

**EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL CONCRETO SUSTITUYENDO  
PARCIALMENTE EL CEMENTO POR POLVO DE SILICE EN AMBIENTE  
AGRESIVO SIMULADO**

Ing. María Alice Olavarrieta<sup>1</sup>, Ing. Alejandro Giménez<sup>2</sup>, Ing. Humberto Bolognini<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería en Construcción, Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, e-mail: *ingmariaalice@gmail.com*

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería en Construcción, Decanato de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, e-mail: *agimenez@ucla.edu.ve*

**RESUMEN**

En esta investigación se evalúa la actividad electroquímica de concretos elaborados con sustitución parcial del peso del cemento por polvo de Sílice (amorfo) expuestos a un ambiente agresivo aplicando la técnica del rociado. Para ello se aplica lo establecido en el Manual de Inspección y Diagnostico de Estructuras de Concreto Armado del CYTED 1998 haciendo la evaluación electroquímica mediante la medición de potenciales, velocidad de corrosión y resistividad eléctrica. La muestra objeto de estudio estaba constituida por 24 especímenes (cuatro por cada tipo de mezcla) elaborados bajo una relación a/c de 0,45 y 0,65 con porcentajes de sustitución del 10% y 15% para cada relación a/c y siguiendo los lineamientos establecidos en El Proyecto Iberoamericano DURACON. El tiempo de exposición y rociado fue de 105 días realizando durante ese lapso de tiempo mediciones periódicas de potenciales de corrosión para los diferentes espesores de recubrimiento con la finalidad de determinar el estado del acero de refuerzo, de resistividad eléctrica y por ultimo de velocidad de corrosión. Una vez realizado el análisis de los resultados se determina que las mezclas elaboradas con 10% y 15% de sustitución para ambas relaciones a/c resultan de durabilidad inadecuada, recomendando realizar estudios posteriores a mezclas elaboradas con relaciones a/c inferiores a 0,45 bajo los mismos porcentajes de sustitución por ser esa relación la que mostró un mejor desempeño al ser expuesta a este tipo de ambiente.

**Palabras clave:** Polvo de Sílice, Durabilidad, Ambiente simulado agresivo

**INTRODUCCIÓN**

El proceso de producción de cemento y la industria cementera, ha sido ampliamente cuestionada a nivel mundial debido al impacto negativo que ésta genera al medio ambiente, siendo una de las más contaminantes debido a las grandes emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el cual representa uno de los principales causantes del efecto invernadero. Para las empresas del sector construcción, la innovación es una herramienta muy adecuada, la cual hacer frente a los cambios imperativos que sufre el mercado internacional, en especial el venezolano. Algunos incluyen nuevos productos que sustituyen a los utilizados

tradicionalmente, mientras que otros lo hacen desarrollando procedimientos que les permiten mejorar el producto o incluso abaratarlo. La búsqueda de materiales novedosos ha sido siempre un área de gran interés científico y tecnológico desde el punto de vista de la investigación ingenieril, incluyendo su aplicabilidad (específicamente en la industria) cuyo papel representa una estrategia muy importante en el ámbito empresarial.

Ante la necesidad de innovar en un sentido ecológico y técnicamente responsable, desde hace algunos años el Decanato de Ingeniería Civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), específicamente el Departamento de Construcción, maneja líneas de investigación que están ampliamente relacionadas con la sustitución y adición de subproductos a las mezclas tradicionales de concreto, las cuales deben cumplir con todos los ensayos pertinentes para así comprobar su comportamiento satisfactorio ante las diversas condiciones ambientales a las cuales será expuesta y asegurar así a los usuarios las condiciones óptimas de uso.

Esta investigación toma como parte los aportes realizados en el trabajo especial de grado titulado Evaluación de la durabilidad del concreto con sustitución parcial del cemento por polvo de sílice en ambiente acelerado, que se defendió para optar al título de ingeniero civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado por los bachilleres Gustavo Forero y Nilda Meléndez, y que está enmarcado en el proyecto de investigación del CDCHT 004 IC 2015 titulado Evaluación de mezclas de concreto con sustitución parcial del cemento y del agregado fino. Tecnología alternativa durable y sustentable del cual son responsables los profesores María Alice Olavarrieta, Alejandro Giménez y Humberto Bolognini.

