

**EVALUACION DEL DAÑO POR CORROSIÓN EN EL REFUERZO DEL
CONCRETO EN AMBIENTE DE CLORUROS, POR LAS TÉCNICAS DE RUIDO
ELECTROQUIMICO Y RPL.**

**FABIAN JOSÉ MOLINA QUINTERO
GERMAN MAURICIO DURAN CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2009**

**EVALUACION DEL DAÑO POR CORROSIÓN EN EL REFUERZO DEL
CONCRETO EN AMBIENTE DE CLORUROS, POR LAS TÉCNICAS DE RUIDO
ELECTROQUIMICO Y RPL.**

**FABIAN JOSE MOLINA QUINTERO
GERMAN MAURICIO DURAN CASTELLANOS**

**Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:
Custodio Vásquez Quintero
Ing. Metalúrgico M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2009**

Dedico este triunfo a
Dios por brindarme la sabiduría para culminar con éxito mi carrera,
A mis Padres
Jairo José Molina Tapia y Onoris Quintero Brito
Porque siempre han estado presentes en todo momento apoyándome, confiando y creyendo
en mí
A mis hermanos
Danny José y Luis David
Porque siempre he contado con ellos
A mis amigos y profesores
Porque hicieron parte del camino que construí con gran esfuerzo y dedicación.

Gracias

Fabián José Molina Quintero

A Dios

Que siempre estuvo presente para poder alcanzar este logro.

A mis padres

Germán Durán Azuero y Martha Teresa Castellanos Pico que siempre estuvieron a mi lado apoyándome.

A mi tía

Ana Gloria Durán Azuero quien me aconsejó y ayudó.

A mis Hermanos

Por su amistad y apoyo.

Gracias

Germán Mauricio Durán Castellanos

AGRADECIMIENTOS

Cuando se llega al término de una etapa como ésta y se mira hacia atrás, se recuerda cada momento transcurrido durante su realización, y no se puede dejar de mencionar a todas las personas que hicieron posible esto habiendo gente que colaboró, tanto técnica como humanamente en su realización.

En primer lugar quiero agradecer a mi director de tesis: al Ing. Metalúrgico M.Sc. Custodio Vásquez Quintero por su constante orientación, valiosos comentarios, sugerencias en cada etapa de esta tesis y fundamentalmente su calidad humana y amistad que han contribuido a sentir un apoyo permanente tanto en lo profesional como en lo personal. Al Ing. Metalúrgico M.Sc. Ph.D Dario Yesid Peña Ballesteros por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco al Ing. Hugo Estupiñan por su acertada colaboración y disposición durante toda la campaña experimental. Asimismo, a todo el personal del Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) por su buena disposición en todo momento, así como a sus instalaciones.

A todas aquellas personas que de alguna u otra forma nos brindaron su ayuda para culminar este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	1
1. OBJETIVOS.	3
1.1. OBJETIVOS GENERALES.	3
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
2. MARCO TEORICO	4
2.1. FUNCION DEL ACERO DE REFUERZO PARA HORMIGON	4
2.2. PROCESOS DE CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO	4
2.3. CORROSION DEL ACERO EN EL HORMIGON.	6
2.4. ATAQUE POR CLORUROS	8
2.5. CAPA PASIVANTE	9
2.6. MECANISMO DE ENTRADA DEL IÓN CLORURO.	10
2.6.1. Entrada por difusión	10
2.7. FORMAS DE INGRESO DE LOS IONES CLORUROS AL HORMIGON.	11
2.8. CONSECUENCIA DEL INGRESO DE IONES CLORURO SOBRE LA ESTRUCTURA DEL HORMIGON ENDURECIDO Y LAS ARMADURAS	12
2.9. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE CORROSIÓN	13
2.9.1. Espesor del Recubrimiento	13
2.9.2. Permeabilidad del Recubrimiento	14
2.9.3. Contenido de Cemento	14
2.9.4. Condiciones Ambientales	14

2.9.5.	Otros factores que influyen en la corrosión asociada al ión cloruro	15
2.9.6.	Profundidad, Localización y recubrimiento de las armaduras.	16
2.10.	TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN	17
2.10.1	Curvas de polarización.	17
2.11.	RESISTENCIA A LA POLARIZACION LINEAL (LPR).	17
2.12.	RUIDO ELECTROQUIMICO.	18
2.12.1	Fuentes del Ruido Electroquímico.	19
2.12.2	Registro del Ruido Electroquímico.	21
2.12.3	Cómo se obtiene las velocidades de corrosión por medio de la técnica de Ruido Electroquímico	22
2.12.4	Índice de Localización (Localization Index)	24
3.	METODOLOGIA	25
3.1.	REVISION BIBLIOGRAFICA	26
3.2.	RECOLECCION DE INFORMACION TECNICA.	26
3.3.	DETERMINACION DE VARIABLES.	26
3.4.	METODOLOGIA DE TRABAJO	26
3.4.1.	Preparación de probetas y adaptación de equipos.	26
3.5.	CARACTERIZACION DEL MATERIAL DE TRABAJO	28
3.6.	EQUIPOS, ELEMENTOS Y MATERIALES EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACION	31
3.7.	DESCRIPCION DEL MONTAJE REALIZADO PARA LOS ENSAYOS	32
3.8.	REALIZACION DE PRUEBAS Y RECOLECCION DE DATOS.	33
4.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.	34

4.1.	VELOCIDAD DE CORROSION.	34
5.	CONCLUSIONES.	71
6.	RECOMENDACIONES	72
6.	BIBLIOGRAFIA	73
7.	ANEXOS.	76

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Esquema de la difusión del oxígeno.	6
Figura 2. Esquema de la destrucción de la capa pasivante por los cloruros.	9
Figura 3. Relación de la vida útil y el ataque de los cloruros.	13
Figura 4. Esquema de cómo se empieza la picadura por cloruros.	16
Figura 5. Independencia de los factores de influencia sobre las señales de Ruido electroquímico	22
Figura 6. Gráfica de Ruido Electroquímico para corrosión uniforme	23
Figura 7. Gráfica de Ruido Electroquímico para corrosión por picado.	23
Figura 8. Cuadro sinóptico de la metodología de trabajo que se utilizo	25
Figura 9. EDS para la muestra de cemento	30
Figura 10. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 23 días de exposición en la solución	36
Figura 11. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 43 días de exposición en la solución.	37
Figura12. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 99 días de exposición en la solución	37
Figura 13. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 120 días de exposición en la solución	38
Figura 14. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las	

	probetas sin micro-sílice a los 150 días de exposición en la solución	38
Figura 15.	Evolución de la corrosión para las probetas sin micro-sílice por la técnica RPL frente al paso del tiempo.	39
Figura 16.	Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 23 días de exposición en la solución	41
Figura 17.	Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los días 77 de exposición en la solución	42
Figura 18.	Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 120 días de exposición en la solución.	42
Figura 19	Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 133 días de exposición en la solución.	43
Figura 20.	Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 150 días de exposición en la solución.	43
Figura 21.	Evolución de la corrosión para las probetas con micro-sílice por la técnica RPL frente al paso del tiempo.	44
Figura 22	Evolución de la corrosión para las probetas sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico frente al paso del tiempo.	46
Figura 23.	Índice de localización de las probetas sin micro-sílice a través del tiempo.	48
Figura 24.	Evolución de la corrosión para las probetas con micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico frente al paso del	

	tiempo.	50
Figura 25.	Índice de localización de las probetas con micro-sílice a través del tiempo.	52
Figura 26.	Tendencia mostrada de las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los primeros días de exposición de las probetas	53
Figura 27.	Gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los primeros días de exposición de las probetas al disminuir el rango de los ejes verticales.	54
Figura 28.	Tendencia mostrada por las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los días intermedios de los 150 días exposición de las probetas.	54
Figura 29.	Gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los días intermedios de los 150 días exposición de las probetas al disminuir el rango de los ejes verticales.	55
Figura 30.	Tendencia mostrada por las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los 150 días exposición de las probetas	56
Figura 31.	Tendencia mostrada por las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los 150 días exposición de las probetas al disminuir el rango de los ejes verticales	56
Figura 32.	Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta de relación a/c 0.4 sin micro-sílice	57
Figura 33.	Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta de relación a/c 0.5 sin micro-sílice.	58
Figura 34.	Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta de relación a/c 0.6 sin micro-sílice	59

Figura 35.	Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta de relación a/c 0.4 con micro-sílice.	60
Figura 36.	Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta de relación a/c 0.5 con micro-sílice	61
Figura 37.	Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta de relación a/c 0.6 con micro-sílice.	62
Figura 38.	Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas de relación a/c 0.4 con y sin micro-sílice por la técnica de RPL.	62
Figura 39.	Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas de relación a/c 0.5 con y sin micro-sílice por la técnica de RPL.	63
Figura 40.	Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas de relación a/c 0.6 con y sin micro-sílice por la técnica de RPL	64
Figura 41.	Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas de relación a/c 0.4 con y sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico	65
Figura 42.	Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas de relación a/c 0.5 con y sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico	65
Figura 43.	Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas de relación a/c 0.6 con y sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico	66

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Condiciones para que haya corrosión	18
Tabla 2. Condiciones para que no haya corrosión	18
Tabla 3. Relación de las pendientes con los tipos de corrosión.	18
Tabla 4. Esquema de la relación de Icorr y los niveles de corrosión	21
Tabla 5. Composición del cemento con el que se realizaron las probetas	29
Tabla 6. Composición química del acero grado A-250.	30
Tabla 7. Datos de Icorr por la técnica RPL, para las probetas sin micro-sílice.	35
Tabla 8. Datos de Icorr por la técnica RPL, para las probetas con micro-sílice.	40
Tabla 9. Datos de Icorr por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO, para las probetas sin micro-sílice	45
Tabla 10. Índice de localización para las probetas sin micro-sílice	47
Tabla 11. Datos de Icorr por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO para las probetas con micro-sílice.	49
Tabla 12. Índice de localización para las probetas con micro-sílice.	51

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	Pag.
Fotografía 1. Imagen de las probetas antes de desmoldearlas.	27
Fotografía 2. Varillas de acero al carbono utilizadas para la preparación de las probetas, delimitando su respectiva área de trabajo con pintura epóxica (Epoxipoliaminda de Pintuco).	27
Fotografía 3. Probetas inmersas en agua para empezar la etapa de curado y fraguado	28
Fotografía 4. Probetas desmontadas.	28
Fotografía 5. Montaje de la probeta en la solución salina.	28
Fotografía 6. Montaje completo para las pruebas de Ruido Electroquímico y Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).	32
Fotografía 7. Varillas del torón al destruir las probetas.	67
Fotografía 8. Varillas del torón después de limpiarlas utilizadas para las tres relaciones a/c sin micro-sílice	67
Fotografía 9. Varillas del torón después de limpiarlas utilizadas para las tres relaciones a/c con micro-sílice.	68

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Datos para la elaboración de las probetas sin micro-sílice y datos para la elaboración de las probetas con micro-sílice.	76
Anexo B.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 30 días de exposición en la solución.	77
Anexo C.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 63 días de exposición en la solución.	77
Anexo D.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 77 días de exposición en la solución.	78
Anexo E.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 133 días de exposición en la solución.	78
Anexo F.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 144 días de exposición en la solución.	79
Anexo G.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 30 días de exposición en la solución	79
Anexo H.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 43 días de exposición en la solución	80
Anexo I.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 63 días de exposición en la	

	solución.	80
Anexo J.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 99 días de exposición en la solución.	81
Anexo K.	Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 144 días de exposición en la solución.	81
Anexo L.	Comparación de los valores de Icorr entre las técnicas de Ruido Electroquímico y RPL para las probetas de relación a/c 0.4 sin micro-sílice.	82
Anexo M.	Comparación de los valores de Icorr entre las técnicas de Ruido Electroquímico, y RPL para las probetas de relación a/c 0.5 sin micro-sílice.	83
Anexo N.	Comparación de los valores de Icorr entre las técnicas de Ruido Electroquímico y RPL para las probetas de relación a/c 0.6 sin micro-sílice	84
Anexo O.	Comparación de los valores de Icorr entre las técnicas de Ruido Electroquímico y RPL para las probetas de relación a/c 0.4 con micro-sílice	85
Anexo P.	Comparación de los valores de Icorr entre las técnicas de Ruido Electroquímico y RPL para las probetas de relación a/c 0.5 con micro-sílice.	86
Anexo Q.	Comparación de los valores de Icorr entre las técnicas de Ruido Electroquímico y RPL para las probetas de relación a/c 0.6 con micro-sílice	87
Anexo R.	Comparación de los valores de Icorr por la técnica RPL para las probetas de relación a/c 0.4.	88
Anexo S.	Comparación de los valores de Icorr por la técnica RPL para	

	las probetas de relación a/c 0.5	89
Anexo T.	Comparación de los valores de Icorr por la técnica RPL para las probetas de relación a/c 0.6.	90
Anexo U.	Comparación de los valores de Icorr por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO para las probetas de relación a/c 0.4.	91
Anexo V.	Comparación de los valores de Icorr por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO para las probetas de relación a/c 0.5.	92
Anexo W.	Comparación de los valores de Icorr por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO para las probetas de relación a/c 0.6.	93
Anexo X.	Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta de relación a/c 0.5 sin micro/sílice a los 150 días de exposición	94
Anexo Y.	Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta de relación a/c 0.6 sin micro/sílice a los 150 días de exposición	94
Anexo Z	Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta de relación a/c 0.4 con micro/sílice a los 150 días de exposición	95
AnexoZ.1.	Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta de relación a/c 0.5 con micro/sílice a los 150 días de exposición.	95
Anexo Z.2	Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta de relación a/c 0.6 con micro/sílice a los 150 días de exposición.	95

TITULO: EVALUACION DEL DAÑO POR CORROSION EN EL REFUERZO DEL CONCRETO POR LAS TECNICAS DE RUIDO ELECTROQUIMICO Y RESISTENCIA A LA POLARIZACION LINEAL EN AMBIENTE DE CLORUROS*

AUTORES: DURAN CASTELLANOS, Germán Mauricio
MOLINA QUINTERO, Fabián José. **

PALABRAS CLAVES: Velocidad de Corrosión, Ruido Electroquímico, Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), Ataque por cloruros, Concreto Reforzado.

RESÚMEN:

El concreto reforzado es utilizado en casi todas las estructuras presentes en la actualidad, debido a sus propiedades mecánicas y su costo. Por todo esto es muy importante tener un control de la corrosión en el refuerzo de acero, especialmente cuando está en presencia de un medio agresivo como son los cloruros.

El ataque en el refuerzo del concreto se puede definir como un proceso de degradación, donde primero se produce una "corrosión uniforme" o generalizada debido al ingreso del oxígeno o al contacto con el hormigón, formando una capa pasiva que luego puede ser atacada por el ion el cloruro al alcanzar el umbral requerido produciendo una corrosión localizada.

Se fabricaron 18 probetas en concreto usando las relaciones agua-cemento 0.4, 0.5 y 0.6, en las cuales el refuerzo fue un acero utilizado en la fabricación de un torón, al cual se le delimitó el área de trabajo con pintura epóxica. Los ensayos Electroquímicos de Resistencia a la Polarización Lineal y Ruido Electroquímico se realizaron en un equipo Potenciostato ACM, con el fin de determinar valores de velocidad de corrosión. Se utilizó un recipiente con solución de NaCl analítica al 3% molar.

A los 150 días de exposición de las probetas en la solución de cloruros no se observó picadura como se puede observar en las gráficas de Ruido Electroquímico y de Índice de Localización, donde no se presenta ninguna perturbación característica de picado; estas graficas indican que se está presentando una corrosión uniforme y mixta, en cuanto a los datos y gráficas analizados de RPL muestran que el mejor comportamiento frente a la corrosión se presenta en la relación agua-cemento 0.4, la cual tiende a valores de potencial menos negativos, y valores de I_{corr} menores en comparación con las dos relaciones utilizadas.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: M.Sc.Custodio Vasquez quintero

TITLE: EVALUATION OF DAMAGE BY CORROSION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE FOR TECHNIQUES ELECTROCHEMICAL NOISE AND LINEAR POLARIZATION RESISTANCE CHLORIDES IN ENVIRONMENT*

AUTHORS: DURAN CASTELLANOS, Germán Mauricio.
MOLINA QUINTERO, Fabián José**

KEYWORDS: Speed Corrosion, Electrochemical Noise, linear polarization resistance (LPR), Attack chloride reinforced concrete.

ABSTRACT:

The reinforced concrete is used in almost all the structures present today, due to their mechanical properties and cost. For all of this is very important to control the corrosion of steel reinforcement, especially when in the presence of half as aggressive chlorides.

The attack on the reinforcement of concrete can be defined as a degradation process, where first is a uniform corrosion or generalized due to the entry of oxygen or contact with the concrete, forming a passive layer that can then be attacked by chloride ion to reach the threshold required to produce a localized corrosion.

18 specimens were manufactured specifically using the water-cement relations 0.4, 0.5 and 0.6, in which the steel reinforcement was used in the manufacture of a strand, which was defined the area of working with epoxy paint. The electrochemical tests Resistance to Electrochemical Noise and Linear Polarization was conducted in a potentiostatic ACM in order to determine values of corrosion rate. We used a vessel with analytical solution of 3% NaCl molar.

For the 150 days of exposure of the specimens in the solution of chloride pitting was not observed as seen in the graphs of Electrochemical Noise and location index, where there is no disturbance characteristic of mincing, these graphs show that is introducing a uniform corrosion and mixed, in terms of data and graphical analysis of RPL show that the best behavior against corrosion occurs in the water-cement ratio 0.4, which tends to less negative potential values and values I_{corr} minor compared with the two relations used.

* Degree Work.

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering and Material Science School. The Director: M.Sc Custodio Vazquez Quintero.

INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es el material más empleado en la actualidad a nivel mundial tanto en construcciones civiles como viales, en virtud de sus características que lo hacen ventajoso con relación a cualquier otro material para el mismo uso. Entre estas ventajas se puede destacar su alta resistencia a la compresión, facilidad en la preparación y el transporte, buena trabajabilidad, bajo costo y elevada durabilidad. Estas propiedades excepcionales del concreto se ven alteradas por una serie de agentes agresivos del medio, que generalmente causan el deterioro progresivo de las estructuras construidas con este material. El concreto se caracteriza por tener de 10 a 30% de porosidad, ésta depende principalmente de la relación del cemento con el agua con que reacciona para producir el gel que une los agregados y de las condiciones de curado. Esta porosidad es la vía que utilizan los agentes agresivos para iniciar la degradación de las estructuras de concreto reforzado.

Un estudio profundo sobre las estructuras de concreto expuestas a ambientes marinos, demuestra que, debido a la presencia de iones destructivos como los cloruros, se produce un ataque corrosivo en la varilla de refuerzo del concreto, donde se pueden presentar dos diferentes casos; la presencia de una corrosión localizada, que es muy destructiva, en estos casos se puede presentar una fractura de carácter frágil debido al ataque de los cloruros en un punto específico del acero de refuerzo, el otro posible caso que puede ocurrir es el de una corrosión generalizada la cual también es motivo de preocupación, porque el acero del refuerzo puede alcanzar un volumen de más de cinco veces el volumen inicial, produciendo así una fractura en la estructura debido al aumento significativo de su volumen en el acero.

Por todo lo anterior es muy importante tener un control de los fenómenos de corrosión que se pueden presentar en estos tipos de estructuras expuestas a ambientes salinos y por consiguiente, en presencia de los iones cloruros. Los iones cloruro pueden estar

presentes en el hormigón si éstos se han añadido en la mezcla (en las adiciones, el agua de amasado o los áridos). Sin embargo, este medio no es el más común ya que desde hace tiempo se prohíbe la inclusión de estos iones en el hormigón. El medio más frecuente de ingreso de los iones es desde el exterior, ya sea porque la estructura esté localizada en ambiente marino o debido al uso de sales de deshielo.

Los cloruros inducen una destrucción local de la capa que pasiva el acero ocasionando un ataque localizado que frecuentemente se transforma en picaduras. Dependiendo de la extensión de la corrosión, puede aparecer o no la fisuración del recubrimiento. En las zonas totalmente sumergidas las armaduras se pueden corroer sin ninguna señal externa de daño en el recubrimiento.

En estas zonas sumergidas o en el hormigón completamente saturado, el ión cloruro penetra en el hormigón por difusión. Sin embargo en las zonas aéreas o en las zonas afectadas por ciclos (zonas en las que se han aplicado sales de deshielo) la absorción capilar puede ser un mecanismo de penetración más rápido.

Por todo esto, este trabajo de Grado pretende aportar a un macro-proyecto algunas herramientas que sirvan para apoyar un modelo, y por tanto predecir y tener un control sobre la corrosión, tipo y mecanismo, sobre las estructuras de concreto reforzado en un medio marino.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento a la corrosión en el refuerzo del concreto expuestos a un ambiente salino por medio de la técnica de ruido electroquímico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la velocidad de corrosión en el refuerzo del concreto expuesto a un ambiente de cloruros por medio de la técnica de ruido electroquímico, comparándola con la obtenida por la técnica RPL.
- Determinar el tipo de corrosión que se presenta en el refuerzo del concreto en contacto con iones cloruros, por medio de la técnica de ruido electroquímico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 FUNCION DEL ACERO DE REFUERZO PARA HORMIGON¹

Se define como hormigón armado, al material resultante de la unión del hormigón o concreto (mezcla proporcional de cemento Pórtland, o cualquier otro cemento hidráulico, con arena, grava y agua limpia, con o sin aditivos, que al fraguar y endurecer adquiere resistencia) y las armaduras o barras de acero de refuerzo, combinados de tal forma que constituyan un elemento sólido, monolítico y único desde el punto de vista de sus características físicas, para aprovechar así las cualidades individuales que presentan ambos materiales.

