos, ocorreu uma variação entre eles ao longo do ciclo.

Os resultados de velocidade de corrosão em função da variação da temperatura para as amostras não contaminadas são apresentados na Figuras, assim como as faixas de análise propostas por Andrade *et.al.*, (1997).

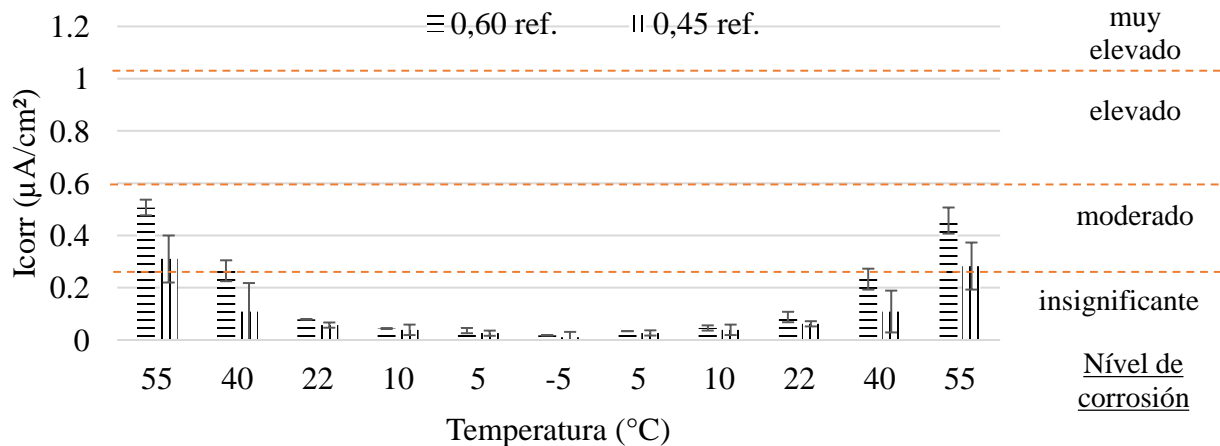


Figura 4. Velocidade de corrosión a diferentes temperaturas em trazas no contaminadas por cloruros (ref.).

El hormigón no contaminado a temperaturas de 22°C e inferiores mostró niveles de corrosión insignificantes. A la temperatura más alta, la relación a/c de 0,60 mostró valores promedio en la región fronteriza entre niveles de corrosión moderados y altos.

La Figura 5 presenta los resultados de la velocidad de corrosión en función de la variación de temperatura para muestras contaminadas con cloruros.

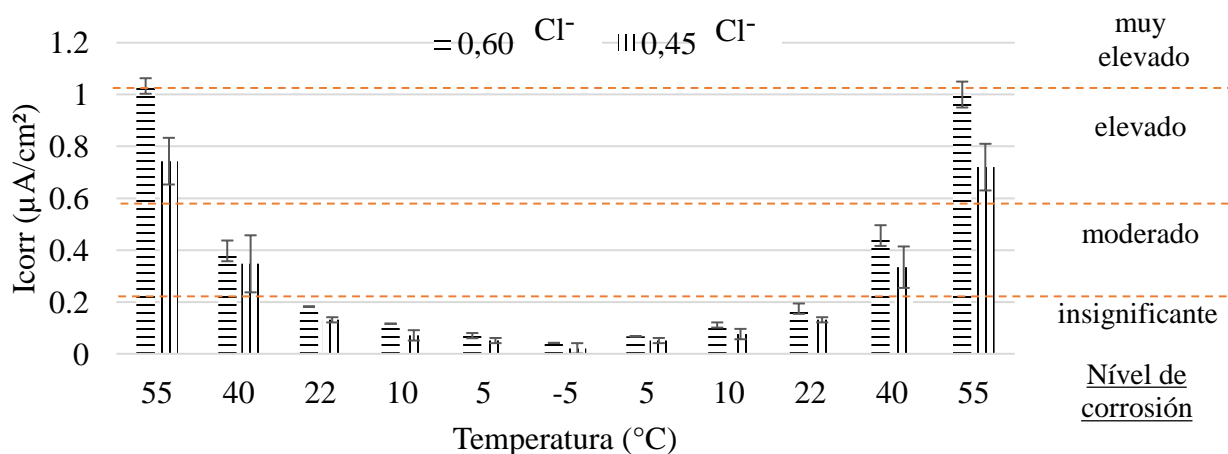


Figura 5. Velocidade de corrosión a diferentes temperaturas em trazas contaminadas por cloruros (Cl⁻).