## 1. DESARROLLO

Una vez diseñadas las mezclas y elaboradas las probetas de estudio se procede a la exposición en el ambiente marino agresivo simulado y a realizar las mediciones electroquímicas.

### 1.1 Ambiente Marino Simulado

Las probetas fueron expuestas a la simulación de un ambiente agresivo acelerado en la ciudad de Barquisimeto, Estado Lara, específicamente en el techo del Decanato de Ingeniería Civil de la UCLA. La concentración de cloruro de sodio era de 3,5% aplicada con un rociador bajo la técnica del rociado, especificada en la Norma ISO 11474:1998. (Ver Figura 1). La exposición de las probetas se llevó a cabo durante un lapso de 90 días.



Figura 1. Método del rociado.

## 1.2 Evaluación electroquímica de las probetas.

### 1.2.1. Potencial eléctrico.

El objetivo del ensayo de potenciales fue el de conocer la probabilidad de la corrosión de las probetas DURACON. El tiempo de exposición fue de aproximadamente 4 meses y las mediciones del potencial eléctrico fueron realizadas de manera semanal. (Ver Figura 2).



Figura 2. Medición del potencial eléctrico.

### 1.2.2. Velocidad de Corrosión.

La velocidad de corrosión es una prueba que se realiza con el GECOR 6 y su función es determinar la intensidad ( $I_{corr}$ ), o la velocidad con la que la armadura va perdiendo sección por efectos de la corrosión. (Ver Figura 3)



Figura 3. Medición de velocidad de corrosión con GECOR 6.

### 1.2.3. Resistividad Eléctrica.

La resistividad eléctrica se considera como un indicador de la calidad del concreto. Su medición se realiza a través de un instrumento digital (ver Figura 4), basándose en el Método de Wenner, mejor conocido como el Método de los Cuatro Pines.



Figura 4 Medición de la resistividad eléctrica.

## 2. RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados electroquímicos de cada ensayo obtenidos una vez culminado el periodo de exposición en el ambiente agresivo marino simulado.

### 2.1 Potencial eléctrico

Las medidas de se encuentran en la norma ASTM C-876- 87: "Standars Test Meted For Half- Cell Potential Of Uncoated Reinforcing Steel In Concrete" así como también en el Manual Durar.

A continuación se presentan una serie de graficas con los resultados de los promedios de potencial de electrico para ambas caras de la probeta y por cada relación agua-cemento, para así dar a conocer finalmente los comportamientos de las mezclas en función del potencial electroquímico.

Ante la situación planteada se tiene que en la Figura 5 se puede precisar el comportamiento del potencial eléctrico del acero embebido en probetas con tres espesores de recubrimiento, para una relación agua-cemento de 0,65 en un intervalo de 2496 horas. Se puede apreciar de manera inmediata que los tres espesores de recubrimiento presentan un comportamiento similar, sin embargo, al transcurrir el tiempo los potenciales iban disminuyendo gradualmente hasta alcanzar valores de -0,550 V hasta -0,600 indicando finalmente una probabilidad de corrosión del 90% encontrándose ahora la armadura en un estado activo.

### Potenciales de Corrosión para una relación agua-cemento 0,65.

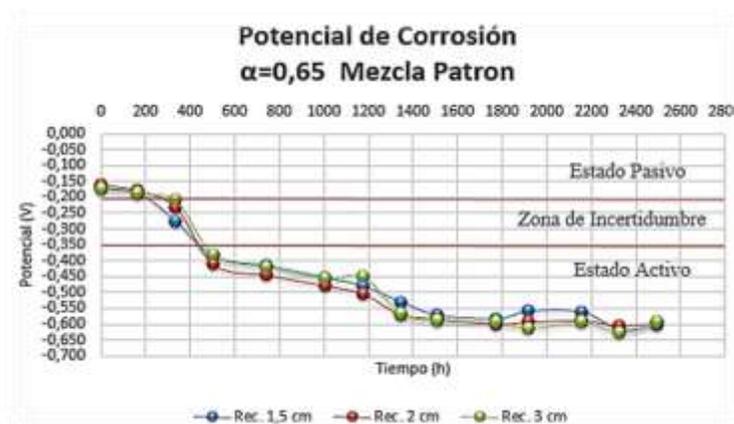


Figura 5. Comportamiento de los tres espesores de recubrimientos para probetas de concreto armado con  $\alpha=0,65$ .

