

Formación de ánodos incipientes en reparaciones localizadas de morteros con adición de sílice de cáscara de arroz

I. R. Remenche^{1*}, P. A. Daschevi² , N. F. Holowka³, L. C. Martioli¹, M. H. F. Medeiros¹ 

*Autor de Contacto: igorrossi@ufpr.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.763>

Recibido: 01/06/2024 | Correcciones recibidas: 02/08/2024 | Aceptado: 20/08/2024 | Publicado: 01/09/2024

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue investigar cómo se puede detectar y monitorear el ánodo incipiente en áreas de reparación localizadas con morteros que contienen adición de sílice de cáscara de arroz. Se probaron tres condiciones de reparación en probetas prismáticas: sin reparación, con reparación sin adición de sílice de cáscara de arroz y con adición de sílice de cáscara de arroz en el mortero. Se realizaron pruebas de potencial de corrosión y resistividad eléctrica. La prueba de potencial de corrosión no mostró variación a lo largo de la barra, mientras que la prueba de resistividad eléctrica mostró valores variables dependiendo del área reparada y no reparada. Se concluyó que la adición de sílice de cáscara de arroz al mortero hizo que el potencial de corrosión fuera más electronegativo debido a la mayor diferencia de resistividad eléctrica con relación al sustrato, contribuyendo a la formación del ánodo incipiente.

Palabras clave: ánodo incipiente; incompatibilidad electroquímica; reparar; potencial de corrosión y resistividad eléctrica de la superficie.

Citar como: Remenche, I. R., Daschevi, P. A., Holowka, N. F., Martioli L. C., Medeiros, M. H. F. (2024), "Formación de ánodos incipientes en reparaciones localizadas de morteros con adición de sílice de cáscara de arroz" Revista ALCONPAT, 14 (3), pp. 255 – 274, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.763>

¹ Program of Graduate Studies in Civil Engineering, Federal University of Paraná (UFPR), Curitiba, Brazil.

² Court of Accounts of Paraná, Curitiba, Brazil.

³ Program of Graduate Studies in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Curitiba, Brazil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor I. R. Remenche contribuyó con la actividad de recolección de datos (50%), revisión de la literatura (50%) y redacción del trabajo (60%). El autor P. A. Daschevi aportó la idea original y la revisión de la obra. El autor N. F. Holowka trabajó en la encuesta de recolección de datos (50%). El autor L. C. Martioli contribuyó con la preparación de las imágenes y la revisión de la literatura (20%). El autor M. H. F. Medeiros colaboró con la redacción del trabajo (40%), la revisión bibliográfica (30%) y como asesor y revisor general del trabajo.

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 segundo número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2025.

Formation of incipient anodes in localized mortar repairs with the addition of rice husk silica

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate how incipient anodes can be detected and monitored in localized repair areas using mortars with added rice husk silica. Three repair conditions were tested on prismatic specimens: without repair, with repair without rice husk silica addition, and with rice husk silica addition in the mortar. Corrosion potential and electrical resistivity tests were conducted. The corrosion potential test showed no variation along the bar, while the electrical resistivity test showed varied values depending on the repaired and non-repaired zones. It was concluded that adding rice husk silica to the mortar made the corrosion potential more electronegative due to the greater difference in electrical resistivity compared to the substrate, contributing to the formation of incipient anodes.

Keywords: Incipient anode; electrochemical incompatibility; repair; corrosion potential; surface electrical resistivity.

Formação de ânodos incipientes em reparos localizados de argamassa com adição de sílica de casca de arroz

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar como o ânodo incipiente pode ser detectado e monitorado em áreas de reparo localizado com argamassas contendo adição de sílica de casca de arroz. Foram testadas três condições de reparo em corpos de prova prismáticos: sem reparo, com reparo sem adição de sílica de casca de arroz e com adição de sílica de casca de arroz na argamassa. Realizaram-se ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica. O ensaio de potencial de corrosão não apresentou variação ao longo da barra, enquanto o ensaio de resistividade elétrica apresentou valores variados em função da zona reparada e não reparada. Concluiu-se que a adição de sílica de casca de arroz na argamassa tornou o potencial de corrosão mais eletronegativo devido à maior diferença de resistividade elétrica em relação ao substrato, contribuindo para a formação do ânodo incipiente.

Palavras-chave: ânodo incipiente; incompatibilidade eletroquímica; reparo; potencial de corrosão e resistividade elétrica superficial.

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

Según el informe de NACE International (2016), se estima que el gasto mundial en corrosión equivale a 2,5 billones de dólares, lo que corresponde al 3,4% del PIB mundial. La misma fuente propone que, si se adoptaran prácticas de control anticorrosión, se podría ahorrar entre un 15% y un 35%, lo que equivale a entre 375 y 875 mil millones de dólares anuales. En Brasil, las pérdidas por corrosión en 2015 representaron el 4% del PIB, lo que corresponde a R\$ 236 mil millones (GRANDES CONSTRUÇÕES, 2017).

En relación al acero en elementos estructurales de hormigón armado, según Mehta y Monteiro (2008), originalmente se creía que el refuerzo, al estar protegido del contacto directo con el aire por una capa de hormigón de cemento Portland de baja porosidad capilar, no sufriría corrosión, ni presentaría manifestaciones patológicas. Sin embargo, en la práctica y a lo largo de los años, se observó que esta suposición no se sostenía, ya que se oponían como evidencia los problemas de durabilidad. Así, los hechos evidenciaron que, en las estructuras de hormigón armado, la corrosión del acero puede agravarse en las primeras fases de la vida útil, aun cuando el hormigón sea compacto y tenga una mezcla adecuada.

En este contexto, se ha establecido el entendimiento de que las estructuras de hormigón armado necesitan una alta vida útil acorde con el proyecto, para evitar la reducción drástica de propiedades relacionadas con su durabilidad, evitando el mayor consumo de materiales en la industria de la construcción civil y gastos adicionales con reparaciones tempranas. Sobre este tema, según Krishnan et al. (2021), el Informe de Impacto de la NACE (2016) indica que alrededor del 50% de las estructuras de hormigón armado necesitan ser reparadas dentro de los 10 años posteriores a su construcción. Generalmente, la solución adoptada es la ejecución de reparaciones localizadas.

Así, en el tema de las reparaciones de estructuras de hormigón armado, se encuentra la técnica de reparación localizada de zonas corroídas, con procedimientos estandarizados y materiales tradicionales y materiales más innovadores que se han propuesto en las últimas décadas. Sin embargo, ha sido común constatar, en condiciones prácticas, el fracaso de estos servicios de reparación en pocos años, requiriendo re-trabajos y aplicación de nuevos materiales, generando mayor consumo de materiales e impacto ambiental.

En resumen, es un hecho que las reparaciones convencionales adoptadas en muchas estructuras están fallando en unos 5 años, generando la necesidad de reparaciones repetidas y un aumento significativo en el costo total de la corrosión y el costo del ciclo de vida de las estructuras de hormigón armado. Los motivos de los fallos prematuros incluyen la falta de rigor técnico en la ejecución, la incorrecta especificación de los materiales y la economía en los sistemas de reparación (reparaciones incompletas para reducir costes), para no conseguir el estancamiento completo del proceso de corrosión instalado.

En este contexto, se sabe que la corrosión en las estructuras reparadas suele reiniciarse principalmente en la interfaz entre el hormigón viejo y la zona reparada, generando la formación de ánodos incipientes. Como tal, la corrosión puede continuar progresando dentro del concreto, incluso después de que se haya eliminado una sección de concreto deteriorado y se haya reemplazado con un nuevo material de reparación.

Diversos estudios han buscado comprender la formación de ánodos incipientes en reparaciones localizadas, los efectos causados por esta manifestación patológica y los métodos para mitigarlos (Castro et al., 2003; Christodoulou et al., 2013; Luković et al., 2017; Ali et al., 2018; Kamde et al., 2021). En este contexto, Castro et al. (2003) analizaron muestras prismáticas con reparaciones localizadas en concreto contaminado con 0.7% de cloruro en masa. Los autores evaluaron cuatro sistemas para la región reparada: (1) solo repasivación alcalina en el área reparada, (2) aplicación de una imprimación de un componente con resina epoxi rica en zinc y (3-4) dos imprimaciones diferentes de dos componentes.

Christodoulou et al. (2013) estudiaron reparaciones localizadas de estructuras de campo, específicamente un estacionamiento de varios pisos expuesto al ataque de cloruro y un puente de hormigón armado de varios vanos. Los autores realizaron reparaciones en áreas de hormigón deteriorado utilizando tres materiales diferentes para observar la formación incipiente de ánodos: un microhormigón fluido a base de cemento Portland, modificado por polímeros y compensado por la contracción; un mortero reparador modificado con polímeros a base de cemento Portland que compensó la contracción con la adición de cenizas de sílice; y un mortero de reparación no retráctil a base de cemento de magnesia-fosfato.

