



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS  
Y APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA  
Y CIENCIAS APLICADAS**

**EFECTO DEL PET RECICLADO Y DEL MUCÍLAGO DE  
NOPAL EN LAS PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS  
Y MECÁNICAS DEL CONCRETO.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**MICA. YOHANDRY DÍAZ BLANCO**

**DIRECTORES DE TESIS: DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN  
DRA. ELSA C. MENCHACA CAMPOS**

**SINODALES: DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
DRA. MIRIAN FLORES DOMÍNGUEZ  
DR. ESTEBAN MARTÍNEZ MEZA  
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO  
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN**

**Cuernavaca, Morelos**

**Enero, 2020**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS**

Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



"1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar"

Cuernavaca, Morelos, a 14 de octubre de 2019.

**DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ**  
COORDINADOR DEL POSGRADO EN  
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
**PRESENTE**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "EFECTO DEL PET RECICLADO Y DEL MUCÍLAGO DE NOPAL EN LAS PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS Y MECÁNICAS DEL CONCRETO" que presenta el alumno YOHANDRY DÍAZ BLANCO, para obtener el título de DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ	Aprobado	
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN	Aprobado	
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO	Aprobado	
DRA. MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ (UVM)	Aprobado	
DR. ESTEBAN MARTÍNEZ MEZA	Aprobado	
DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS	Aprobado	
DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

---

## Resumen.

Esta investigación se enfoca al uso de materiales de desecho y naturales tales como: PET (polietilentereftalato) y mucílago de nopal, como agregados que pueden modificar favorablemente las propiedades electroquímicas y mecánicas del concreto. Se elaboraron muestras con diferentes geometrías de PET: fibras largas (FL), rectángulos (R), mezcla de fibra largas + rectángulos (F-R) y fibras cortas (FC). El PET se agregó al concreto como sustituto parcial de la arena con una relación PET/arena en volumen de: 3%/97%, 5%/95% y 8%/92%. En el caso del mucílago de nopal, se diseñaron tres concentraciones cuya relación en peso nopal-agua fue de 1:1, 1:2 y 1:3, obtenidas por dos métodos de extracción diferentes. A partir de los resultados de ambos agregados por separado se determinó el porcentaje y geometrías óptimas de PET, así como la mejor concentración de mucílago de nopal para evaluar su efecto combinado en el concreto. Para realizar el ensayo de resistencia a la compresión ( $F'c$ ) las muestras se curaron durante 28, 42 y 56 días. Para las pruebas electroquímicas las muestras se colocaron en una solución de cloruro de sodio al 3%, simulando un entorno marino. Durante 240 a 300 días todas las muestras fueron evaluadas a través de diversas técnicas electroquímicas como: potencial de media celda (H.C.P.), ruido electroquímico (E.N.), espectroscopía de impedancia electroquímica (E.I.S.) y resistencia a la polarización lineal (L.P.R.). Se observó una disminución en los valores de  $F'c$  con el incremento en porcentaje de PET. Para el mucílago de nopal se observó el efecto retardante de este aditivo en el fraguado del concreto, sin embargo a las 42 y 56 días de curado la concentración 1:3 superó el valor de  $F'c$  de la muestra control. Todas las muestras con agregados de PET y mucílago de nopal, tanto juntos como por separados, alcanzaron valores de potencial más nobles en comparación con la muestra control, así como los valores más altos de resistencia de ruido ( $R_n$ ), resistencia a la polarización ( $R_p$ ) y del módulo de la impedancia IZI. Se obtuvo un circuito equivalente formado por una resistencia, asociada a la solución en los poros del concreto y dos constantes de tiempo, relacionadas con la película pasiva y la doble capa. Se apreció el efecto favorable de los (R), la mezcla de (FL-R) y las (FC) y el mucílago de nopal en los valores de rapidez de corrosión ( $I_{corr}$ ), pues mantienen el acero en el rango de corrosión de despreciable a baja por un mayor período de exposición al medio agresivo.

---

## Abstract.

This research was focused on the use of waste and natural materials such as: PET (polyethylene terephthalate) and nopal mucilage, as aggregates that can favorably modify the electrochemical and compressive strength properties of concrete. Samples with different PET geometries were made: long fibers (FL), rectangles (R), long fiber mix + rectangles (FL-R) and short fibers (FC). PET was added to concrete as a partial substitute for sand with a PET/sand ratio in volume of: 3%/97%, 5%/95% and 8%/92%. In the case of nopal mucilage, three concentrations were designed whose nopal-water weight ratio was 1:1, 1:2 and 1:3, obtained by two different extraction methods. From the results of both aggregates separately, the percentage and optimal geometries of PET were determined, as well as the best concentration of nopal mucilage to assess its combined effect on concrete. To perform the compression resistance ( $F'c$ ) test, the samples were cured for 28, 42 and 56 days. In the case of electrochemical tests, the samples were exposed to solution of 3% sodium chloride, simulating a marine environment. During 240 to 300 days all samples were evaluated through various electrochemical techniques such as: half-cell potential (H.C.P.), electrochemical noise (E.N.), electrochemical impedance spectroscopy (E.I.S.) and linear polarization resistance (L.P.R.). A decrease in  $F'c$  values was observed with the increase in percentage of PET. For the nopal mucilage the retarding effect of this additive was observed in the setting of the concrete, however, at 42 and 56 days after curing, the 1:3 concentration exceeded the value of  $F'c$  of the control sample. All samples with aggregates of PET and nopal mucilage, both together and separately, reached more noble potential values compared to the control sample, as well as higher values of noise resistance ( $R_n$ ), polarization resistance ( $R_p$ ) and the impedance module  $|Z|$ . An equivalent circuit formed by a resistance, associated with the solution in the pores of the concrete and two time constants, related to the passive film and the double layer was obtained. The favorable effect of the (R), the mixture of (FL-R) and the (FC) and the nopal mucilage in the values of corrosion rate ( $I_{corr}$ ) was appreciated, since they keep the steel in the negligible to low corrosion range for a longer exposure period to the aggressive environment.

---

## **AGRADECIMIENTOS:**

Durante estos 4 años de estudio en el posgrado (Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas) muchas personas han estado involucradas directa e indirectamente a este trabajo de investigación. Por lo anterior quisiera agradecer de la manera más atenta a:

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), perteneciente al Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) por permitirme continuar con mi formación académica en el Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de este proyecto de investigación.

A mis directores de tesis, el Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín y la Dra Elsa Carmina Menchaca Campos quisiera agradecerles de la manera más atenta el esfuerzo y dedicación que me brindaron y reconocer que fueron una guía y un apoyo durante estos años. Gracias por todos los conocimientos adquiridos y por cada consejo en cada etapa de este proyecto que enriquecieron mi formación profesional.

A cada uno de los profesores que me impartieron una materia, gracias por el conocimiento aportado y el incentivo en ser un mejor estudiante. A mi comité sinodal, el Dr. José Gonzalo González Rodríguez, a la Dra. Miriam Flores Domínguez y al Dr. Esteban Martínez Meza, por el tiempo dedicado y cada comentario o crítica que fortalecieron los resultados alcanzados en esta investigación. Agradezco a los revisores invitados, el Dr. Arturo Molina

---

Ocampo y el Dr. Juan Carlos García Castrejón, por sus sugerencias y comentarios de la escritura de la tesis, los cuales enriquecieron el trabajo.

A mis amigos y compañeros de estudio del CIICAp y del laboratorio, por el tiempo compartido y el apoyo brindado. A todos mis amigos cubanos en México y en Cuba, en especial a Yohan, Karla, Ana Karelia y Alina J. por su preocupación, por cada momento compartido y por la ayuda incondicional.

Un agradecimiento muy especial, a mi hijo, mi esposa, a mis padres, mi hermana, y el resto de la familia por el apoyo y por el cariño. Por estar siempre tan pendiente de mi vida y levantarme en los momentos más difíciles. Gracias por una familia tan unida y demostrármelo en cada momentos.

A todos MUCHAS GRACIAS.

---

## **DEDICATORIA:**

*Dedicada especialmente a mi madre Efigenia Blanco, que aunque la vida no le dio la oportunidad de verme lograr esta meta tan importante en mi vida, me dio todas las enseñanzas para lograrlo. Donde quiera que estés, sé que eres una luz en mi camino, gracias madre mía.*

A mi hijo Aaron Daniel Díaz, por su alegría y por su amor, por ser la fuerza motriz que me impulsa a seguir luchando y lograr cada uno de mis objetivos.

A mi esposa Carolin, por tantos años de felicidad y tantos momentos difíciles en los que nunca dejé de creer en mí. Por tu apoyo y porque este triunfo es compartido.

A mi padre Roberto Díaz, por ser un guerrero y porque hoy es una muestra fehaciente de lucha y perseverancia. Por todo su amor, por sus consejos y por siempre estar al pendiente de mi vida.

A mi hermana Elizabeth Díaz, que es la persona más fuerte que conozco. Por ser tan importante en vida y estar ahí cuando más la he necesitado. Por su cariño incondicional, y por tanto apoyo durante estos dos años.

A todos mis tíos, en especial a tía Cary y tío Chichi por su preocupación, y por todo el apoyo que como familia me han demostrado.

A todas mis sobrinas Leydi y Baby, y a mis primos Mayito y Antonio, por su cariño y preocupación.

Al resto de la familia, por el cariño dado.

# “ÍNDICE”

---

---

## **Índice.**

**Lista de tablas.....v**

**Lista de figuras.....vi**

**Capítulo 1. Introducción.....1**

1.1 Estado del arte..... 1

1.2 Justificación..... 11

1.3 Hipótesis..... 12

1.4 Objetivos..... 12

• Objetivo general..... 12

• Objetivos específicos..... 13

1.5 Alcance..... 13

**Capítulo 2. Marco teórico..... 15**

2.1 Concreto reforzado..... 15

2.1.1 Cemento Portland..... 15

2.1.2 Concreto..... 15

2.1.3 Durabilidad del concreto reforzado..... 16

2.1.4 Corrosión en el concreto reforzado..... 16

2.2 Técnica de resistencia a la compresión..... 17

2.3 Técnicas electroquímicas para el estudio de la corrosión..... 18

2.3.1 Técnica de potencial de media celda..... 18

2.3.2 Técnica de ruido electroquímico..... 19

2.3.3 Técnica de resistencia a la polarización lineal..... 20

2.3.4 Técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica..... 22

2.4 Técnicas de caracterización..... 24

2.4.1 Técnica de espectroscopía de infrarrojo..... 24



## **“ÍNDICE”**

---

2.4.2	Técnica de difracción de rayos-X. ....	25
<b>Capítulo 3. Materiales y metodología experimental. .. 27</b>		
3.1	Materiales utilizados en el concreto. ....	27
3.2	Reciclado del PET. ....	28
3.3	Extracción del mucílago del nopal. ....	30
	• Macerado a temperatura ambiente. ....	31
	• Macerado utilizando temperatura. ....	32
3.4	Diseño de las probetas. ....	32
3.5	Preparación de las muestras. ....	36
3.6	Ensayo de resistencia a la compresión. ....	39
3.7	Técnicas electroquímicas. ....	39
3.7.1	Medición del potencial de media celda. ....	39
3.7.2	Aplicación de la técnica de ruido electroquímico. ....	40
3.7.3	Aplicación de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica. ....	41
3.7.4	Aplicación de la técnica de resistencia a la polarización lineal. ....	42
3.8	Técnicas de caracterización. ....	43
3.8.1	Aplicación de la técnica de espectroscopía de infrarrojo en el mucílago de nopal. ....	43
3.8.2	Aplicación de la técnica de difracción de rayos-X al concreto con mucílago de nopal. ....	43
3.9	Nomenclatura de las Muestras. ....	44
<b>Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados. .... 45</b>		
4.1	Resultados de técnicas de caracterización. ....	45
4.1.1	Resultados de la técnica de espectroscopía por F.T.IR. para el mucílago de nopal. ....	45
4.1.2	Resultados de la técnica de difracción de rayos-X del concreto con mucílago de nopal. ....	46