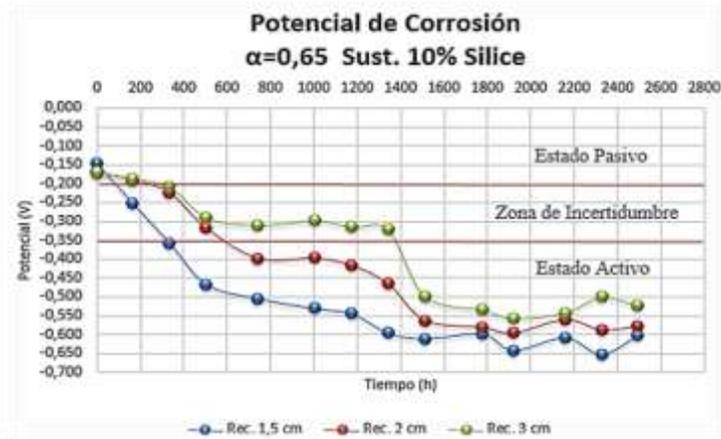


Figura 6. Comportamiento de los tres espesores de recubrimientos para probetas con sustitución de 10% de cemento por polvo de sílice y relación  $\alpha=0,65$ .

Seguidamente y con ayuda de la Figura 6 se observa en su comportamiento una evidencia notable en los espesores de recubrimiento indicando una mayor protección al acero de refuerzo.

En último lugar se detalla la Figura 7 en la que se observa que los recubrimientos de 1,5 cm y 2 cm disminuyeron rápidamente a un estado activo entre los (300-450 h) equivalente a 12-18 días de exposición, en cambio el recubrimiento de 3 cm, aunque se mantuvo en la zona de incertidumbre hasta las 1200 h siempre estuvo cercano a la zona activa por tanto el recubrimiento no aportó mucha resistencia.

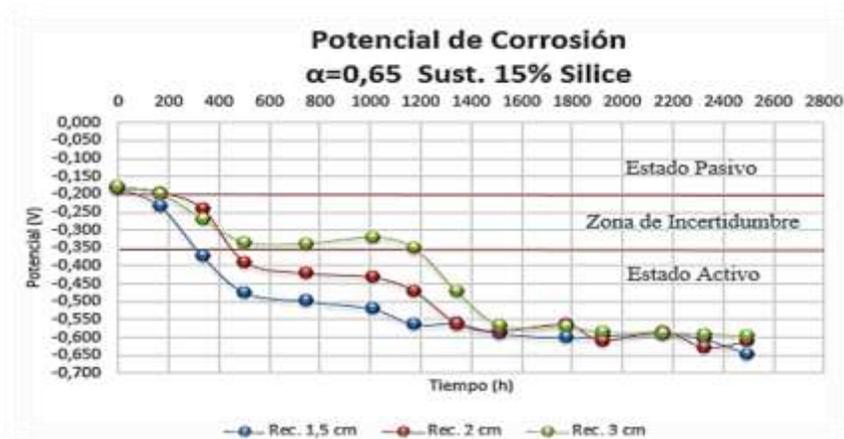


Figura 7. Comportamiento de los tres espesores de recubrimientos para probetas con sustitución de 15% de cemento por polvo de sílice y relación  $\alpha=0,65$ .

**Potenciales de Corrosión para una relación agua-cemento 0,45.**



Figura 8. Comportamiento de los tres espesores de recubrimientos para probetas de concreto con  $\alpha=0,45$ .

En la Figura 8 se detalla que los valores de potencial eléctrico para el recubrimiento de 2 y 3 cm se mantuvieron desde aproximadamente las 200 horas en la zona de incertidumbre durante todo el periodo de estudio, por otra parte, el recubrimiento de 1,5 cm, aunque no cayó de manera drástica tuvo su punto de estado activo a las 1170 horas.

En cuanto a los valores de potencial eléctrico registrados, se puntualiza que al iniciar las mediciones los tres espesores de recubrimiento arrojaron valores cercanos a los -0.200 V indicando una probabilidad de corrosión baja, a medida que transcurría la exposición del ambiente agresivo acelerado los valores de potencial se mantuvieron por encima de los -0.300 V para los espesores de recubrimiento de 2 cm y 3 cm, en cambio para el espesor de recubrimiento de 1,5 cm se llegó a un pico de -0.600 V al final del periodo de exposición indicando la probabilidad del 90 % de corrosión.