Quando se expuso a la temperatura más alta del ciclo (55°C), el concreto contaminado con una relación de 0,60 a/c alcanzó un nivel muy alto de corrosión, mientras que el contaminado con una relación de 0,45 a/c mostró un alto nivel de corrosión. A temperaturas inferiores a 10°C, el hormigón contaminado mostró niveles insignificantes de corrosión a pesar de que el refuerzo estaba despasivado. despreciable

Se observó que, tanto para los rastros contaminados como para los no contaminados, la mayor variación en los resultados se produjo a temperaturas más altas. Esto se debe, según Østvik (2004), a que a mayores temperaturas la probabilidad de que dos moléculas choquen es mayor. Esta mayor tasa de colisión genera un aumento de la energía cinética, afectando la energía de activación de las reacciones químicas.

La variación de la temperatura generó una influencia directamente proporcional a la velocidad de corrosión, y a medida que aumentó la temperatura, la velocidad de corrosión también aumentó.

Las trazas con una relación a/c de 0,45 mostraron valores de velocidad de corrosión más bajos durante todo el ciclo de exposición en comparación con las trazas con una relación a/c de 0,60.

Los resultados de los ensayos de resistividad eléctrica superficial para las probetas sometidas al ciclo de temperatura para las trazas no contaminadas se presentan en la figura 6, así como los rangos de indicación de riesgo de corrosión para concreto contaminado con cloruros, sugeridos por Bungey y Millard (2001).