El hormigón por sí solo, asegura una gran resistencia a las sollicitaciones de compresión, pero muy escasa o frágil a los esfuerzos de flexión y tracción, por lo que no es conveniente su uso para estructuras expuestas a estas exigencias. Sin embargo, si son instaladas debidamente barras de acero de refuerzo en las zonas apropiadas, se habrá cumplido con tal requerimiento, obteniéndose un elemento capaz de resistir esfuerzos o tensiones combinadas. En consecuencia, se puede decir que, en general, las compresiones son resistidas por el hormigón, y las tracciones y flexiones por el acero.

2.2 PROCESOS DE CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO²

La corrosión ocasionada por cloruros se inicia cuando la concentración es tan alta que la alcalinidad del concreto no es lo suficientemente grande para proteger el acero. El

¹ Manual de Armaduras de Refuerzo para Hormigón, Fabricación - Instalación – Protección. Carlos Rondon S.M. 1ª Edición: 2.000 ejemplares, Julio de 2005.

² Alonso Cobo Escamilla, 2001. “Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón Armado: Causas y Procedimientos de Rehabilitación”.

nivel de cloruros que se requiere para que se inicie la corrosión, es el llamado valor umbral de cloruros. Una vez que este valor se ha alcanzado se puede decir que la fase de protección ha terminado y se inicia la fase de corrosión. B. Wietek y E.G. Kunzl (1997) indican que el concreto tiene un valor inicial de pH 12 ya que está permanentemente protegido contra la corrosión. El medio ambiente alcalino del concreto crea una capa de pasivación sobre la superficie del concreto protegiéndolo de reacciones químicas adicionales. Solamente en el caso de influencias externas, esta capa protectora es distorsionada y la corrosión del acero puede ocurrir.

La densidad del concreto está controlada por la relación del agua/cemento y la presencia de aditivos como silicatos, cenizas, etc. Estos aditivos muchas veces reducen la penetración de cloruros porque hacen a la estructura más densa, asumiendo que el concreto está libre de hendiduras. Una relación agua/cemento baja produce también una reducción de la penetración de cloruros porque a medida que la relación agua/cemento disminuye el concreto se hace más denso.

La durabilidad de la armadura del hormigón es el resultado natural de la acción protectora de doble naturaleza que el hormigón ejerce sobre el acero. El recubrimiento es una barrera física que aísla el acero del exterior. La elevada alcalinidad de la fase acuosa promueve la formación de una capa de óxidos microscópica y transparente que mantiene inalterado el acero por tiempo indefinido mientras no cambien las condiciones de servicio.

Dos son las causas fundamentales de la pérdida de esta capacidad protectora del hormigón, la carbonatación del recubrimiento y la presencia de iones cloruros. La carbonatación induce una corrosión generalizada en el acero mientras que la presencia de cloruros produce una corrosión localizada en la armadura. La corrosión se puede identificar fácilmente por la presencia de manchas de óxido en la armadura y la aparición de fisuras paralelas a la dirección de las barras de armado. La corrosión bajo tensión del acero pretensado es un tipo especial de ataque localizado.

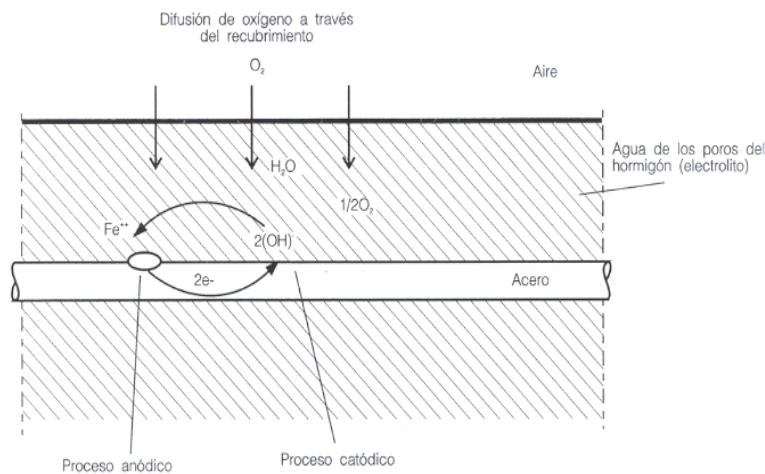
2.3 CORROSION DEL ACERO EN EL HORMIGON.³

La corrosión del acero en el hormigón es un proceso electroquímico. Los potenciales electroquímicos que forman las pilas de corrosión se pueden generar de dos formas:

- Las pilas de composición se pueden formar cuando se colocan dos metales diferentes dentro del hormigón, como las armaduras de acero y los conductos de aluminio, o cuando existen variaciones significativas en las características superficiales del acero.
- Las pilas de concentración se pueden formar debido a diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero, como los álcalis, cloruros o el oxígeno.

Como consecuencia, uno de los dos metales (o algunas partes del metal si sólo hay uno) se convierte en anódico y el otro en catódico, como se observa en la figura 1.

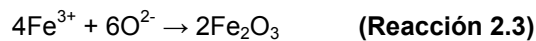
Figura 1. Esquema de la difusión del oxígeno.



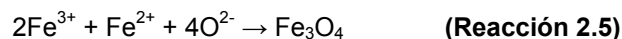
FUENTE: La corrosión del hormigón armado

³ Electrochemical Evaluation on Repairs with Mortars in Structures Affected by Chlorides Contamination. M.E. Acosta-Lomeli, R. Velasquez-Gonzales. PortugaliaeElectrochimica Acta 23 (2005)

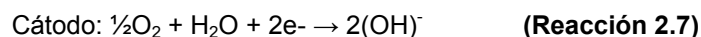
En condiciones normales, el acero embebido en el hormigón se encuentra amparado por una doble protección: física (el espesor del recubrimiento de hormigón) y química (el pH alcalino del hormigón, con valores habituales de 12-13, que sitúa al acero en la zona de pasividad del diagrama de Pourbaix, en la que se forma en la superficie del acero una capa protectora de óxido Fe_2O_3 de espesor muy pequeño, del orden de 100.000 Å, que impide toda corrosión ulterior). Las reacciones de formación de esta capa protectora de óxido son:



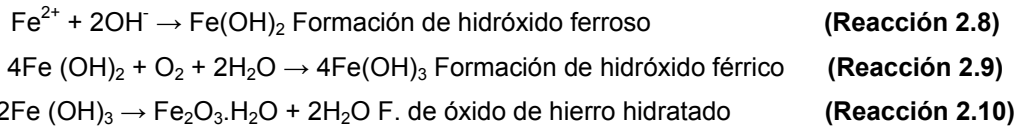
Sin embargo, la capa pasiva consiste no sólo de Fe_2O_3 , sino que es una mezcla de Fe_2O_3 y Fe_3O_4 entremezclados con hidratos del cemento. Pero el Fe_3O_4 no es un óxido pasivo, ya que su porosidad es muy elevada comparada con la del Fe_2O_3 . La formación del Fe_3O_4 se puede representar así:



El proceso anódico no puede producirse hasta que la capa protectora del acero se hace permeable por la acción de los iones Cl^- . El proceso catódico no se produce hasta que en la superficie del acero se dispone de una cantidad suficiente de oxígeno y agua. Las reacciones son:



Inicialmente se produce hidróxido ferroso de color verdoso y, con mayor grado de oxidación, óxido ferroso-férrico, de color negro, e hidróxido férrico, rojizo. En ausencia de suficiente oxígeno, no se forma óxido expansivo ya que no se puede desarrollar la formación de hidróxido férrico. Las reacciones son:



La transformación del hierro metálico en óxido ($\text{FeO} (\text{H}_2\text{O})_x$) viene acompañada de un incremento de volumen que puede llegar a ser del 600% del tamaño original del metal, lo que se considera la principal causa de la expansión y fisuración del hormigón.

2.4 ATAQUE POR CLORUROS⁴

Los iones cloruro pueden estar presentes en el hormigón si éstos se han añadido en la mezcla (en las adiciones, el agua de amasado o los áridos). Sin embargo, este medio no es el más común ya que desde hace tiempo se prohíbe la inclusión de estos iones en el hormigón. El medio más frecuente de ingreso de los iones es desde el exterior, ya sea porque la estructura esté localizada en ambiente marino o debido al uso de sales de deshielo.

Los cloruros inducen una destrucción local de la capa que pasiva el acero ocasionando un ataque localizado que frecuentemente se transforma en picaduras. Dependiendo de la extensión de la corrosión, puede aparecer o no la fisuración del recubrimiento. En las zonas totalmente sumergidas las armaduras se pueden corroer sin ninguna señal externa de daño en el recubrimiento.

En estas zonas sumergidas o en el hormigón completamente saturado, el ión cloruro penetra en el hormigón por difusión. Sin embargo en las zonas aéreas o en las zonas afectadas por ciclos (zonas en las que se han aplicado sales de deshielo) la absorción capilar puede ser un mecanismo de penetración más rápido.

⁴ Procesos de Degradación de la Armaduras. José Fullea García. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)

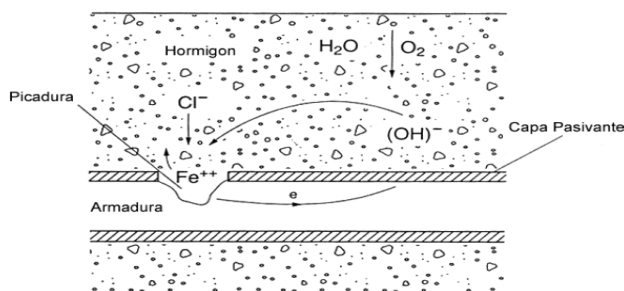
2.5 CAPA PASIVANTE

Las armaduras embebidas en la pasta de cemento hidratado forman rápidamente y de forma natural una fina capa de óxido, llamada *capa pasivante*, que queda fuertemente adherida al acero sobre la que se forma.

La capa pasivante impide la disolución del Fe en las zonas anódicas, lo que imposibilita la reacción de corrosión aunque se cumplan el resto de condiciones necesarias, como la presencia de humedad y de oxígeno. La reacción catódica, no obstante, se puede realizar independientemente de la presencia de la capa pasivante. La capa pasivante se mantendrá estable, en ausencia de cloruros, si en el agua contenida en los poros de la pasta de cemento hidratada se mantiene un valor de pH superior a 12, valor que se alcanza en un hormigón sano por la presencia de álcalis. Este elevado valor del pH desciende sólo en condiciones excepcionales, como en el proceso de carbonatación o en un ataque por ácidos, momento en el que la capa pasivante desaparece y se inicia el proceso de corrosión.

La acción de los cloruros produce una corrosión por picadura debido a que la capa pasivante se destruye sólo en pequeñas áreas de la superficie que actúan en las zonas anódicas, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Esquema de la destrucción de la capa pasivante por los cloruros.



FUENTE: Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros.

2.6 MECANISMO DE ENTRADA DEL IÓN CLORURO⁵

2.6.1 Entrada por difusión. La entrada del ión cloruro en el hormigón se realiza principalmente por difusión en los poros llenos de agua, pero su modelado es complicado ya que no existe un frente de avance como puede ocurrir con la carbonatación, sino que se produce un aumento gradual de la concentración en el tiempo y con la profundidad.

La forma habitual de modelizar la difusión es mediante la Segunda Ley de Fick, y se calcula con la ecuación 2.1:

$$\frac{d[Cl^-]}{dt} = D_c * \frac{d^2[Cl^-]}{dx^2}$$

(Ecuación 2.1)

FUENTE: Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros.

Donde:

[Cl⁻]: es la concentración de ión cloruro a la profundidad x en el tiempo t.

D_c: es el coeficiente de difusión.

La solución exacta de esta ecuación es la siguiente:

$$\frac{(C_{\max} - C_d)}{(C_{\max} - C_{\min})} = \text{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4 * D_c * t}} \right]$$

(Ecuación 2.2)

FUENTE: Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros.

Donde:

C_{max}: concentración de ión cloruro en la superficie.

C_d: concentración de ión cloruro a cierta profundidad.

C_{min}: concentración de ión cloruro del hormigón sin atacar.

erf: función de error.

⁵ Determination of the Ion Diffusion Coefficient in Moisture and Salt Loaded Masonry Materials by Impedance Spectroscopy. S. Erdogan, I.L. Kondratova, T.W. Bremner. Department of Civil Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada. 29 September 2003

La determinación de C_{max} es difícil ya que la concentración de cloruros en la superficie es muy variable según las condiciones ambientales en las que se encuentra el hormigón (húmedo, seco, sometido a evaporación, etc), por lo que generalmente se determina a cierta profundidad del hormigón.

No obstante, la profundidad de penetración por difusión de los cloruros en el hormigón puede ajustarse de forma satisfactoria con una ley proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, tal y como se indica en la Guía de Diseño CEB de Durabilidad de Estructuras de Hormigón (1996).

En la práctica, el ajuste de la parábola se realiza con la determinación de la concentración de cloruros en diferentes profundidades a partir de muestras de hormigón.

2.7 FORMAS DE INGRESO DE LOS IONES CLORUROS AL HORMIGON

La presencia de iones cloruro en el hormigón se debe a dos situaciones diferentes: a) ingresaron en el momento de preparación de la mezcla b) ingresaron durante la vida en servicio del hormigón. El primer caso es lógicamente más severo que el segundo, aunque es el más fácil de evitar con un adecuado control de los componentes de la mezcla. Las situaciones más comunes son que los iones cloruro integren el agua de amasado (aguas salobres), constituyan una contaminación del agregado fino (arena de médano) o formen parte de los aditivos (particularmente, aditivos aceleradores).

El caso b) corresponde a situaciones típicas de hormigones en ambiente marino, en las que el hormigón ingresa lentamente desde el exterior y cuando alcanza las barras, se inicia el deterioro propiamente dicho (o la fase de propagación, tal como se definió en el artículo anterior). El ingreso del ión cloruro al hormigón está vinculado al transporte de

fluidos en un medio poroso, por lo que se centrará la atención en comprender los distintos mecanismos que intervienen.

2.8 CONSECUENCIA DEL INGRESO DE IONES CLORURO SOBRE LA ESTRUCTURA DEL HORMIGON ENDURECIDO Y LAS ARMADURAS⁶

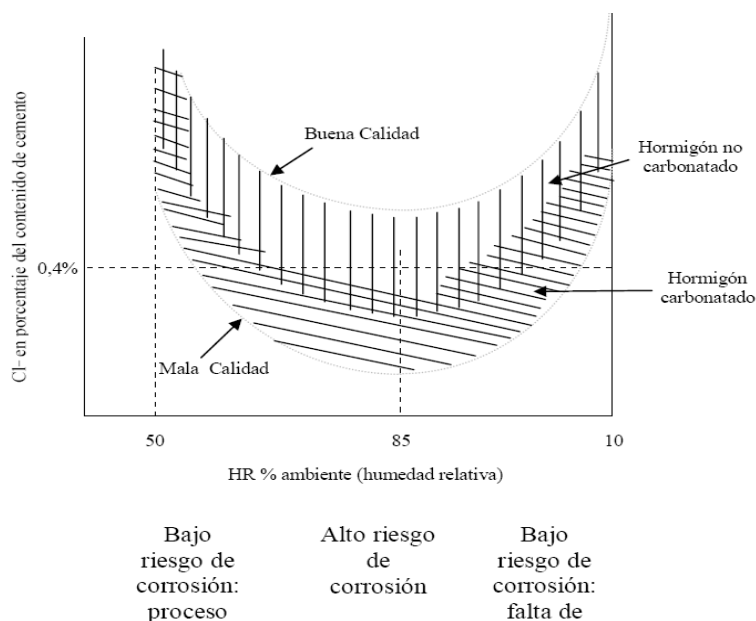
El ión cloruro reacciona con las fases aluminato para formar un compuesto relativamente insoluble conocido como Sal de Friedel. Este compuesto es levemente expansivo pero no es capaz de inducir tensiones severas que deterioren al hormigón. La formación de esta sal "inmoviliza" temporalmente los iones cloruro, reduciendo su movilidad para alcanzar a las armaduras y romper su condición pasiva.

Ciertamente, el daño más severo asociado al ingreso de iones cloruro se produce en el hormigón armado, porque la corrosión del acero va acompañada de incremento de volumen, fisuración del hormigón y desprendimiento del hormigón de recubrimiento. El óxido de hierro no es resistente a la tracción, se debilita la adherencia entre hormigón y acero, y cuando la pérdida de la sección útil es significativa, puede llegar a producir el colapso de la estructura.

Cuando la concentración de cloruros supera el 0.6% de la concentración de hidróxidos se empieza a detectar la corrosión en las armaduras. Esta concentración corresponde al 0.4% en peso del contenido de cemento en hormigones habituales aunque depende de las condiciones ambientales, especialmente de la humedad relativa y del grado de carbonatación del hormigón, donde se presenta una relación entre la vida útil de las estructuras y el ataque de cloruro como se muestra en la figura 3.

⁶ Ensayos Típicos en la Determinación de la Durabilidad del Concreto, Grupo de Investigación en Análisis y Diseño-Universidad Nacional de Colombia (2005)

Figura 3. Relación de la vida útil y el ataque de los cloruros.



FUENTE: Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros.

2.9 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE CORROSIÓN⁷

En el apartado anterior se ha comentado que la forma de entrada principal de los cloruros en el hormigón es por difusión a través de los poros llenos de agua, por lo que la forma de impedir la entrada es mediante la reducción de la porosidad del hormigón y el aumento del espesor del recubrimiento.

2.9.1 Espesor del Recubrimiento. La penetración de los cloruros en el interior del hormigón sigue una ley según la raíz cuadrada del tiempo. Esto supone que ante una disminución del recubrimiento a la mitad, las condiciones de concentración de cloruros en la armadura para que se produzca la corrosión se alcanzan en una cuarta parte del tiempo.

⁷

Influencia de la Condición Superficial del Acero de Refuerzo en la Cinética de Corrosión en Hormigón Expuesto en Solución de NaCl al 3.5%. (2003)

2.9.2 Permeabilidad del Recubrimiento. La relación agua/cemento es determinante en la permeabilidad del hormigón ya que la porosidad capilar se forma por la evaporación del agua que no reacciona en el proceso de hidratación del cemento. Relaciones a/c superiores a 0.6 aumentan considerablemente la porosidad capilar del hormigón.

También el curado influye de forma decisiva ya que un secado prematuro de la superficie puede provocar una interrupción de la reacción de hidratación, lo que se traduce en un aumento de la permeabilidad.

2.9.3 Contenido de Cemento. El incremento del contenido de cemento se traduce, como ya se ha comentado, en una mayor capacidad de combinación de los cloruros, pero no influye de forma tan decisiva como la relación agua/cemento ya que los cloruros procedentes del exterior se combinan con menor facilidad.

2.9.4 Condiciones Ambientales. En ambientes muy secos, con humedades relativas inferiores al 60%, el riesgo de corrosión es bajo ya que está impedido por la falta de agua que permita la reacción electrofítica. Igualmente, en ambientes saturados de agua, la reacción electrofítica se impide por la ausencia de oxígeno, aún con presencia elevada de cloruros.

Las condiciones más favorables para la corrosión del acero de las armaduras se muestra en la tabla 1, o al producir ciclos de humedad-secado en combinación con elevadas temperaturas, ya que aumenta la cinética de todas las reacciones químicas involucradas.

Tabla 1. Condiciones para que haya corrosión.

pH < 8	pH > 8
Oxígeno Agua	Oxígeno Agua Cloruros

FUENTE: Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros.

La tabla 2 muestra las condiciones adecuadas para que no se presente corrosión en el refuerzo del concreto en presencia de iones agresivos como los cloruros.

Tabla 2. Condiciones para que no haya corrosión.

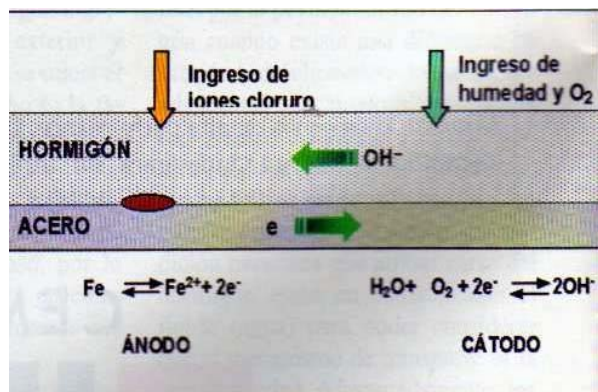
Mantener fuera del hormigón armado y pretensado alguna de las siguientes opciones: Oxígeno Agua Cloruros	Colocar en el hormigón armado y pretensado alguna de las siguientes opciones: Iones Hidroxilos Potencial negativo sobre el Acero Iones ferrosos Inhibidor
--	---

FUENTE: Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros.

2.9.5 Otros factores que influyen en la corrosión asociada al ion cloruro. La corrosión es un fenómeno electroquímico en el que una sección del acero se comporta como ánodo y otra (aleatoria), como cátodo. Una vez se destruye la capa pasiva por efecto del ión cloruro, en el ánodo se produce la oxidación del hierro y en el cátodo, la reducción del O₂, como se muestra en la figura 4.

El hormigón húmedo constituye el medio por el que circulan los iones Fe²⁺ y OH⁻ para combinarse y formar el Fe (OH)₂, de color pardo característico; los electrones libres circulan por el metal. La figura 4 ilustra el fenómeno de cómo se empieza a producir el ataque localizado.

Figura 4. Esquema de cómo se empieza la picadura por cloruros.



FUENTE: Durabilidad de estructuras de concreto

Es evidente que, en ausencia de oxígeno o de humedad, el proceso corrosivo no se produce o es tan lento como para no alterar la vida útil de la estructura, aún en presencia de ión cloruro. Por ejemplo, en estructuras permanentemente sumergidas, aún cuando el contenido de iones cloruro puede ser elevado, el acero no se corroe porque el suministro de oxígeno es muy limitado. Tampoco se oxida la armadura de elementos estructurales "secos". Cuando el hormigón se encuentra carbonatado, la agresividad por ión cloruro se incrementa y la presencia de otras sales en el hormigón y la temperatura favorecen también el proceso corrosivo.