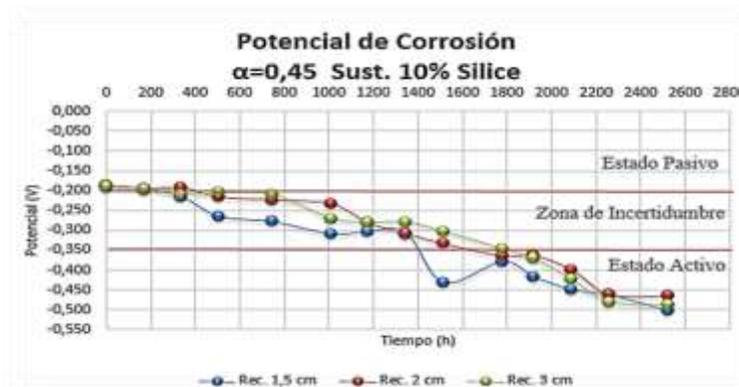


Figura 9. Comportamiento de los tres espesores de recubrimientos para probetas con sustitución de 10% de cemento por polvo de sílice y relación  $\alpha=0,45$ .

En la Figura 9 donde se puede apreciar una tendencia de disminución gradual muy similar para los tres recubrimientos. En cuanto a los valores de potencial, al inicio las mediciones oscilan entre los -0.150 V y -0.200 V para los tres espesores indicando para ese momento una probabilidad del 10% de corrosión, luego de ser sometidas al ambiente de simulación, pasan casi de manera inmediata del estado pasivo a la zona de incertidumbre durante un intervalo entre 1400-1800 equivalente a 59-75 días de exposición, para así finalmente entrar todos al estado activo.

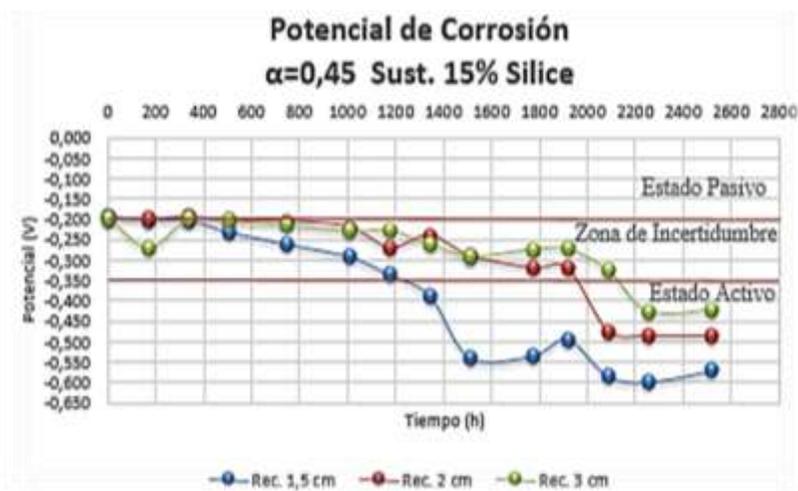


Figura 10. Comportamiento de los tres espesores de recubrimientos para probetas con sustitución de 15% de cemento por polvo de sílice y relación  $\alpha=0,45$ .

En la Figura 10 se observa que los recubrimientos de 2 y 3 cm se mantienen muy cercanos desde el estado pasivo a la zona de incertidumbre llegando al límite a las (1950-2100) horas donde finalmente pasan al estado activo, en cambio para el recubrimiento de 1,5 cm el cual va disminuyendo de forma más rápida consigue entrar con tan solo 1200 horas de exposición.

Para este diseño igual que para los 5 casos anteriores se inició con valores de potenciales que indicaban una probabilidad de corrosión baja, en pocas palabras por encima de -0,200 V seguidamente y con vista a los tres recubrimientos se observa que los valores generados al final rondan por debajo de -0,400 V y por encima de -0,600 V.

## 2.2. Resistividad Eléctrica.

El ensayo de resistividad expresa la calidad del concreto en función del tipo de cemento, adiciones, relación agua-cemento y porosidad en las estructuras y es uno de los parámetros que controlan la velocidad de corrosión en el acero embebido.

A continuación se presentan las evaluaciones de los resultados obtenidos de resistividad eléctrica para las seis (6) mezcla estudiadas.