Posteriormente, Luković et al. (2017) ampliaron esta investigación evaluando la aplicabilidad de los compuestos cementosos endurecidos por deformación en reparaciones sometidas a corrosión continua, así como estudiando el uso de morteros de reparación no reforzados y materiales de reparación comerciales. Por su parte, Ali et al. (2018) investigaron diversas estrategias de reparación disponibles comercialmente utilizando muestras prismáticas expuestas a diferentes condiciones con y sin cloruros. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar los efectos de la presencia de reparaciones localizadas con el uso de sílice de cáscara de arroz (SCA) sobre la formación de ánodos incipientes. Para ello, se consideraron dos condiciones de exposición en la preparación de los especímenes: un grupo contaminado con cloruro y un grupo no contaminado. Además, se analizaron tres escenarios diferentes para la reparación: la pieza de hormigón sin reparar, así como probetas con mortero de reparación de cemento Portland puro y probetas con mortero de reparación con adición de sílice de cáscara de arroz en la composición aglutinante. También se realizaron dos ensayos no destructivos para evaluar la integridad del elemento estructural: potencial de corrosión (Ecorr) y resistividad eléctrica superficial. El análisis buscó contribuir a la verificación de la formación incipiente de ánodo en hormigones con la adición de sílice de cáscara de arroz y verificar si la actividad puzolánica intensifica el proceso de corrosión debido a la formación incipiente de ánodos.

Para ello, inicialmente se presentaron los fundamentos teóricos que sustentaron el análisis, los métodos consultados en la investigación para determinar la presencia del ánodo incipiente, los resultados del análisis y la discusión de los datos, y, finalmente, las conclusiones.

2. FORMACIÓN DE ÁNODOS INCIPIENTES

Al realizar servicios de reparación puntual, es común eliminar concretos que tienen grietas o fisuras e incluso que están contaminados con cloruros. Por lo tanto, es necesario limpiar la barra de acero y reemplazar el concreto viejo con un nuevo compuesto, llamado material de reparación. Sin embargo, incluso después de la reparación, la corrosión puede continuar. Esto se debe a la diferencia de comportamiento electroquímico entre el hormigón viejo y el nuevo, a la limpieza inadecuada de los refuerzos, a la alta permeabilidad del hormigón, etc.

Por lo tanto, el "Efecto Ánodo Incipiente" es un fenómeno importante a considerar en el contexto de las reparaciones localizadas de morteros en una pieza de hormigón armado, especialmente cuando se trata de la corrosión de refuerzos de acero.

El término "ánodo incipiente" se refiere a un área ubicada en la interfaz entre el concreto y la reparación estructural que conduce a la formación del proceso de corrosión activa de los refuerzos (LUCOVIĆ et al., 2017; ALI et al., 2018). Esta área se convierte en un punto focal para el ataque corrosivo y puede caracterizarse por ciertas condiciones propicias para la formación de un pilote galvánico, como la diferencia entre las características electroquímicas del refuerzo de acero en el concreto original y en el área reparada, lo que requiere reparaciones repetidas debido a la ocurrencia de fallas tempranas (KAMDE et al., 2021).

El ánodo incipiente es crítico en el contexto de las reparaciones de hormigón armado porque, si no se trata adecuadamente, puede provocar problemas de durabilidad en el futuro. Durante la

reparación, es esencial identificar y tratar todas las áreas afectadas por la corrosión, lo que generalmente implica la eliminación completa del área corroída, la preparación adecuada de la superficie y la aplicación de medidas de protección como la aplicación de recubrimientos, el uso de ánodos galvánicos o incluso inhibidores de corrosión.

Con este fin, las reparaciones localizadas de elementos estructurales son una técnica que se encuentra comúnmente en los edificios en Brasil. La técnica tiene como objetivo interrumpir el pilote electroquímico generado a lo largo de la vida útil de la pieza y restaurar la capa pasivante del acero mediante la aplicación de nuevo hormigón, lechada o mortero de reparación. A pesar de la correcta ejecución de la reparación, es posible verificar la corrosión del acero en la interfaz entre el hormigón y el mortero de reparación (MEDEIROS, DASCHEVI, ARAÚJO, 2022). En la figura 1 se presenta el efecto del ánodo incipiente en los ensayos de potencial de corrosión en elementos estructurales.

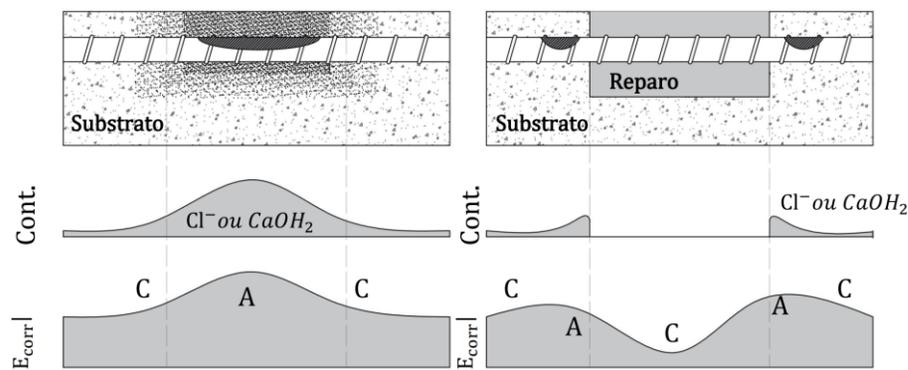


Figura 1. Configuraciones clásicas de la variación del potencial de corrosión cuando se forman ánodos incipientes en los elementos reparados.
Fuente: MEDEIROS, DASCHEVI y ARAÚJO (2022).

Se puede ver que, en la primera situación, el refuerzo se corroe en el medio del refuerzo y, debido a esto, el potencial de corrosión (en el módulo) en esta región es mayor que en las otras. Sin embargo, en el segundo caso, la interfaz en la que se realizó la reparación tiene picos de potencial de corrosión, mientras que en medio de la reparación la armadura estaría en una condición pasiva. De esta manera, el uso de materiales de reparación adecuados puede reducir permanentemente el potencial de corrosión del acero dentro del área de reparación. Las razones de esto serían la baja permeabilidad típicamente y el alto pH de estos materiales. Un pH alto en el área recién reparada resulta en un cambio negativo, ya que los potenciales de equilibrio del acero en el concreto serían más negativos que en la región recién reparada (CHRISTODOULOU, 2013).

Así, la detección temprana de ánodos incipientes es fundamental para el mantenimiento y conservación de las estructuras de hormigón armado, ya que se pueden tomar medidas correctivas para detener el proceso corrosivo antes de que cause daños significativos. Esto puede implicar la aplicación de recubrimientos protectores, protección catódica, reparación de las áreas corroídas con mortero y control del medio ambiente.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Caracterización de los materiales

El cemento Portland utilizado en el programa experimental fue del tipo CP V – ARI para el hormigón y los morteros de reparación. Este cemento sigue los requisitos establecidos en la NBR 16697 (ABNT, 2018). En la Tabla 1 se muestran los datos de la caracterización química, física y mecánica de este cemento.

Tabla 1. Caracterización química, física y mecánica del cemento CP V – ARI.

Composición química (%)										
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	CaO Libre	Equivalent e Alcalino	Residuo Insoluble	Pérdida de Fuego	
62,20	19,82	4,49	3,05	2,74	2,02	1,02	0,66	0,63	3,41	
Expan. Caliente (%)	Pega (min)		Finura por el método Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	Resist. a compresión (MPa)				Peso espec. (g/cm ³)
	Inicial	Final				1 día	3 días	7 días	28 días	
0,18	217	267	4366	0,05	0,35	23,4	38,1	44,5	52,5	3,09

Fuente: Fabricante.

Como adición puzolánica se utilizó sílice de cáscara de arroz (SCA), caracterizada químicamente en la Tabla 2. Esta adición mineral se obtuvo a partir de la combustión controlada en un sistema de lecho fluidizado, con el objetivo de producir un material con puzolanidad optimizada. Para medir la capacidad puzolánica de esta adición, se realizó la prueba de Chapelle Modificada, realizada de acuerdo con la NBR 15895 (ABNT, 2010), que establece como condición para la clasificación de una puzolana que el consumo mínimo de hidróxido de calcio consumido es de 436 mg $[\text{Ca}(\text{OH})]_2/\text{g}$ de adición.

En este caso, la sílice de cáscara de arroz fijó la cal a 1336 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de muestra, muy por encima del límite mínimo establecido en la NBR 15895 (ABNT, 2010), lo que lleva a clasificar este material como de alta reactividad.

Tabla 2. Propiedades químicas de la sílice de cáscara de arroz (SCA).