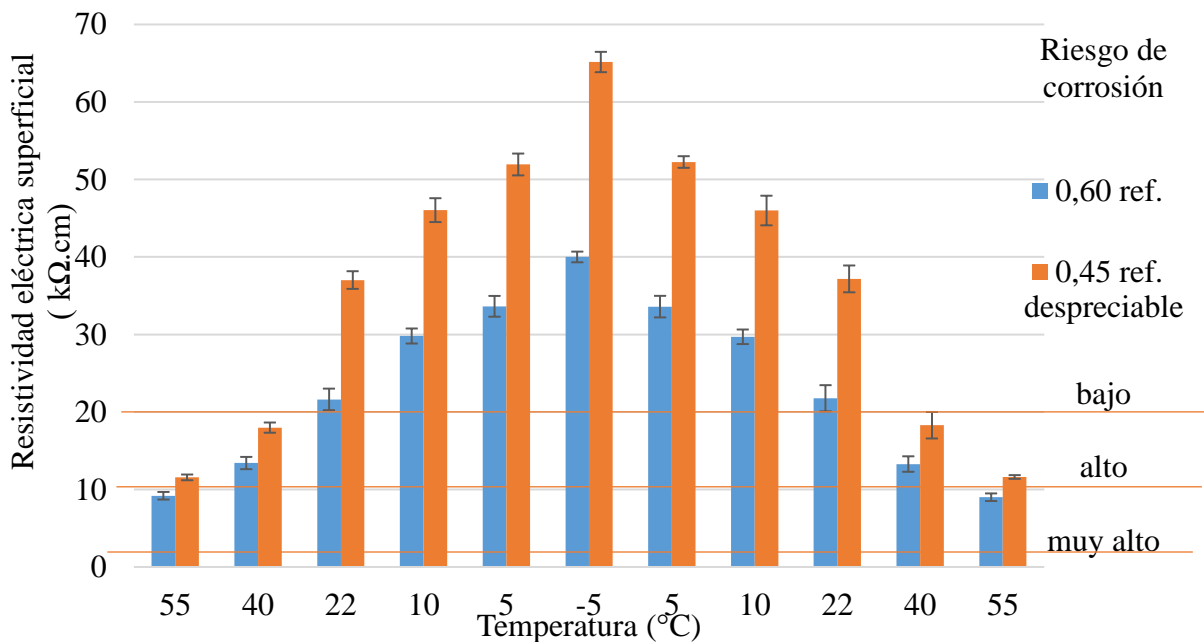


Figura 6. Resistividad eléctrica superficial a diferentes temperaturas en trazas no contaminadas por cloruros (ref.).

Los hormigones no contaminados mostraron una variación en la escala de análisis del riesgo de corrosión. A temperaturas de 22°C e inferiores, las trazas permanecieron en el rango de riesgo insignificante para ambas relaciones a/c. Por lo tanto, a una temperatura de 40°C, la traza con una relación a/c de 0,45 estaba muy cerca de la zona límite entre riesgo de corrosión insignificante y bajo. La traza con una relación a/c de 0,60 a una temperatura de 40°C se ubicó en la región de bajo riesgo de corrosión y a la temperatura más alta en la zona límite entre bajo y alto riesgo de corrosión.

La Figura 7 presenta los resultados de la resistividad eléctrica de la superficie en función de la variación de temperatura para trazas contaminadas por cloruros.

Los hormigones contaminados mostraron un comportamiento similar a los hormigones no contaminados, siguiendo la misma tendencia de variación de rangos a lo largo de la exposición a diferentes temperaturas.

Se pudo comprobar que la variación de temperatura influyó en la resistividad eléctrica de forma inversamente proporcional, es decir, a medida que aumentó la temperatura, disminuyó la resistividad eléctrica de los concretos.

También se notó la influencia de la relación a/c en los resultados, ocurriendo los valores de resistividad eléctrica más altos en la traza con la relación a/c más baja para todas las temperaturas analizadas.

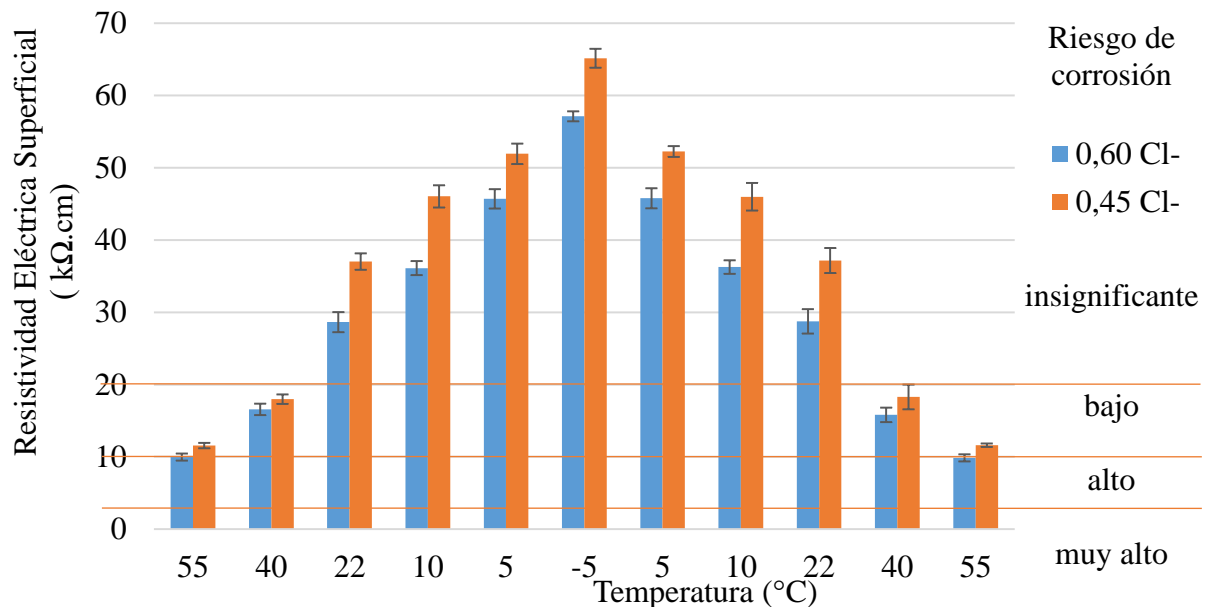


Figura 7. Resistividad eléctrica superficial a diferentes temperaturas en trazas no contaminadas por cloruro (Cl⁻).