2.9.6 Profundidad, Localización y recubrimiento de las armaduras. La determinación de la profundidad, localización, características geométricas y separación del refuerzo dentro de las estructuras de concreto reforzado es un tema que se viene estudiando hace varias décadas. Los cambios tecnológicos que se han presentado en las técnicas no destructivas, han permitido grandes avances en estos temas. La mayoría de los instrumentos basan su funcionamiento en la interacción de la varilla embebida dentro del concreto y un campo electromagnético de baja frecuencia.

2.10 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN

2.10.1 Curvas de polarización. En las curvas de polarización se aplica un barrido de potencial de menos a más 250 mV con respecto al potencial de corrosión. El barrido se empieza en -250 mV, es decir en la zona catódica. El logaritmo de la densidad de corriente obtenida se gráfica en función del barrido de potencial.

En las curvas de polarización (E vs Log i) se obtienen unos segmentos lineales cerca al potencial de corrosión, estos segmentos son conocidos como las regiones Tafel donde se hallan las pendientes anódica y catódica; la extrapolación de estos segmentos al potencial de corrosión permiten encontrar la densidad de corriente de corrosión.

2.11 RESISTENCIA A LA POLARIZACION LINEAL (LPR)⁸

La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), es decir, la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización. Esta ecuación recuerda la conocida Ley de Ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre dos puntos resulta en un flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia, siendo esta ecuación la siguiente

$$I_{corr} = B / R_p \quad \text{(Ecuación 2.3)}$$

$$B = (b_a b_c) / [2.303(b_a + b_c)] \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$

Donde b_a y b_c son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente.

La constante B en la ecuación sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel.

⁸ Efecto del Método de Curado en la Velocidad de Corrosión del Concreto Reforzado a Edad Temprana.

Por otra parte, se ha dicho que la mayor parte de las pendientes de Tafel oscilan entre valores de 60 y 120 mV/década, de donde se ha optado por hacer una aproximación suponiendo que ambas pendientes tuvieran el segundo valor. Así, se obtiene una B = 26 mV que puede emplearse con reserva, ya que las pendientes del sistema bajo estudio no tienen por qué tener esos valores. En cualquier caso, si se aplica este valor de constante B a un estudio, los valores de velocidad de corrosión serán comparables y éstos serán al menos del mismo orden de magnitud que si se emplearan las pendientes de Tafel reales. Donde las pendientes se pueden relacionar con el tipo de corrosión de la siguiente manera:

Tabla 3. Relación de las pendientes con los tipos de corrosión.

Tipo de corrosión	PENDIENTE (dB[V/Hz ^{1/2}]/década)		PENDIENTE (dB[AHz ^{1/2}]/década)	
	<i>Máx.</i>	<i>Min.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Min.</i>
<i>Pasivación</i>	-15	-25	1	-1
<i>Picado</i>	-20	-25	-7	-14
<i>Uniforme</i>	0	-7	0	-7

Fuente: Evaluación de Macroceldas de Corrosión Embebidos en Vigas de Concreto Reforzado Bajo Ambiente Salino

2.12. RUIDO ELECTROQUIMICO⁹

En parte por casualidad, en parte como consecuencia de investigación científica orientada hacia ese fin, se pudo establecer, a finales de los años sesenta, que los sistemas en corrosión electroquímica producen por sí mismos, es decir, bajo ningún tipo de excitación externa, señales en forma de pequeñas variaciones estocásticas en potencial y en corriente, suministrando, así, valiosa información de los procesos

⁹ J.M MALO TAMAYO y J.URUCHURTU CHAVARIN. Instituto de Investigaciones Eléctricas. La técnica de Ruido Electroquímico para el Estudio de la Corrosión

asociados a la superficie metálica. Dicho fenómeno se conoce desde entonces como Ruido electroquímico.

El registro e interpretación del ruido electroquímico para el estudio de la corrosión involucra, no obstante, una forma completamente diferente de concebir el fenómeno a la empleada por los métodos electroquímicos tradicionales. Según éstos, la corrosión es considerada como un proceso en equilibrio y de cinética constante, mientras que, en el caso del ruido electroquímico, se registran desequilibrios en las reacciones electroquímicas en intervalos de tiempo muy cortos.

Además, la velocidad e intensidad de dichas señales en forma de pequeñas variaciones en potencial y corriente, según el tipo de material, las características de su superficie en contacto con el medio, las condiciones de este último, así como diferentes factores de diseño, permiten la obtención de información electroquímica del proceso corrosivo en tiempo real con tanta sensibilidad que, incluso, pueden registrarse procesos de nucleación submicroscópicos de la corrosión, indetectables con otros métodos y, por supuesto, a simple vista.

2.12.1 Fuentes del Ruido Electroquímico. Entender el origen del ruido electroquímico es el principio para entender la aplicabilidad de esta técnica. En este sentido, la interfase metal (capa de productos de corrosión) / electrolito es el punto donde se producen en forma continua las señales de ruido electroquímico en forma de pequeñas variaciones (transientes) en potencial y corriente, las cuales están relacionadas con los procesos de transferencia de carga que allí ocurren. Por lo tanto, el fenómeno del ruido electroquímico no es, bajo ninguna circunstancia, la respuesta a algún tipo de excitación externa del sistema, sino en realidad una consecuencia inherente a los procesos electroquímicos involucrados en la corrosión, que ocurre aun cuando no se esté midiendo.

De este modo, las variaciones en potencial y corriente registradas como señales electroquímicas se derivan de la estocástica disolución del metal, ocasionada, en primera medida, por la presencia de sitios de diferente energía en la superficie relacionados con heterogeneidades propias del material, como son: segregaciones, impurezas, fases de diferente composición química, tratamientos térmicos y mecánicos, anisotropías o defectos en la estructura cristalina. Ello hace, de la común consideración de una superficie homogénea.

Siendo el principio de mínima energía la fuerza motriz de la corrosión, se entiende, entonces, que el proceso de disolución metálica ocurra bajo diferentes cinéticas de transferencia de carga dependiendo de las condiciones locales de la superficie. De forma análoga, heterogeneidades en el medio, como, por ejemplo: gradientes de concentración y temperatura o la presencia de procesos de transferencia de masa difusionales a través de las capas de productos de corrosión, contribuyen también a la variación en la interfase de las resistencias, a la polarización del electrolito, de la capacitancia de la doble capa y de la impedancia de Warburg (en caso de presencia de capas de productos de corrosión), inherentes al fenómeno eléctrico de transferencia de carga. Estas heterogeneidades son causa, por todo lo planteado, de una desequilibrada o transiente disolución del metal y, en últimas, la fuente más importante del ruido electroquímico.

Fenómenos de corrosión localizada, como el picado y la corrosión en rendijas entre otros, por tratarse de procesos electroquímicos estocásticos relacionados con la activación y repasivación local en la interfase metal (capa pasiva) / electrolito representan también una importante fuente de ruido electroquímico. Precisamente, en este campo, es donde la técnica de ruido electroquímico ha experimentado sus mayores avances y ha permitido de forma única el registro de los procesos submicroscópicos que dan origen a estas formas de corrosión.

2.12.2 Registro del Ruido Electroquímico. El registro y análisis del ruido electroquímico involucra mucho más que conectar un equipo de medida al sistema investigado, en cambio, deben ser indispensablemente considerados una gran cantidad de factores de influencia, cuya compleja interrelación se representa de forma esquemática en la figura 5. Esto conlleva, en últimas, a que se logre una definición específica de los procedimientos experimentales y a la correcta selección de un adecuado sistema de registro con sus correspondientes parámetros, garantizando la obtención de información del proceso corrosivo de forma confiable.

La aplicación de la técnica de ruido electroquímico en el ámbito de la corrosión se puede clasificar en tres campos diferentes: investigación básica de fenómenos corrosivos, pruebas y evaluación de la corrosión, y monitoreo a nivel industrial de la misma. A su vez, cada uno de ellos contempla diferentes parámetros y condiciones de registro específicos, las grandes variaciones, en cuanto a los parámetros de registro y adquisición de la señal según la aplicación, permiten concluir que para el registro del ruido electroquímico no existe un sistema universal y, por ende, su concepción estará siempre directamente relacionada con su aplicación, como lo muestra la figura 5.

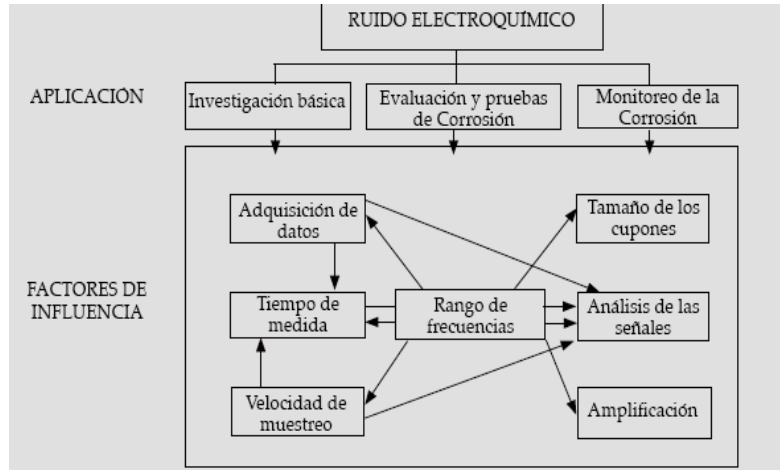
Una medida que permite tener un control y conocer el nivel de corrosión que se está manejando y presentando es la I_{corr} , como lo muestra la tabla 4, donde;

Tabla 4. Esquema de la relación de I_{corr} y los niveles de corrosión.

I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderada
0.5-1.0	Elevada
>0.1	Muy elevada

Fuente: Evaluación de Macroceldas de Corrosión Embebidos en Vigas de Concreto Reforzado Bajo Ambiente Salino

Figura 5. Independencia de los factores de influencia sobre las señales de Ruido electroquímico.



Fuente: Utilización de la técnica de ruido electroquímico para la investigación y monitoreo de la corrosión

2.12.3. Cómo se obtiene las velocidades de corrosión por medio de la técnica de Ruido Electroquímico. Para obtener la resistencia de ruido electroquímico se necesita saber la desviación estándar de la corriente y el potencial y se calcula según la ecuación 2.7, donde;

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (\Omega)$$

(Ecuación 2.7)

Donde:

R_p: Resistencia de Ruido Electroquímico

ΔE: Desviación estándar del potencial

ΔI: Desviación estándar de la corriente

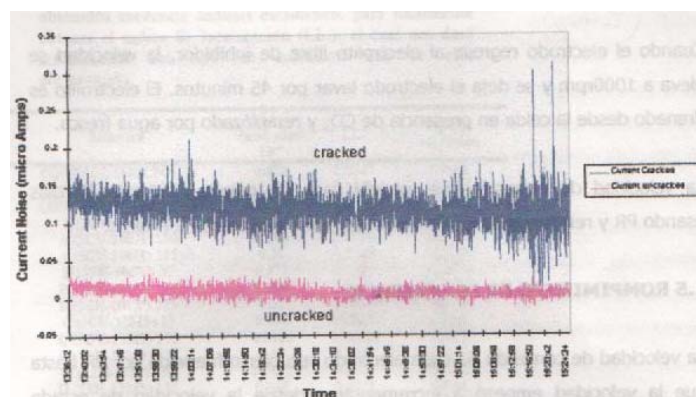
Luego se procede a calcular la I_{corr} por medio de la ecuación 2.8, donde;

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

(Ecuación 2.8)

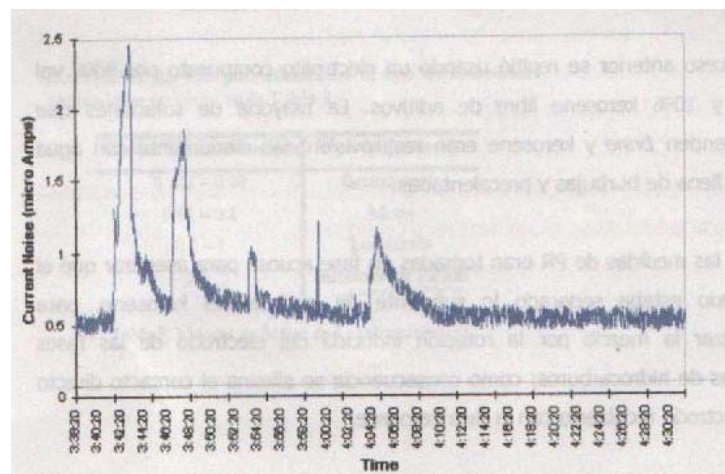
La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión, es decir, la i_{corr} , con la resistencia a la polarización. En donde B es una constante que en el caso de acero embebido en hormigón es de 26mV.

Figura 6. Gráfica de Ruido Electroquímico para corrosión uniforme.



Fuente: The role of chloride ions in pitting of carbon steel studied by the statistical analysis of electrochemical noise

Figura 7. Gráfica de Ruido Electroquímico para corrosión por picado.



Fuente: The role of chloride ions in pitting of carbon steel studied by the statistical analysis of electrochemical noise

En las figuras 6 y 7 se puede observar unas gráficas obtenidas al utilizar la técnica de Ruido Electroquímico, donde se presenta los dos comportamientos característicos de la corrosión, siendo estos una corrosión generalizada o uniforme y una corrosión localizada.

En la figura 6 se observa una corrosión uniforme, donde los picos mostrados por la grafica presentan un comportamiento muy parecido entre ellos lo que indica que no se presenta una perturbación significativa que indique la presencia de una corrosión localizada.

En la figura 7, a diferencia de la 6 se observa la formación de unos picos sobresaliente, los cuales indican la presencia de picaduras, donde se observa la diferencia en cuanto a la perturbación que muestra en comparación con la gráfica numero 7.

2.12.4 Índice de Localización (Localization Index). Es la relación de la desviación Standard sobre la raíz cuadrática de la corriente promedio.

$$I.L = \sigma_i / I_{rms} \quad (9)$$

Por medio del índice de localización se pueden clasificar por rangos el tipo de corrosión que se está presentando en un material, esta corrosión puede ser:

Corrosión Generalizada: $0,001 < IL < 0,01$

Corrosión mixta: $0,01 < IL < 0,1$

Corrosión localizada: $0,1 < IL < 1,0$

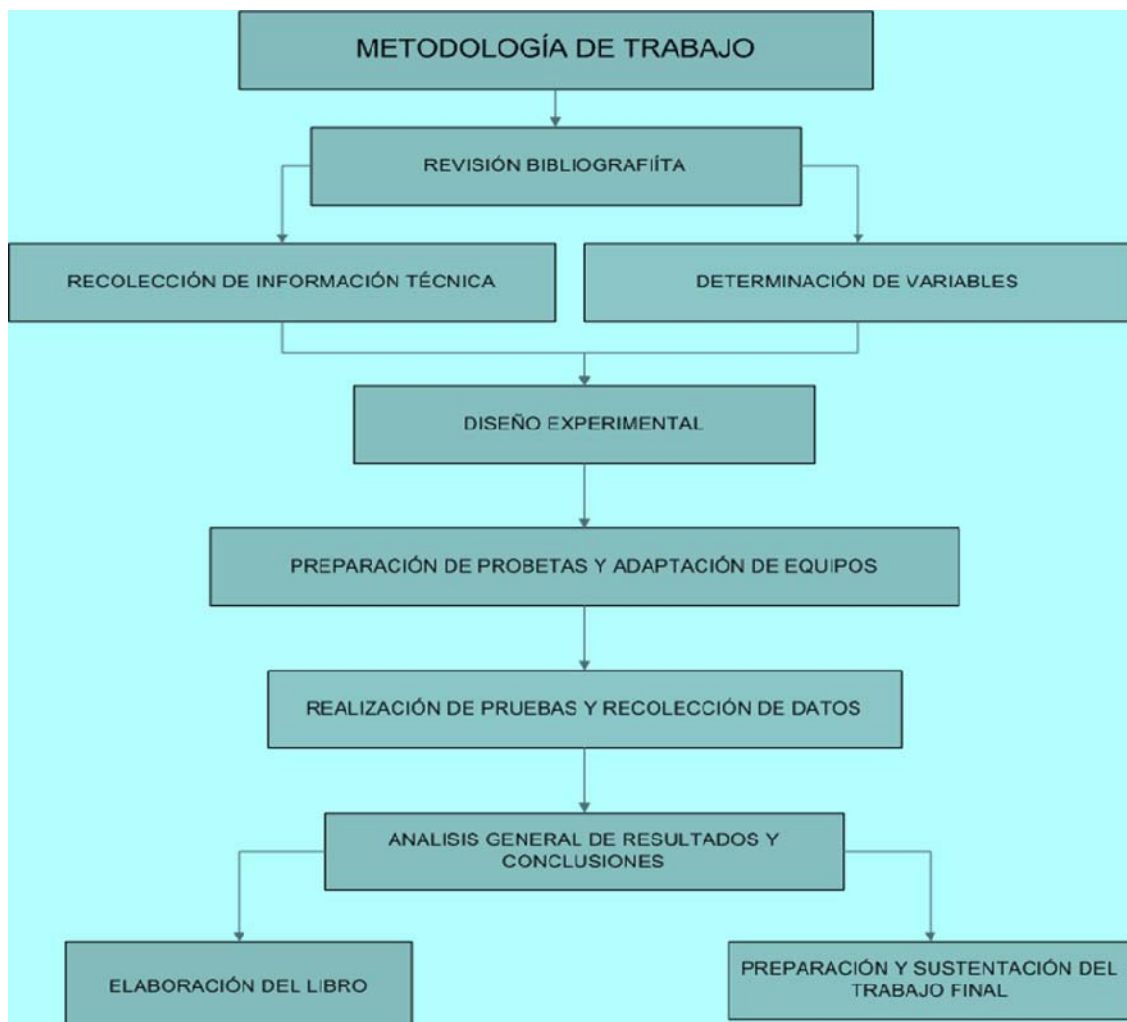
Iniciación de Picado: > 1

Fuente: Caracterización de la corrosión de concretos con mezclas ternarias.

3. METODOLOGIA

En este trabajo de grado, se determinó la velocidad de corrosión del refuerzo del concreto, siendo este un acero al carbono, expuesto a un ambiente con cloruros, utilizando las técnicas de Ruido Electroquímico y Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), manejando una metodología que se describe a continuación.

Figura 8. Cuadro sinóptico de la metodología de trabajo que se utilizó.



3.1 REVISION BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se recopiló toda la información posible, análisis de la bibliografía necesario para poder llevar a cabo este proyecto, teniendo como prioridad temas como técnicas electroquímicas para medir la velocidad de corrosión en estructuras de concretos en contacto con cloruros.

3.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA

Consistió en documentarse sobre las técnicas y normas que se necesitaron para realizar este proyecto, teniendo en cuenta que también se debe conocer sobre el manejo y operacion de los equipos que se van a utilizar.

3.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES

En esta etapa se determinan las variables que afectaran en proceso, tanto las dependientes como las que se mantienen constantes y las independientes.

- **Dependientes:** Velocidad de corrosión (I_{corr}) y resistencia de ruido (R_n).
- **Independientes:** Relación agua-cemento (a/c), tiempo de exposición.
- **Constantes:** Concentración de cloruros, tipo de acero y materiales usados para la preparación de la mezcla del concreto y pH.

3.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.4.1 Preparación de probetas y adaptación de equipos. Se prepararon 18 probetas (Fotografía 1) con los componentes para la fabricación del concreto tales como;

(Cemento, agua, áridos y aditivos), teniendo en cuenta las relaciones agua-cemento (a/c) para cada probeta con valores de 0.4, 0.5 y 0.6, con y sin micro-sílice respectivamente, donde los datos para realizar estas mezclas se muestran en el Anexo A. Además se utilizaron dos varillas iguales de acero al carbono de un torón como refuerzo, una como electrodo de referencia y de trabajo (WE1) y la otra como electrodo de trabajo (WE2) en cada probeta. Estas se recubrieron con pintura epóxica para delimitar el área de trabajo (Fotografía 2), se desmontaron y se sumergieron en el agua por un periodo de 28 días para las etapas de fraguado y curado (fotografía 3), y se sacaron para proceder con las pruebas.

Fotografía 1. Imagen de las probetas antes de desmoldearlas.



Fotografía 2. Varillas de acero al carbono utilizadas para la preparación de las probetas, delimitando su respectiva área de trabajo con pintura epóxica (Epoxipoliámida de Pintuco)



Fuente: Los Autores

Dimensiones de las Probetas:

- 12 cm de largo de solo la probeta.
- 15 cm de largo de la probeta con la varilla.
- 7,5 cm de diámetro.

Fotografía 3. Probetas inmersas en agua para empezar la etapa de curado y fraguado



Fuente: Los Autores

Fotografía 4. Probetas desmontadas.



Fuente: Los Autores

3.5 CARACTERIZACION DEL MATERIAL DE TRABAJO.

Los análisis se realizaron por la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X por energía dispersa. Para esto se utilizó un Espectrómetro de Fluorescencia de rayos

X de energía dispersa Shimadzu EDX 800 HS, con un detector de estado sólido Si (Li) y como fuente de rayos X un tubo de rodio. La composición química del cemento se muestra en la tabla 5; con el cual se realizaron las probetas, en la figura 9 se observan las graficas obtenidas por la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X.

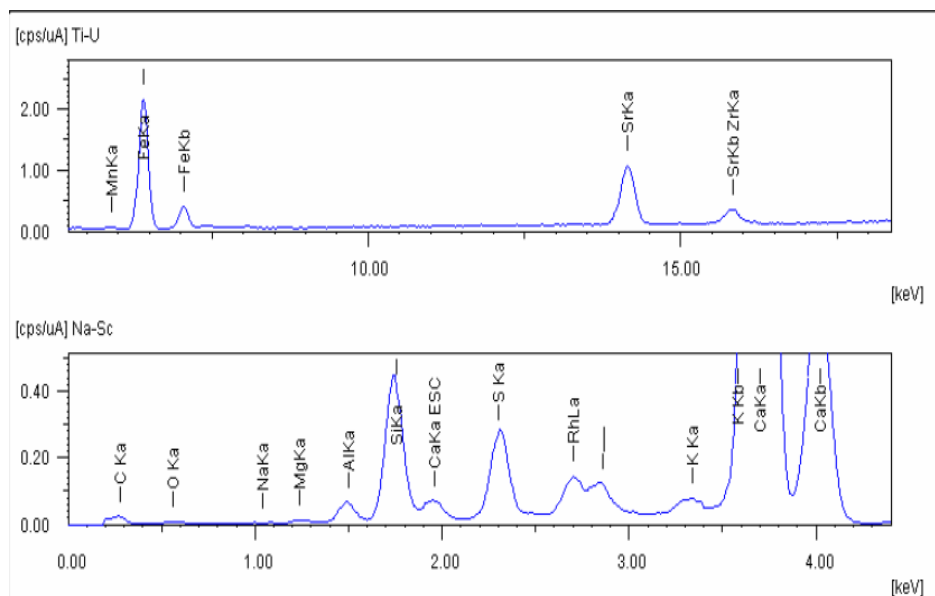
Tabla 5. Composición del cemento con el que se realizaron las probetas.