## **“ÍNDICE”**

---

---

<b>4.2</b>	<b>Ensayo de resistencia a la compresión.....</b>	<b>50</b>
4.2.1	Resultado de la técnica de resistencia a la compresión para las probetas con agregados de PET.....	50
	• Fallo de las probetas con agregados de PET.....	52
4.2.2	Resultado de la técnica de resistencia a la compresión para las probetas con mucílago de nopal.....	54
	• Fallo de las probetas con mucílago de nopal.....	57
4.2.3	Resultado de la técnica de resistencia a la compresión para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal.....	58
<b>4.3</b>	<b>Técnicas electroquímicas y de observación visual.....</b>	<b>60</b>
4.3.1	Resultados de la técnica de potencial de media celda.....	60
	• Probetas con agregados de PET.....	60
	• Probetas con mucílago de nopal.....	62
4.3.2	Resultados de la técnica de ruido electroquímico.....	64
	• Probetas con agregados de PET.....	64
	• Probetas con mucílago de nopal.....	68
4.3.3	Resultados de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica.....	72
	• Probetas con agregados de PET.....	72
	• Probetas con mucílago de nopal.....	78
4.3.4	Resultados de la técnica de resistencia a la polarización lineal.....	83
	• Probetas con agregados de PET.....	83
	• Probetas con mucílago de nopal.....	87
4.3.5	Resultados a partir de la observación visual de las barras de acero.....	90
	• Probetas con agregados de PET.....	90
	• Probetas con mucílago de nopal.....	92
4.3.6	Resultados electroquímicos para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal.....	94
	• Potencial de media celda.....	94
	• Ruido electroquímico.....	95
	• Espectroscopía de impedancia electroquímica.....	98
	• Resistencia a la polarización lineal.....	105
	• Observación visual de las barras de acero.....	107

## “ÍNDICE”

---

<b>Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones. ....</b>	<b>109</b>
Conclusiones.....	109
Recomendaciones.....	112
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>113</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>126</b>

## **“LISTA DE TABLAS”**

---

### **Lista de tablas.**

Tabla 2. 1. Criterio de probabilidad de corrosión del acero de refuerzo relacionado con la medición del potencial de corrosión.....	18
Tabla 2. 2. Tabla de valores de índice de localización y tipo de corrosión.....	20
Tabla 2. 3. Intervalos de rapidez de corrosión relacionados con el grado de corrosión del acero en el concreto en términos de vida útil.....	22
Tabla 3. 1. Dosificación de los materiales.....	28
Tabla 3. 2. Nomenclatura de todas las muestras analizadas.....	44
Tabla 4. 1. Valores de intensidad relativa a los 28 días de curado.....	47
Tabla 4. 2. Valores de intensidad relativa a los 42 días de curado.....	48
Tabla 4. 3. Valores de intensidad relativa a los 56 días de curado.....	50
Tabla 4. 4. Valores de $F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) para las muestras con PET a los 28 días de curado del concreto.....	50
Tabla 4. 5. Valores de $F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) para las muestras con mucílago de nopal a los 28 días de curado del concreto.....	54
Tabla 4. 6. Valores de $F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) para las muestras con mucílago de nopal a los 42 días de curado del concreto.....	55
Tabla 4. 7. Valores de $F'c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) para las muestras con mucílago de nopal a los 56 días de curado del concreto.....	55
Tabla 4. 8. Valores de resistencia a la compresión de muestras con PET + mucílago de nopal a los 28 días de curado del concreto.....	59
Tabla 4. 9. Parámetros electroquímicos obtenidos de la simulación.....	101

## **“LISTA DE FIGURAS”**

---

### **Lista de figuras.**

Figura 3. 1. Reciclado del PET. ....	28
Figura 3. 2. PET, fibras largas. ....	29
Figura 3. 3. PET, fibras cortas. ....	30
Figura 3. 4. PET, partículas rectangulares. ....	30
Figura 3. 5. a) Hojas de nopal en estado fresco, b) Macerado a temperatura ambiente, c) Macerado aplicando temperatura y d) Filtrado del mucílago de nopal. ....	30
Figura 3. 6. Proceso de obtención del mucílago de nopal. ....	31
Figura 3. 7. Diagrama de flujo del diseño de las probetas con PET. ....	32
Figura 3. 8. Diagrama de flujo del diseño de las probetas con mucílago de nopal...	33
Figura 3. 9. Diagrama de flujo del diseño de las probetas con PET + mucílago de nopal.....	34
Figura 3. 10. Probetas para el ensayo de resistencia a la compresión. ....	35
Figura 3. 11. Dimensiones de las probetas para las pruebas electroquímicas. ....	36
Figura 3. 12. a) Barras de acero sin tratamiento superficial, b) Barras de acero recubiertas con cinta adhesiva y c) Muestra de concreto con tres electrodos. ....	37
Figura 3. 13. a) Probetas parcialmente sumergidas en una solución de cloruro de sodio al 3%. ....	38
Figura 3. 14. a) Probetas a los 28 días de curado, b) Ensayo de compresión y c) Fallo de la probeta después de realizada la prueba. ....	39
Figura 3. 15. Medición de potencial de media celda a los electrodos de acero. ....	40
Figura 3. 16. Medición de ruido electroquímico.....	41
Figura 3. 17. Esquema de la celda para la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica. ....	42
Figura 3. 18. Aplicación de la Resistencia a la Polarización Lineal.....	42
Figura 4. 1. Diagramas de transmitancia para las siguientes elementos: a) nopal, b) mucílago de nopal puro, c) concentración de mucílago 1-3 y d) concentración de mucílago 1-3T.....	45

## **“LISTA DE FIGURAS”**

---

Figura 4. 2. Difractogramas de rayos-X de las siguientes muestras, a los 28 días de curado: a) CO, b) CO+1-1N y c) CO+1-3N.....	47
Figura 4. 3. Difractogramas de rayos-X de las siguientes muestras, a los 42 días de curado: a) CO, b) CO+1-1N y c) CO+1-3N.....	48
Figura 4. 4. Difractogramas de rayos-X de las siguientes muestras, a los 56 días de curado: a) CO, b) CO+1-1N y c) CO+1-3N.....	49
Figura 4. 5. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de muestras con diferentes geometrías de PET. ....	52
Figura 4. 6. Tipo de fallo de muestra control. ....	52
Figura 4. 7. Tipo de fallo de las probetas con 3% de PET. a) Probeta con fibras largas, b) Probeta con fibras cortas, c) Probeta con fibras largas + rectángulos, y d) Probeta con rectángulos. ....	53
Figura 4. 8. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de las muestras con mucílago de nopal a los 28 días de curado. ....	56
Figura 4. 9. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de las muestras con mucílago de nopal a los 42 días de curado. ....	56
Figura 4. 10. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de las muestras con mucílago de nopal a los 56 días de curado. ....	57
Figura 4. 11. Tipo de fallo de la muestra control. ....	57
Figura 4. 12. Tipo de fallo de las probetas con mucílago de nopal obtenido por maceración a temperatura ambiente: a) CO+1-1N, b) CO+1-2N, y c) CO+1-3N.....	58
Figura 4. 13. Tipo de fallo de las probetas con mucílago de nopal obtenido por maceración aplicando temperatura: a) CO+1-1NT, b) CO+1-2NT, y c) CO+1-3NT. ....	58
Figura 4. 14. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de muestras con PET + mucílago de nopal a los 28 días de curado.....	60
Figura 4. 15. Variación del potencial de media celda en función del tiempo para las probetas con PET y la muestra control. ....	61
Figura 4. 16. Variación del potencial de media celda en función del tiempo para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control. ....	63
Figura 4. 17. Gráfica de valores de la desviación estándar del ruido en corriente $\sigma_i$ , a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b)	

## **“LISTA DE FIGURAS”**

---

Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control. .....	65
Figura 4. 18. Gráfica de valores de $R_n$ , a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.....	66
Figura 4. 19. Gráfica de valores de L.I., a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.....	67
Figura 4. 20. Gráfica de valores de $\sigma_i$ , para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.....	69
Figura 4. 21. Gráfica de valores de $R_n$ , para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.....	70
Figura 4. 22. Gráfica de valores de L.I., para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.....	71
Figura 4. 23. Diagrama de Nyquist para las muestras con PET y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28. ....	72
Figura 4. 24. Diagrama de Nyquist para las muestras con PET y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160. ....	73
Figura 4. 25. Diagrama de Nyquist para las muestras con PET y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300. ....	74
Figura 4. 26. Diagrama de Bode para las muestras con PET y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28. ....	75
Figura 4. 27. Diagrama de Bode para las muestras con PET y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160. ....	76
Figura 4. 28. Diagrama de Bode para las muestras con PET y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300. ....	77
Figura 4. 29. Gráfica de valores de impedancia total ( $Z$ ) en función del tiempo para a) Probetas con fibras largas, rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.....	77
Figura 4. 30. Diagrama de Nyquist para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28. ....	78

## **“LISTA DE FIGURAS”**

---

Figura 4. 31. Diagrama de Nyquist para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160.....	79
Figura 4. 32. Diagrama de Nyquist para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300.....	80
Figura 4. 33. Diagrama de Bode para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28. ....	80
Figura 4. 34. Diagrama de Bode para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160.....	81
Figura 4. 35. Diagrama de Bode para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300.....	82
Figura 4. 36. Gráfica de valores de impedancia total (Z) en función del tiempo, para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control. ....	82
Figura 4. 37. Gráfica de valores de $R_p$ en función del tiempo para a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control. ....	83
Figura 4. 38. Gráfica de valores de $I_{corr}$ en función del tiempo para a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control. ....	85
Figura 4. 39. Gráfica de correlación entre los valores de $R_n$ y $R_p$ para las muestras con PET. ....	86
Figura 4. 40. Gráfica de valores de $R_p$ en función del tiempo para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control. ....	87
Figura 4. 41. Gráfica de valores de $I_{corr}$ en función del tiempo para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control. ....	88
Figura 4. 42. Gráfica de correlación entre los valores de $R_n$ y $R_p$ para las muestras con PET. ....	89
Figura 4. 43. Varillas de acero de la muestra control, extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo.....	90
Figura 4. 44. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con fibras largas de PET; a) CO+3%FL, b) CO+5%FL y c) CO+8%FL. ....	90