Figura 11. Comportamiento de probetas con relación agua-cemento de 0,65.

En la Figura 11 para las tres mezclas los valores estuvieron casi en su totalidad por debajo de 10 kΩ.cm y bajo una tendencia similar, esto lo ubica en una zona de alto riesgo a la corrosión. Sin embargo, a las 744 horas se observa un ligero aumento por parte de la mezcla patrón, pero instintivamente vuelve a bajar a la semana siguiente.

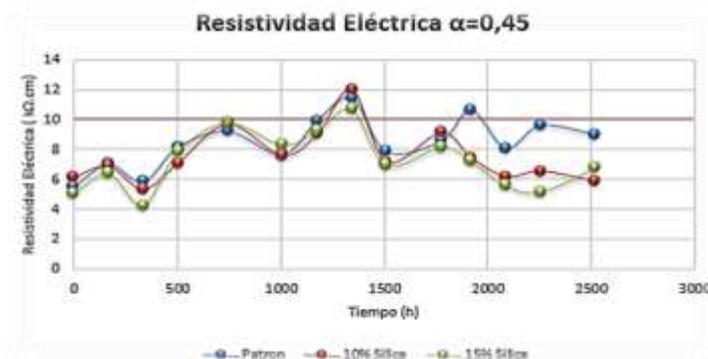


Figura 12. Comportamiento de probetas con relación agua-cemento de 0,45.

Seguidamente, se tiene la Figura 12 las tres mezclas con una tendencia similar, así como también un valor de resistividad por debajo de los 10 kΩ.cm, no obstante, para las 1344 horas se ve un repentino aumento por encima de los (10 kΩ.cm) pero posteriormente vuelve a decaer hasta la zona de alto riesgo de corrosión.

Sobre la base de las consideraciones anteriores, la resistividad eléctrica arrojó resultados que indican la existencia de un alto riesgo a la corrosión para todas las mezclas, en consecuencia, no existió ninguna influencia por parte de la sílice en el concreto.

### 2.3. Velocidad de Corrosión.

La estimación de la velocidad de corrosión sigue los lineamientos establecidos por el Manual Durar. .

De las figuras 13, 14 y 15 se deduce, que por parte del espesor de recubrimiento no hubo ninguna diferencia tangible entre tener mayor recubrimiento de concreto. De la misma

forma en la parte de la sustitución los valores de intensidades de corrosión fueron altos y no estableció una factibilidad en contra la mezcla patrón lo que hace pensar que la relación agua-cemento de 0,65 no juega una ventaja en este tipo de ambiente.

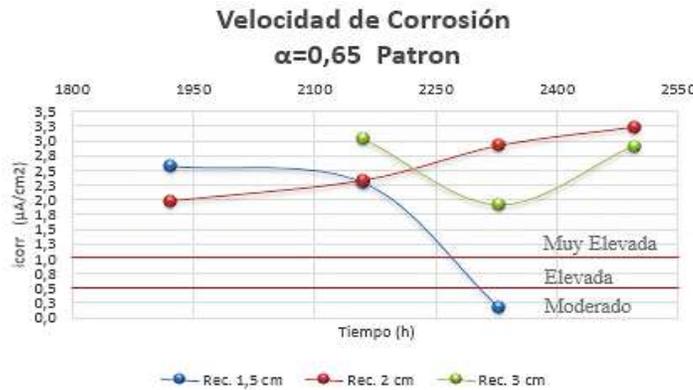


Figura 13 Velocidad de corrosión para los 3 espesores de recubrimientos en probetas con relación a/c= 0,65 sin sustitución.



Figura 14. Velocidad de corrosión para los 3 espesores de recubrimientos para probetas con relación a/c= 0,65 y sustitución de cemento por polvo de sílice de 10%.