COMPUESTO ANALIZADO	COMPOSICIÓN EN (%)	DESVIACIÓN ESTANDAR
CaO	72.496	0.098
SiO ₂	14.917	0.075
Al ₂ O ₃	4.312	0.065
SO ₃	3.297	0.021
Fe ₂ O ₃	2.679	0.016
MgO	1.376	0.081
K ₂ O	0.540	0.013
SrO	0.208	0.002
TiO ₂	0.132	0.014
MnO	0.026	0.004
ZrO ₂	0.018	0.001
Na ₂ O	0.000	0.00

Fuente: Los Autores

La composición química del cemento cumple con la norma, por lo que se puede emplear en la preparación de las probetas

Figura 9. EDS para la muestra de cemento



En la tabla 6 se muestra la composición química del acero utilizado para realizar las probetas, estos análisis se realizaron por la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X por energía dispersa, mostrando una gran similitud con la encontrada en la literatura.

Tabla 6. Composición química del acero grado al carbono.

ELEMENTO ANALIZADO	CANTIDAD EN (%)	DESVIACIÓN ESTANDAR
Hierro	98.658	0.122
Manganeso	0.835	0.013
Silicio	0.443	0.016
Aluminio	0.023	0.017
Fósforo	0.016	0.006
Azufre	0.024	0.004

La composición química del acero concuerda con el de la norma, por lo tanto puede ser empleado como el refuerzo de las probetas.

3.6 EQUIPOS, ELEMENTOS Y MATERIALES EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Los equipos que se utilizaron en el montaje para la toma de los valores de corrosión fueron:

- Equipo Potenciostato - Galvanostato ZRA de la marca ACM Instruments-GILL8AC.
- Computador para tomar los datos del equipo.
- Electrodo de Ag/AgCL como electrodo de referencia.

En las fotografías 5 y 6 se presenta el montaje con el cual se realizaron las pruebas electroquímicas. Los materiales que se utilizaron para la realización del montaje fueron los siguientes:

- NaCl analítica para preparar la solución electrolítica.
- Las probetas de concreto preparadas anteriormente

Fotografía 5. Montaje de la probeta en la solución salina.



Fotografía 6. Montaje completo para las pruebas de Ruido Electroquímico y Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).



Fuente: Los Autores

3.7 DESCRIPCION DEL MONTAJE REALIZADO PARA LOS ENSAYOS

Para realizar el montaje y luego las pruebas electroquímicas se siguieron los siguientes pasos:

- 1.) Se realizó una limpieza con lijas en el refuerzo del concreto, donde se van hacer las conexiones con las pinzas del equipo.
- 2.) Se preparó la solución electrolítica con agua destilada y NaCl analítico con una relación del 3% en peso.
- 3.) Se introdujeron las probetas en la solución siguiendo el orden de la relación 0.4, 0.5 y 0.6.

4.) Se realizaron las respectivas conexiones y se enciende el equipo para proceder a realizar las pruebas.

5.) Realización de pruebas electroquímicas.

3.8 REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Se realizaron las pruebas basadas en la técnica de ruido electroquímico de la norma ASTM C-876, realizando un mallado a cada probeta con la finalidad de tomar en cada punto un valor de potencial esperando obtener las respectivas graficas que relacionen las condiciones activas o pasivas que presenta el acero necesario obtener primero las desviaciones estándar de las series de tiempo de ruido en potencial y corriente, donde luego se calculo la desviación estándar se divide entre la desviación estándar de la corriente, y por medio de la ecuación de Stern y Geary se obtuvo la i_{corr} que es directamente proporcional a la velocidad.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En esta parte del libro se presenta los resultados más relevantes durante el desarrollo de esta investigación, en concordancia con las actividades propuestas en la metodología anteriormente presentada.

Los resultados de la caracterización del material (acero), cemento y de la solución de cloruros trabajadas fueron expuestas en el numeral 3.5 de la metodología. Donde en la tabla 5 y la figura 10 se muestra la composición del cemento con el que se realizaron las probetas. En la tabla 5 se muestra la composición química del acero, es utilizado en el campo de la construcción en forma de torón.

4.1 VELOCIDAD DE CORROSION

Estos resultados hacen referencia a las velocidades de corrosión para las probetas de relación a/c 0.4, 0.5 y 0.6 con y sin micro-sílice, por medio de las técnicas electroquímicas de RPL (Resistencia a la Polarización Lineal) y Ruido Electroquímico (EN), a diferentes tiempos, iniciando el 27 de octubre del 2008, hasta cumplir 150 días de exposición en una solución de cloruros.

En la tabla 7 se presentan los valores de I_{corr} obtenidos por la técnica electroquímica RPL para las probetas sin micro/sílice.

Tabla 7. Datos de Icorr por la técnica RPL, para las probetas sin micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.6	Icorr (mA/cm ²)
23	6,92E-05	1,095E-03	8,95E-04	
30	1,3E-04	6,27E-04	1,57E-03	
43	1,213E-03	4,531E-03	6,497E-03	
63	2,246E-03	9,74E-04	4,011E-03	
77	3,89E-04	1,23E-03	1,75E-03	
99	6,687E04	1,763E-03	1,024E-02	
120	6,186E-04	2,373E-03	8,409E-03	
133	1,9383E-03	4,4591E-03	1,2984E-03	
140	8,746E-04	9,365E-04	7,4114E-03	
150	4,7059E-03	1,7046E-03	8,9485E-03	

Fuente: Los Autores

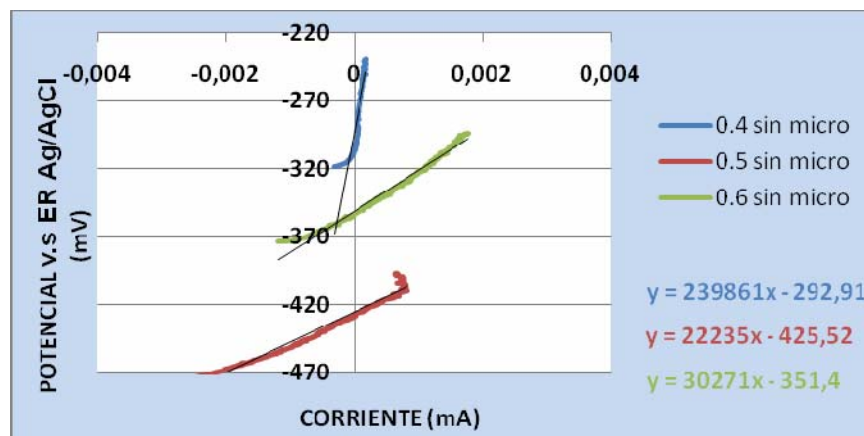
Las figuras 10, 11, 12, 13 y 14 muestran los cambios que sufren los potenciales y los valores de corrientes de las probetas sin micro-sílice a medida que aumenta el tiempo de inmersión de las probetas en la solución de cloruros.

En la figura 10 se observa que para un tiempo de exposición relativamente corto entre las probetas y la solución de cloruros se puede ver que las probetas de relación 0.5 y

0.6 presentan niveles de potenciales muy por debajo de la probeta de relación 0.4, donde estos potenciales están dentro del rango de una corrosión significativa.

Además se puede observar la diferencia de pendientes que presentan las tres relaciones, siendo la relación 0.4 la de mayor pendiente, y por lo tanto la de menor corrosión, esta seguida de la relación 0.6 y dándose en la relación 0.5 la menor pendiente, y por tanto la que presenta una mayor velocidad de corrosión.

Figura 10. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 23 días de exposición en la solución.

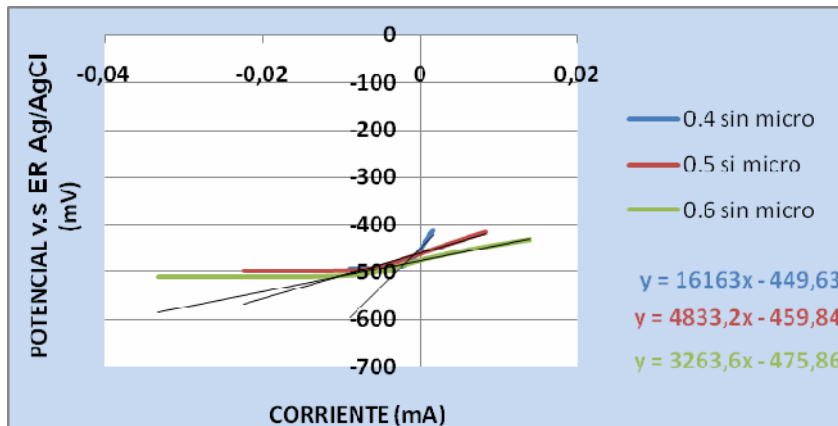


Fuente: Los Autores

En la figura 11 se puede observar que los valores son más bajos de potencial en las tres relaciones que para el caso anterior, además también se da una similitud en el valor de potencial para las tres relaciones, siendo este aproximadamente de -480 mV, por lo que se puede decir que para las probetas sin micro-sílice aumenta la velocidad de corrosión a los 43 días de contacto con la solución.

También cabe aclarar que aunque el potencial que presentan las tres relaciones es muy parecido, y la menor velocidad de corrosión la presenta la probeta de relación a/c 0.4, seguida por la de 0.5 y 0.6 respectivamente.

Figura 11. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 43 días de exposición en la solución.

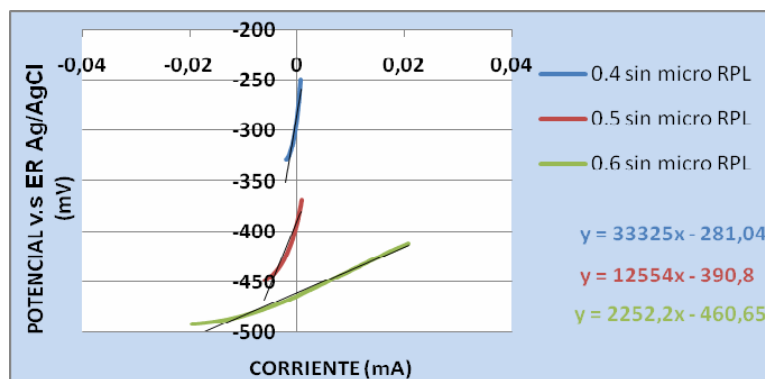


Fuente: Los Autores

En la figura 12 se puede observar cómo cambian los potenciales con respecto a la figura 11, donde se calcularon valores menos negativos, por lo que se puede decir que se empieza a presentar un rango de corrosión menos activo que el que tenía las probetas en la solución de cloruro a los 43 días de exposición.

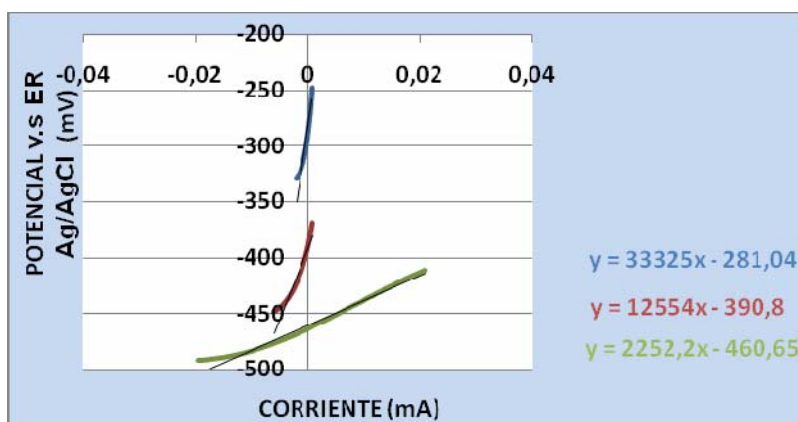
También se determinó que la relación que sigue presentando la menor velocidad de corrosión es la de 0.4, seguida por las de 0.5 y 0.6, como lo muestran sus pendientes en la gráfica.

Figura12. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 99 días de exposición en la solución.



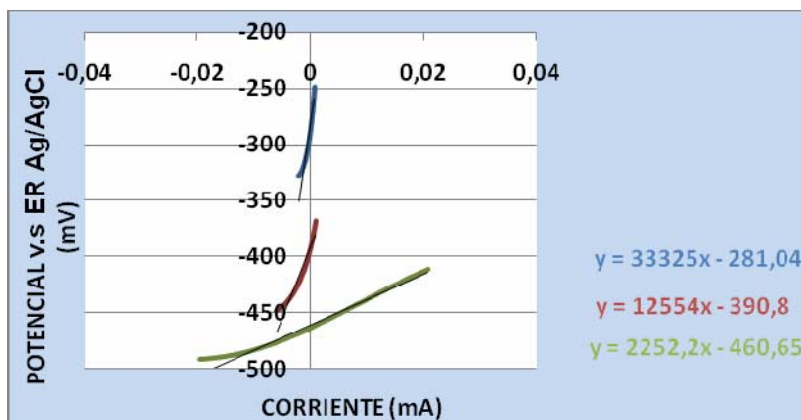
Una vez pasados los 120 días de exposición de las probetas en la solución de cloruros, ver figura 13, donde se observa que las probetas de relación 0.4 y 0.5 tienen valores más negativos de potenciales, pero sigue siendo la probeta con la relación 0.4 la que presenta una mayor pendiente que las probetas de relación 0.5 y 0.6, por lo tanto es la del valor más bajo de velocidad de corrosión.

Figura 13. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 120 días de exposición en la solución.



Fuente: Los Autores

Figura 14. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 150 días de exposición en la solución.

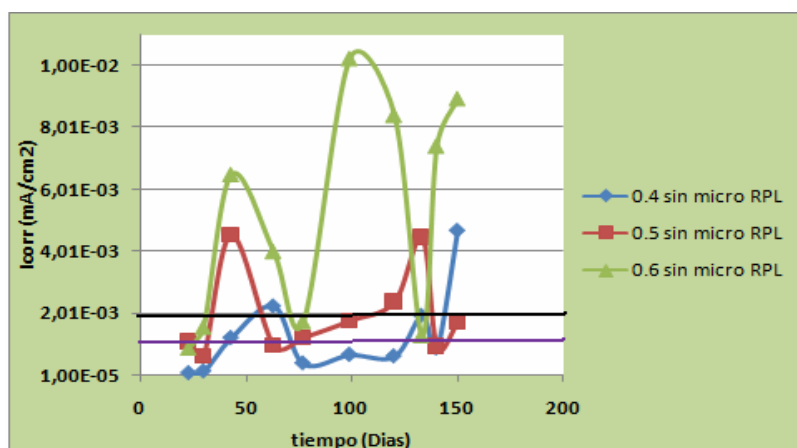


Fuente: Los Autores

A los 150 días de exposición de las probetas en la solución de cloruros se observa en la figura 14 que las probetas presentan una tendencia muy similar a la mostrada a los 120 días de exposición con la solución de cloruros.

En la figura 15 se observa el comportamiento de las corrientes electroquímicas de las tres relaciones a/c frente al tiempo, donde se presentan dos líneas de división muy importante, enunciadas en la tabla 4 de la metodología, indicando la primera línea ($1\text{E-}04\text{mA/cm}^2$) el estado de pasividad, el rango entre las dos líneas muestra un estado de corrosión moderada y por encima de la segunda línea ($1\text{E-}03\text{ mA/cm}^2$) se presenta una corrosión elevada.

Figura 15. Evolución de la corrosión para las probetas sin micro-sílice por la técnica RPL frente al paso del tiempo.



Fuente: Los Autores

Los datos obtenidos muestran que las tres relaciones muestran un comportamiento activo-pasivo, donde la relación a/c 0.4 muestra los valores más bajos de corrosión en comparación con las otras dos relaciones.

En el caso de la relación a/c 0.4 se observa que se presenta la pasivación hasta los 43 días de exposición, luego presenta un aumento en los valores de la corriente, entrando a estados activos de corrosión, pero a los 77 días vuelve a presentar un estado de

pasivación como se muestra en la grafica, estando estos valores por debajo de la primera línea, pero luego a los 133 días de exposición de la probeta con relación a/c 0.4 se encuentra nuevamente en un estado activo de corrosión.

Para las probetas de relación a/c 0.5 y 0.6 se observa que se encuentran en la zona de pasivación solo al principio, después se mantienen en el rango de corrosión activa presentándose los valores más altos de corrosión en la probeta de relación a/c 0.6.

En todo el transcurso del tiempo se observa que para las tres relaciones a/c se presentaron fluctuaciones, siendo ésto una indicación de la inestabilidad que presenta el sistema debido a las reacciones que todavía están ocurriendo.

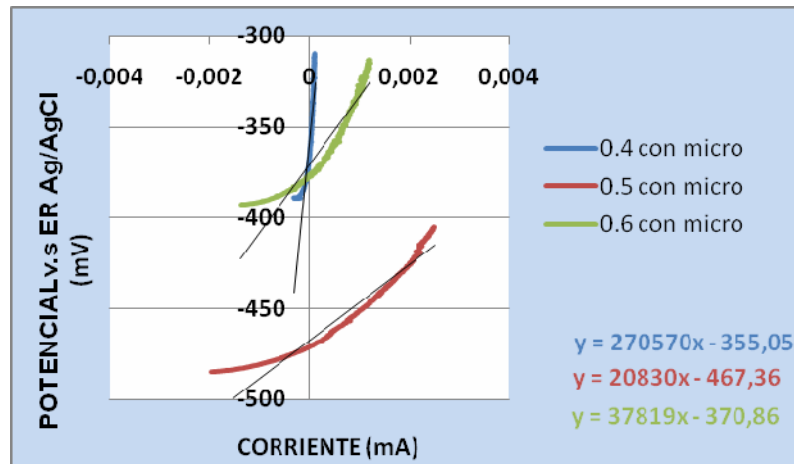
La tabla 8 muestra los valores de I_{corr} por medio de la técnica RPL para las probetas con micro-sílice.

Tabla 8. Datos de I_{corr} por la técnica RPL, para las probetas con micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.6	I_{corr} (mA/cm²)
23	6,50E-05	1,048E-03	5,41E-04	
30	1,184E-03	1,5E-03	4,38E-04	
43	2,778E-03	6,90E-05	9,13E-04	
63	2,013E-03	1,521E-03	4,011E-03	
77	2,63E-04	1,836E-03	1,206E-03	
99	7,9756E-03	3,4079E-03	1,1231E-03	
120	1,1256E-03	7,4645E-03	3,8812E-03	
133	9,483E-04	2,2629E-03	4,1162E-03	
140	1,0394E-03	2,065E-03	3,2624E-03	
150	4,459E-04	6,9795E-03	3,9944E-03	

Fuente: Los Autores

Figura 16. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 23 días de exposición en la solución.



Fuente: Los Autores

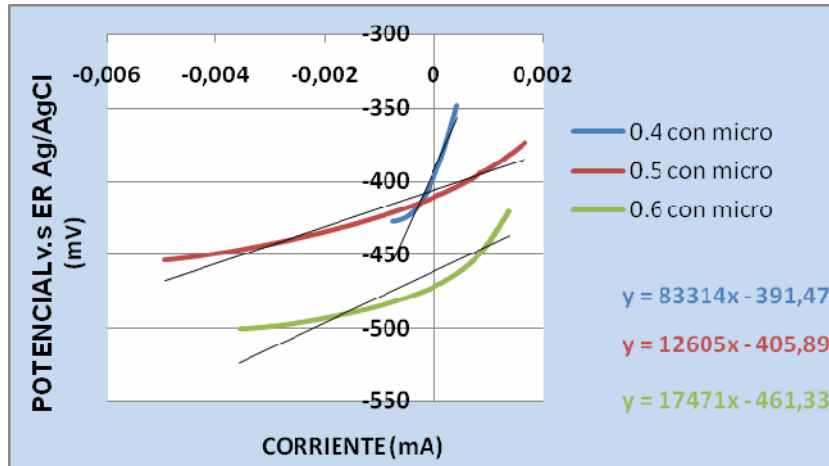
En las figuras 16 y 17 se muestran dos tiempos diferentes de exposición para las tres relaciones donde en la figura 16 las relaciones a/c 0.4 y 0.6 presentan aproximadamente el mismo potencial, a diferencia de la probeta de relación a/c 0.5, la cual presenta el potencial más negativo.

En la figura 17 las relaciones que presentan el mismo potencial aproximadamente son las relaciones de 0.4 y 0.5 respectivamente, mientras que el valor más negativo es para la relación de 0.6.

Por ello se puede decir que la probeta de relación a/c 0.4 presenta la mayor estabilidad en cuanto a los valores de potencial en comparación con las otras dos relaciones.