## **“LISTA DE FIGURAS”**

---

Figura 4. 45. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con rectángulos de PET; a) CO+3%R, b) CO+5%R y c) CO+8%R. ....	91
Figura 4. 46. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con fibras largas + rectángulos de PET; a) CO+3%FL-R, b) CO+5%FL-R y c) CO+8%FL-R. ....	91
Figura 4. 47. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con fibras cortas de PET; a) CO+3%FC, b) CO+5%FC y c) CO+8%FC.....	91
Figura 4. 48. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para la muestra control.....	92
Figura 4. 49. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con mucílago de nopal extraído por maceración a temp. ambiente; a) CO+1-1N, b) CO+1-2N y c) CO+1-3N.....	93
Figura 4. 50. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con mucílago de nopal extraído por maceración aplicando temp.; a) CO+1-1NT, b) CO+1-2NT y c) CO+1-3NT. ....	93
Figura 4. 51. Gráfica de valores del potencial de media celda en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control.....	94
Figura 4. 52. Gráfica de valores de $\sigma_i$ en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal en comparación a la muestra control.....	95
Figura 4. 53. Gráfica de valores de $R_n$ en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. ....	96
Figura 4. 54. Gráfica de valores de L.I. en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. ....	97
Figura 4. 55. Circuito equivalente utilizado para la simulación de los datos de EIS.98	
Figura 4. 56. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO para el día 28 de prueba. ....	99
Figura 4. 57. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO+3%R+1-3N para el día 28 de prueba.....	100

## **“LISTA DE FIGURAS”**

---

Figura 4. 58. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO para el día 224 de prueba. ....	100
Figura 4. 59. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO+3%R+1-3N para el día 224 de prueba.....	100
Figura 4. 60. Diagrama de Nyquist para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 1 y b) Día 28. ....	102
Figura 4. 61. Diagrama de Nyquist para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 84 y b) Día 210.....	102
Figura 4. 62. Diagrama de Nyquist para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 224 y b) Día 240.....	103
Figura 4. 63. Diagrama de Bode para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 1 y b) Día 28. ....	104
Figura 4. 64. Diagrama de Bode para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 84 y b) Día 210.....	104
Figura 4. 65. Diagrama de Bode para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 224 y b) Día 240.....	105
Figura 4. 66. Gráfica de valores de $R_p$ en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal en comparación con la muestra control. ....	106
Figura 4. 67. Gráfica de valores de $I_{corr}$ en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal en comparación con la muestra control. ....	106
Figura 4. 68. Gráfica de correlación entre los valores de $R_n$ y $R_p$ para las muestras con la combinación de PET.....	107
Figura 4. 69. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 240 días de exposición al medio agresivo, para las muestras: a) CO, b) CO+3%R+1-3N, c) CO+3%FL-R+1-3N, y d) CO+3%FC+1-3N.....	108

### Capítulo 1. Introducción.

#### 1.1 Estado del arte.

La corrosión del acero de refuerzo es una de las causas más comunes de deterioro de las estructuras de concreto reforzado (Hansson, 1984; Morris *et al.*, 2002; Pech-Canul and Castro, 2002; Trocónis de Rincón *et al.*, 2007). En las últimas décadas numerosas investigaciones se han llevado a cabo en este campo, con la finalidad de encontrar soluciones a esta importante problemática.

Diversos factores influyen en el proceso de corrosión de las armaduras de refuerzo; algunos de ellos están relacionados con las propiedades de los materiales y otros se asocian a factores ambientales tales como: la calidad del concreto y el tipo de acero de refuerzo, así como las condiciones de exposición, la temperatura y la humedad (Valipour, Shekarchi y Ghods, 2014).

Las causas que más afectan la corrosión del acero son (i) la despasivación del acero de refuerzo debido al ataque localizado de los iones cloruro, que ingresan a través de la red de poros del concreto (Montemor, Simões y Ferreira, 2003; Garcés *et al.*, 2008; Morozov *et al.*, 2013) y (ii) la corrosión generalizada debido a un proceso de carbonatación dentro del concreto, debido al dióxido de carbono presente en la atmósfera que ingresa a través de los poros del material y reacciona con la matriz de cemento (Ahmad, 2003; Montemor, Simões and Ferreira, 2003; Morozov *et al.*, 2013; Duarte *et al.*, 2014). En los EE. UU., el daño causado por el proceso de corrosión se traduce en enormes pérdidas económicas que ascienden a unos \$ 276 mil millones de dólares por año (Fajardo, Valdez y Pacheco, 2009).

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

El hormigón ofrece una doble protección al acero de refuerzo. Primero, actúa como una barrera física, aislando el acero de refuerzo del ambiente circundante lo que dificulta la entrada de agentes agresivos. Además, la alta alcalinidad del concreto proporciona un pH entre 12-13, a este pH el acero forma una película pasiva de muy pequeño espesor, impermeable y compacta (Giannotti da Silva and Liborio, 2006; Morozov *et al.*, 2013).

Actualmente, muchas estructuras de concreto pierden estas características a una edad temprana. La durabilidad del concreto reforzado es un factor muy importante en la evaluación de la calidad de una mezcla de hormigón, teniendo en cuenta la relevancia del análisis de costos del ciclo de vida del material. El acceso de agentes agresivos del medio externo tendrá un papel importante en el proceso de deterioro del concreto y es uno de los factores que más impacto tiene en la durabilidad del mismo. Además, las reacciones químicas que se llevan a cabo entre los agentes externos que ingresan a la red de poros del concreto y los principales compuestos del cemento también son de suma importancia (Neves *et al.*, 2015).

Numerosos investigadores han enfocado su esfuerzo en la búsqueda de materiales alternativos, ya sean nuevos o de desecho, naturales o sintéticos que incorporados al concreto puedan alargar la vida útil de las estructuras. Esta creciente necesidad de mejorar la durabilidad del concreto reforzado y también reducir los costos de producción se ha dirigido al uso de diferentes y variadas dosificaciones en mezclas de concreto (Fajardo, Valdez y Pacheco, 2009). Algunos de los materiales que se incluyen en estas mezclas son: yute, bambú, coco, cáscara de arroz, bagazo de caña y aserrín (Martínez-Barrera *et al.*, 2005), así como materiales sintéticos como el poli (alcohol vinílico), polipropileno, polietileno y poliamidas (Martínez-Barrera *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2010; Shi *et al.*, 2012).

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

Desde el siglo XX, los polímeros se han utilizado cada vez más en un amplia gama de productos debido a sus características, que incluyen baja densidad, alta relación resistencia/peso, alta durabilidad, facilidad de diseño, fabricación y bajo costo (Gu y Ozbakkaloglu, 2016). El uso en los últimos años de estos materiales de desecho se origina principalmente por razones ambientales, debido a que los polímeros post-consumo son los residuos más significativos, los cuales tardan cientos de años para su biodegradación. Además, su consumo excesivo causa graves problemas ambientales creados por la disposición de dichos materiales en vertederos, o su flotación en el océano (Fraternali, Spadea y Berardi, 2014).

El PET (tereftalato de polietileno) es uno de los polímeros de consumo más comunes y se emplea ampliamente como materia prima para elaborar productos como botellas para el uso de bebidas y otros bienes de consumo (Kim *et al.*, 2008; Frigione, 2010). Las botellas de PET han reemplazado a las botellas de vidrio como almacenamiento de bebidas debido a su peso liviano, facilidad de manejo y almacenamiento (Frigione, 2010). Sin embargo, el PET puede causar daños al medio ambiente si no se desecha adecuadamente. Estudios sobre el reciclaje de las botellas de PET han indicado que el proceso puede causar considerables problemas ambientales y económicos (Kim *et al.*, 2008). Por otro lado, se ha demostrado que el plástico reciclado se puede usar de manera rentable para la fabricación de agregados de bajo costo y/o fibras de refuerzo de materiales cementosos en la industria de la construcción (Fraternali, Spadea y Berardi, 2014)

No solo los materiales de desecho están siendo comúnmente usados en el concreto para mejorar sus propiedades tales como: resistencia a la corrosión, resistencia a la compresión, así como su durabilidad. En las últimas décadas se han estado analizando diferentes sustancias químicas sobre todo naturales, que agregadas al concreto tiene la capacidad de modificar algunas de sus

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

propiedades. Lo antes mencionado, tiene como fin incorporar a la industria de los aditivos químicos para el concreto otros compuestos más amigables con el medio ambiente tales como: gel de aloe vera (Torres-Acosta y Martínez-Madrid, 2005), extracto de algas marinas (León-Martínez *et al.*, 2014) y mucílago de nopal (Torres-Acosta y Martínez-Madrid, 2005; Torres-Acosta, 2007; Torres Acosta *et al.*, 2010; Ramírez-Arellanes *et al.*, 2012; León-Martínez *et al.*, 2014; Martínez-Molina *et al.*, 2016); destacando las cualidades de este último.

Opuntia ficus-indica (O.F.I., conocida en México como “nopal”) crece en grandes matorrales en ambientes semiáridos y áridos. Pertenece al grupo de las cactáceas; originaria de México, actualmente se cultiva el nopal comercialmente en México, Chile, Argentina, Marruecos, Italia y partes de California, Texas y Florida (Goycoolea y Cárdenas, 2003; Sáenz, Sepúlveda y Matsuhiro, 2004; Martínez-Molina *et al.*, 2016).

El mucílago de Opuntia ficus-indica es un heteropolisacárido de alto peso molecular que presenta significativas propiedades nutricionales y medicinales para el ser humano, así como excelentes características reológicas (Cárdenas, Higuera-Ciapara y Goycoolea, 1997; León-Martínez, Méndez-Lagunas y Rodríguez-Ramírez, 2010; León-Martínez *et al.*, 2011). Se puede encontrar distribuido en casi toda la planta, especialmente en los cladodios y en la fruta. El método de extracción y purificación que se implemente va a depender del origen del mucílago de nopal, aunque existen diferentes métodos para llevar a cabo este proceso (León-Martínez *et al.*, 2011).

Diferentes estudios concuerdan en que los compuestos presentes en el mucílago de nopal son muy variados, pudiéndose encontrar proteínas así como diferentes tipos y composiciones de polisacáridos (Chandra, Eklund y Villarreal, 1998). En general, la composición de carbohidratos en el mucílago

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

contiene proporciones variables de l-arabinosa, d-galactosa, l-ramnosa y d-xilosa como las principales unidades de azúcar (León-Martínez *et al.*, 2011).