Composición química (%)									Otras Propiedades		
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Otros Óxidos	Pérdida por fuego	Sup. BET	Peso esp. (g/cm ³)	Chapelle modificado (mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de adición)
0,43	88,47	2,72	0,05	-	1,55	1,46	0,49	4,84	14,692	2,12	1336
*CuO, ZnO, MnO, P ₂ O ₅ , Tm ₂ O ₃ e Rb ₂ O											

La figura 2 muestra el difractograma de rayos X, que indica la presencia de una porción mineral en estado amorfo, con picos de fase cristalina de cristobalita, además de la existencia de un halo amorfo, típico del material puzolánico.

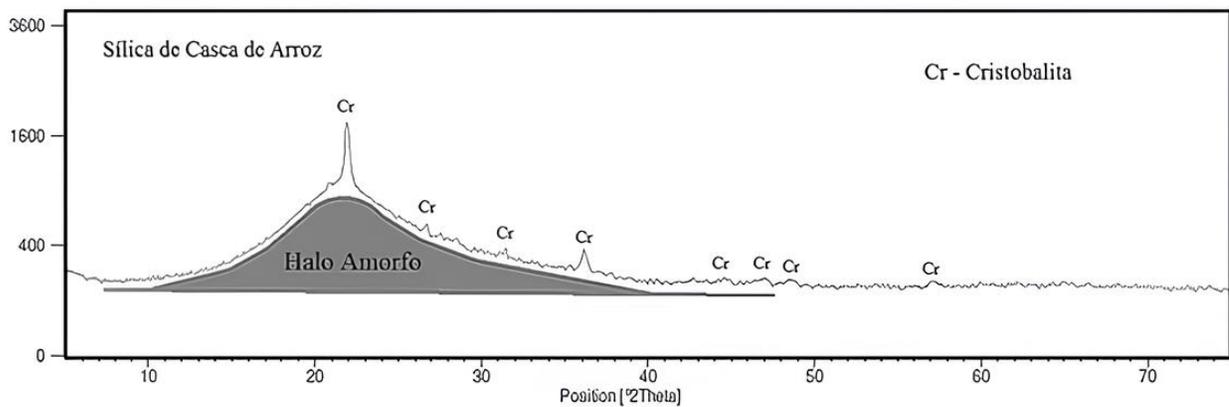


Figura 2. Difractograma de rayos X de adición mineral sílica de casca de arroz.

Como agregados finos y gruesos, se utilizaron arenas naturales y gravas de origen basáltico (grava nº "0", $d_{max} = 9,5 \text{ mm}$), respectivamente. Los datos de tamaño de partícula de NBR NM 248 (ABNT, 2003a) se muestran en la Figura 3, mostrando el cumplimiento de los requisitos de NBR 7211 (ABNT, 2009).

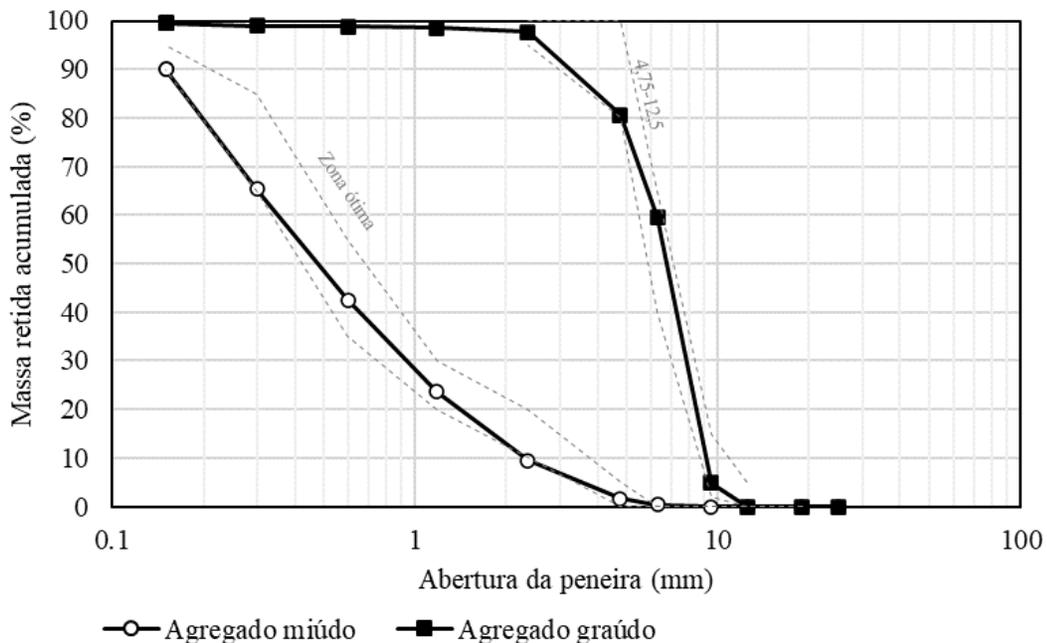


Figura 3. Curvas granulométricas de los agregados fino y grueso.

En la Tabla 3 se muestran los datos sobre el contenido de material pulverulento según NBR NM 46 (ABNT, 2003b); peso específico según NBR NM 52 (ABNT, 2003c) para agregados finos y NBR NM 53 (ABNT, 2006a) para agregados gruesos; peso unitario según NBR NM 45 (ABNT, 2006b); y absorción según NBR NM 30 (ABNT, 2001). A pesar de que el contenido de materiales pulverulentos estuvo por encima de los límites para agregados pequeños y grandes, 5% y 1% respectivamente, se entendió que esta característica no interferiría con los objetivos de este estudio.

Tabla 3. Caracterización de áridos utilizados en hormigones y morteros.

Propiedad	Norma	Agregado Fino	Agregado Grueso
Módulo de finura	NBR NM 248	2,33	5,79
Dimensión máxima característica (mm)	NBR NM 248	4,75	9,5
Peso Unitario (g/cm ³)	NBR NM 45	1,60	2,39
Classificación	NBR 7211	Zona óptima	4,15 – 12,5
Peso específico (g/cm ³)	NBR NM 52 e 53	2,510	2,747
Absorción de agua	NBR NM 30	1,57%	1,59%
Contenido de materiales pulverulentos	NBR NM 46	5,33%	7,11%

Debido a la baja relación a/c utilizada en los morteros de reparación, se añadió el aditivo superplastificante PowerFlow 1180 de MC-Bauchemie, a base de polímeros de policarboxilato, con una densidad de 1,09 kg/L y una dosis recomendada de 0,2% a 5,0% en relación con la masa de cemento.

3.2. Proceso de producción de probetas de hormigón armado

Para el desarrollo experimental del estudio se realizaron ensayos de potencial de corrosión y resistividad eléctrica superficial. Estos ensayos se aplicaron a probetas prismáticas que simulaban una pieza de hormigón reparada, como se ilustra en la Figura 4.

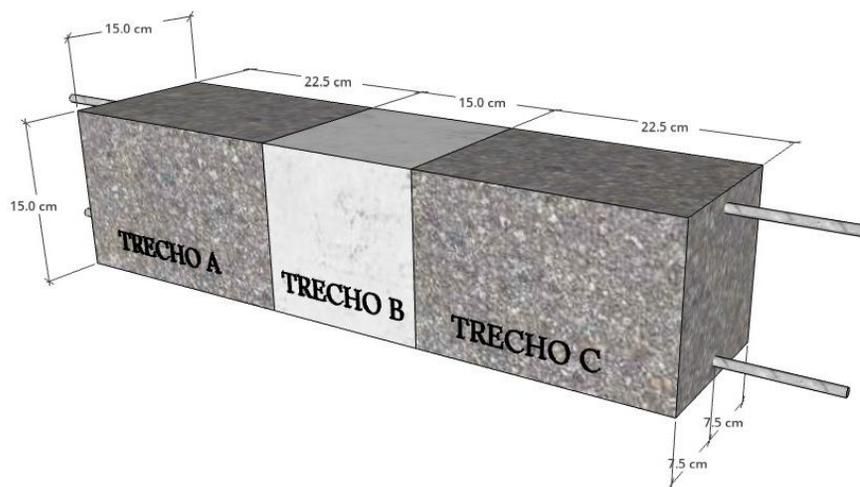


Figura 4. Espécimen prismático de hormigón armado reparado con mortero para el ensayo de verificación de formación de ánodo incipiente.

Como se ilustra en la Figura 2, la pieza de hormigón armado utilizada para el análisis se segmentó en tres secciones: Sección A, Sección B y Sección C. Esta segmentación se realizó para distinguir las regiones no reparadas de las regiones reparadas durante los ensayos. La sección A y la sección C corresponden a las regiones que no han sido reparadas, mientras que la sección B corresponde a la región con reparación estructural.