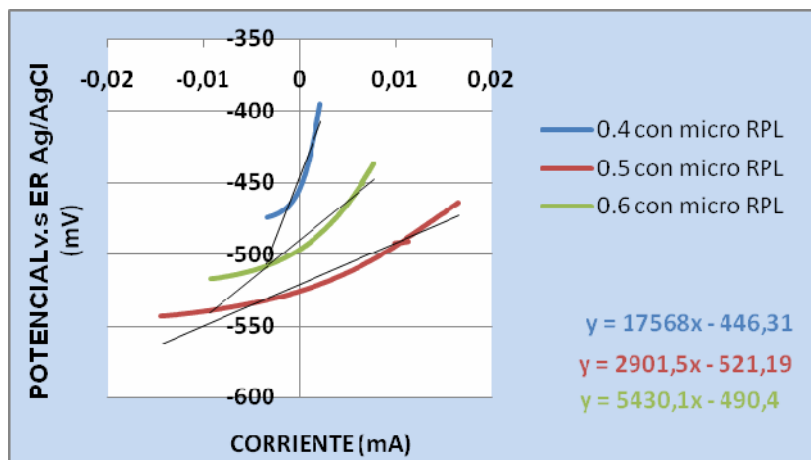
Mientras que en la figura 17 se observa como a los 77 días de exposición se presenta un aumento en el rango de corrosión para las probetas con relación a/c 0.4 y 0.6, mientras que para la relación a/c 0.5 se presenta un aumento en el valor de su potencial, con respecto a los 23 días, indicando que la capa pasiva se forma a tiempos diferentes en las tres relaciones.

Figura 17. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-silice a los días 77 de exposición en la solución.



Fuente: Los Autores

Figura 18. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-silice a los 120 días de exposición en la solución.



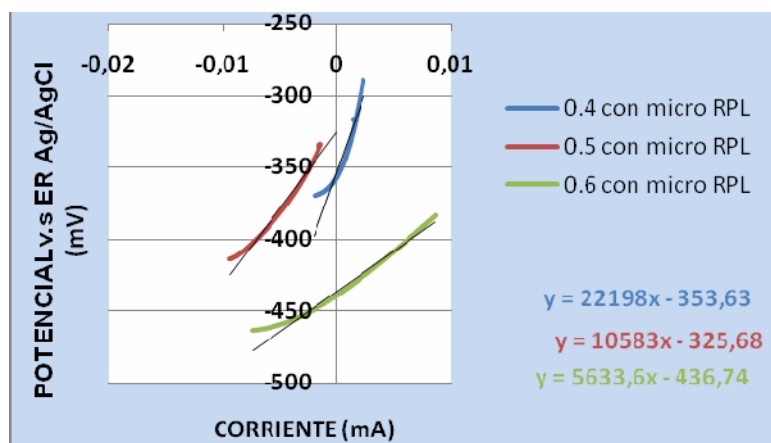
Fuente: Los Autores

En la figura 18 se observa que para los 120 días de exposición, las probetas presentan valores considerables de potencial, donde el valor más negativo y la menor pendiente se presenta en la probeta de relación a/c 0.5.

Mientras que para la figura 19, donde el tiempo de exposición es de 133 días, se observa el cambio que se ha presentado en los valores de sus potenciales, los cuales son más nobles que los que tenían a los 120 días de exposición.

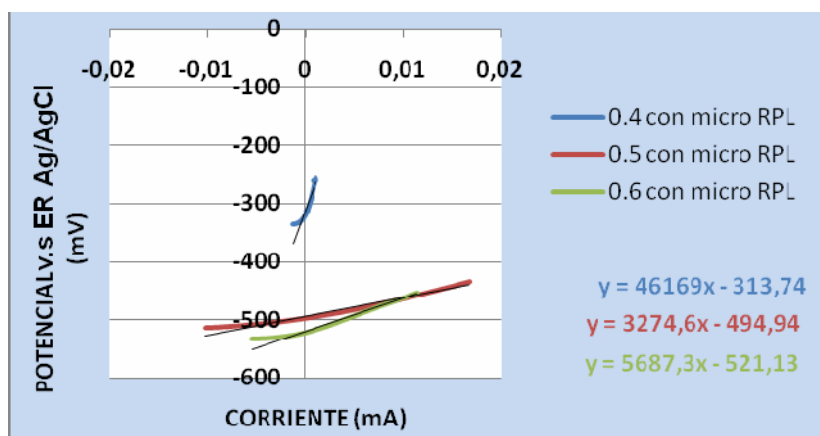
Estas características son más sobresaliente en la relación a/c 0.4, donde se presenta la mayor pendiente y por lo tanto la menor velocidad de corrosión.

Figura 19. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-silice a los 133 días de exposición en la solución.



Fuente: Los Autores

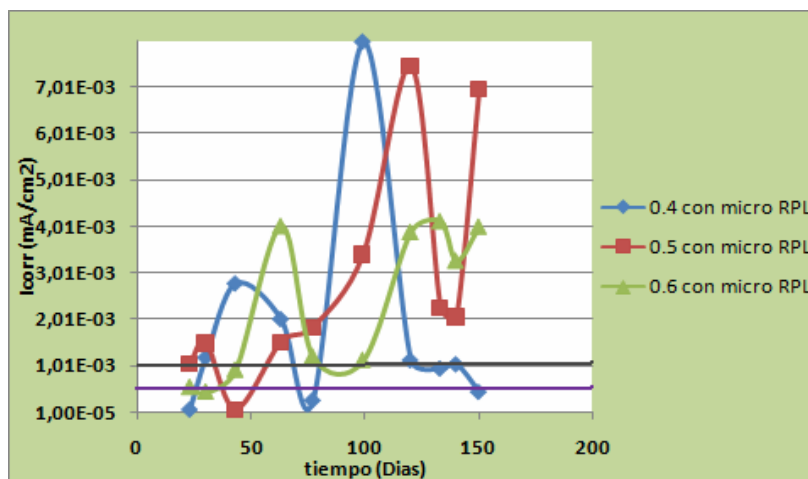
Figura 20. Gráfica de resistencia a la polarización lineal (RPL) para las probetas con micro-silice a los 150 días de exposición en la solución.



En la figura 20 se presenta el comportamiento de las tres relaciones con micro-sílice a los 150 días de exposición con la solución de cloruros, mostrando que en la relación a/c 0.4 se presenta un aumento considerable en su potencial, en comparación con las otras dos relaciones, las cuales presentan potenciales mas negativos en comparación con la relación 0.4, lo que indica que a los 150 días de exposición la probeta de relación a/c 0.4 está protegida, mientras que las otras dos relaciones están siendo atacadas por los cloruros.

En la figura 21 se presenta el comportamiento de las I_{corr} de las tres relaciones a/c frente al paso del tiempo observándose que a los 23 días de exposición solo se presenta pasivación en las relaciones a/c 0.4 y 0.6, mientras que la probeta de relación a/c 0.5 se encuentra en un estado de corrosión activa, donde la pasivación para esta probeta se alcanzo a los 43 días de exposición.

Figura 21. Evolución de la corrosión para las probetas con micro-sílice por la técnica RPL frente al paso del tiempo.



Fuente: Los Autores

En la relación a/c 0.4 se observa que se presenta una pasivación a los 23 y tendencia a repasivarse a los 77 días de exposición de la probeta en la solución de cloruro.

En las tres relaciones a/c se presentan fluctuaciones mostrando que para las probetas con micro-sílice tampoco se presenta una estabilidad como se presentó en las probetas sin micro-sílice.

La tabla 9 muestra los datos de Icorr por medio de la técnica de Ruido Electroquímico las probetas sin micro – sílice.

Tabla 9. Datos de Icorr por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO, para las probetas sin micro-sílice.

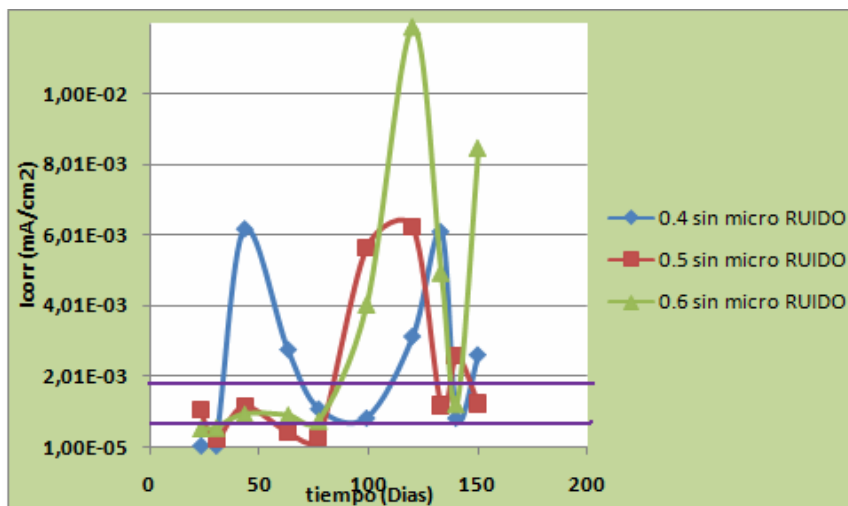
Tiempo de Exposición (Dias)	Relación a/c 0.4	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.6	Icorr (mA/cm²)
23	6,50E-05	1,048E-03	5,41E-04	
30	5,93E-05	2,09E-04	5,58E-04	
43	6,169E-03	1,15E-03	9,48E-04	
63	2,772E-03	4,24E-04	9,2E-04	
77	1,098E-03	2,5E-04	7,55E-04	
99	8,406E-04	5,6431E-03	4,0413E-03	
120	3,144E-03	6,219E-03	1,18771E-02	
133	6,093E-03	1,1673E-03	4,9391E-03	
140	8,403E-04	2,5685E-03	1,2227E-03	
150	2,6263E-03	1,2074E-03	8,4629E-03	

Fuente: Los Autores

En la figura 22 se muestra la evolución de la velocidad de corrosión de las tres relaciones a/c frente al paso del tiempo para las probetas sin micro-sílice por medio de la técnica de Ruido Electroquímico, donde se observa que para la relación a/c 0.6 se

tiene el valor más alto de corrosión a los 120 días de exposición en comparación con las otras dos relaciones.

Figura 22. Evolución de la corrosión para las probetas sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico frente al paso del tiempo.



Fuente: Los Autores

Se observa que la probeta de relación a/c 0.5 muestra una doble pasivación, dándose la primera a los 30 días y la segunda a los 77 días, después muestra la tendencia a mantener valores de corrosión dentro del rango de moderada y elevada.

La probeta de relación a/c 0.6 muestra una pasividad dentro de los primeros 77 días de exposición con la solución de cloruros, presentando después una tendencia a aumentar los valores de corrosión elevados.

Las tres relaciones muestran unas fluctuaciones significativas como ocurrió al utilizar la técnica electroquímica de resistencia a la polarización lineal (RPL), lo que corrobora que no existe un equilibrio en el sistema.

La tabla 10 muestra los valores del índice de localización para las probetas sin micro sílice.

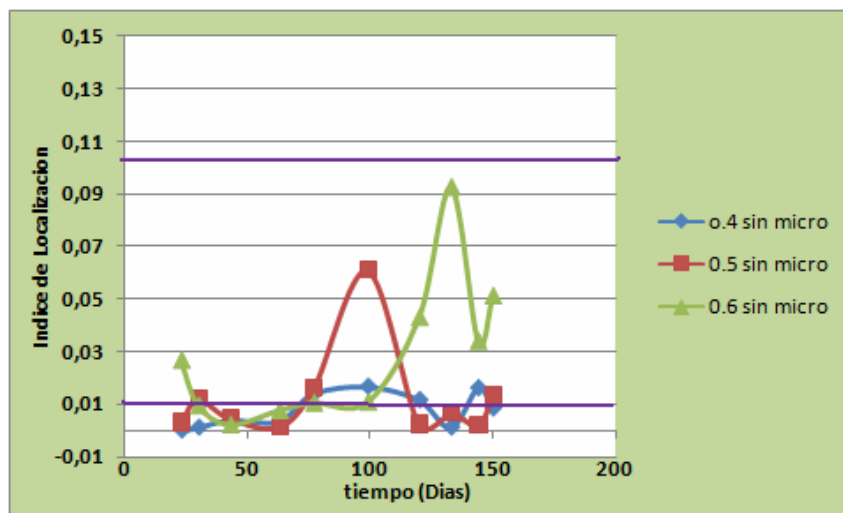
Tabla 10. Índice de localización para las probetas sin micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.6	I.L
23	0,0011061	0,003	0,0269	
30	0,0039949	0,0119	0,0097119	
43	0,0035374	0,0045882	0,00238	
63	0,014	0,0013413	0,0078064	
77	0,0167	0,016	0,0107	
99	0,0116	0,0609	0,01097	
120	0,0011586	0,00228	0,043	
133	0,0162	0,006644	0,09239	
140	0,0084166	0,00198	0,034	
150	0,0011061	0,0135	0,0512	

Fuente: Los Autores

En la figura 23 se observa los valores del índice de localización para las probetas sin micro-sílice al utilizar la técnica de Ruido Electroquímico, donde se observa dos líneas (0,01 y 0,1) (Fuente: Caracterización de la corrosión de concretos con mezclas ternarias.) las cuales forman tres rangos, siendo estos los encargados de decir que tipo de corrosión se está presentando.

Figura 23. Índice de localización de las probetas sin micro-sílice a través del tiempo.



Fuente: Los Autores

Se observa que para los 150 días de exposición de las probetas en la solución de cloruros tienden a mantenerse en el rango de corrosión de tipo uniforme y mixta, estando la corrosión uniforme por debajo de la primera línea, entre las dos líneas se presenta el rango de la corrosión mixta y por encima de la segunda línea se presenta una corrosión localizada.

La relación a/c 0.6 es la que muestra mayor tendencia a entrar dentro del rango de corrosión localizada, sin embargo a los 150 días aun no se ha alcanzado el umbral requerido de cloruros para producir una corrosión localizada.

La tabla 11 muestra los datos de I_{corr} por la técnica de Ruido Electroquímico para las probetas con micro - sílice

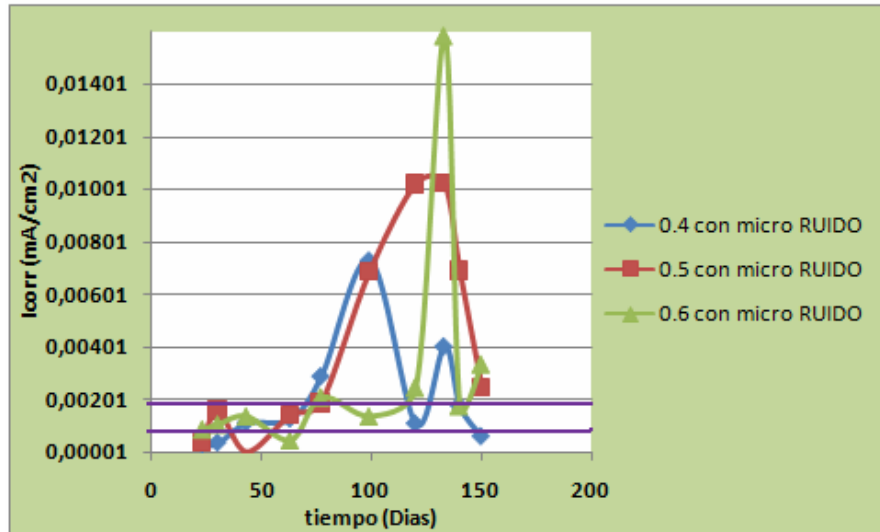
Tabla 11. Datos de Icorr por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO, para las probetas con micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.6	Icorr (mA/cm ²)
23	2,84E-04	3,9E-04	8,75E-04	
30	3,42E-04	1,596E-03	1,067E-03	
43	1,112E-03	2,02E-06	1,377E-03	
63	1,264E-03	1,423E-03	4,64E-04	
77	2,879E-03	1,889E-03	2,102E-03	
99	7,3037E-03	6,8697E-03	1,3756E-03	
120	1,0816E-03	1,01984E-02	2,4641E-03	
133	4,0218E-03	1,02106E-02	3,78311E-02	
140	1,7657E-03	6,9067E-03	1,7663E-03	
150	5,908E-04	2,48269E-03	3,3599E-03	

Fuente: Los Autores

En la figura 24 se presenta la evolución de la velocidad de corrosión, frente al paso del tiempo para las probetas con micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico, donde se observa una tendencia similar de las tres relaciones, especialmente en los primeros 80 días.

Figura 24. Evolución de la corrosión para las probetas con micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico frente al paso del tiempo.



Fuente: Los Autores

La probeta de relación a/c 0.4 y 0.5 se mantuvieron en el estado de pasivación hasta los 43 días de exposición, mientras que la relación 0.6 presentó pasivación a los 23 días, entrando posteriormente a un estado activo y volviendo a pasivarse a los 63 días.

La probeta de relación a/c 0.4 muestra tendencia a una segunda pasivación, produciéndose a los 150 días de exposición en la solución de cloruros, la probeta de relación 0.6 fue la que presentó los valores más altos de corrosión seguida por la relación 0.5, y por último la relación 0.4.

La tabla 12 muestra los datos de índice de localización para las probetas con micro – sílice.

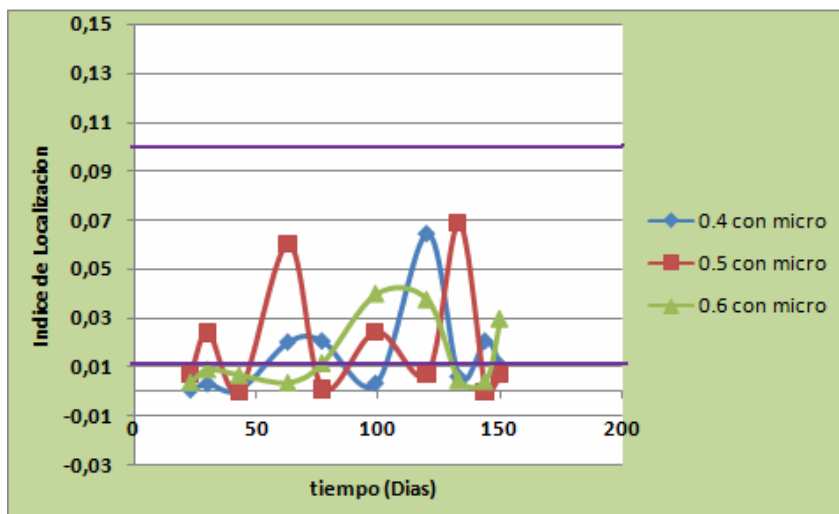
Tabla 12. Índice de localización para las probetas con micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4	Relación a/c 0.5	Relación a/c 0.6	I.L
23	0,00026862	0,00733333	0,004	
30	0,0027706	0,024	0,00919	
43	0,00037324	0,00023626	0,0069	
63	0,02	0,0605	0,0038	
77	0,0204	0,0010851	0,0118	
99	0,0029919	0,0243	0,04	
120	0,0646	0,007	0,0376	
133	0,0058312	0,0689	0,00483	
140	0,0204	0,000055	0,00448	
150	0,0105	0,00705	0,02985	

Fuente: Los Autores

En la figura 25 se observa los valores de los índices de localización para las probetas con micro-sílice a través de los 150 días de exposición de las probetas en la solución de cloruros.

Figura 25. Índice de localización de las probetas con micro-sílice a través del tiempo.



Fuente: Los Autores

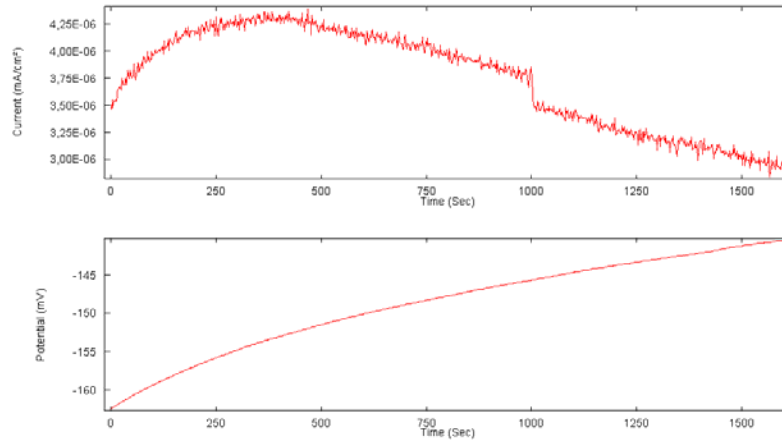
Se puede observar que los valores de los índices son menores para las probetas con micro-sílice que las sin micro-sílice, dándose todos los valores dentro de los rangos de corrosión uniforme y corrosión mixta.

Se observa unos valores aleatorios de estos índices lo que no asegura ni muestra una tendencia con la que se pueda determinar en qué momento se pueda presentar una picadura.

Los valores más altos de estos índices están presentes en la probeta de relación a/c 0.5, seguido por la valores de 0,4 y 0,6.

En la figura 26 se muestra la tendencia que presentaron las probetas con y sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico en los primeros días de contacto en la solución de cloruros, donde el valor del potencial tiende a tomar valores más positivos, los cuales están dentro del rango de corrosión insignificante.

Figura 26. Tendencia mostrada de las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los primeros días de exposición de las probetas.

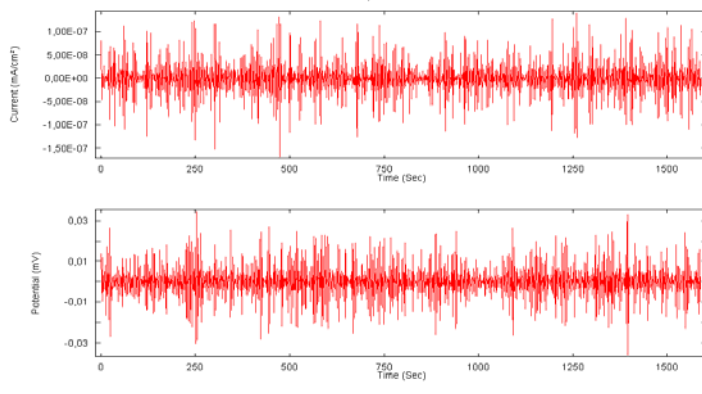


Fuente: Los Autores

Se observa también que los valores de corriente tienden a ser menores, lo que indica que la demanda de electrones es baja, debido a la corrosión insignificante que se está presentando

La figura 27 es el resultado de disminuir el rango de los ejes y (Potencial y Corriente) de la figura 26, esto para observar si existe la presencia de un pico característico de una picadura, pero como no existe ninguna sobresaliente entre los demás; todos están más o menos a una altura muy similar, se puede decir que el tipo de corrosión presente puede ser generalizada o mixta.