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta con el uso del mucilago de nopal en el concreto son sus características de cultivo. El nopal es una planta muy resistente que se puede cultivar en casi cualquier parte del territorio mexicano, además es capaz de soportar climas extremos y no requiere una atención especial para su producción. Por lo anterior, no se estaría privando a la población del consumo de esta importante fuente de vitaminas, todo lo contrario se le estaría dando aún más relevancia a su uso.

Este proyecto de investigación está dirigido al uso de materiales de desecho y naturales en el diseño de mezclas de concreto que sean más amigables con el medio ambiente y a su vez, obtener un material con mejores propiedades electroquímicas y con una mayor durabilidad. Por tales razones, el PET y el mucilago de nopal resultan tener un gran potencial como agregados modificadores de las propiedades del concreto.

En las últimas décadas se han realizado numerosas investigaciones sobre la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, sobre todo para el estudio de la corrosión de las armadura de acero tales como: (i) análisis de los mecanismos de deterioro así como las causas que lo provocan, (ii) estudio de métodos de protección del acero y (iii) desarrollo e implementación de técnicas electroquímicas en el estudio de la corrosión ya sea en laboratorio o en obras construidas (Trocónis de Rincón *et al.*, 2007).

(Poursaee y Hansson, 2007) evaluaron el comportamiento corrosivo del acero de refuerzo en concreto demostrando que el tiempo requerido para que la rapidez de corrosión del acero en el mortero disminuya a una velocidad que se considera generalmente pasiva, es de aproximadamente 7 días. Para el

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

caso de la solución de los poros simulada en el laboratorio, el tiempo es de al menos 3 días de exposición.

Otros autores han analizado la capacidad de protección de morteros a base de cemento Portland modificado con diferentes materiales. Las pruebas se realizaron en una cámara de niebla salina en presencia de CO<sub>2</sub> y/o cloruros. La modificación con humo de sílice y latex acrílico mejoró el desempeño contra ambos tipos de condiciones agresivas. En el caso del cemento Portland modificado con resina de látex acrílico y fibras de plástico, este tuvo un incremento en la resistencia contra la penetración de cloruros, aunque después de la carbonatación del mortero no hay una mejora significativa. Por último la mezcla con látex estireno butadieno tuvo un comportamiento muy pobre contra ambas condiciones agresivas ([Nepomuceno y Andrade, 2006](#)).

Fue evaluado el proceso de corrosión para estimar la vida útil en muestras de concretos, bajo los efectos de diferentes condiciones de exposición (zonas de mareas y salpicaduras) y relaciones agua/cemento (a/c). Los resultados mostraron que la rapidez de corrosión en la zona de salpicadura fue más alta que en la zona de marea y la rapidez de corrosión aumentó con el incremento de la relación a/c ([Valipour, Shekarchi y Ghods, 2014](#)).

En otro estudio se analizó el comportamiento electroquímico en el concreto modificando los siguientes factores: materiales cementosos, relaciones de agua/cemento (a/c), proporciones de agregados finos, espesores de cobertura de concreto y exposición a soluciones de cloruros; a través de la técnica L.P.R. y gravimétricamente con el método de pérdida de peso. Concluyen que existe una correlación lineal entre los valores de la rapidez de corrosión medidos por ambas técnicas, independientemente del espesor de la cubierta, la concentración de cloruro y la calidad del concreto ([Alghamdi y Ahmad, 2014](#)).



## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

Otros autores diseñaron cilindros de concreto reforzado de diferentes calidades para ser expuestos a la atmósfera marina del norte de la Península de Yucatán. Los resultados demostraron que el inicio de la corrosión activa del acero de refuerzo fue más corto y los valores de densidad de corriente de corrosión fueron mayores para las barras de refuerzo en concretos con una alta relación a/c ([Pech-Canul y Castro, 2002](#)).

En muestras de concreto se incorporaron diferentes tipos de materiales carbonosos (grafito en polvo y fibras de carbono de uso general) para evaluar el efecto sobre la corrosión del acero de refuerzo. Del estudio se determinó que las mezclas con materiales carbonosos presentaron una reducción de la permeabilidad y con el aumento del contenido de material de carbono se produce una disminución en el nivel de corrosión ([Garcés et al., 2007](#)).

La corrosión en concreto expuesto a diferentes ambientes agresivos con cloruros, ha sido objeto de estudio para muchos investigadores ([González, Miranda y Feliu, 2004](#); [Leelalerkiet et al., 2004](#); [Pérez-Quiroz et al., 2008](#)). Otros autores han demostrado las ventajas del uso de aceros inoxidables de refuerzo (AISI 304 y 316) en el comportamiento a la corrosión en losas de concreto con diferentes contenidos de cloruro ([García-Alonso et al., 2007](#)). ([Castro, De Rincon y Pazini, 2001](#)) analizaron el comportamiento del concreto expuesto a ambientes marinos tropicales con el objetivo de establecer perfiles de humedad relativa, temperatura, viento y contenido de cloruros para ser usados con propósitos de predicción y modelado.

Los estudios realizados en concreto no solo se enfocan al análisis del proceso corrosivo del acero de refuerzo. En la actualidad, debido a la creciente problemática global respecto a la contaminación del planeta cada vez más las investigaciones en concreto se encaminan a la búsqueda de nuevos materiales reciclados o naturales que aporten mejoras al material.

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

En ese sentido muchas investigaciones se han enfocan al uso del PET reciclado como agregados en una matriz de concreto pudiéndose encontrar una gran variedad de fibras, según su forma, dimensión y esbeltez. De manera general las fibras llegan a tener algunos milímetros de ancho y varios centímetros de largo, garantizando que la longitud de la fibra sea mucho mayor al ancho. Además, las mismas deben ir distribuidas de manera homogénea dentro del concreto (Foti y Paparella, 2014).

(Kim *et al.*, 2008) investigaron el efecto de la superficie de las fibras de PET en términos de adhesión con una matriz de concreto. Los resultados muestran un comportamiento favorable en términos de unión entre el PET y el concreto, especialmente para las fibras en relieve, mientras que la adhesión fue menor para las fibras corrugadas y rectas.

El uso de fibras rectas y circulares obtenidas de botellas de PET de desecho, ha sido objeto de análisis en términos de la ductilidad del concreto. Las pruebas indicaron que ambas geometrías tienen un efecto favorable y probablemente aumentan la ductilidad del material compuesto (Foti, 2011). (Pereira, de Oliveira Junior y Fineza, 2017) investigaron que el volumen de las fibras tiene un efecto directo en la resistencia a la compresión y a la tracción del hormigón, sin embargo, la longitud de las fibras tiene una influencia directa solo en la resistencia a la tracción.

La sustitución de agregados finos por agregados livianos de botellas de PET de desecho (W.P.L.A.) también ha sido objeto de estudio. En el cual, se determinó que la fluidez y el vertido en obra del concreto mejoró con el aumento en la proporción de reemplazo y el contenido de agua. La resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción, y el módulo de elasticidad de las botellas de PET de desecho del concreto agregado liviano (W.P.L.A.C.) se ven afectados por la relación agua/cemento y la relación de reemplazo de W.P.L.A.

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

La densidad disminuye considerablemente para las muestras con mayor reemplazo de agregados en comparación con la densidad del concreto de peso normal (Choi *et al.*, 2005).

Otras geometrías de PET reciclado se han utilizado en muchos estudios para analizar diferentes propiedades del concreto, tales como: partículas trituradas para analizar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, la permeabilidad, la resistencia al impacto y la abrasión (Mohammed, 2017). El comportamiento mecánico del concreto con partículas de PET con un tamaño promedio de 26 mm y 114 mm aproximadamente fue investigado. Los resultados muestran una disminución en la resistencia a la compresión con el aumento en la proporción de volumen y tamaño de las partículas de PET (Albano *et al.*, 2009).

En otro estudio se adicionó el PET reciclado de desechos sustituyendo el 5% en peso del agregado fino en el concreto. En el estudio se determinó que pequeños porcentajes de PET reciclado no afectan la absorción de agua del concreto (Frigione, 2010). Otros autores investigaron las propiedades mecánicas del concreto con la adición de fibras rectas y deformadas con diferentes longitudes de 30 mm y 50 mm. En el estudio concluyeron que la incorporación de fibras en el concreto conduce a una reducción de entre 0.5% y 8.5% de resistencia a la compresión de diseño. Además, la prueba de agrietamiento por contracción plástica arrojó que incluso en las muestras con bajos volumen de fibras se contrarresta la formación y propagación de las grietas (Borg, Baldacchino y Ferrara, 2016).

Más reciente ha sido el uso del mucílago de nopal como aditivo en el concreto para mejorar algunas de sus propiedades tanto en estado fresco como estado endurecido. (Ramírez-Arellanes *et al.*, 2012) analizaron el efecto del mucílago de nopal en pastas de cemento determinando que los tiempo de fraguado se

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

incrementaban con la adición de este aditivo natural. Además, reportaron que existían cambios en la microscopía de las mezclas con mucílago. Otros autores describen que se reducen los tamaños de los cristales de hidróxido de calcio (Chandra, Eklund y Villarreal, 1998) y en presencia de polímeros solubles en agua se modifica la microestructura del concreto (Peschard *et al.*, 2004; Knapen and Van Gemert, 2009; Ramírez-Arellanes *et al.*, 2012).

Se ha descrito la presencia de azúcares en el mucílago y el efecto que tienen estos compuestos como retardadores del fraguado del cemento (Chandra, Eklund and Villarreal, 1998; Ramírez-Arellanes *et al.*, 2012). Los polisacáridos pueden ser absorbidos en los primeros compuestos de hidratos del cemento, formando un recubrimiento menos permeable (Peschard *et al.*, 2004). Otro estudio presenta una explicación similar. Durante el proceso de fraguado de cemento los polímeros solubles en agua pueden ser adsorbidos en las partículas de cemento no hidratado, y relentizar el ataque por el agua (Knapen and Van Gemert, 2009).

Además, el mucílago de nopal puede mejorar diversas propiedades del concreto, muchas de las cuales se relacionan entre si como son: la permeabilidad, resistencia a la compresión, microagrietamiento por secado del concreto, fluidez de la mezcla, absorción de agua, porosidad, entre otras. Todo lo anterior se debe fundamentalmente, a la viscosidad y los polisacáridos presentes en el gel de nopal como lo plantean (Chandra, Eklund and Villarreal, 1998).

Otras investigaciones reportan un aumento en la resistencia a la compresión a los 90 días de curado, con valores superiores a la muestra control (Chandra, Eklund y Villarreal, 1998). Así mismo, en estudios de concreto con agregados en polvo de nopal deshidratado, se determinaron valores superiores a la

## CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”

---

resistencia de diseño a los 120 y 200 días de prueba (Torres-Acosta and Martínez-Madrid, 2005).

Recientes hallazgos sugieren que pequeñas concentraciones de gel de nopal podrían ser útiles como inhibidor de la corrosión para el acero de refuerzo en mortero contaminado con cloruro. (Martínez-Molina *et al.*, 2016) reportaron que hubo una mejora en la durabilidad de los especímenes con gel de nopal, debido a un aumento de la resistencia a la polarización y una disminución del agrietamiento inducido por corrosión.