Los elementos prismáticos fueron moldeados con unas dimensiones de 15 X 15 X 60 cm y fueron utilizados por Daschevi (2022) en su tesis de maestría. El hormigón se moldeó con cemento Portland CPV – ARI y con una relación de mezcla en masa de 1:2,17:2,94:0,6 (relación cemento:

arena: grava: agua/cemento), con un consumo de cemento de 358 kg/m³ y un contenido de mortero del 51% para obtener una resistencia característica (fck) de 30 MPa a los 28 días. Así, este hormigón presentó una resistencia media a la compresión de 37 MPa, un módulo de elasticidad de 28 GPa y una absorción por buzamiento del 5,2%

Además, se consideró una condición de contaminación del hormigón por cloruro (Cl⁻) del 1,4%, en relación con la masa de cemento, que se añadió en forma de NaCl durante la mezcla de hormigón en la hormigonera. Este porcentaje corresponde al doble de la cantidad utilizada por Castro et. al. (2003), con el objetivo de asegurar la despasivación de los refuerzos.

Para el mortero de reparación se utilizaron cuatro proporciones de mezcla:

- Relación de mezcla SCA (0%): 1:3:0,4 (relación cemento: arena: agua/cemento).
- Relación de mezcla SCA (10%): 0,90:0,10:3:0,4 (cemento: SCA: relación arena: agua/cemento).
- Relación de mezcla SCA (15%): 0,85:0,15:3:0,4 (cemento: SCA: relación arena: agua/cemento).
- Relación de mezcla SCA (20%): 0,80:0,20:3:0,4 (cemento: SCA: relación arena: agua/cemento).

El índice de consistencia del mortero se fijó en 200 mm ± 10 mm, obtenido mediante la adición de 1,5% de un aditivo superplastificante a base de polímeros de policarboxilato a la masa de cemento. Este programa experimental también tiene como objetivo analizar una condición en la que no se utilizó la reparación. En la Tabla 4 se muestran las nomenclaturas adoptadas para los especímenes examinados.

Tabla 4. Nomenclaturas y especificaciones para los especímenes o probetas.

Probeta	Reparación	Adición	Substrato
SCA (0%) – S/Cl ⁻	Sin	0%	Sin Cl ⁻
SCA (10%) – S/Cl ⁻	Sin	10%	Sin Cl ⁻
SCA (15%) – S/Cl ⁻	Sin	15%	Sin Cl ⁻
SCA (20%) – S/Cl ⁻	Sin	20%	Sin Cl ⁻
SCA (0%) – C/Cl ⁻	Sin	0%	1,4% de Cl ⁻
SCA (10%) – S/Cl ⁻	Sin	10%	1,4% de Cl ⁻
SCA (15%) – S/Cl ⁻	Sin	15%	1,4% de Cl ⁻
SCA (20%) – C/Cl ⁻	Sin	20%	1,4% de Cl ⁻
Sin reparación – S/Cl ⁻	No	-	Sin Cl ⁻
Sin reparación – C/Cl ⁻	No	-	1,4% de Cl ⁻

Las barras de acero adoptadas fueron CA-50, con un diámetro de 8 mm, una longitud de 70 cm y un recubrimiento nominal de 1 cm. Antes del moldeo, todos se limpiaron previamente en una solución de ácido clorhídrico y hexametilentetramina, según el procedimiento de ASTM G-1 (1999). Luego, todas las barras se enjuagaron con agua corriente para la eliminación completa de los productos aplicados para la limpieza y se secaron completamente con toallas de papel. Además, se aislaron las regiones exteriores de las barras y se soldaron cables conductores. En el otro lado del cable, se soldó un terminal electrónico para la conexión al dispositivo de medición de potencial de corrosión.

3.2 Potencial de corrosión (E_{corr})

Según Romano, Brito y Rodrigues (2013), el potencial de corrosión de una armadura presente en el hormigón armado se caracteriza por ser un potencial mixto, es decir, el resultado de la combinación cinética de al menos dos procesos: la oxidación anódica del acero y la reducción del

oxígeno disuelto. El ensayo de potencial de corrosión mide la diferencia de potencial entre el acero presente en la estructura de hormigón armado y un electrodo de referencia, que es capaz de mantener su potencial fijo y sirve de punto de comparación (MEDEIROS et al., 2013; MEDEIROS et al., 2017).

Para la realización de los ensayos se utilizó la norma ASTM C 876 (ASTM, 2015). Inicialmente, esta norma especifica que no se refiere a las regiones donde se ubica el hormigón en el interior de edificios y estructuras ubicadas en el desierto, ya que la estructura puede perder humedad e influir en la resistividad del hormigón, haciéndola demasiado alta.

En este sentido, los ejemplares se dejaron en un tanque con agua para evitar resultados erróneos. Considerando la necesidad de que el hormigón esté húmedo, el agua presente en la porosidad capilar del hormigón armado actúa como conductor y, de esta manera, contribuye a la formación de diferencias de potencial a lo largo de la superficie del acero debido al agente agresivo presente (SONG, SARASWARHY, 2007 apud MEDEIROS et al., 2017).

Así, la configuración adoptada para realizar el ensayo de potencial de corrosión incluía un voltímetro, un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre, conductores que actúan como cobre negativo y positivo, y una esponja húmeda. La Figura 5 muestra el sistema de medición configurado para este experimento.



Figura 5. Aparatos para la realización de ensayos de potencial de corrosión (E_{corr}).

Se realizaron siete puntos de inspección de potencial de corrosión en la superficie de la probeta, cuatro puntos en el área sin reparar, dos puntos en la interfaz entre la reparación y el hormigón, y un punto en el centro de la pieza. El mismo procedimiento se adoptó para las muestras sin reparación. La configuración adoptada para las pruebas se puede ver en la Figura 6.

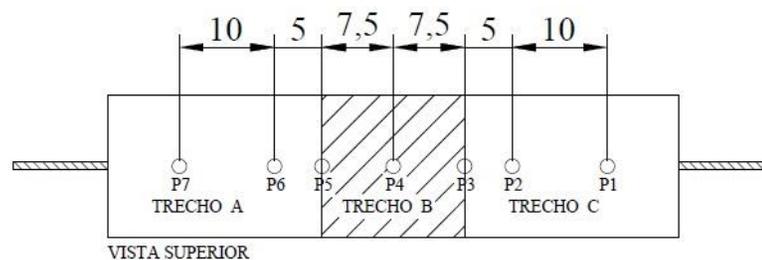


Figura 6. Puntos de análisis del potencial de corrosión

A través de los datos obtenidos, se puede verificar la probabilidad de corrosión a través de la Tabla 5 presentada en la norma ASTM C 876 (ASTM, 2015).

Tabla 5. Probabilidad de corrosión por medio del potencial de corrosión del inducido (PCA) en la muestra para lecturas utilizando el electrodo de cobre/sulfato de cobre.

Valor encontrado	Probabilidad de corrosión
PCA > - 200 mV	<10%
-350 mV < PCA < - 200 mV	Incerto
PCA < - 350 mV	>90%

Fuente: ASTM C 876 – 2015 (ASTM, 2015).

Además, se realizó el ensayo de potencial de corrosión tanto en la barra superior como en la inferior de cada probeta.

3.3 Resistividad eléctrica superficial

Para obtener los valores de resistividad eléctrica superficial del hormigón, se utilizó el Método de los Cuatro Electrodo, también conocido como Método de Wenner, el cual es ampliamente utilizado en experimentos que involucran estudios de durabilidad del concreto (HORNBOSTEL et al., 2013; MEDEIROS JUNIOR et al., 2014; MEDEIROS JUNIOR et al., 2019; WOSNIAK et al., 2021; ARAÚJO et al., 2022). Este método se desarrolló inicialmente para determinar la resistividad eléctrica del suelo (SILVA, 2016).

Para realizar la prueba de resistividad eléctrica superficial se utilizó el equipo Resipod de la marca Proceq. El ensayo consiste en colocar cuatro electrodos sobre la superficie del hormigón. Los electrodos en los extremos del equipo emiten una corriente eléctrica que puede ser alterna o continua, con una frecuencia de 40 Hz. Dependiendo del fabricante, la variación en el valor de la corriente puede estar entre 10 µA y 200 µA. Con esto, los dos electrodos internos miden la diferencia de potencial (ddp) resultante de la corriente aplicada por los electrodos externos. La resistividad eléctrica está determinada por (01) desarrollado por Wenner.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \tag{1}$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica del concreto ($\Omega \cdot m$);

a = Distancia promedio entre los eles de los electrodos (m);

V = Diferencia de potencial entre los electrodos internos (V);

I = Corriente Eléctrica (A).

Así, se realizaron dos comprobaciones de la resistividad eléctrica superficial del hormigón por tramo de la muestra, tanto en la superficie superior como en la inferior. En la Figura 7 se presentan los puntos analizados.