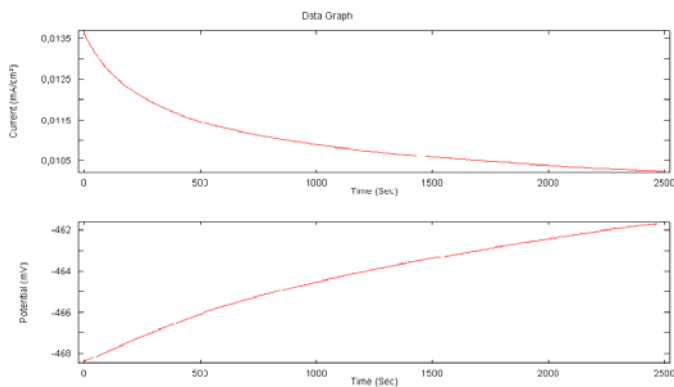
Figura 27. Gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los primeros días de exposición de las probetas al disminuir el rango de los ejes verticales.



Fuente: Los Autores

En la figura 28 se presenta la tendencia que mostraban las probetas en el rango de los 43 y 77 días de estar en contacto con la solución de cloruro, donde se puede observar un aumento en los valores de potencial en comparación con los mostrados en la figura 26, aunque la tendencia de la gráfica es aumentar con el tiempo.

Figura 28. Tendencia mostrada por las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los días intermedios de los 150 días exposición de las probetas.

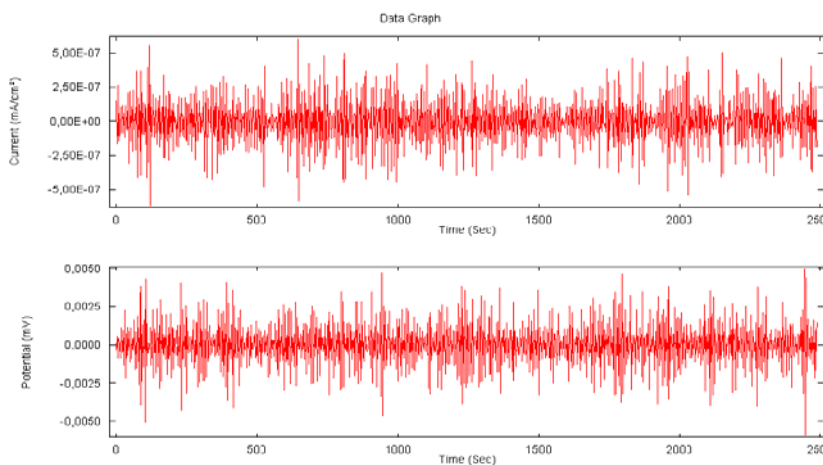


Fuente: Los Autores

Se observa que los valores de corriente tienen una tendencia a disminuir, aunque presentan valores más significativos que los mostrados anteriormente.

La figura 29 es el resultado de disminuir el rango de los ejes y (Potencial y Corriente) de la figura 28, para observar si existe la presencia de un pico característico de una picadura, pero no existe ninguna ya que están a una altura muy similar, se puede decir que el tipo de corrosión presente puede ser generalizada o mixta.

Figura 29. Gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los días intermedios de los 150 días exposición de las probetas al disminuir el rango de los ejes verticales.

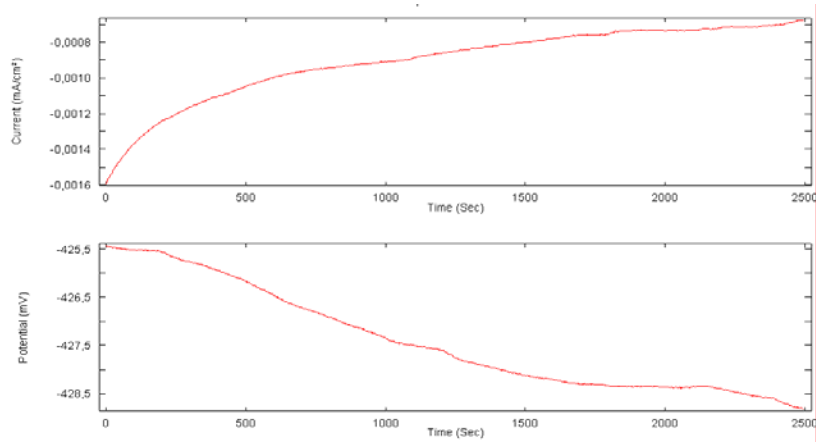


Fuente: Los Autores

La figura 30 muestra el comportamiento de las probetas a los 150 días de contacto con la solución de cloruro, donde se observa como los valores de potencial indican un rango de corrosión elevada, y a su vez muestra la tendencia a seguir disminuyendo con el tiempo.

La gráfica de Ruido de corriente muestra una tendencia de aumento, lo que indica que la demanda de electrones es considerable, debido también a la corrosión elevada que se presentó a este tiempo.

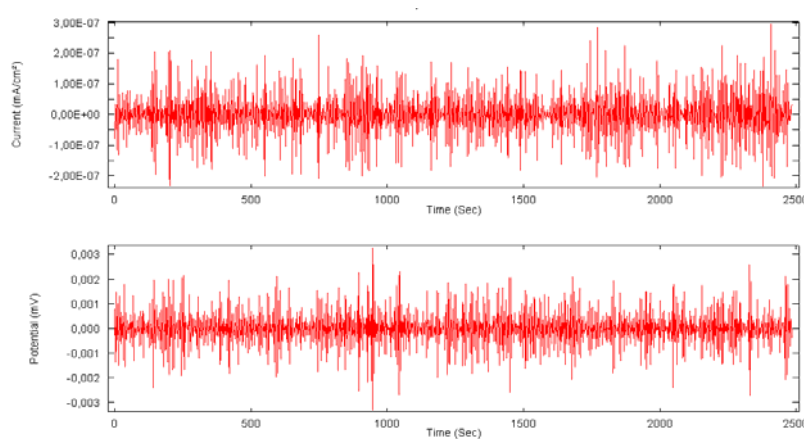
Figura 30. Tendencia mostrada por las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los 150 días exposición de las probetas.



Fuente: Los Autores

La figura 31 es el resultado de disminuir el rango de los ejes y (Potencial y Corriente) de la figura 30, para observar si existe la presencia de un pico característico de una picadura, pero como todos están a una altura muy similar, se puede decir que el tipo de corrosión presente puede ser generalizada o mixta.

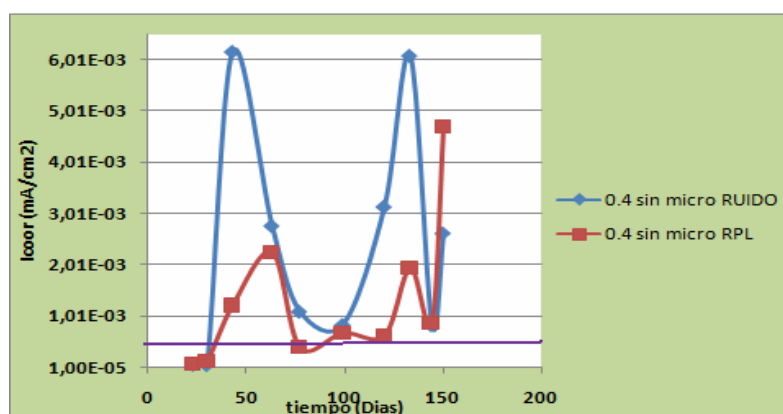
Figura 31. Tendencia mostrada por las gráficas de Ruido Electroquímico para potencial y corriente a los 150 días exposición de las probetas al disminuir el rango de los ejes verticales.



Fuente: Los Autores

En la figura 32 se observa la comparación para la probeta de relación a/c 0.4 sin micro-sílice por las técnicas electroquímicas de RPL y Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo L.

Figura 32. Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta con relación a/c 0.4 sin micro-sílice.



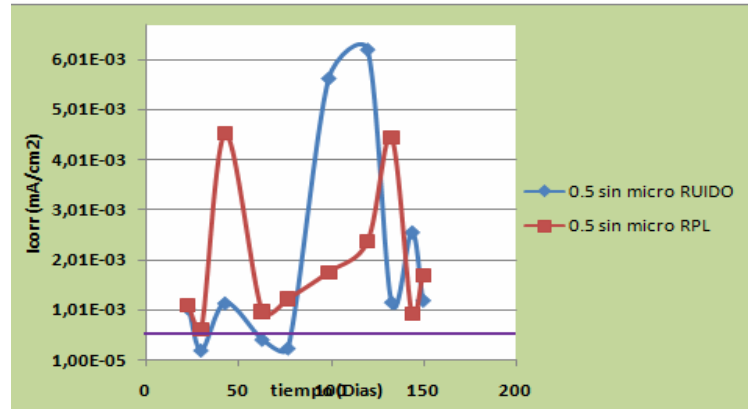
Fuente: Los Autores

Se observa que en la gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico presenta los valores más altos de I_{corr} en comparación con la gráfica obtenida por la técnica RPL, sin embargo estos valores se encuentran dentro de la misma escala, las graficas muestran un comportamiento similar, indicando una similitud al usar las dos técnicas electroquímicas, donde la diferencia varía en los valores de mostrados de I_{corr} .

Se observa que la tendencia a estar dentro del rango pasivo, se mostró en las gráficas obtenidas al utilizar las dos técnicas electroquímicas en los primeros días.

En la figura 33 se observa la comparación de las velocidades de corrosión obtenidas en la probeta de relación a/c 0.5 sin micro-sílice comparando las técnicas electroquímicas de RPL y Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo M.

Figura 33. Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta con relación a/c 0.5 sin micro-sílice.



Fuente: Los Autores

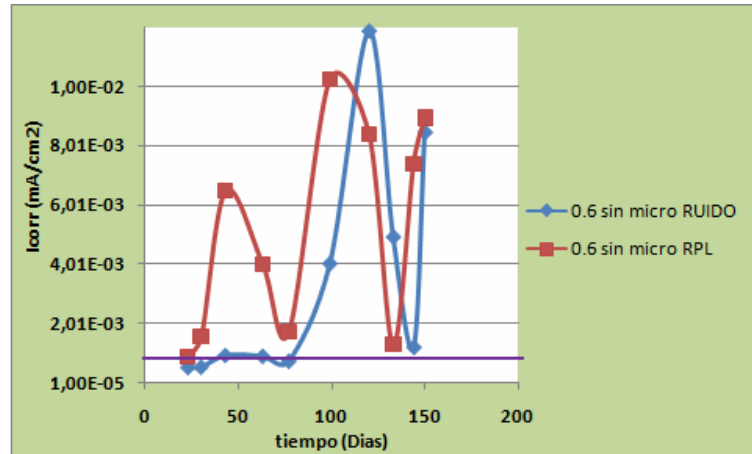
La figura 33 muestra una marcada relación en cuanto a la tendencia de las graficas resultantes al aplicar las dos técnicas, donde se observa que la grafica de Ruido Electroquímico tiende a estar dentro del rango pasivo en dos rangos.

Además figura muestra una cierta diferencia entre las dos técnicas empleadas, mostrándose una mayor fluctuación al utilizar la técnica de Ruido Electroquímico. También cabe destacar que el valor más alto de corrosión que se registro se presento utilizando la técnica de Ruido Electroquímico, pero manejando la misma escala.

En la figura 34 se observa la comparación de las velocidades de corrosión obtenidas en la probeta de relación a/c 0.6 sin micro-sílice comparando las técnicas electroquímicas de RPL y Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo N.

La tendencia mostrada por las dos gráficas en los primeros 60 días tiene una ligera variación, pero posteriormente es casi la misma, donde se observa un comportamiento muy parecido al utilizar las dos técnicas electroquímicas, en excepto los primeros 60 días.

Figura 34. Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta con relación a/c 0.6 sin micro-sílice.



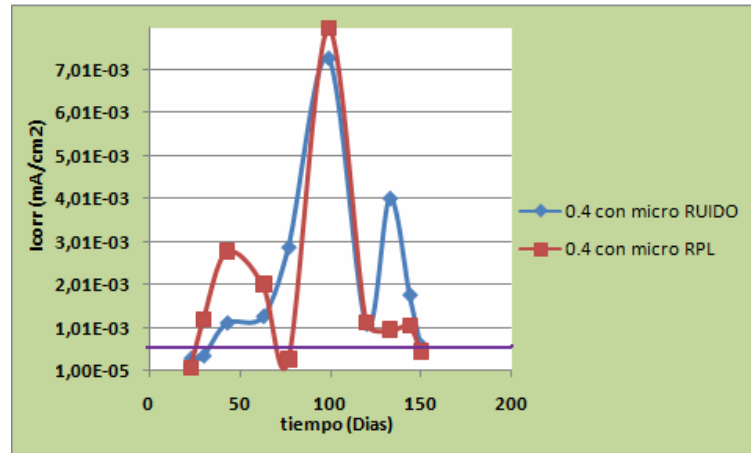
Fuente: Los Autores

Se observa que para la probeta con relación a/c 0.6 sin micro-sílice se presentan los valores de velocidades de corrosión que más concuerdan al utilizar las dos diferentes técnicas electroquímicas, siendo esta relación la que presenta la menor diferencia en comparación con las otras dos relaciones mostradas en las figuras 28 y 29.

Además se observa el valor más alto de corrosión a los 100 días de exposición de la probeta con la solución de cloruros como se puede observar al utilizar las dos técnicas.

En la figura 35 se observa la comparación de las velocidades de corrosión obtenidas en la probeta de relación a/c 0.4 con micro-sílice comparando las técnicas electroquímicas de RPL y Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo O.

Figura 35. Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta con relación a/c 0.4 con micro-sílice.



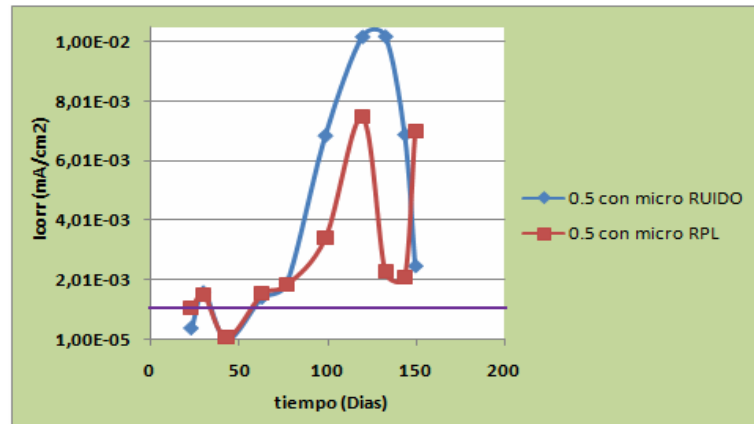
Fuente: Los Autores

En algunos periodos de tiempo se observa una gran similitud entre las graficas obtenidas por las dos técnicas, pero en los otros rangos hubo una ligera variacion presentando el valor más alto de velocidad de corrosión a los 100 días de exposición aproximadamente, donde se observa la tendencia a repasivarse que se muestra a los 150 días para las dos gráficas.

A los 150 días de exposición de la relación se observa que el valor de velocidad de corrosión es el mismo para ambas técnicas, además es muy difícil decir en cual técnica se presentan los valores más bajos de corrosión, debido a que al principio se presenta el valor más alto en la técnica RPL, y al final se presenta en la técnica de Ruido Electroquímico.

En la figura 36 se muestra la comparación de los datos de velocidad de corrosión en la probeta con relación a/c 0.5 con micro-sílice, comparando las técnicas electroquímicas de RPL y Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo P.

Figura 36. Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta con relación a/c 0.5 con micro-sílice



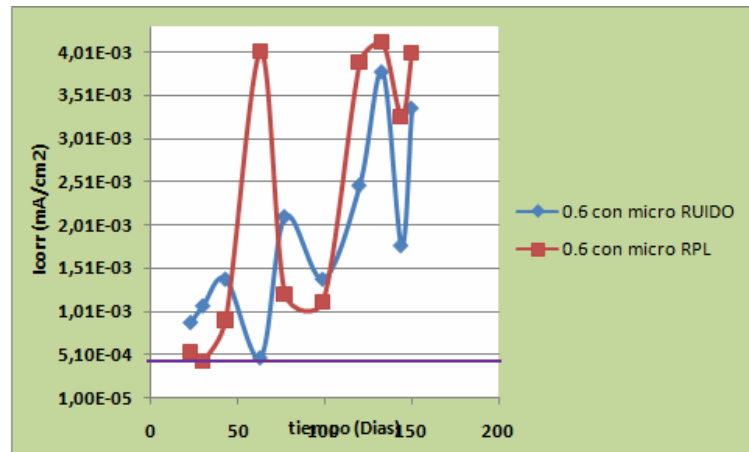
Fuente: Los Autores

Se observa una gran similitud en la tendencia mostrada de las gráficas mostradas, donde la principal diferencia son los valores de I_{corr} .

La principal diferencia se observa a los 120 días aproximadamente, donde los valores de I_{corr} de las dos técnicas se desfasan en un orden de magnitud, donde los datos más bajos de corrosión se muestran cuando se utilizó la técnica RPL.

Se muestra el comportamiento de la velocidad de corrosión frente al paso del tiempo para la probeta con relación a/c 0.6 con micro-sílice, comparando las técnicas electroquímicas de RPL y Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo Q. Además en la figura 37 se observa una variación en los primeros 100 días, posteriormente hay similitud en las gráficas obtenidas por las dos técnicas electroquímicas, siendo muy difícil definir en cuál de las graficas se obtiene los valores más bajos de velocidades de corrosión, excepto el caso del valor obtenido a los 130 días aproximadamente utilizando la técnica de Ruido Electroquímico, donde el valor no coincide con la tendencia que se venía presentando en la gráfica.

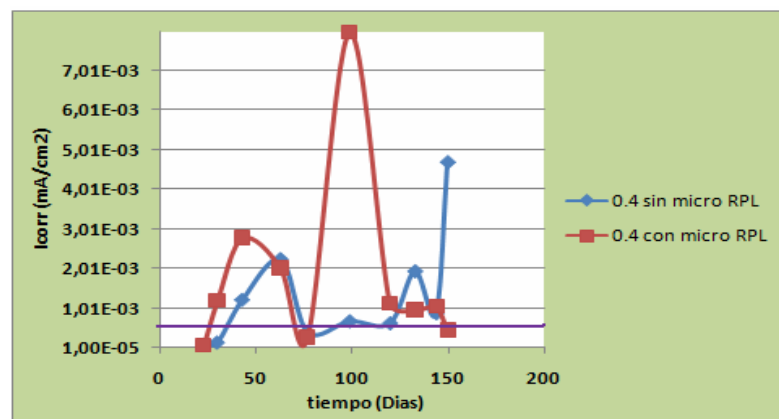
Figura 37. Comparación entre las dos técnicas electroquímicas para la probeta con relación a/c 0.6 con micro-sílice



Fuente: Los Autores

En la figura 38 se observa la diferencia que se presenta en las probetas con relación a/c 0.4 con y sin micro-sílice por la técnica electroquímica RPL, donde los datos para su realización se muestran en la tabla del anexo R .

Figura 38. Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas con relación a/c 0.4 con y sin micro-sílice por la técnica de RPL.



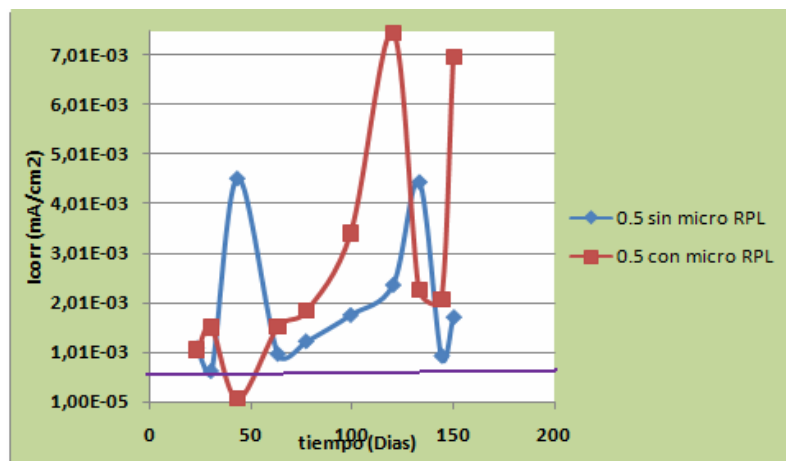
Fuente: Los Autores

La figura muestra que la relación a/c 0.4 con y sin micro-sílice presentan pasivación a los 23 días y una repasivación antes de los 100 días de exposición, donde la probeta con micro-sílice muestra los valores más altos de corrosión hasta los 120 días de exposición aproximadamente, pero tiende a repasivarse a los 150 días de exposición, a diferencia de lo mostrado por la probeta sin micro-sílice.

El descenso indica que la probeta con micro-sílice está protegida con la capa pasiva, por eso su tendencia a disminuir los valores de velocidad de corrosión, mientras que para la probeta sin micro-sílice se observa la tendencia a aumentar el valor de corrosión a los 150 días de exposición.

En la figura 39 se observa la diferencia de los valores de la velocidad de corrosión para las probetas de relación a/c 0.5 con y sin micro-sílice, por la técnica electroquímica RPL, donde los datos para su realización se muestran en la tabla del anexo S.

Figura 39. Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas con relación a/c 0.5 con y sin micro-sílice por la técnica de RPL.