(Torres Acosta *et al.*, 2010) incorporaron diferentes concentraciones de polvo de nopal deshidratado como aditivo en concreto en relación al peso del cemento (0,10%, 0,25%, 0,5%, y 1,0%). Los resultados indican una mejora en la respuesta electroquímica con la adición del aditivo; así mismo la respuesta mecánica no fue significativa con un aumento del 4% a los 30 días de curado para la mayor concentración de nopal deshidratado.

### 1.2 Justificación.

Como se ha mencionado con anterioridad la corrosión del acero de refuerzo es el principal problema de durabilidad de las estructuras de concreto reforzado. En la actualidad muchas de estas estructuras terminan perdiendo sus propiedades antes del tiempo de vida útil para el cual fueron diseñadas, sobre todo en ambientes muy agresivos. Este parámetro tiene cada vez más relevancia en cada uno de los estudios que se llevan a cabo este material.

Por otra parte, la sociedad no solo en México sino también a nivel mundial enfrenta un grave problema debido a la contaminación ambiental. En ese sentido, la eliminación y gestión de materiales de desechos sólidos, así como

## **CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”**

---

el uso cada vez mayor de nuevos materiales naturales, forma parte fundamental de esta investigación, con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental por PET.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se propone el uso de diferentes geometrías y concentraciones de PET agregados al concreto como sustituto parcial de la arena; así como el uso de un aditivo natural a base de nopal para evaluar propiedades mecánicas y electroquímicas del material compuesto.

### **1.3 Hipótesis.**

A partir de diferentes porcentajes de PET, en forma de fibras largas, fibras cortas, así como partículas de rectángulos y diferentes concentraciones de mucílago de nopal agregados a una matriz de concreto, se pueden mejorar algunas propiedades de este material, tales como: durabilidad en términos de resistencia a la corrosión y su resistencia a la compresión.

### **1.4 Objetivos.**

#### **✚ Objetivo general.**

- Evaluar el efecto de diferentes concentraciones y geometrías de PET, así como un aditivo natural a base de mucílago de nopal en las propiedades mecánicas y electroquímicas del concreto.

## **CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”**

---

### **✚ Objetivos específicos.**

- Analizar el efecto que tienen las fibras y partículas de PET incorporadas al concreto, en las propiedades electroquímicas y de resistencia a la compresión.
- Evaluar la acción de un aditivo natural a base de mucílago de nopal en la microestructura del concreto, así como en la respuesta electroquímica y mecánica del concreto reforzado.
- Analizar el comportamiento electroquímico y mecánico en mezclas de concreto con la adición de ambos agregados en conjunto (PET y mucílago de nopal).

### **1.5 Alcance.**

Este proyecto de investigación estudia varios puntos importantes, los cuales se describen a continuación:

- Se aportará información y datos relevantes sobre el proceso corrosivo del acero de refuerzo en concreto expuesto a un medio agresivo similar al agua de mar. Se utilizarán diferentes técnicas electroquímicas con el fin de establecer una comparación entre ellas y determinar cuáles resultan ser más adecuadas para el estudio de la corrosión en el concreto.
- Además, ante la creciente demanda de encontrar soluciones a los problemas ambientales a los que se enfrenta la sociedad y el planeta; el estudio del PET como agregado en el concreto en diferentes

## **CAPÍTULO 1. “INTRODUCCIÓN”**

---

geometrías y porcentajes es una excelente alternativa para la gestión y eliminación de residuos sólidos de desecho.

- A través de este proyecto se determinarán las cualidades del PET dentro de una matriz de concreto, también se realizará un estudio mecánico y electroquímico del mucílago de nopal como aditivo natural adicionado al concreto. Los aditivos que se usan en el concreto son compuestos químicos muy agresivos y contaminantes, por lo que el estudio de esta solución puede tener un gran impacto al diseñar un material más duradero y amigable con el medio ambiente.



### Capítulo 2. Marco teórico.

#### 2.1 Concreto reforzado.

##### 2.1.1 Cemento Portland.

El cemento Portland es un material que se obtiene como producto de la calcinación de un conjunto de elementos sílico-calcáreos. Estos son sometidos a elevadas temperaturas de alrededor de 1450 grados Celsius. Del producto resultante y a través de un proceso de molienda con la adición de yeso se obtiene el cemento portland (CEMEX). Dentro de los principales compuestos del cemento encontramos las fases de alita ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ) y belita ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ), los cuales constituyen los silicato de calcio (CS). Otras fases presentes son el aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ) y ferrinato de aluminato tricálcico ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Vetter *et al.*, 2019).

##### 2.1.2 Concreto.

El concreto es un material compuesto por diferentes materiales tales como: cemento portland, grava o agregado grueso, arena o agregado fino y agua. Actualmente en su composición puede haber otros materiales adicionales, los cuales son incorporados a la mezcla con el fin de mejorar alguna de sus propiedades, ya sea en estado fresco o sólido.

Una de las cualidades más notorias del concreto es su elevada resistencia a esfuerzos de compresión, en cambio, tiene una baja resistencia a la tracción. Por lo anterior, es necesario reforzar el concreto con barras de acero a fin de garantizar la estabilidad mecánica del material compuesto. De esta manera se

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

forma lo que comúnmente se conoce como concreto reforzado (Aguirre y Mejía de Gutiérrez, 2013).

### 2.1.3 Durabilidad del concreto reforzado.

La durabilidad del concreto reforzado es una de las propiedades más importantes de este material, debido a que engloba una serie de factores y procesos. Desde sus inicios, el diseño de las estructuras de concreto se basaba en su resistencia mecánica (compresión) pero en las últimas décadas la durabilidad de las estructuras ha sido un factor de peso a tener en cuenta en el diseño de estas estructuras (Hernández-Castañeda y Mendoza-Escobedo, 2006). La durabilidad del concreto se define como la resistencia que presenta el material ante la acción de la intemperie, ataque químico, abrasión, o cualquier otro proceso de deterioro que afecte la vida útil del material (ACI, 2008).

### 2.1.4 Corrosión en el concreto reforzado.

La corrosión es un fenómeno natural que se lleva a cabo por reacciones espontáneas de los metales en contacto con el entorno y es inverso al proceso de metalurgia en la producción de estos materiales (Guangling y Ahmad, 1998).

El concreto es material heterogéneo y de alta densidad que debido a sus componentes y su proceso de fabricación presenta una gran cantidad de poros. Esta porosidad constituye la entrada del agua y del oxígeno, así como de otros agentes externos que son los principales causantes de la corrosión en el acero de refuerzo. El agua y el oxígeno, así como iones agresivos pueden difundirse a través de la red de poros del concreto hasta la superficie del

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

refuerzo. Una vez iniciado el deterioro del metal se va formando una herrumbre (óxido no protector) que ocupa un volumen mucho mayor y por consiguiente se fisura y desprende la cobertura de concreto (Genesca y Ávila, 1996).

Dentro de los tipos de corrosión que más afectan al acero de refuerzo en el concreto se encuentran: i) corrosión generalizada, la cual tiene lugar de manera uniforme sobre toda la superficie del acero y es causada por la presencia de CO<sub>2</sub> dentro de los poros del concreto y ii) corrosión localizada que se lleva a cabo solo en algunos puntos de la superficie metálica y se manifiesta sobre todo en ambientes costeros (Winston Revie y Uhlig, 2008).

### 2.2 Técnica de resistencia a la compresión.

La técnica de resistencia a la compresión es una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de las propiedades mecánicas del concreto a nivel mundial. Esta propiedad se puede considerar como la más importante y su ensayo debe ser llevado a cabo en todas las estructuras de concreto, y en todas las etapas de construcción.

Esta prueba mecánica se rige por las normas ASTM C 39/C 39M, y la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE, en las cuales se establecen los requisitos para la determinación de la resistencia de probetas cilíndricas de concreto. La resistencia se calcula de la siguiente manera:

$$f'_c = P/A \quad [2.1]$$

donde: ( $f'_c$ ) es la resistencia característica o de diseño a compresión del concreto en (kg/cm<sup>2</sup>); (P), es la carga máxima de rotura en (kg) y (A), es el área de apoyo de la sección transversal del espécimen en (cm<sup>2</sup>).

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

Las probetas fueron escaladas para evitar un consumo excesivo de material, pues en cada paso de este proyecto se veló por garantizar el menor consumo de energía y materiales.

### 2.3 Técnicas electroquímicas para el estudio de la corrosión.

#### 2.3.1 Técnica de potencial de media celda.

El comportamiento electroquímico del acero de refuerzo en el concreto puede ser estudiado a través de diversas técnicas electroquímicas. Uno de los métodos más ampliamente utilizados para establecer el estado de la corrosión del refuerzo de acero en el concreto es la medición del potencial de media celda o potencial a circuito abierto. (Morris *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2007; Morozov *et al.*, 2013).

Tabla 2. 1. Criterio de probabilidad de corrosión del acero de refuerzo relacionado con la medición del potencial de corrosión.

Criterios de potencial de corrosión		
Potencial de corrosión (mV)		Probabilidad de corrosión
(mV vs. SCE)	(mV vs. CSE)	
> -125	> -200	10%
-126 a -275	-200 a -350	Zona de incertidumbre
< -276	< -350	90%

En la Tabla 2.1 se muestran los rangos de valores del potencial de corrosión para estructuras de concreto reforzado y el criterio de probabilidad de corrosión según la norma ASTM C876 (Morris *et al.*, 2002; Pérez-Quiroz *et al.*,

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

2008). Los valores de potencial están medidos contra un electrodo saturado de calomel (S.C.E.) y un electrodo saturado de cobre (C.S.E.).

### 2.3.2 Técnica de ruido electroquímico.

La técnica de ruido electroquímico es una herramienta muy versátil, la cual ha sido utilizada en las últimas décadas para estudiar la corrosión en diferentes materiales (Uruchurtu-Chavarín y Malo, 1997), incluyendo el acero de refuerzo en concreto (Zhao *et al.*, 2007). Esta técnica provee información sobre el mecanismo de corrosión a partir de las fluctuaciones espontáneas del potencial y la corriente.

Si la corriente en ruido se obtiene como la corriente entre dos electrodos nominalmente idénticos, entonces el ruido en potencial del par de electrodos de trabajo se puede medir con respecto a un electrodo de referencia o un tercero electrodo de trabajo, que representa el método estándar utilizado para medir ruido electroquímico (Cottis, 2001).

Además, una de las ventajas más importantes que esta técnica ofrece es que el sistema no es perturbado por ninguna señal externa de voltaje o corriente durante el tiempo de prueba (Legat, Leban y Bajt, 2004).

La medición simultánea de potencial y corriente permite obtener por analogía con la ley de Ohm la resistencia de ruido electroquímico ( $R_n$ ). Esta resistencia es equivalente a la resistencia de polarización ( $R_p$ ) del metal en algunos sistemas (Girija *et al.*, 2007). La resistencia de ruido se puede obtener por la siguiente expresión, (Gusmano *et al.*, 1997; Girija *et al.*, 2007; Bautista *et al.*, 2010):

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

$$R_n = \sigma_v / \sigma_i \quad [2.2]$$

Dónde, ( $\sigma_v$ ) es la desviación estándar del ruido en potencial y ( $\sigma_i$ ) es la desviación estándar del ruido en corriente.