4. CONCLUSIONES

Los concretos con una relación a/c más baja mostraron mayor resistencia a la compresión, menor absorción de agua y una relación de huecos más baja en comparación con los concretos con una relación a/c más alta, independientemente de si estaban o no contaminados por cloruros.

Con los resultados alcanzados por el programa experimental, es posible afirmar con un 95% de significancia que existe una influencia de la variación de temperatura sobre el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica. Temperaturas más altas dieron como resultado valores de potencial de corrosión más electronegativos y mayor velocidad de corrosión debido a la disminución de la resistividad eléctrica, especialmente en concreto contaminado con cloruros.

A una temperatura de 22°C, las muestras contaminadas presentaron una probabilidad de corrosión del 90% para el potencial de corrosión, mientras que a una temperatura negativa la probabilidad de corrosión fue del 10%. Los hormigones no contaminados dieron como resultado una baja probabilidad de corrosión para mediciones por debajo de 22°C. Hasta una temperatura de 55°C, ninguna de las muestras no contaminadas presentó una probabilidad superior al 90%. A bajas temperaturas, las mediciones del potencial de corrosión indican una baja probabilidad de corrosión, incluso si la armadura está despasivada. A altas temperaturas, el potencial de corrosión indica la incertidumbre de la corrosión incluso si el refuerzo está pasivado.

No fue posible verificar la influencia de la relación a/c en los resultados del potencial de corrosión a través del programa experimental.

Se observó una mayor actividad corrosiva a temperaturas superiores a 10°C en cuerpos contaminados con cloruros. Los resultados de la velocidad de corrosión de las cuatro trazas mostraron su mayor variación entre sí a las temperaturas más altas (entre 40°C y 55°C). Para los valores medidos a temperatura negativa (-5°C), mediante análisis de varianza fue posible considerar los valores estadísticamente equivalentes.

Todos los rastros analizados sufrieron variaciones en el rango analítico a medida que cambiaba la

temperatura, lo que muestra una tendencia a que el riesgo de corrosión aumente a temperaturas más altas.

En cuanto a la aplicación de los métodos utilizados cabe destacar que actúan de forma complementaria para analizar las condiciones de la estructura. Y debido a la sensibilidad de las pruebas, es importante observar las condiciones ambientales y climáticas para evitar obtener valores o interpretaciones erróneas durante las actividades de monitoreo e inspección.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Laboratorios de Corrosión (LabCor) del Departamento de Ingeniería Química, al Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción Civil y Mecánica del Departamento de Materiales de Construcción (DEMC) y al Laboratorio de Ingeniería Estructural (LAEES), todos pertenecientes a la Universidad. Gobierno Federal de Minas Gerais. También agradecen al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y a la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por el financiamiento del proyecto.