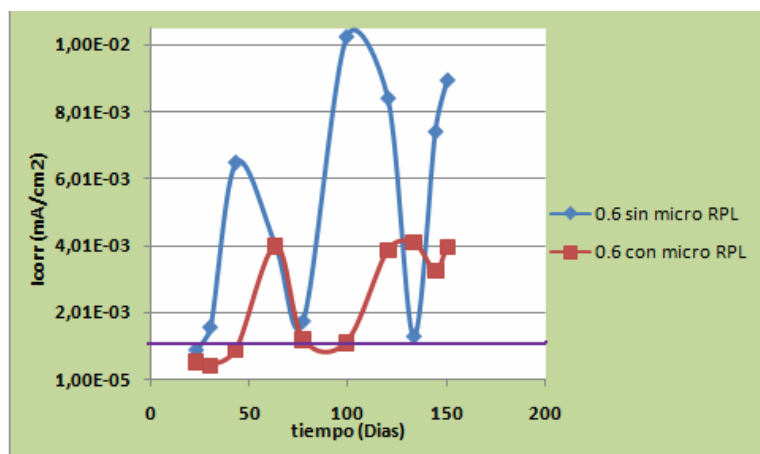
Fuente: Los Autores

Se observa que para la probeta con micro-sílice se da el valor más alto de corrosión, pero este valor está dentro de la misma escala, dándose este después de los 100 días

de exposición con la solución de cloruros, esto indica que para las probetas con micro-sílice se tarda más la formación de la película pasiva o capa protectora, porque el ingreso de oxígeno es mucho más lento que para las probetas sin micro-sílice.

En la figura 40 se observa la diferencia de los resultados de velocidad de corrosión a través del tiempo por la técnica RPL para las probetas con una relación a/c 0.6; los datos se muestran en la tabla del anexo T.

Figura 40. Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas con relación a/c 0.6 con y sin micro-sílice por la técnica de RPL.

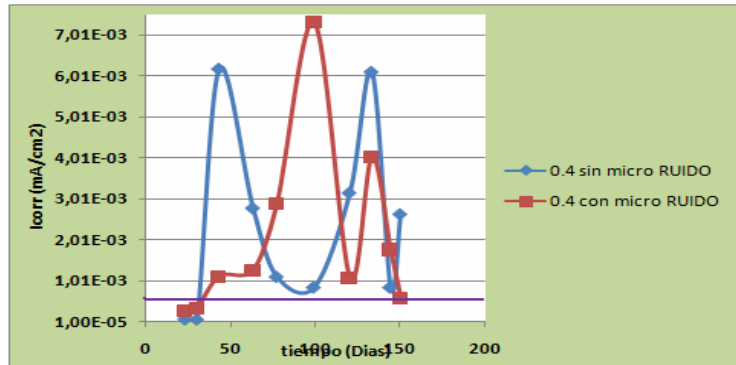


Fuente: Los Autores

Se observa que la probeta con micro-sílice además de presentar los valores más bajos de corrosión en comparación con la probeta sin micro-sílice, muestra que tiende a repasivarse a los 100 días de exposición en la solución de cloruros aproximadamente.

En la figura 41 se observa la evolución de los valores de corrosión a través del tiempo para las probetas con relación a/c 0.4 con y sin micro-sílice por medio de la técnica de Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo U.

Figura 41. Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas con relación a/c 0.4 con y sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico.

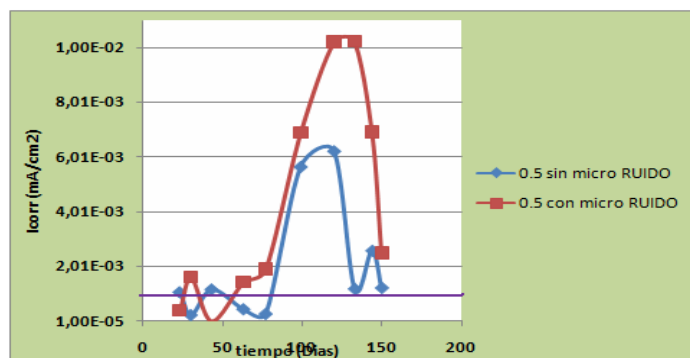


Fuente: Los Autores

Se observa que al inicio se presentan dos valores de velocidad de corrosión muy similares tanto para la probeta con y sin micro-sílice, posteriormente presenta una leve variación, finalmente la probeta con micro-sílice a los 150 días de exposición muestra una tendencia a repasivarse.

En la figura 42 se observa la evolución de los valores de corrosión a través del tiempo para las probetas con relación a/c 0.5 con y sin micro-sílice por medio de la técnica de Ruido Electroquímico; los datos se muestran en la tabla del anexo V.

Figura 42. Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas con relación a/c 0.5 con y sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico.

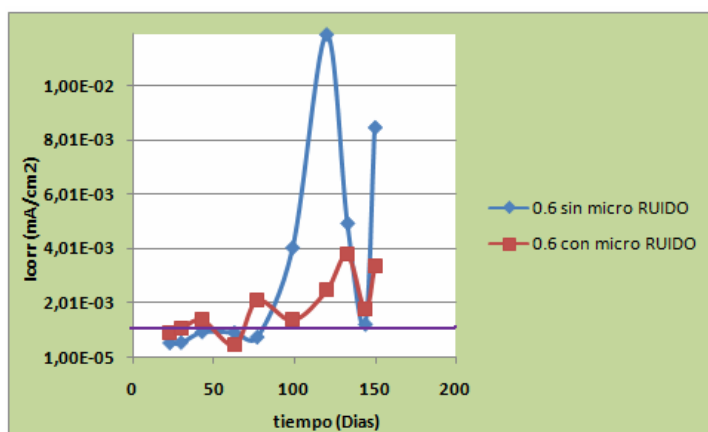


Fuente: Los Autores

Se observó que al inicio se presentaron valores de velocidad de corrosión muy similares en las probetas tanto con y sin micro-sílice, mostrando mayor permanencia en la zona pasiva la probeta sin micro-sílice, siendo esto atribuido posiblemente a la mayor sensibilidad de la técnica de Ruido Electroquímico a cualquier cambio en el medio de trabajo.

En la figura 43 se presenta la diferencia de las velocidades de corrosión frente al paso del tiempo para las probetas con relación a/c 0.6 con y sin micro-sílice, donde los datos se muestran en la tabla del anexo W.

Figura 43. Comparación entre las velocidades de corrosión para las probetas con relación a/c 0.6 con y sin micro-sílice por la técnica de Ruido Electroquímico.



Fuente: Los Autores

Se presenta una gran similitud en la tendencia que muestran las gráficas en los primeros 60 días donde se observa que cumplen los requisitos para que ocurra la pasividad.

Se observa que la probeta con micro-sílice presenta los valores más bajos de velocidad de corrosión, en donde se presenta un cambio de escala en los valores de I_{corr} de de la probeta sin micro-sílice ($1E-02 \text{ mA/cm}^2$), en comparación con la probeta con micro-sílice ($1E-03 \text{ mA/cm}^2$)

Fotografía 7. Varillas del torón al destruir las probetas.



Fotografía 8. Varillas del torón después de limpiarlas utilizadas para las tres relaciones a/c sin micro-sílice.



0.4 sin micro

0.5 sin micro



0.6 sin micro

Fotografía 9. Varillas del torón después de limpiarlas utilizadas para las tres relaciones a/c con micro-sílice.



0.4 con micro



0.5 con micro



0.6 con micro

En las fotografías 7, 8 y 9 se muestran las varillas del torón utilizadas en las probetas de las diferentes relaciones a/c con y sin micro-sílice, donde se observa que no se ha presentado ningún tipo de corrosión directa en la varilla.

5. CONCLUSIONES

- El refuerzo del concreto con relaciones a/c 0.4, 0.5 y 0.6 presentan un comportamiento aleatorio activo-pasivo, frente a la corrosión, durante los 150 días de exposición, donde la relación a/c 0.4 estuvo un mayor tiempo en la zona pasiva.
- De acuerdo con los resultados y las gráficas de Ruido Electroquímico, I_{corr} v.s tiempo, e índice de localización v.s tiempo para los 150 días a los que estuvieron expuestas las probetas el tipo de corrosión fue en algunos rangos de tiempo, generalizada, y en otros casos, mixta, donde no se observó de manera bien definida la iniciación del picado, posiblemente debido a la dificultad en el análisis de los transientes de el tiempo o, a que no se alcanzó el umbral de cloruros necesario para el picado.
- La corriente de corrosión obtenida por las técnicas de RPL y Ruido Electroquímico en general está dentro del mismo orden de magnitud pero en ligeras variaciones en algunos rangos de tiempo durante el ensayo, mostrando unos resultados aleatorios.
- Mediante la utilización de las dos técnicas electroquímicas, RPL y Ruido Electroquímico se comprobó que las probetas con contenido de micro-sílice presentaron valores relativamente bajos de corrosión en comparación con las probetas sin micro-sílice.

6. RECOMENDACIONES

- Extender el tiempo de exposición de las probetas, para observar el comportamiento del refuerzo con la corrosión a tiempos mas largos.
- Realizar ensayos de Ruido Electroquímico variando el tamaño del refuerzo (área superficial) y la relación a/c entre 0.4 y 0.5.
- Utilizar otro tipo de puzolana diferente de la micro-sílice.
- Utilizar la transformada de Wavelet (WT) para el análisis de datos de Ruido Electroquímico con fin de obtener información sobre las variaciones de tiempo y señales no estacionarias y diferenciar de una manera precisa el tipo de corrosión.

6. BIBLIOGRAFIA

- W Inverson “ Transient voltage changes produced in corroding metals and alloys”,en journal of the electrochemical society, vol 115,pp.617-618 ,1968.
- V .Tyagai, N. Lukyanchikova . “Electrochemical noise of iodine reduction on a cadmium sulphide surface,surface” science, vol.12, pp. 331-340, 1968.
- J Goellner. “Elektrochemisches rauchen bei der corrosion” , Werkstoffe und corrosion , vol. 55,pp.727-734, 2004
- R., A Cottis, S Torgoose ,Electrochemical Impedance and Noise; Corrosion Testing Made Easy Series; Ed B Syrett ,NACE, 1999.
- Alonso Cobo Escamilla, 2001. “Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón Armado:Causas y Procedimientos de Rehabilitación”.
- J Uruchurtu –Chavarin, J. M. Malo, “Electrochemical Noise as a Powerfull Electrochemical technique for corrosion studies ”; Research Trends, Trends in Corrosion Research, Vol. 2 ,1997, p.49.
- R. A Cottis; “Interpretation of Electrochemical Noise Data ”;Corrosion, Vol. 57. 3, 2001,p.265.
- D. Eden; “Electrochemical Noise – The First Two Octaves” NACE Corrosion 98,San Diego, 1998, paper 386.
- P. Gu, J.J. Beadoin, M. Zhang, V.M. Malhotra, Performanse of Reinforcing Steel in Concrete Containing Silica Fume And Blast Furnace Slag Pounded Whit Sodium Chloride Solution ACL Materials Journal, 2000.
- H.T Cao, M.Jedy, M. Rahimi, Properties of High Strength Concrete Using Cement Blended Whit Silica Fume, Flay Ash And Blast Furnace Slag,

- Concrete Institute of Australia, concrete ' 89, Australia, Mayo, de 1989.
- N.R. Short, C.L Page, The Diffusion of Chloride Ions Through Portland And Blended Cement Pastes, Silicates Industries , 1982.
- R. E Nunez, E. Maldonado., C. Gaona T, J. Uruchurtu, J. Chacon Nava "Ruido Electroquimico En concretos Con Mezclas Ternarias " Congreso Iberoamericano de METALURGIA Y Materiales 2006 Habana Cuba.
- ASTM C150 – 02 Standard Especification For Poland Cement Test, Vol, 4.01.
- Kelly, Inman y Hudson " Electrochemical Noise Measurement for Corrothion Applications" , ASTM SP- 1277. ASTM , 1996.
- Sharon X, Ling W. "experimental estudy of early age behavior of high performance concrete deck slabs under different curig methods" .Construction and Building Materials Vol. 20 (2006).
- L.R Hilbert. "Monitoring Corrosion Rates and Localized in Low Conductivity Water". Corrosion Science Vol. 48 (2006).
- ASTM C 876-94 American Society of Test and Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Philadelphia, USA(1994).
- Manual de Armaduras de Refuerzo para Hormigón, Fabricación - Instalación – Protección. Carlos Rondon S.M. 1ª Edición: 2.000 ejemplares, Julio de 2005
- K. Hladky, J.L. Dawson ,Corrosion Science 21,4 (1981): p.317.

- M.L. Benish , et al., “ Anew Electrochemical Noise Technique for Monitoring The Localized Corrosion of 304 Stainless Steel in Chloride-Containing Solutions , “Corrosion/98, paper no. 370 ,(Houston TX : NACE International,1998).
- F. Mansfeld and Z . sun,” Localization Index Obtained from Electrochemical Noise Analysis”, Corrosion, vol.55,No. 10, p. 915 , 1999.
- Determination of the Ion Diffusion Coefficient in Moisture and Salt Loaded Masonry Materials by Impedance Spectroscopy.
- JUAN MANUEL LIZARAZO MARRIAGA. Ensayos Típicos en la Determinación de la Durabilidad del Concreto.
- J.M MALO TAMAYO y J.URUCHURTU CHAVARIN. Instituto de Investigaciones Eléctricas. La técnica de Ruido Electroquímico para el Estudio de la Corrosión.
- Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, Aplicación al Contenedor de Residuos Radioactivos de Media Actividad. Alejandro Arva, W. Morris, M. Graciela Alvares. Jornada SAM/ CONAMET/ SIMPOSIO MATERIALES 2003.
- CASTELLOTE, M., ANDRADE, C. y ALONSO, C. (2002). “Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values”. Corrosion Science, Vol. 44, 2409-2424.
- Estudio de la Vida Útil de Estructuras de Hormigón Pretensado Frente a Corrosión por Cloruros. Mariela Cordero. Barcelona, Octubre 2005 Universitat Politècnica de Catalunya Department d`Enginyeria de la Construcció

7. ANEXOS

ANEXO A.

Datos para la elaboración de las probetas sin micro-sílice.

Relaciones Agua-cemento	Agua (Kg)	Cemento (Kg)	Arena (Kg)	Gruesos (Kg)
0.4	0.6930	1.7325	2.5971	2.7984
0.5	0.6930	1.3860	2.5971	2.7984
0.6	0.6930	1.1550	2.5971	2.7984

Fuente: Los Autores

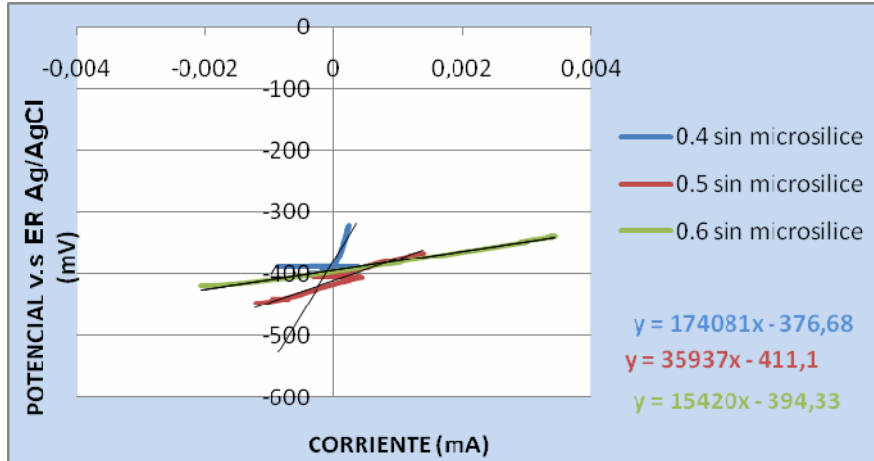
Datos para la elaboración de las probetas con micro-sílice.

Relaciones Agua-Cemento	Agua (Kg)	Cemento (Kg)	Arena (Kg)	Gruesos (Kg)	Microsilice (Kg)	Plastificante (Kg)
0.4	0.6168	1.5419	2.5971	2.7984	0.17325	0.017325
0.5	0.7710	1.5419	2.5971	2.7984	0.17325	0.017325
0.6	0.9251	1.5419	2.5971	2.7984	0.17325	0.017325

Fuente: Los Autores

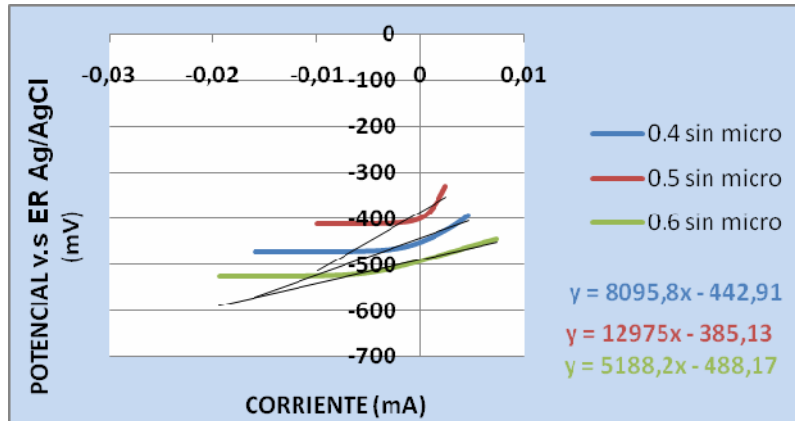
Para la elaboración de estas probetas se utilizó un plastificante para darle mayor fluencia y consistencia a la mezcla.

Anexo B. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 30 días de exposición en la solución.



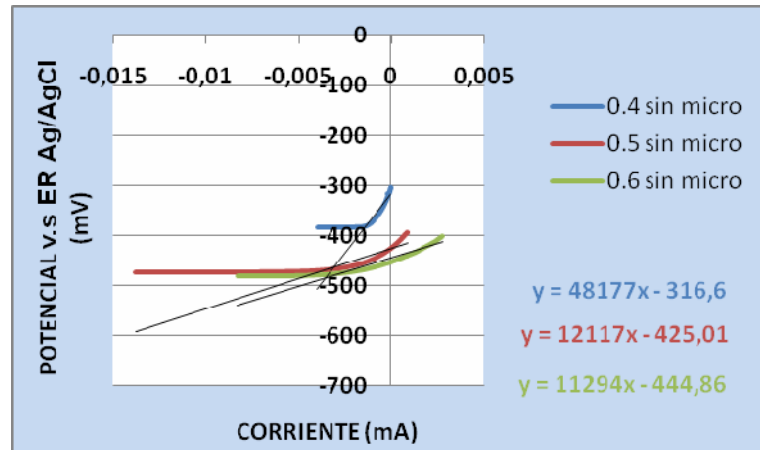
Fuente: Los Autores

Anexo C. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 63 días de exposición en la solución.



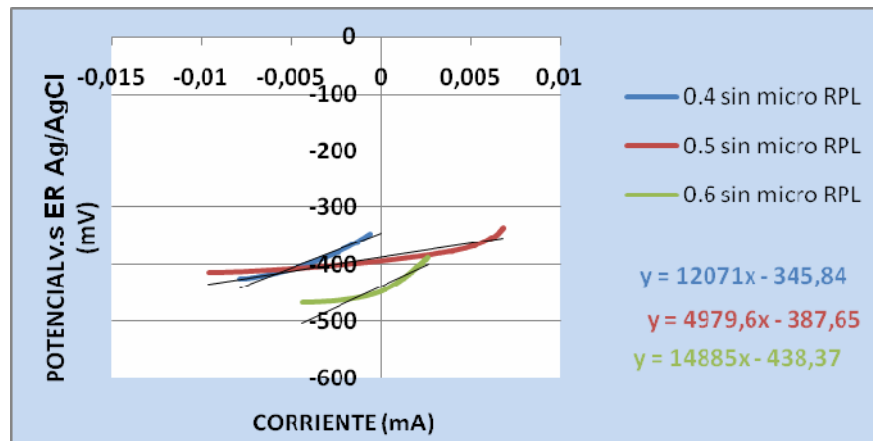
Fuente: Los Autores

Anexo D. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 77 días de exposición en la solución.



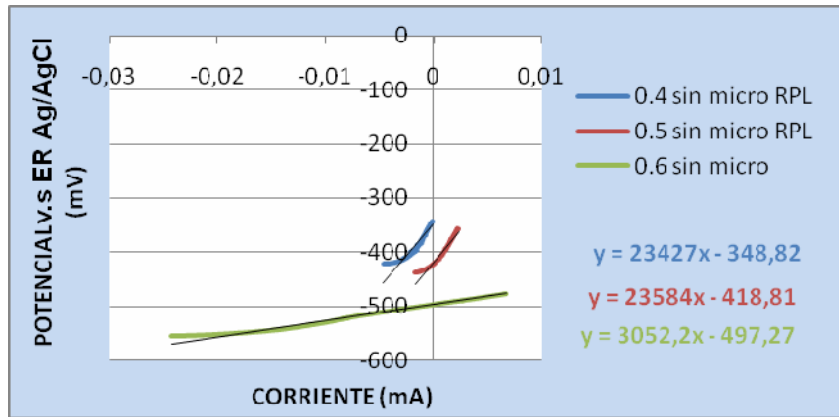
Fuente: Los Autores

Anexo E. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 133 días de exposición en la solución.



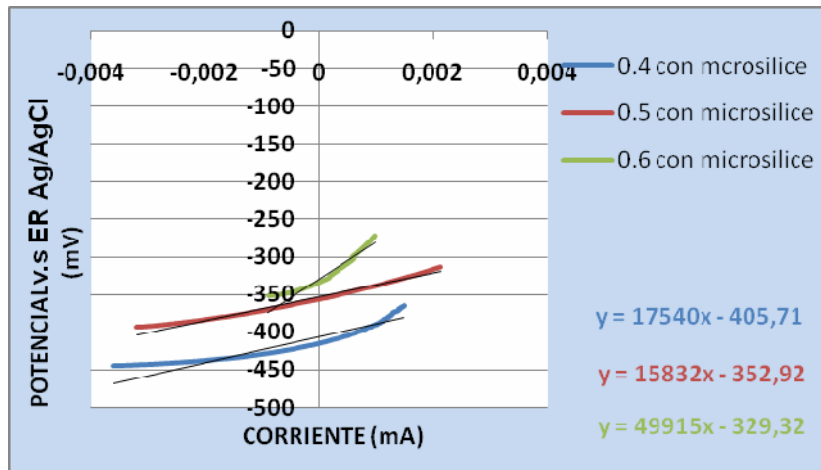
Fuente: Los Autores

Anexo F. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas sin micro-sílice a los 144 días de exposición en la solución.