Muchos procesos corrosivos se desarrollan a través de eventos transitorios independientes, los cuales pueden ser estudiados a través de esta técnica. El tipo de corrosión en el acero de refuerzo puede ser determinado por un parámetro llamado índice de localización (L.I.), a través de la siguiente expresión (Arellano-Pérez *et al.*, 2018):

$$L.I. = \frac{\sigma_i}{I_{rms}} \quad [2.3]$$

Donde,  $\sigma_i$  es la desviación estándar de la corriente y  $I_{rms}$  es el promedio de la corriente al cuadrado. La interpretación de los valores de L.I. para el tipo de corrosión se encuentra expresada en la Tabla 2.2 (Arellano-Pérez *et al.*, 2018).

Tabla 2. 2. Tabla de valores de índice de localización y tipo de corrosión.

Tipo de corrosión	Índice de localización
Localizada	Entre 1 – 0.1
Mixta	Entre 0.1 – 0.01
Generalizada	Entre 0.01 – 0.001

### 2.3.3 Técnica de resistencia a la polarización lineal.

La técnica L.P.R. es una importante herramienta de investigación para el estudio de diferentes fenómenos electroquímicos, además permite estudiar los mecanismos de reacción y la cinética de la corrosión en variados sistemas (Stern y Geary, 1957; Andrade *et al.*, 2001). La técnica es rápida y no invasiva,

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

requiriendo solamente una conexión al acero de refuerzo, (ASTM G-59). El electrodo deberá estar ligeramente polarizado alrededor del potencial libre de corrosión  $E_{corr}$ , aproximadamente entre 20-50 mV (Andrade *et al.*, 2004).

La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) del acero de refuerzo embebido en concreto, se define como la pendiente de la curva de polarización alrededor del potencial de corrosión  $E_{corr}$  (Andrade y Alonso, 1996; Andrade *et al.*, 2004; Poursaee, 2010):

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad [2.4]$$

La  $R_p$  es inversamente proporcional a la rapidez de corrosión  $I_{corr}$  y se relacionan a través de una constante de proporcionalidad B, de acuerdo a Stern-Geary por la siguiente expresión (Hansson, 1984; Andrade y Alonso, 1996; Poursaee, 2010; Andrade y Buják, 2013):

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad [2.5]$$

El factor de proporcionalidad (constante B) varía de 13 a 52 mV. En este estudio sobre el análisis de la rapidez de corrosión del acero de refuerzo en concreto, se aplicó un valor de  $B = 26$  mV (Andrade *et al.*, 2004). Los rangos de valores de rapidez de corrosión en términos de vida útil del acero de refuerzo en el concreto se muestran en la Tabla 2.3 (Andrade y Alonso, 1996).

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

Tabla 2. 3. Intervalos de rapidez de corrosión relacionados con el grado de corrosión del acero en el concreto en términos de vida útil.

$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	C.R. (mm/y)	Nivel de corrosión
< 0.1	<0.001	Despreciable
Entre 0.1 - 0.5	0.001-0.005	De bajo a moderado
Entre 0.5 - 1	0.005-0.010	De moderado a elevado
> 1	> 0.010	Muy elevado

### 2.3.4 Técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica.

La espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica capaz de medir la resistencia de los metales en diferentes entornos agresivos a partir de la respuesta de una señal alterna de potencial o corriente de muy pequeña amplitud. (Morozov *et al.*, 2013). Esta herramienta funciona en el dominio de la frecuencia y se basa en el concepto de que una interface se puede ver como una combinación de elementos de circuitos eléctricos pasivos, es decir, resistencia, capacitancia e inductancia (Montemor, Simões y Ferreira, 2003; Ribeiro y Abrantes, 2016).

Esta herramienta proporciona una gran cantidad de información cuantitativa como: la rapidez de corrosión del acero en el concreto (Giannotti da Silva y Liborio, 2006), características del concreto (Ribeiro and Abrantes, 2016), así como los fenómenos de difusión del transporte de masas a través de la red de poros del concreto y los mecanismos de corrosión (Montemor, Simões and Ferreira, 2003; Morozov *et al.*, 2013). Sin embargo, la interpretación de los resultados puede ser difícil y el uso de un circuito equivalente, que puede cambiar según las condiciones del sistema, hace que la técnica sea más adecuada para estudios de laboratorio (Ribeiro y Abrantes, 2016).



## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

La técnica consiste entonces en la aplicación al electrodo de trabajo de una señal de pequeña amplitud (10-20 mV) de voltaje sinusoidal (o corriente), en un amplio rango de frecuencias. La respuesta en cada frecuencia es otra señal sinusoidal que puede tener amplitud diferente y un cambio de fase con respecto a la señal de entrada (Andrade and Alonso, 1996).

La E.I.S. ofrece algunas ventajas en relación con las técnicas de corriente continua: utiliza señales muy pequeñas de corriente o voltaje que no perturban las propiedades del electrodo a medir (Ribeiro and Abrantes, 2016). Cuando se aplica una corriente alterna a estos elementos, la corriente resultante se obtiene por analogía con la ley de Ohm, por lo tanto, la impedancia que está representada por  $Z$ , mide la relación entre  $\Delta E$  y  $\Delta I$  (Ribeiro and Abrantes, 2016).

La analogía con la corriente directa se da como un límite en el que la frecuencia es cero. Siguiendo la ley de Ohm (Del Valle Moreno, Pérez López and Martínez Madrid, 2001):

$$R = V/I \quad [2.6]$$

$$Z = V_{(w)}/I_{(w)} \quad [2.7]$$

dónde:  $Z$  es la impedancia del circuito,  $V_{(w)}$  es el potencial como función de la frecuencia y la  $I_{(w)}$  es la corriente como función de la frecuencia.

Cuando se aplica la señal de voltaje en corriente alterna, se obtiene una respuesta en corriente de acuerdo a las ecuaciones (Torres Acosta *et al.*, 2006):

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

$$V = V_{m\acute{a}x} * \text{sen}(wt) \quad [2.8]$$

$$I = I_{m\acute{a}x} * \text{sen}(wt + \theta) \quad [2.9]$$

dónde, ( $\theta$ ) es el ángulo de fase y es muy útil para aproximar las características de los elementos eléctricos a diferentes frecuencias.

Existen diferentes formas de interpretar los resultados obtenidos por la técnica EIS, a través del diagrama de Nyquist, donde la impedancia real ( $Z'$ ) se representa en el eje X y la impedancia imaginaria ( $Z''$ ) en el eje Y; y a través del diagrama de Bode, el módulo de impedancia y el ángulo de fase se representan en función de la frecuencia ([Andrade and Alonso, 1996](#)).

### 2.4 Técnicas de caracterización.

#### 2.4.1 Técnica de espectroscopía de infrarrojo.

La técnica de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (F.T.I.R.) es una herramienta muy poderosa para el análisis de grupos moleculares. Se utiliza un haz de luz infrarroja (2.5 a 15  $\mu\text{m}$ ; equivalentes al número de onda comprendido entre 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ ) que al interactuar con las moléculas genera movimientos vibracionales en los enlaces ([Barraza-Garza et al., 2013](#)).

De forma general, la radiación electromagnética puede interactuar con la materia de diversas formas: puede reflejarse, absorberse o transmitirse, o una combinación de ellas ([Mondragón Cortez, 2015](#)). La mayoría de las moléculas tales como lípidos, proteínas, carbohidratos, ácidos nucleicos y otras presentes en una muestra biológica tienen en sus enlaces movimientos vibracionales con frecuencias dentro del infrarrojo medio; asociado a un

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

espectro específico (Barraza-Garza *et al.*, 2013). A partir de los resultados obtenidos por el espectrómetro de infrarrojo, equipo usado para realizar esta prueba de caracterización, es posible obtener un espectro. Este espectro está conformado por bandas o picos, su representación en el eje de las abscisas se compone del intervalo de valores de longitud de onda en número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ); en cambio el eje de las ordenadas está conformado por los valores de intensidad de absorción o transmisión (Mondragón Cortez, 2015).

Cada una de estas bandas corresponde a un movimiento de vibración del estado excitado de uno de los enlaces dentro de la molécula. Se puede definir entonces que el conjunto de ellas constituye la huella dactilar del compuesto (Piqué y Vázquez, 2012); o bien el espectro constituye una representación gráfica de los estados excitados de la materia, producidos después de hacer un barrido que abarca todos los valores de longitudes de onda del infrarrojo medio (Mondragón Cortez, 2015).

### 2.4.2 Técnica de difracción de rayos-X.

La técnica de X.R.D. ha sido ampliamente utilizada en la caracterización de materiales, que cumplen con la condición de tener una estructura cristalográfica definida (Betancourth *et al.*, 2010). Lo anterior se debe a que los rayos-X son ondas electromagnéticas similares a la luz, pero cuya longitud de onda es mucho más corta ( $\lambda = 0.2 - 200 \text{ \AA}$ ) (Jumate y Manea, 2012).

La difracción es un fenómeno físico que tiene lugar cuando determinadas ondas electromagnéticas pueden evitar obstáculos si el tamaño de los obstáculos es similar a la longitud de onda. Se utiliza principalmente para el análisis de materiales cristalinos, ya que los planos atómicos de estos materiales presentan una distancia interplanar similar a las longitudes de los

## CAPÍTULO 2. “MARCO TEÓRICO”

---

rayos-X (Jumate and Manea, 2012). Teniendo en cuenta esto y a partir de la ley de Bragg descrita en la ecuación [2.10], es posible determinar por esta técnica la distancia interplanar de un arreglo atómico determinado, el tipo de estructura cristalina, los planos de difracción, entre otros parámetros.

$$n\lambda = 2D \sin(\theta) \quad [2.10]$$

donde: (n), es un número entero; ( $\lambda$ ), es la longitud de onda de los rayos-X, (D), es la distancia entre los planos de la red cristalina y ( $\theta$ ), no es más que el ángulo formado entre los rayos incidentes y los planos de dispersión (Betancourth *et al.*, 2010).

## **CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”**

---

### **Capítulo 3. Materiales y metodología experimental.**

#### **3.1 Materiales utilizados en el concreto.**

Requerimientos de los materiales empleados para la elaboración de las muestras de concreto:

- Cemento Portland regulado por la norma ASTM C-150.
- Grava con un tamaño máximo de 20 mm y arena fina de piedra triturada, según la norma ASTM-C-33.
- Acero de refuerzo con un diámetro de 3/8" de grado #42.
- PET reciclado a partir de botellas de agua y refresco.
- Hojas de nopal en estado fresco.

Todos los materiales como cemento, arena, grava y acero se encontraban libres de humedad, grasa y residuos contaminantes que pudieran afectar la mezcla de concreto.