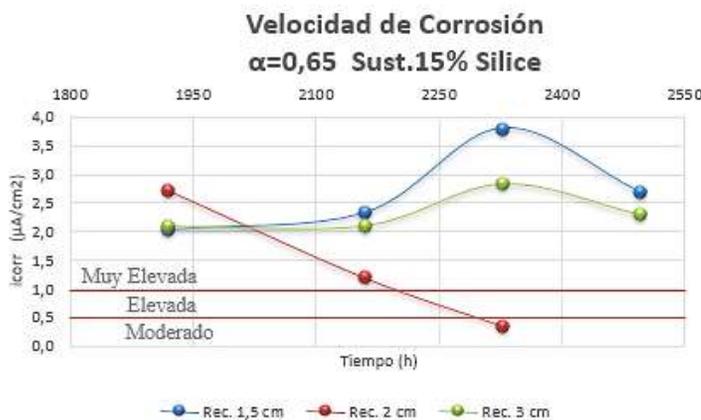


Figura 15 Velocidad de corrosión para los 3 espesores de recubrimientos para probetas con relación a/c= 0,65 y sustitución de cemento por polvo de sílice de 15%.

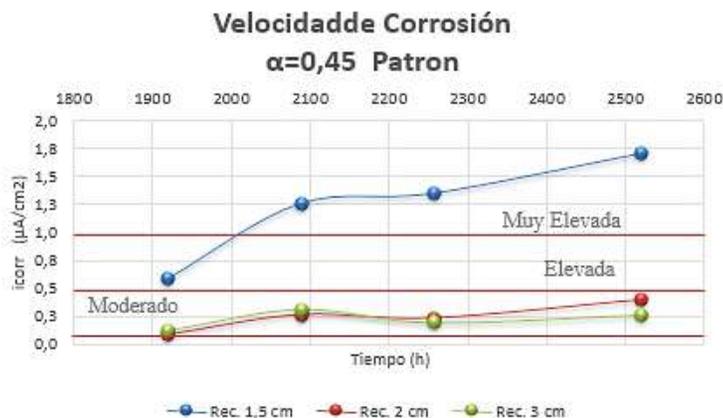


Figura 16. Velocidad de corrosión para los 3 espesores de recubrimientos para probetas con relación  $a/c=0,45$  sin sustitución.

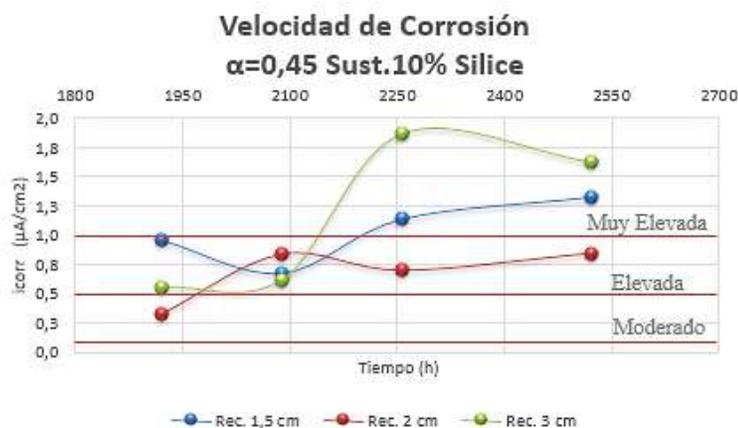


Figura 17. Velocidad de corrosión para los 3 espesores de recubrimientos para probetas con relación  $a/c=0,45$  y sustitución de cemento por polvo de sílice de 10%.

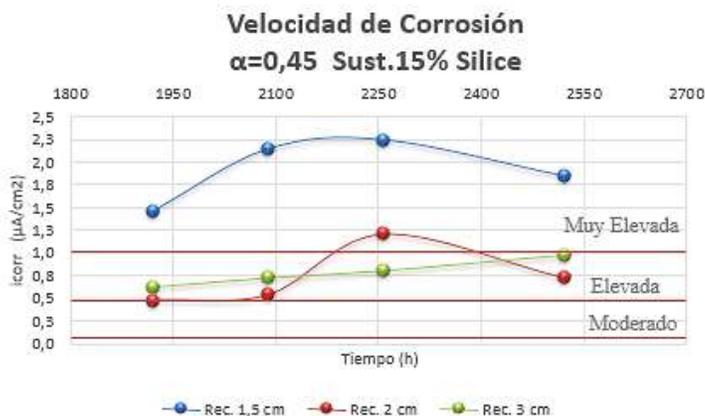


Figura 18. Velocidad de corrosión para los 3 espesores de recubrimientos para probetas con relación  $a/c=0,45$  y sustitución de cemento por polvo de sílice de 15%.