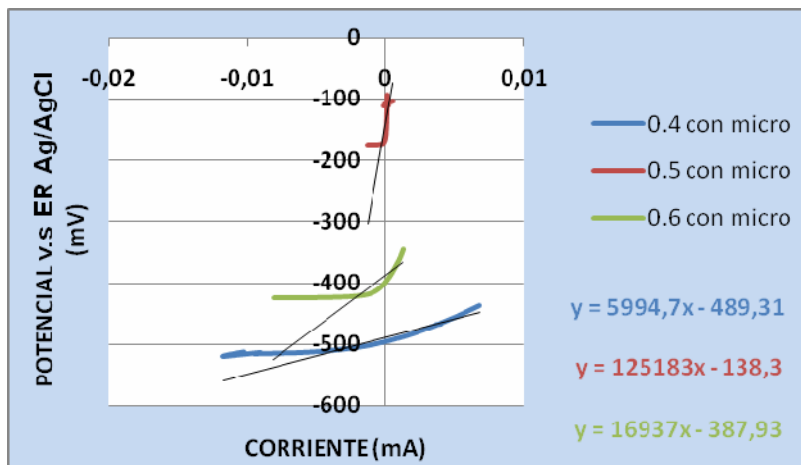
Fuente: Los Autores

Anexo G. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 30 días de exposición en la solución.



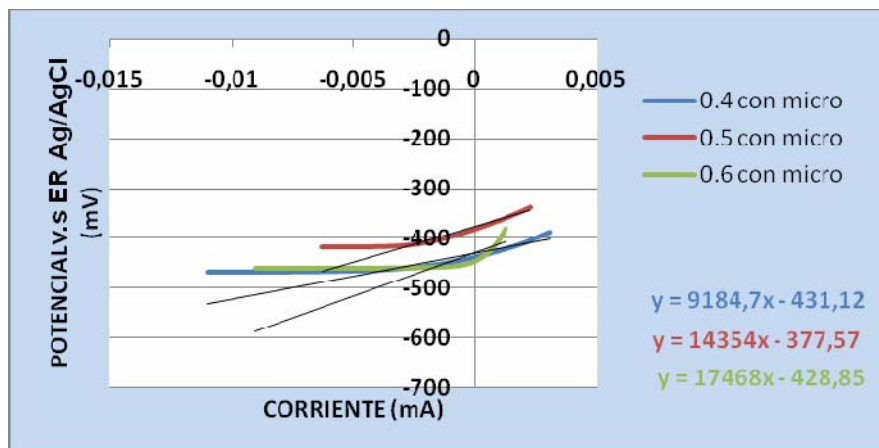
Fuente: Los Autores

Anexo H. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 43 días de exposición en la solución.



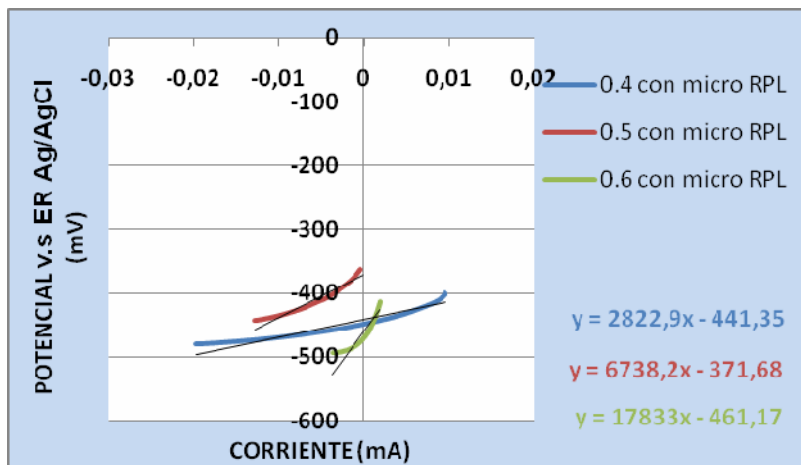
Fuente: Los Autores

Anexo I. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 63 días de exposición en la solución.



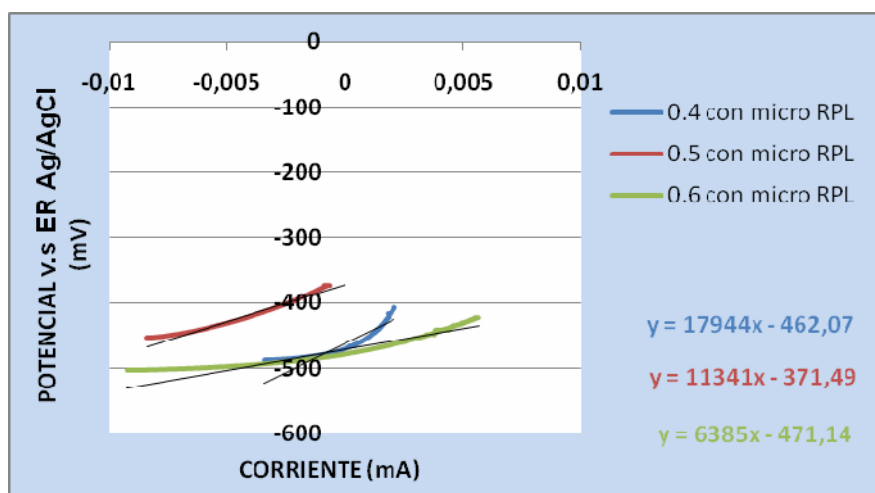
Fuente: Los Autores

Anexo J. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 99 días de exposición en la solución.



Fuente: Los Autores

Anexo K. Gráfica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) para las probetas con micro-sílice a los 144 días de exposición en la solución.



Fuente: Los Autores

Anexo L. Comparación de los valores de I_{corr} entre las técnicas de RUIDO ELECTROQUIMICO, y RPL para las probetas de relación a/c 0.4 sin micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4 sin micro-sílice (RUIDO)	Relación a/c 0.4 sin micro-sílice (RPL)	I_{corr} (mA/cm ²)
23	6,50E-05	6,92E-05	
30	5,93E-05	1,3E-04	
43	6,169E-03	1,213E-03	
63	2,772E-03	2,246E-03	
77	1,098E-03	3,89E-04	
99	8,406E-04	6,687E-04	
120	3,144E-03	6,186E-04	
133	6,093E-03	1,9383E-03	
144	8,403E-04	8,746E-04	
150	2,6263E-03	4,7059E-03	

Fuente: Los Autores

Anexo M. Comparación de los valores de I_{corr} entre las técnicas de RUIDO ELECTROQUIMICO, y RPL para las probetas de relación a/c 0.5 sin micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.5 sin micro-sílice (RUIDO)	Relación a/c 0.5 sin micro-sílice (RPL)	I_{corr} (mA/cm ²)
23	1,048E-03	1,095E-03	
30	2,09E-04	6,27E-04	
43	1,15E-03	4,531E-03	
63	4,24E-04	9,74E-04	
77	2,5E-04	1,23E-03	
99	5,6431E-03	1,7633E-03	
120	6,219E-03	2,3733E-03	
133	1,1673E-03	4,4591E-03	
144	2,5685E-03	9,365E-04	
150	1,2074E-03	1,7046E-03	

Fuente: Los Autores

Anexo N. Comparación de los valores de I_{corr} entre las técnicas de RUIDO ELECTROQUIMICO, y RPL para las probetas de relación a/c 0.6 sin micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.6 sin micro-sílice (RUIDO)	Relación a/c 0.6 sin micro-sílice (RPL)	I_{corr} (mA/cm ²)
23	5,41E-04	8,95E-04	
30	5,58E-04	1,57E-03	
43	9,48E-04	6,497E-03	
63	9,2E-04	4,011E-03	
77	7,55E-04	1,75E-03	
99	4,0413E-03	1,02442E-02	
120	1,18771E-02	8,4099E-03	
133	4,9391E-03	1,2984E-03	
144	1,2227E-03	7,4114E-03	
150	8,4629E-03	8,9485E-03	

Fuente: Los Autores

Anexo O. Comparación de los valores de I_{corr} entre las técnicas de RUIDO ELECTROQUIMICO, y RPL para las probetas de relación a/c 0.4 con micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4 con micro-sílice (RUIDO)	Relación a/c 0.4 con micro-sílice (RPL)	I_{corr} (mA/cm ²)
23	2,84E-04	6,50E-05	
30	3,42E-04	1,184E-03	
43	1,112E-03	2,778E-03	
63	1,264E-03	2,013E-03	
77	2,879E-03	2,63E-04	
99	7,3037E-03	7,9756E-03	
120	1,0816E-03	1,1256E-03	
133	4,0218E-03	9,483E-04	
144	1,7657E-03	1,0394E-03	
150	5,908E-04	4,459E-04	

Fuente: Los Autores

Anexo P. Comparación de los valores de I_{corr} entre las técnicas de RUIDO ELECTROQUIMICO, y RPL para las probetas de relación a/c 0.5 con micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.5 con micro-sílice (RUIDO)	Relación a/c 0.5 con micro-sílice (RPL)	I_{corr} (mA/cm ²)
23	3,9E-04	1,048E-03	
30	1,596E-03	1,5E-03	
43	2,02E-06	6,90E-05	
63	1,423E-03	1,521E-03	
77	1,889E-03	1,836E-03	
99	6,8697E-03	3,4079E-03	
120	1,01984E-02	7,4645E-03	
133	1,02106E-02	2,2629E-03	
144	6,9067E-03	2,065E-03	
150	2,48269E-03	6,9795E-03	

Fuente: Los Autores

Anexo Q. Comparación de los valores de I_{corr} entre las técnicas de RUIDO ELECTROQUIMICO, y RPL para las probetas de relación a/c 0.6 con micro-sílice.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.6 con micro-sílice (RUIDO)	Relación a/c 0.6 con micro-sílice (RPL)	I_{corr} (mA/cm ²)
23	8,75E-04	5,41E-04	
30	1,067E-03	4,38E-04	
43	1,377E-03	9,13E-04	
63	4,64E-04	4,011E-03	
77	2,102E-03	1,206E-03	
99	1,3756E-03	1,1231E-03	
120	2,4641E-03	3,8812E-03	
133	3,78311E-02	4,1162E-03	
144	1,7663E-03	3,2624E-03	
150	3,3599E-03	3,9944E-03	

Fuente: Los Autores

Anexo R. Comparación de los valores de I_{corr} por la técnica RPL para las probetas de relación a/c 0.4.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4 sin micro-sílice	Relación a/c 0.4 con micro-sílice	I_{corr} (mA/cm ²)
23	6,92E-05	6,50E-05	
30	1,3E-04	1,184E-03	
43	1,213E-03	2,778E-03	
63	2,246E-03	2,013E-03	
77	3,89E-04	2,63E-04	
99	6,687E-04	7,9756E-03	
120	6,186E-04	1,1256E-03	
133	1,9383E-03	9,483E-04	
144	8,746E-04	1,0394E-03	
150	4,7059E-03	4,459E-04	

Fuente: Los Autores

Anexo S. Comparación de los valores de i_{corr} por la técnica RPL para las probetas de relación a/c 0.5.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.5 sin micro-sílice	Relación a/c 0.5 con micro-sílice	i_{corr} (mA/cm ²)
23	1,095E-03	1,048E-03	
30	6,27E-04	1,5E-03	
43	4,531E-03	6,90E-05	
63	9,74E-04	1,521E-03	
77	1,23E-03	1,836E-03	
99	1,7633E-03	3,4079E-03	
120	2,3733E-03	7,4645E-03	
133	4,4591E-03	2,2629E-03	
144	9,365E-04	2,065E-03	
150	1,72046E-03	6,9795E-03	

Fuente: Los Autores

Anexo T. Comparación de los valores de I_{corr} por la técnica RPL para las probetas de relación a/c 0.6.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.6 sin micro-sílice	Relación a/c 0.6 con micro-sílice	I_{corr} (mA/cm²)
23	8,95E-04	5,41E-04	
30	1,57E-03	4,38E-04	
43	6,497E-03	9,13E-04	
63	4,011E-03	4,011E-03	
77	1,75E-03	1,206E-03	
99	1,02442E-02	1,1231E-03	
120	8,4099E-03	3,8812E-03	
133	1,2984E-03	4,1162E-03	
144	7,4114E-03	3,2624E-03	
150	8,9485E-03	3,9944E-03	

Fuente: Los Autores

Anexo U. Comparación de los valores de I_{corr} por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO para las probetas de relación a/c 0.4.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.4 sin micro-sílice	Relación a/c 0.4 con micro-sílice	I_{corr} (mA/cm²)
23	6,50E-05	2,84E-04	
30	5,93E-05	3,42E-04	
43	6,169E-03	1,112E-03	
63	2,772E-03	1,264E-03	
77	1,098E-03	2,879E-03	
99	8,406E-04	7,3037E-03	
120	3,144E-03	1,0816E-03	
133	6,093E-03	4,0218E-03	
144	8,403E-04	1,7657E-03	
150	2,6263E-03	5,908E-04	

Fuente: Los Autores

Anexo V. Comparación de los valores de I_{corr} por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO para las probetas de relación a/c 0.5.

Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.5 sin micro-sílice	Relación a/c 0.5 con micro-sílice	I_{corr} (mA/cm ²)
23	1,048E-03	3,9E-04	
30	2,09E-04	1,596E-03	
43	1,15E-03	2,02E-06	
63	4,24E-04	1,423E-03	
77	2,5E-04	1,889E-03	
99	5,6431E-03	6,8697E-03	
120	6,219E-03	1,01984E-02	
133	1,1673E-03	1,02106E-02	
144	2,5685E-03	6,9067E-03	
150	1,2074E-03	2,48369E-03	

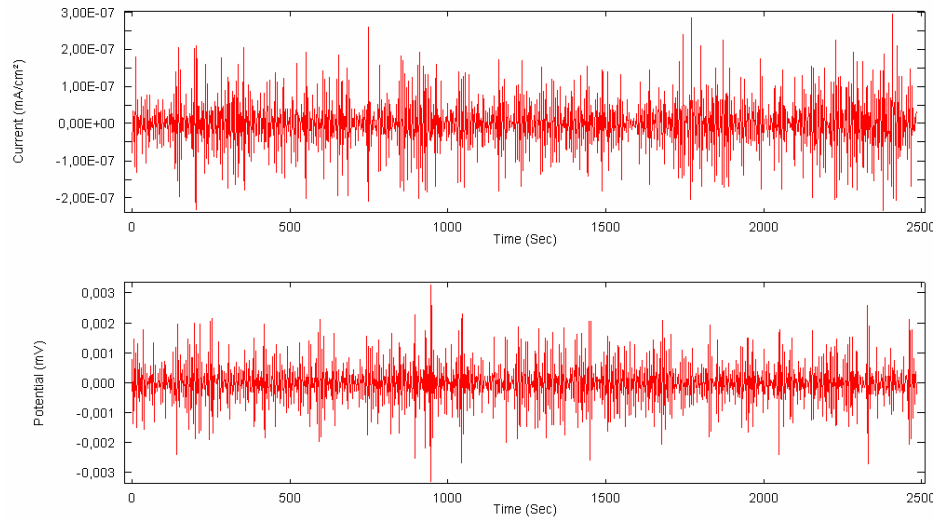
Fuente: Los Autores

Anexo W. Comparación de los valores de I_{corr} por la técnica de RUIDO ELECTROQUIMICO para las probetas de relación a/c 0.6.

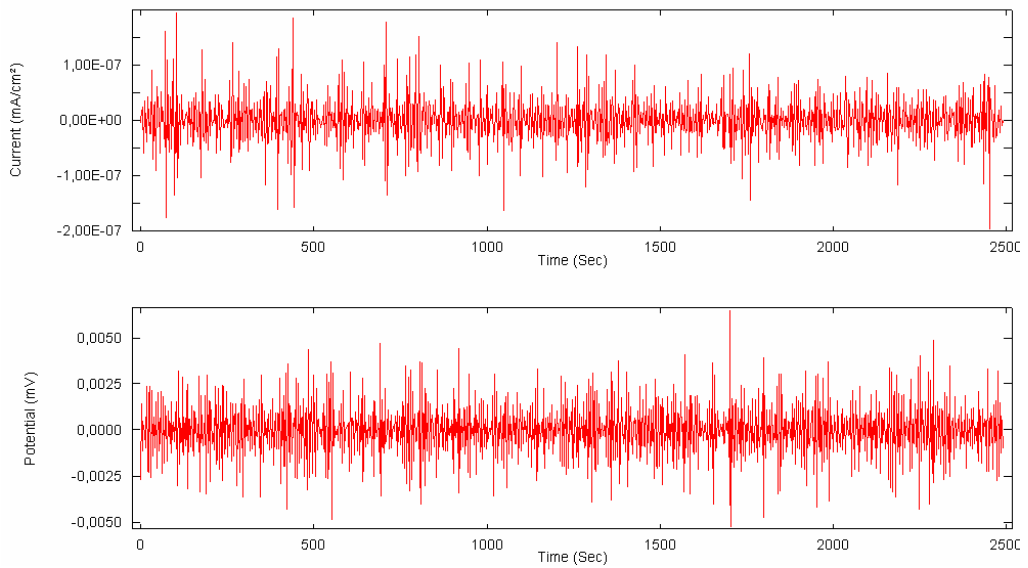
Tiempo de Exposición (Días)	Relación a/c 0.6 sin micro-sílice	Relación a/c 0.6 con micro-sílice	I_{corr} (mA/cm ²)
23	5,41E-04	8,75E-04	
30	5,58E-04	1,067E-03	
43	9,48E-04	1,377E-03	
63	9,2E-04	4,64E-04	
77	7,55E-04	2,102E-03	
99	4,0413E-03	1,3756E-03	
120	1,18771E-02	2,4641E-03	
133	4,9391E-03	3,78311E-02	
144	1,2227E-03	1,7663E-03	
150	8,4629E-03	3,3599E-03	

Fuente: Los Autores

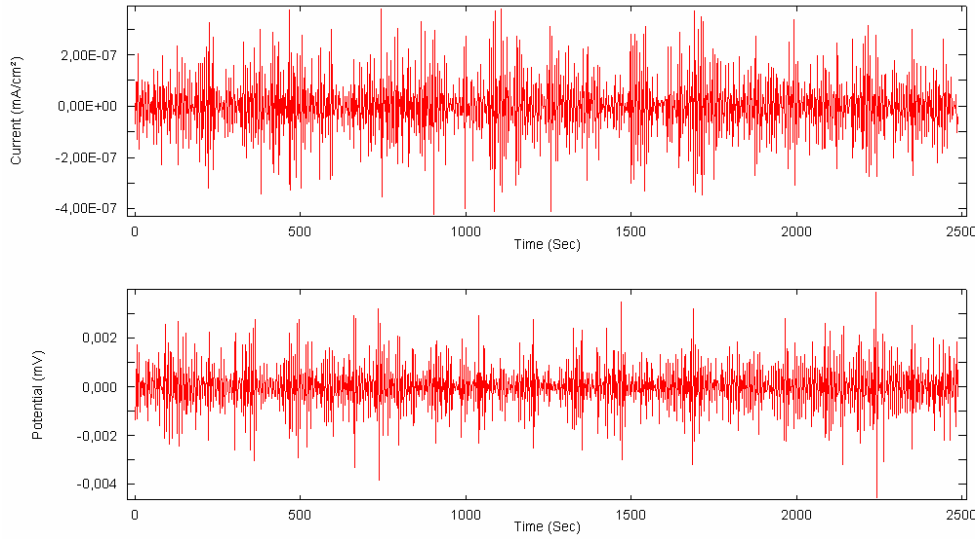
Anexo X. Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta con relación a/c 0.5 sin micro/sílice a los 150 días de exposición.



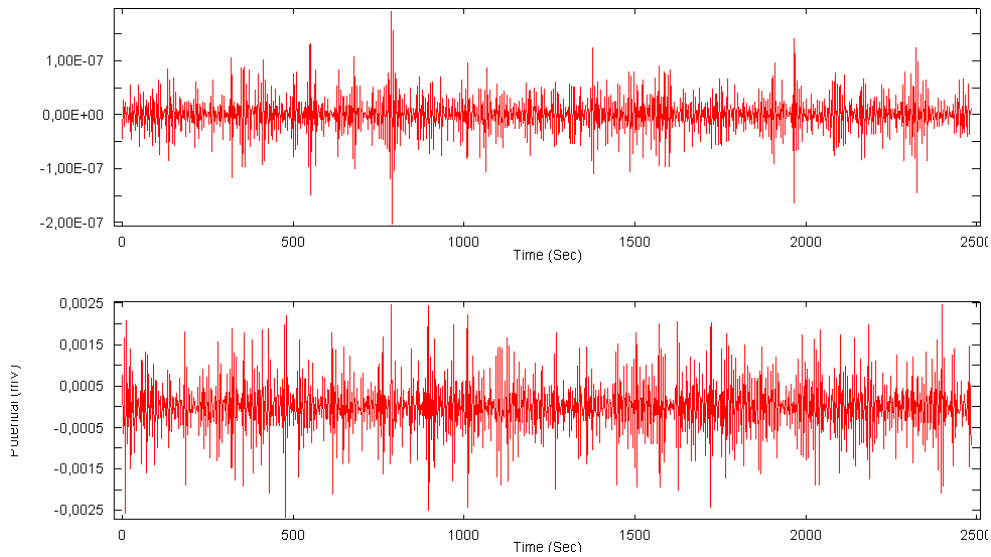
Anexo Y. Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta con relación a/c 0.6 sin micro/sílice a los 150 días de exposición. .



Anexo Z. Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta con relación a/c 0.4 con micro/sílice a los 150 días de exposición.



Anexo Z.1. Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta con relación a/c 0.5 con micro/sílice a los 150 días de exposición. .



Anexo Z.2. Gráfica obtenida por la técnica de Ruido Electroquímico para la probeta con relación a/c 0.6 con micro/sílice a los 150 días de exposición.