En el caso de las varillas de acero, no fue necesario realizar ningún tratamiento superficial debido al perfecto estado de las mismas. Con respecto a las botellas de PET y a las hojas de nopal, se realizó la limpieza de las mismas para su posterior uso en el concreto. Se estableció una resistencia de diseño de  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , partir de la cual se dosificaron lo materiales empleados. Este valor de resistencia es muy utilizado en elementos estructurales de concreto reforzado. Todos los valores de los materiales utilizados se observan en la Tabla 3.1.

### CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

Tabla 3. 1. Dosificación de los materiales.

Material	Características	Cantidad
Cemento	CPC 30R	10.4 kg
Arena	Piedra triturada	19.5 kg
Grava	Tamaño máximo de 20mm	32.2 kg
Agua	Potable	2.35 l
Acero	Grado #42	2.88 m
PET reciclado	Botellas principalmente	318.0 ml o 438.8 g
Nopal	Mucilago de nopal	2.55 l

#### 3.2 Reciclado del PET.

El reciclado del PET se realizó bajo el esquema mostrado en la siguiente figura:

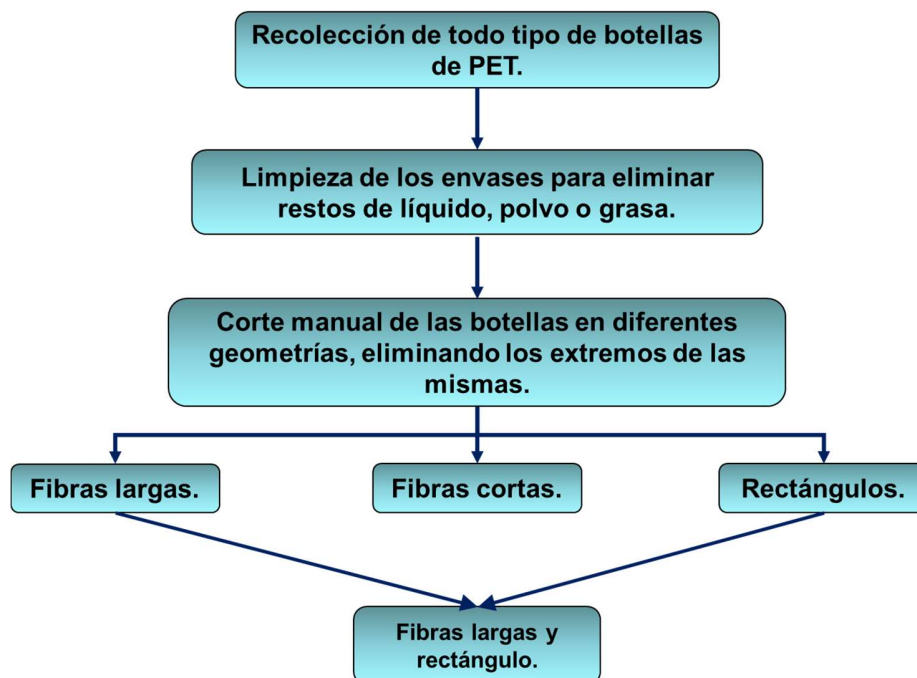


Figura 3. 1. Reciclado del PET.

### **CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”**

---

Se diseñaron 3 geometrías diferentes tales como: fibras largas, fibras cortas y partículas en forma de rectángulos. En el caso de las fibras, se conoce el efecto que tienen las mismas dentro de una matriz de concreto.

En el caso de los rectángulos, su diseño está basado en investigaciones realizadas anteriormente, demostrando su efecto favorable en las propiedades electroquímicas del concreto. Por último, se determinó hacer una mezcla de fibras largas y rectángulos para evaluar el efecto que ambas geometrías podían brindarle al material compuesto.

En las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4, se muestran las imágenes del PET reciclado en las diferentes geometrías. Las fibras largas tienen de 0.5 - 1 mm de ancho y 25 mm de largo; las fibras cortas tienen las siguientes dimensiones, de 2 - 3 mm de ancho y 15 mm de largo; y las partículas de rectángulos tienen de 3 - 4 mm de ancho y largo respectivamente. El PET fue dosificado en el concreto teniendo en cuenta una relación PET/arena en porciento de volumen, tales como: 3%/97%, 5%/95% y 8%/92%.



Figura 3. 2. PET, fibras largas.

## CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

---



Figura 3. 3. PET, fibras cortas.



Figura 3. 4. PET, partículas rectangulares.

### 3.3 Extracción del mucílago del nopal.

El proceso de extracción del mucílago de nopal se llevó a cabo según las Figuras 3.5 y 3.6.

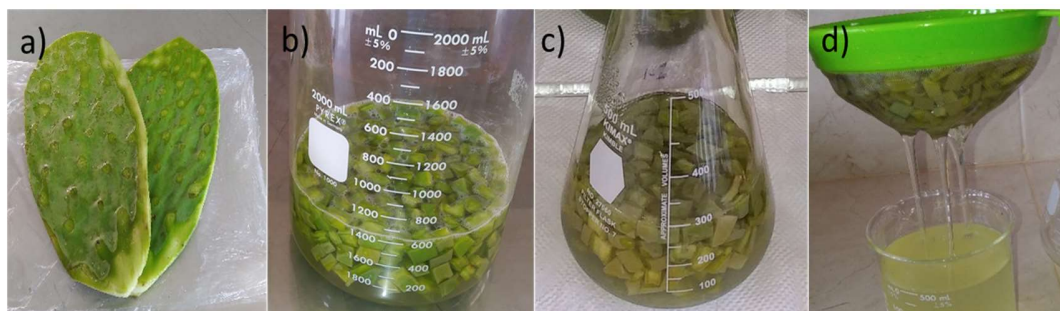


Figura 3. 5. a) Hojas de nopal en estado fresco, b) Macerado a temperatura ambiente, c) Macerado aplicando temperatura y d) Filtrado del mucílago de nopal.



### CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

---

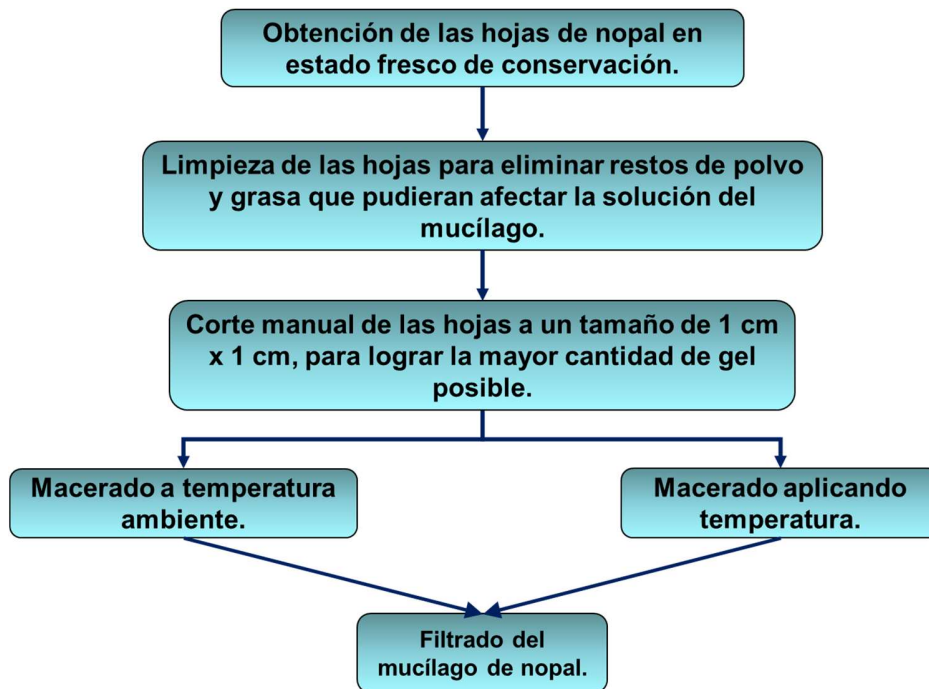


Figura 3. 6. Proceso de obtención del mucílago de nopal.

La extracción del mucílago se realizó a partir de las hojas de nopal con una relación nopal-agua en peso. Otros autores han utilizado esta metodología para extraer el gel de nopal bajo diferentes condiciones. El proyecto en estudio se basó en dos métodos de extracción, los cuales se describen a continuación.

#### ✚ Macerado a temperatura ambiente.

Después de mezclar el agua con el nopal en cada recipiente para obtener la concentración de mucílago deseada, se dejó en reposo a temperatura ambiente por 48 horas. Durante este tiempo la solución no presentaba indicios de descomposición, por lo que se determinó usarla en el concreto.

## CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

### ✚ Macerado utilizando temperatura.

Una vez mezclados el nopal y el agua, se calentó la mezcla hasta alcanzar una temperatura de 95° C por 10 minutos con el objetivo de acelerar el proceso de liberación del gel de nopal. Luego, cada solución estuvo en reposo por 24 horas para ser utilizadas en el concreto.

### 3.4 Diseño de las probetas.

El diseño de las probetas se realizó teniendo en cuenta los siguientes diagramas de flujo mostrado en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9.



Figura 3. 7. Diagrama de flujo del diseño de las probetas con PET.

### CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

Se diseñaron 3 geometrías de PET y una mezcla que contiene fibras largas y partículas en forma de rectángulos, así como la muestra control. Por otro lado, se varió la relación PET/arena en proporción volumen/volumen dando lugar a tres concentraciones de PET de 3, 5 y 8%, con un total de 13 probetas que fueron evaluadas a través de diferentes técnicas electroquímicas. Para las pruebas de compresión se triplicaron las muestras, siendo un total de 39 probetas.

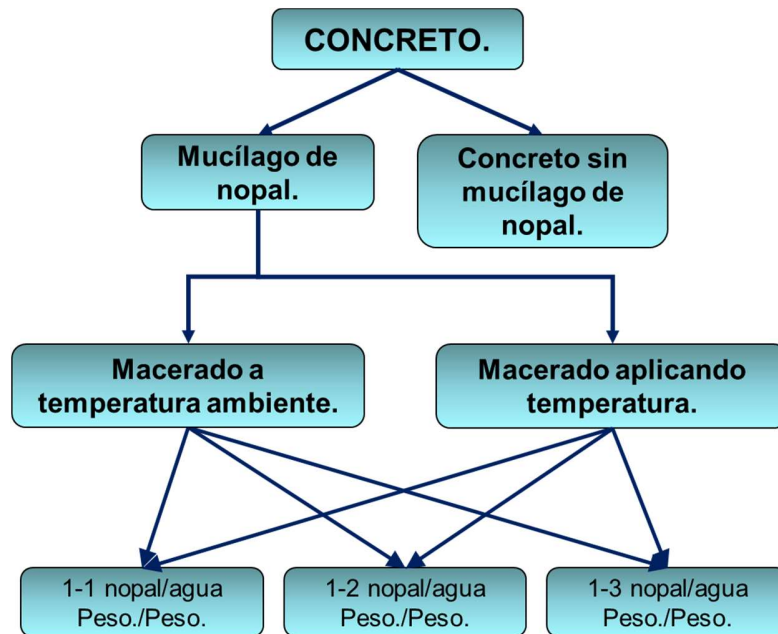


Figura 3. 8. Diagrama de flujo del diseño de las probetas con mucílago de nopal.