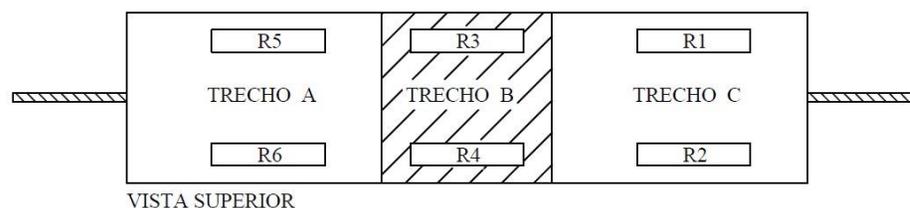


Figura 7. Puntos de análisis de resistividad eléctrica del concreto.

A través de los resultados obtenidos, se utilizó la Tabla 6 de la Norma Europea CEB 192 (CEB, 1989) para verificar si la estructura sufre algún riesgo de corrosión:

Tabla 6. Probabilidad de riesgo de corrosión.

Resistividad eléctrica del concreto	Probabilidad de corrosión
$p > 20 \text{ kohm x cm}$	Despreciable
$10 < p < 20 \text{ kohm x cm}$	Baja
$5 < p < 10 \text{ kohm x cm}$	Alta
$p < 5 \text{ kohm x cm}$	Muy Alta

Fonte: CEB 192 (CEB, 1989).

Es importante tener en cuenta que, aunque es una técnica sencilla y ampliamente utilizada, el Método de los Cuatro Electrodo debe aplicarse con cuidado para evitar influencias de factores externos, como la forma de la muestra a ensayar, la región de contacto entre los electrodos y el hormigón, la heterogeneidad del hormigón, el tipo de onda eléctrica, la frecuencia e intensidad de la corriente aplicada. Estos factores pueden afectar la precisión de las mediciones. Teniendo en cuenta la metodología utilizada, los resultados obtenidos a través de los ensayos se presentarán en los siguientes temas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La corrosión en los elementos de hormigón armado puede provocar una reducción de la capacidad portante debido a la disminución de la sección transversal del acero y al desarrollo de grietas en los compuestos cementosos. Por lo tanto, las reparaciones de corrosión y la limpieza adecuada de la armadura son esenciales para evitar la recurrencia de esta manifestación patológica y la formación de ánodos incipientes. Dada la escasa discusión sobre este tema en la literatura científica (Castro et al., 2003; Christodoulou et al., 2013; Luković et al., 2017; Ali et al., 2018), ningún estudio ha abordado el uso de sílice de cáscara de arroz en reparaciones de mortero y si podría causar la formación de ánodos incipientes en las áreas reparadas. Por lo tanto, el presente estudio buscó investigar las diferencias electroquímicas causadas por el uso de sílice de cáscara de arroz en reparaciones de mortero y si esto podría contribuir potencialmente a la formación de ánodos incipientes en el hormigón armado. Las propiedades analizadas incluyeron características físicas (resistividad eléctrica, módulo de elasticidad y resistencia a la compresión) y propiedades fisicoquímicas (potencial de corrosión). Los resultados obtenidos para cada prueba se presentan en los siguientes apartados.

4.1 Características del sustrato y morteros de reparación

A efectos comparativos con las características de los morteros utilizados como reparación, el hormigón del sustrato tiene una resistencia media de 37 MPa (desviación estándar = 1,5 MPa) y un módulo medio de elasticidad de 28 GPa (desviación estándar = 1,0 GPa).

La Figura 8 muestra la variación en la resistencia a la compresión de los morteros con la variación en el contenido de SCA. Cabe destacar que el mortero con un 10% de sustitución parcial de cemento por SCA mostró un incremento de la resistencia a la compresión del 11,6% en relación con el mortero de referencia. En el caso de los porcentajes de reposición de 15% y 20%, se produjo una reducción de la resistencia de 10,0% y 43,6%, respectivamente, en relación con el mortero de referencia.

En general, se puede afirmar que hubo una tendencia a la reducción de la resistencia con el aumento del nivel de sustitución parcial del cemento por ACS. Comparando los datos de resistencia con el

hormigón del soporte que recibió la reparación (37 MPa), es importante destacar que el mortero con 20% de SCA fue el único que presentó menor resistencia a la compresión que el sustrato.

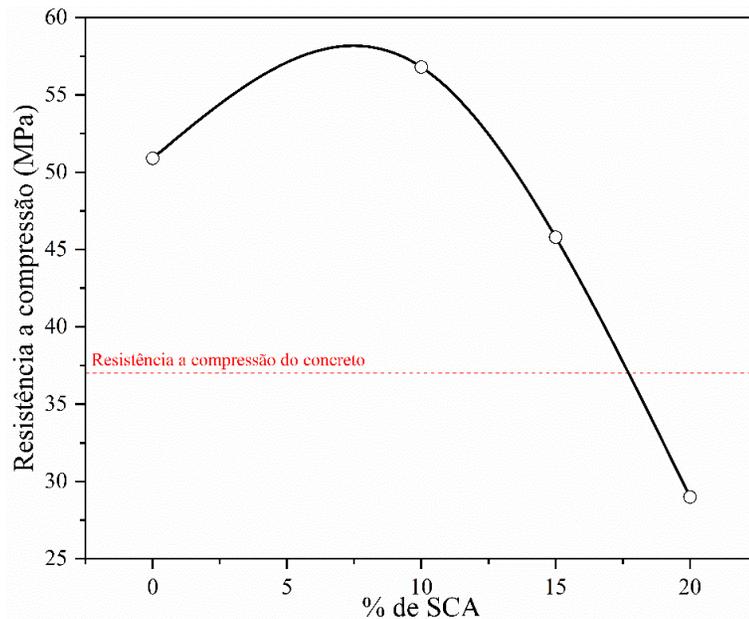


Figura 8. Resistencia a la compresión de los morteros en función del contenido de SCA, medida en probetas de 40 x 40 x 80 cm, a los 28 días de curado.

En la Figura 9 se muestra la influencia del contenido de reemplazo parcial del cemento por SCA sobre los valores medios del módulo de elasticidad a los 28 días. El análisis estadístico indicó que las medias de 0%, 10% y 15% no tuvieron diferencia significativa, considerándose similares. Por otro lado, el contenido del 20% provocó una reducción estadísticamente significativa, lo que representa una disminución del 5,6% en comparación con el contenido del 0%. Hay que tener en cuenta que todos los morteros tienen un módulo de elasticidad superior al del soporte, que es de 28 GPa.

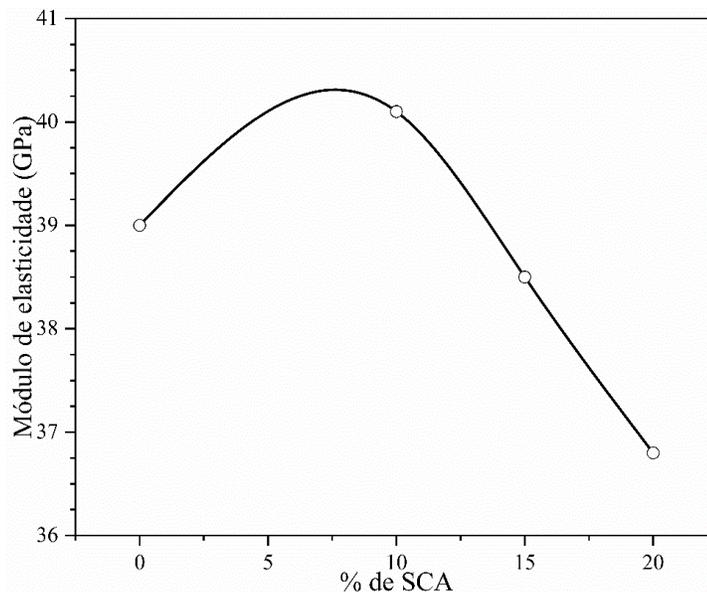


Figura 9. Módulo estático de elasticidad de morteros en función del contenido de SCA, medido en probetas de 40 x 40 x 160 cm, a los 28 días de curado.

4.2 Potencial de corrosión

La prueba de potencial de corrosión se utiliza para evaluar la propensión de un material a la corrosión en un entorno o condición específica. Los datos obtenidos a través de este ensayo se transformaron en promedios aritméticos, ya que no se observó una gran variación en el potencial de corrosión en los 7 puntos de inspección a lo largo de la pieza de hormigón. El análisis reveló una desviación estándar entre 3 y 10 y un coeficiente de variación de 1% a 9%. En la Figura 10 se muestran los valores de Ecorr en función de las muestras de cada serie de ensayos.