6. REFERENCIAS

- Alhozaimy, A., Hussain, R., Al-Negheimish, A., Al-Zaid, R., Singh, D. (2014), *Effect of simulated concrete pore solution chemistry, chloride ions, and temperature on passive layer formed on steel reinforcement*. ACI Materials Journal. American Concrete Institute. v. 111, n. 4, p. 411-421. <https://doi.org/10.14359/51686829>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2015). *T 358 – 15. Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington.
- Al-Khaja, A. W. (1997), *Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes*. Construction and Buildings Materials, v. 11, n. 1, p. 9-13. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00004-4)
- American Society for Testing and Materials (2015), *ASTM C 876. Standard test method for half cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete*. Philadelphia.
- American Society for Testing and Materials (2017), *ASTM G1-03. Practice for Preparing, Cleaning and evaluating corrosion test specimens*. Philadelphia.
- American Society for Testing and Materials (2019), *ASTM C215. Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens*. Philadelphia.
- Andrade, C. Feliu, S. (1988), *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*. Madrid: CSIC/IETcc. 122 p.
- Andrade, C.; Carruyo, A. R.; Dias, J.; Helene, P. R. L.; Rincon, I. T. (1997), *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión em estruturas de hormigón armado*. DURAR (Red Temática XV.B – Durabilidad de la armadura – del programa ibero-americano de ciência y tecnologia para el desarrollo) Rio de Janeiro: CYTED. 208p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018), *NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2005), *NBR 9778 Versão corrigida 2: 2009. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018), *NBR 5739. Concreto ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2015), *NBR 5738. Concreto – Procedimento para*

moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro.

Bungey, J.H.; Millard, S. G. (1996), *Testing of concrete in structures*. 3 ed. S.I: Chapman & Hall, 226p.

Chauhan, A.; Sharma, U. K. (2019), *Influence of temperature and relativity humidity variations on non-uniform corrosion of reinforced concrete*. Structures. v. 19, p 296-308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.016>

Figueiredo, E. J. P.; Meira, G. (2013), *Corrosión de armadura de estructuras de hormigón*. Boletín Técnico 06. ALCONPAT International. México. 32p.

Figueiredo, E. J. P. (2005), *Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto*. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Vol. 2. Cap. 27. São Paulo: IBRACON, p. 829-855.

Gjørv, O. E. (2015), *Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade*. São Paulo: Oficina de textos. p.238.

Helene, P. R. L. (1993), *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. 231 p. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), 1993.

Melo, G. F.; Laurentino, J. V. A.; Santos, L. O. (2021), *Estudo comparativo das eficiências de agentes inibidores comerciais de corrosão em estruturas marítima de concreto armado*. Engineering Sciences, v.9. n.2. p.66-80.

Medeiros-Junior, R. A. de, Munhoz, G. da S., Medeiros, M. H. F. de. (2019). *Correlación entre la absorción de agua, la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del hormigón con diferentes contenidos de puzolana*. Revista ALCONPAT, 9(2), 152 - 166. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

Mendes, S.E.; Oliveira, R.L.; Cremonez, C.; Pereira, E.; Pereira, E.; Medeiros-Junior, R.A. (2018), *Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model*. Construction and Building Matererials. 192 p. 610–620.

Michel, A.; Sørensen, H.E.; Geiker, M.R. (2021), *5 years of in situ reinforcement corrosion monitoring in the splash and submerged zone of a cracked concrete element*. Construction and Building Materials. v. 285. 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122923>

Noort, R.; Hunger, M.; Spiesz, P. (2016), *Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as alternative test method*. Construction and. Building. Materials. 115, 746–759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.054>

Østvik, J. M. (2005), *Thermal Aspects of corrosion of steel in concrete*, PhD Thesis. Departament of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology – NTNU, Trondheim.

Raphael, M.; Shalon, R. (1971), *A study of the influence of climate on corrosion and reinforced concrete*. In: RILEM Symposium on Concrete and Reinforced Concrete in Hot Climates, Proceedings. p. 77-96.

Torres, A. S. (2011), *Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise*. Porto Alegre. 170p.

Tuutti, K. (1982), *Corrosion of steel in concrete*. Sweden: CBI. 468 p.

Woly nec, S. (2002), *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*. EDUSP, São Paulo.

Wosniack, L. M.; Real, L. V.; Silva, M. D.; Macioski, G.; Hoppe Filho, J.; Medeiros, M. H. F. (2021), *Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321-340, jul./set.ANTAC.

Yousuf, F.; Wei, X.; Tao, J. (2017), *Evaluation of the influence of a superplasticizer on the hydration of varying composition cements by the electrical resistivity measurent method*. Construction and Building Materials. P.25-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.138>