De las graficas 16,17 y 18 se logra ver que el espesor de recubrimiento, tuvo una influencia marcada tanto para la mezcla patrón como para la sustitución de 15 %, donde se refleja el comportamiento esperado. Sin embargo, para la sustitución de 10% se percibe más que todo una mezcla entre ellas. De igual forma se tiene el efecto de la sustitución en donde se aprecian valores con niveles elevados de corrosión entre sus recubrimientos, en comparación con la mezcla patrón que se mantiene el de 2 y 3 cm por debajo de un nivel moderado. Lo cual hace ver una mejoría en cuanto a la relación agua-cemento de 0,45 para el ambiente implementado.

### 3. CONCLUSIONES

En relación a los resultados obtenidos en los ensayos electroquímicos, en donde la relación agua-cemento constituyó una variable importante para el ambiente simulado, se observó que en los resultados aportados por las mezclas de 0,65 las probetas llegaron a activarse en su totalidad, por lo tanto, la muestra que resultó ser la más factible dentro de este reglón fue la de 10% de sustitución de cemento por polvo de sílice, específicamente en el recubrimiento de 3 cm, revelando así que la sustitución intentó mejorar la mezcla, pero el ambiente agresivo conjuntamente con una relación a/c elevada generó como resultado una durabilidad inadecuada.

De manera semejante, entre las mezclas elaboradas con una relación agua-cemento de 0,45 la mezcla patrón consiguió mantener los recubrimientos de 2 y 3 cm dentro de un rango moderado, siendo las únicas de esta relación que no presentaron una activación por el ambiente simulado. No obstante, las sustituciones llegaron a activarse de una manera más lenta que las de 0,65 estableciendo a la de 15% de sustitución de cemento por polvo de sílice como la de mejor comportamiento para este reglón, demostrando que las relaciones a/c menores influyen de mejor manera en la protección de la armadura. De igual forma la durabilidad también resulto inadecuada.

De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando y para ambas relaciones agua-cemento se deduce que las sustituciones con sílice expuesta a un ambiente agresivo acelerado no compatibilizan entre sí, generando una respuesta de durabilidad inadecuada.

A manera de esperar mejores resultados para la protección del acero de refuerzo, mejora de la durabilidad del material y la estabilidad química del mismo se recomienda la caracterización del polvo de sílice en cuanto a sus características de finura y grado de amorficidad para futuras investigaciones.

### 4. AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento a los bachilleres **Nilda Melendez y Gustavo Forero** autores de esta investigación evaluada para obtener el título de Ingeniero Civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.

A la empresa de concreto premezclado **COCIPRE C.A.** por la realización de los ensayos de control de calidad del concreto en estado endurecido.

A la empresa **RIAS C.A** por la donación del polvo de sílice para esta investigación.

## 5. REFERENCIAS

Melendez N, Forero G (2016). Evaluación de la durabilidad del concreto con sustitución parcial del cemento por polvo de sílice en ambiente acelerado. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto – Venezuela.

DURAR (CYTED) (1998) “Manual de inspección evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado”. Madrid – España.

Fondonorma, (2000) “Norma COVENIN 277-2000; Concreto. Agregados. Requisitos”. Caracas - Venezuela.

Fondonorma, (2003) “Norma COVENIN 28:2003; Cemento Portland requisitos (7ma Revisión) (Provisional)”. Caracas - Venezuela.

Fondonorma, (2004) “Norma COVENIN 3134-04; Cemento Portland con adicciones”. Caracas - Venezuela.

“Estudio de la Durabilidad de Concretos Adicionados con Escoria Siderúrgica, con diferentes formas de curado.”

[http://www.ecoingenieria.org/docs/Estudio\\_Durabilidad\\_Concretos\\_Adicionados.pdf](http://www.ecoingenieria.org/docs/Estudio_Durabilidad_Concretos_Adicionados.pdf)

“La sílice y su uso en la industria de la construcción.”

<http://www.quiminet.com/articulos/la-silice-y-su-uso-en-la-industria-de-la-construccion-3452105.htm>

“La Resistividad Eléctrica como parámetro de control del hormigón y su durabilidad.”

<http://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/36554-La-resistividad-electrica-como-parametro-de-control-del-hormigon-y-su-durabilidad.html>

“Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEA.”

<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt2006/07-Tecnologicas/2006-T-067.pdf>  
a la espera de su contribución a lo que promete ser un exitoso evento.