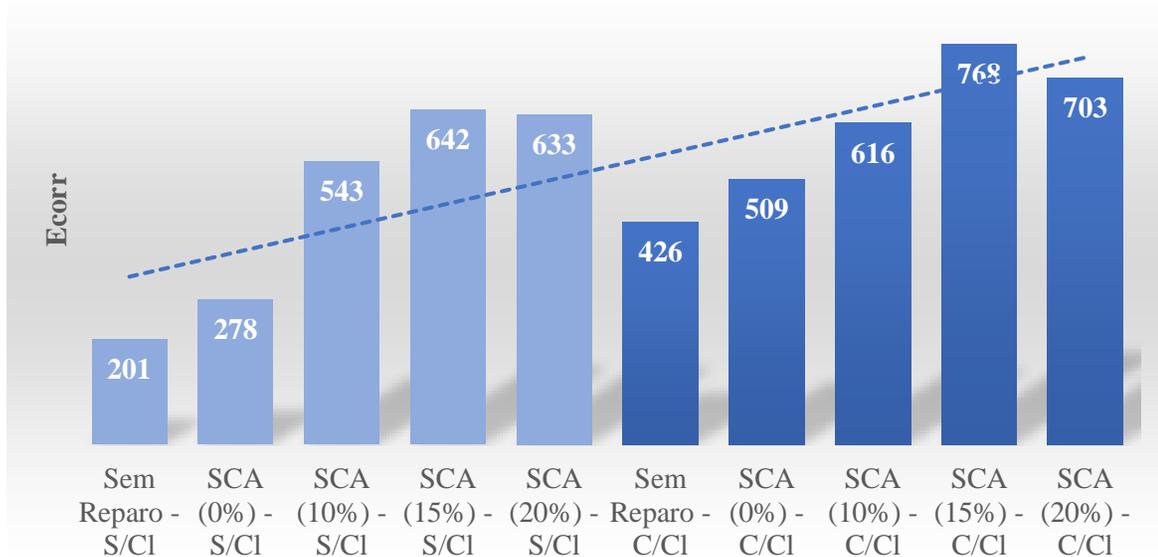


Figura 10. Potencial de corrosión utilizando electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre.

Para hacer un análisis de la Figura 10, es didáctico interpretarla por partes. Inicialmente, se deben observar las muestras no reparadas, con y sin contaminación por cloruro. En este caso, la influencia de la presencia del contaminante es evidente, lo que hace que los resultados sean más electronegativos en presencia de iones cloruro. De acuerdo con la clasificación ASTM C 876 (ASTM, 2015), se puede afirmar que el caso no contaminado tiene menos de un 10% de probabilidad de corrosión. En el caso del hormigón contaminado por cloruros, se puede afirmar que existe más del 90% de probabilidad de corrosión, por lo que la contaminación del 1,4% de cloruro en relación con el peso del cemento provocó un cambio de más del 100% en los valores de Ecorr.

Al observar la Figura 10 con un enfoque solo en las series con contaminación por iones de cloruro, se observa que la reparación localizada no mejoró los valores de potencial de corrosión, manteniendo las piezas reparadas en valores Ecorr que indican más del 90% de probabilidad de corrosión. Esto significa que la ejecución de la reparación localizada no garantizó el estancamiento del proceso de corrosión instalado, por lo que continúa desarrollándose y avanzando en el hormigón reparado. Además, analizando la Figura 10 y comparando el caso de mortero de reparación modificado con puzolana de alta reactividad, los valores de Ecorr fueron aún más electronegativos, oscilando entre 21% y 51% en comparación con la reparación de mortero sin SCA. Se trata de una advertencia, ya que el uso de una puzolana, que normalmente se espera que mejore la reparación, puede significar un empeoramiento del rendimiento en las condiciones de servicio.

Analizando la Figura 10 con un enfoque en las series sin contaminación por cloruros, cabe destacar el hecho de que la introducción de la reparación genera algún tipo de perturbación electroquímica que hace que las piezas de concreto reparadas presenten más Ecorr electronegativo en comparación

con las series sin reparación y sin cloruros. Cabe destacar que la serie SCA (15%) – S/Cl cuyo valor E_{corr} fue de -642 mV, 219% más electronegativo que la parte no reparable y libre de cloruros. Una explicación para el aumento de la electronegatividad de E_{corr} con el uso de SCA en morteros es el hecho de que esta puzolana de alta reactividad consume considerablemente la portlandita resultante del proceso de hidratación del cemento, como se demuestra en el trabajo de Hoppe Filho et al. (2017) y Campos, Medeiros y Hoppe Filho (2022). Sin embargo, es interesante notar que el silicato de calcio hidratado formado a través de la reacción puzolánica tiene una densidad menor que el C-S-H formado durante el proceso de hidratación del cemento Portland (RIBEIRO, 2018). En este sentido, existe la probabilidad de que, al utilizar SCA, se haya consumido la portlandita responsable del alto pH del mortero, generando una reducción del pH del mortero de reparación y provocando una incompatibilidad electroquímica con el hormigón del soporte.

El pH del ambiente tiene un gran impacto en el equilibrio de potenciales, ya que un pH alto da como resultado, más potenciales de equilibrio electronegativos. Un aumento del pH de una sola unidad en la región alcalina del hormigón da lugar a un cambio más negativo de 60 mV en los potenciales de equilibrio entre el acero y los productos, así como en los potenciales de equilibrio para las reacciones de oxígeno e hidrógeno (POURBAIX, 1990 apud CHRISTODOULOU et al., 2013).

4.3 Resistividad eléctrica superficial

En las figuras 11 y 12 se muestran los datos obtenidos para la resistividad eléctrica superficial de los materiales que componen las probetas de hormigón armado reparadas. Hay que tener en cuenta que las resistividades eléctricas superficiales de los morteros de reparación son superiores a las del sustrato de hormigón, y esta diferencia puede ser un factor desencadenante para la formación de ánodos incipientes.

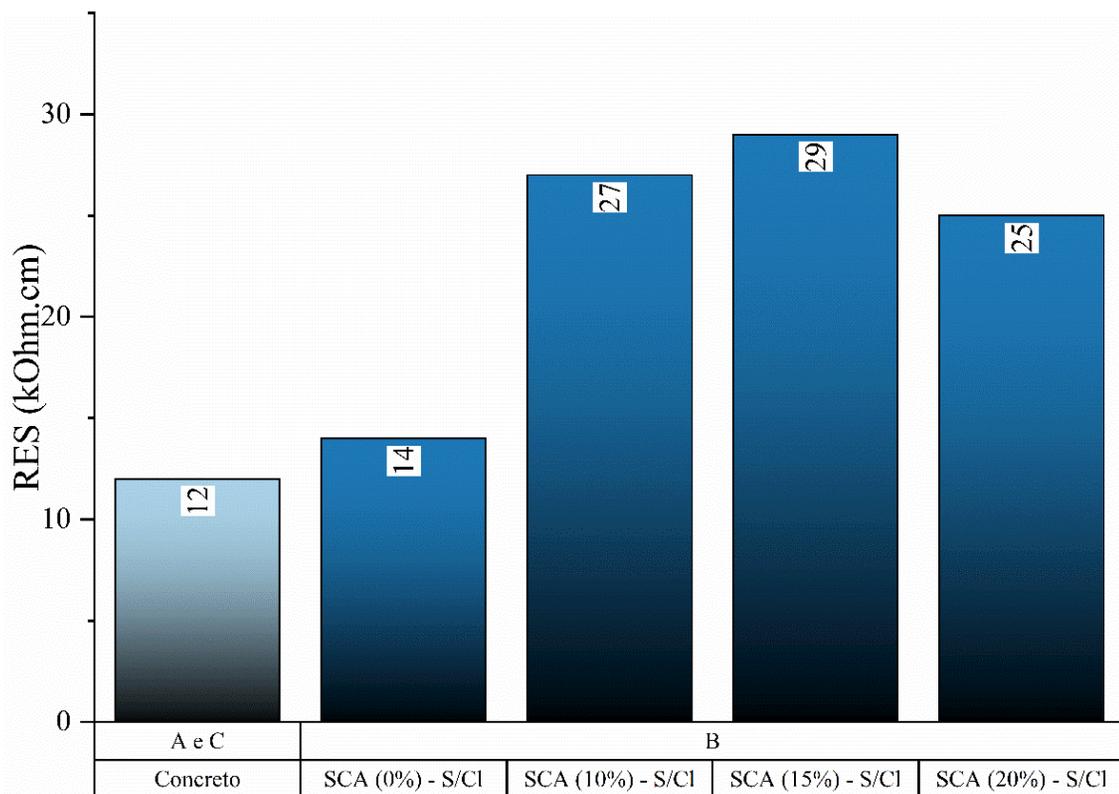


Figura 11. Resistividad eléctrica superficial (RES) de las muestras sin cloruro.

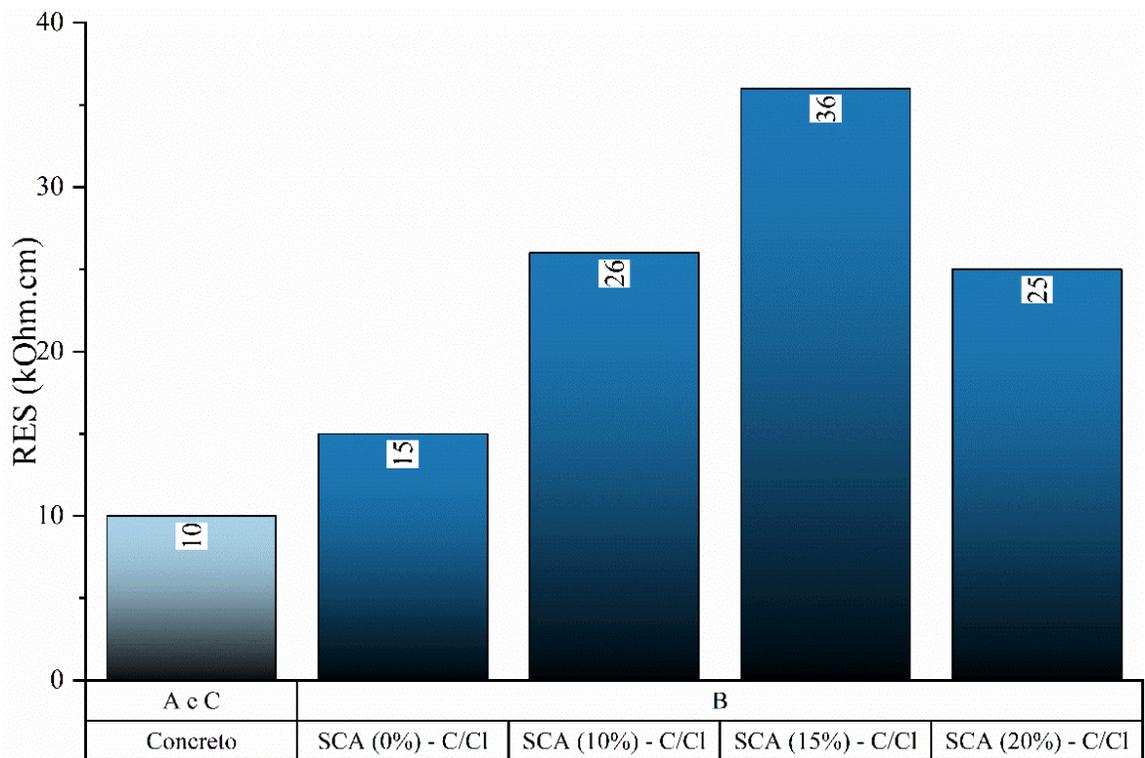


Figura 12. Resistividad eléctrica superficial (RES) de las muestras con cloruros.

Los resultados encontrados para la resistividad eléctrica superficial (RES) están en línea con los obtenidos en el estudio desarrollado por Wosniack et al. (2021) y Araújo, Macioski y Medeiros (2022), quienes también observaron valores de resistividad eléctrica más altos para los hormigones fundidos con sílice de cáscara de arroz en comparación con los hormigones sin esta adición. La resistividad eléctrica del hormigón está relacionada con la matriz de la microestructura del cemento, incluyendo las estructuras de poros, la porosidad y su distribución. Estas propiedades están controladas por el grado de hidratación del cemento (POLDER, 2001, apud SILVA, FERREIRA, FIGUEIRAS, 2011). Por esta razón, se observan altos valores de resistividad eléctrica superficial para morteros de reparación con la adición de sílice de cáscara de arroz, en comparación con el sustrato de concreto y mortero sin la adición de SCA.

En este sentido, según Wosniack et al. (2021), la actividad puzolánica impacta en la resistividad eléctrica superficial del hormigón, refinando los poros y contribuyendo a una pasta más densa. Otro efecto de la adición puzolánica reportado en los trabajos de Medeiros et al. (2013) y Medeiros Junior, Munhoz y Medeiros (2019) que impacta en la resistividad eléctrica de los compuestos cementosos es el consumo de hidróxido de calcio en la reacción puzolánica, por lo que la solución de poros de concreto se vuelve menos concentrada en iones Ca^{2+} y OH^- y, en consecuencia, menos conductora o más resistentes. Estos argumentos explican el hecho de que los valores de resistividad eléctrica en morteros con SCA sean muy superiores a los de materiales sin SCA (mortero de referencia y hormigón de soporte).

Sin embargo, es importante destacar que, según lo determinado por Hoppe Filho et al. (2017), quienes analizaron el índice de actividad puzolánica con cal según NBR 5751 (ABNT, 2015), la sílice de cáscara de arroz tiene una cinética de actividad puzolánica más baja en comparación con el humo de sílice y el metacaolín. De esta forma, si se utilizaran otras adiciones, se verificarían otros valores de resistividad eléctrica superficial para el mortero de reparación.

Volviendo a este trabajo, que se ocupa de las probetas de hormigón reparadas, en el caso del mortero de reparación sin adición de sílice de cáscara de arroz, los valores de resistividad eléctrica superficial fueron un 17% superiores en la región con reparación que en la región de hormigón del

sustrato. Esto se debe a que el mortero de reparación tiene una relación agua/cemento (p/c) más baja que el hormigón del sustrato (regiones vecinas). De acuerdo con los resultados obtenidos por Chen y Wu (2013), la porosidad aumenta a medida que aumenta la relación w/c y, según Medeiros Junior, Munhoz y Medeiros (2019), la resistividad disminuye a medida que aumenta la relación w/c. Así, los datos obtenidos en la campaña experimental son coherentes, por lo que la resistividad eléctrica superficial del mortero de reparación sin SCA es mayor, debido a que tiene una mezcla más densa.

Sin embargo, debido a los efectos ya explicados anteriormente, la adición de SCA provoca una mayor diferencia de RES entre el sustrato reparado y el mortero de relleno reparador. Sobre este tema, la Figura 12 muestra que los morteros con ACS, consecuentemente con una mayor diferencia de RES entre el sustrato y el mortero, son los que resultan en más valores electronegativos del sistema reparado, indicando una mayor tendencia a la corrosión debido a la incompatibilidad electroquímica entre las regiones.

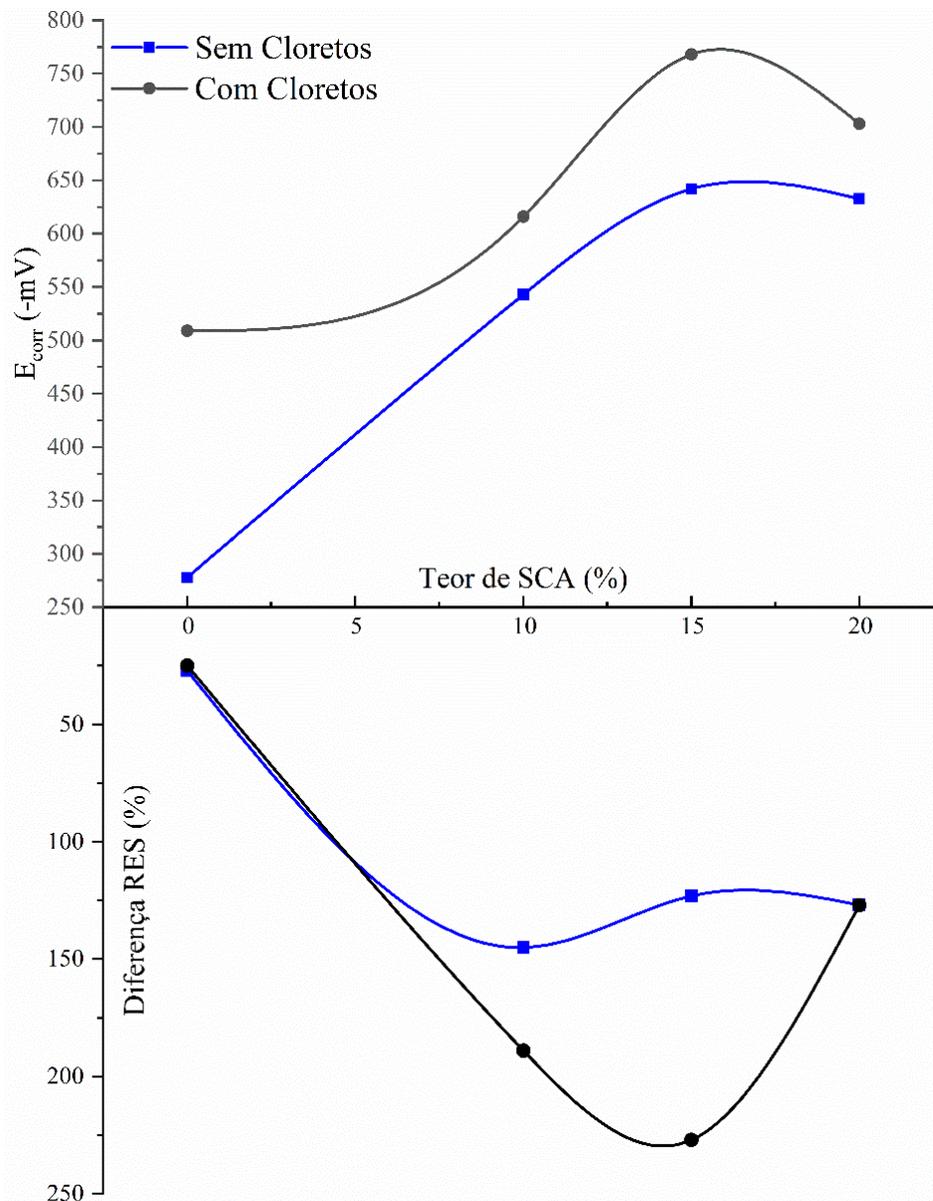


Figura 12. Relación entre el contenido de SCA, E_{corr} y la diferencia de RES entre el hormigón de soporte y el mortero de reparación.

5. CONSIDERACIONES FINALES

A partir del plan experimental desarrollado en este trabajo, se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- La adición de sílice de cáscara de arroz (SCA) provocó un aumento de la resistividad eléctrica de los morteros de reparación, con incrementos que oscilaron entre el 67% y el 140% en comparación con el mortero sin SCA.
- Se verifica que, solo con los datos de potencial de corrosión, no sería posible afirmar la existencia del fenómeno del ánodo incipiente, debido a que el potencial de corrosión del acero mostró poca variación dentro y fuera de la reparación.
- Al evaluar los datos de resistividad eléctrica superficial, es posible notar la diferencia de propiedades entre el mortero de reparación y el hormigón, especialmente en el caso del mortero con la adición de SCA.
- Cabe destacar que, al analizar la posibilidad de la existencia del ánodo incipiente en elementos estructurales, no se debe utilizar un solo medio de prueba, ya que, con la presencia de datos de diferentes experimentos, es posible tener más certeza sobre la ocurrencia del fenómeno. En vista de esto, para asegurar la ocurrencia de corrosión en las muestras, sería necesario incluir las mediciones de la velocidad de corrosión y la corriente galvánica.
- La reparación localizada introducida en las probetas provocó un movimiento de los potenciales de corrosión a valores más electronegativos, indicando la probabilidad de corrosión activa, incluso en los casos en que el sustrato no estaba contaminado por cloruros.
- La principal conclusión de este trabajo es que la adición de sílice de cáscara de arroz en el mortero de reparación resultó en mayores diferencias en la resistividad eléctrica superficial entre el área reparada y las secciones del sustrato de concreto, provocando que los valores de potencial de corrosión de las piezas reparadas sean más electronegativos, indicando una tendencia a la falla por corrosión de los refuerzos causada por la formación de ánodos incipientes.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a las agencias brasileñas CNPq, Capes y Fundación Araucária por la beca y el apoyo financiero, al campus de Curitiba de la Universidad Federal de Paraná (UFPR), al Centro Politécnico, al Departamento de Construcción Civil (DCC), al Programa de Posgrado en Ingeniería Civil (PPGEC), al Centro de Estudios de Ingeniería Civil (CESEC), al Laboratorio de Materiales y Estructuras (LAME), al grupo de investigación en Patología y Recuperación de la Construcción (PRC), así como al Grupo Pilecco Nobre y a la Cementera Itambé, por la donación de materiales para la investigación.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 5751 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018), *NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010), *NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 7211 - Agregados para concreto -*

Especificação. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001), *NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006b), *NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003b), *NBR NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003c), *NBR NM 52 - Agregados miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006a), *NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003a), *NBR NM 248 - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.

American Society for Testing and Materials (1999), *ASTM G1 - Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens*. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials (2015), *ASTM C-876: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Philadelphia.

Ali, M. S. *et al.* (2018), *An experimental study of electrochemical incompatibility between repaired patch concrete and existing old concrete*. *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 159-172.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.059>

Araújo, E. C., Macioski, G., De Medeiros, M. H. F. (2022), *Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs*. *Construction and Building Materials*, v. 324, p. 126659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126659>

Campos, P. A., Medeiros, M. H. F., Filho, J. H. (2022), *Ação conjugada de sílica de casca de arroz e hidróxido de cálcio em compósitos de cimento Portland: porosidade, compostos hidratados, reserva alcalina, e resistência à compressão*. *Revista Matéria*, v. 27, n.03.

<https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0018>

Castro, P., Pazini, E., Andrade, C., Alonso, C. (2003), *Macrocell activity in slightly chloride-contaminated concrete induced by reinforcement primers*. *Corrosion*, v. 59, n. 6, p. 535–546.

<https://doi.org/10.5006/1.3277585>

Comité Euro-Internacional du Béton (1989), *Nº 192: diagnosis and assessment of concrete structures: state-of-art report*. Switzerland: FIB – International Federation for Structural Concrete.

Chen, X., Wu, S. (2013), *Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar*. *Construction and Building Materials*, v.38, p. 804-812.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058>

Christodoulou, C., *et al.* (2013), *Diagnosing the cause of incipient anodes in repaired reinforce concrete structures*. *Corrosion Science*, v. 69, p. 123 – 129.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.032>

Daschevi, P. A. (2022), *‘Efeito do ânodo incipiente em reparos localizados utilizando argamassas com substituição parcial de ligante por sílica de casca de arroz’*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Hoppe Filho, J. *et al.* (2017), *Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado*. *Revista Matéria*, v. 22, n. 03.

<https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0206>

Hoppe Filho, J. *et al.* (2017), *Reactivity Assessment of Residual Rice-Husk Ashes*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 1, p. 04017003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000182](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000182)

- Grandes Construções (2017), Brasil perde 4% do PIB com corrosión. Revista Grandes Construções.
- Hornbostel, K., Larsen, C. K.; Geiker, M. R. (2013), *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate—A literature review*. Cement and concrete composites, v. 39, p. 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Kamde, D. K., et al. (2021), *Long-term performance of galvanic anodes for the protection of steel reinforced concrete structures*. Journal of Building Engineering, v. 42, p. 103049. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103049>
- Luković, M., et al. (2017), *Failure Modes in Concrete Repair Systems due to Ongoing Corroison*. Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1155/2017/9649187>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008), “*Concreto: Microestrutura, Propiedades e Materiais*”. Ibracon.
- Medeiros, M. H. F., et al. (2013), *Inspection of Buildings in Rio de Janeiro-Brazil: Proving the greater tendency of corrosion at the base of reinforced concrete columns using potential corrosion technique*. American Journal of Engineering Research (AJER), v. 2, p. 102-112.
- Medeiros, M. H. F., et al. (2017), *Potencial de corrosión: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v.10, p. 864-885. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000400005>
- Medeiros, M. H. F., et al. (2013), *High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, p. 411 - 418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000059](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000059)
- Medeiros, M. H. F., et al. (2017), *Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover*. REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS, v. 10, p. 864-885. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000400005>
- Medeiros, M. H. F., Daschevi, P. A., Araújo, E. C. (2022), *Reparo localizado para estruturas de concreto armado: erros, acertos e reflexões*. Concreto & Construções. <https://doi.org/10.4322/1809-7197.2022.106.0001>
- Medeiros Junior, R. A., et al. (2014), *Investigação da resistência à compressão e da resistividade eléctrica de concretos com diferentes tipos de cimento*. Revista ALCONPAT, v. 4, p. 116-128. <https://doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>
- Medeiros Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F. (2019), *Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan*. Revista ALCONPAT, v. 9, p. 152-166. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>
- Nace International (2016), *International Measures of Prevention Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*.
- Romano, P., Brito, P. S. D., Rodrigues, L. (2013), *Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions*. Construction and Building Material, v. 47, p. 827 – 832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.042>
- Silva, P. C., Ferreira, R. M., Figueiras, H. (2011), “*Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure*”. International Conference on Durability of Building Materials and Components.
- Silva, L. M. A. (2016), “*Resistividade eléctrica superficial do concreto: influência da cura*”. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Goiás.
- Ribeiro, D. V. (2018), *Estruturas dos poros e mecanismos de transporte no concreto*. In: Ribeiro, D. V., et al. “*Corrosión e Degradação em Estruturas de Concreto*”. Rio de Janeiro: GEN, p. 51-93.
- Wosniack, L. M. et al. (2021), *Resistividade eléctrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro electrodos*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321 – 340. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300554>