El mucílago de nopal se obtuvo por dos métodos de extracción diferentes con y sin temperatura. Se diseñaron 3 concentraciones de mucílago de nopal a partir de una relación por peso nopal/agua, 1-1, 1-2 y 1-3, así como el diseño de la muestra control fabricándose un total de 7 probetas, las cuales fueron evaluadas a través de diferentes técnicas electroquímicas. Para realizar las pruebas de compresión se triplicaron las muestras fabricándose un total de 21 probetas para ser evaluadas a los 28 días de curado.

### CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

Además, se elaboraron 3 muestras para ser evaluadas a los 42 y 56 días de curado a partir del mucílago obtenido por maceración a temperatura ambiente para cada concentración, siendo un total de 18 muestras. Finalmente, se obtuvieron 39 muestras para poder determinar el comportamiento mecánico del concreto, con y sin mucílago de Nopal.

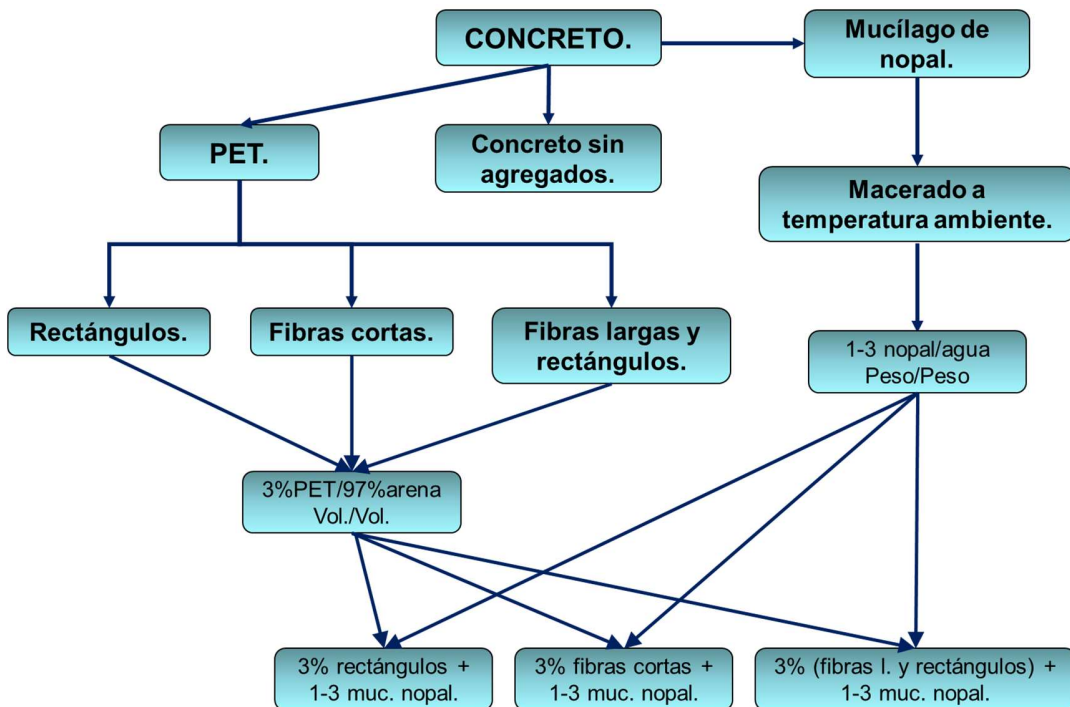


Figura 3. 9. Diagrama de flujo del diseño de las probetas con PET + mucílago de nopal.

Las últimas probetas se diseñaron con agregados de PET + mucílago de nopal. El diseño de estas muestras se basó en la utilización de 3% de rectángulos, 3% de fibras cortas y 3% de la mezcla de fibras largas + rectángulos, a las cuales se les agregó la concentración de mucílago de nopal 1-3, obtenida por maceración a temperatura ambiente.

### **CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”**

---

Teniendo en cuenta la muestra control se obtuvieron 4 probetas, las cuales fueron evaluadas a través de diversas técnicas electroquímicas. Para las pruebas de compresión solo se triplicaron las muestras que contenían PET + mucílago de nopal, dando un total de 9 probetas.

Las probetas también fueron diseñadas según la técnica de evaluación que se utilizó. Por lo anterior se elaboraron dos tipos de muestras, las cuales se describen a continuación:

- Para el ensayo de resistencia a la compresión se tomaron en cuenta la norma ASTM C 39, y la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE que establece una relación altura/diámetro igual a 2.
- Las probetas fueron escaladas, para garantizar el menor consumo de energía y materiales.
- Se elaboraron probetas cilíndricas con un diámetro de 4.3 cm y 8.6 cm de altura a partir de tubos de PVC, tal y como se observa en la Figura 3.10.



Figura 3. 10. Probetas para el ensayo de resistencia a la compresión.

## CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

Para realizar las pruebas electroquímicas se diseñaron probetas con un recubrimiento de 3 cm entre el borde de las varillas y los lados del cubo. Por lo anterior, las probetas medían 7 cm de ancho, 10 cm de largo y 10 cm de altura, y el área expuesta de las barras de acero en contacto con el concreto fue de 18 cm<sup>2</sup>, el resto de las dimensiones se muestran en la Figura 3.11.

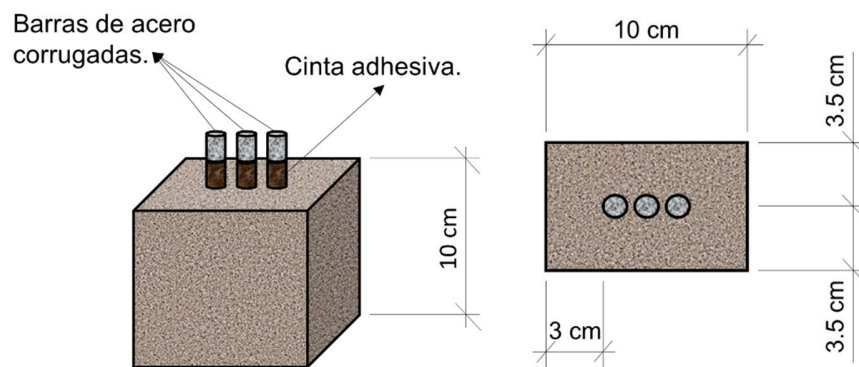


Figura 3. 11. Dimensiones de las probetas para las pruebas electroquímicas.

### 3.5 Preparación de las muestras.

Para elaborar todas las probetas se siguió el mismo procedimiento, tanto para las muestras con PET como para las muestras con mucílago de nopal. La única diferencia radicó en la forma en que se agregaron estos materiales. El PET fue agregado a la mezcla como sustituto parcial de la arena, en cambio el mucílago de nopal fue incorporado a la mezcla como sustituto total del agua. El procedimiento utilizado se describe a continuación.

1. Todos los elementos sólidos fueron incorporados a la mezcla, incluyendo el PET en forma de fibras largas, fibras cortas, partículas en forma de rectángulos, y la mezcla de fibras largas y rectángulos.

### **CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”**

---

2. Una vez incorporada el agua a los materiales, se mezclaron todos los elementos procurando obtener una mezcla lo más homogénea posible. Todo el proceso se realizó a temperatura ambiente. Cabe mencionar, que a las probetas con mucílago de nopal no se les agregó agua.
3. Se utilizó aceite quemado, para recubrir los moldes de las muestras y garantizar un desmoldado sin fisuras y grietas.
4. El vertido del material se realizó por capas, compactando cada capa por varios minutos hasta completar un total de tres capas para cada probeta.
5. Solo en el caso de las probetas con las varillas de acero, una vez terminada la compactación se colocaron las barras de acero y se llevó a cabo una última compactación para garantizar la correcta adherencia entre el concreto y el acero. Las barras de acero fueron recubiertas con una cinta adhesiva en la zona de la interfase concreto-atmósfera, tal y como se muestra en la Figura 3.12.

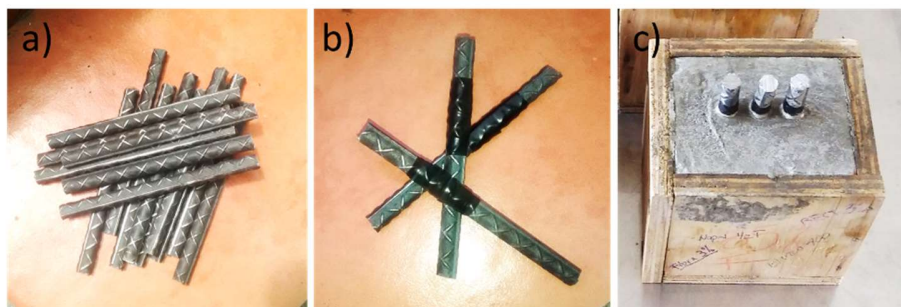


Figura 3. 12. a) Barras de acero sin tratamiento superficial, b) Barras de acero recubiertas con cinta adhesiva y c) Muestra de concreto con tres electrodos.

### **CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”**

---

6. En el caso de las probetas con las que se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión, fue necesario enrasar la superficie con una regla, dejándola lisa y nivelada.
7. Todas las muestras permanecieron 24 horas dentro del molde, luego se sumergieron en agua para garantizar el curado del concreto. Este proceso es indispensable para que se lleven a cabo todas las reacciones de hidratación del cemento hasta alcanzar su resistencia de diseño.
8. En el caso de las probetas que fueron evaluadas electroquímicamente, después de los 28 días de curado fueron sumergidas parcialmente en una solución de cloruro de sodio al 3% simulando un entorno agresivo similar el agua de mar. Durante 240 y 300 días se mantuvo el nivel de la solución entre 2 y 3 cm de distancia con respecto a la superficie de las probetas, tal y como se observa en la Figura 3.13.



Figura 3. 13. a) Probetas parcialmente sumergidas en una solución de cloruro de sodio al 3%.



## CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

---

### 3.6 Ensayo de resistencia a la compresión.

El ensayo de resistencia a la compresión se llevó a cabo a los 28 días de curado del concreto en una máquina de tensión aun cuando las probetas permanecían húmedas, tal y como se observa en la Figura 3.14. Durante el ensayo se garantizó una alineación vertical y horizontal de las muestras con respecto a los ejes de carga del equipo, hasta alcanzar el fallo de las mismas. Durante el experimento se tronaron tres muestras de cada tipo, siendo este el número mínimo de muestras para este ensayo. Además, se hizo un análisis estadístico y se determinó la media y la desviación estándar.



Figura 3. 14. a) Probetas a los 28 días de curado, b) Ensayo de compresión y c) Fallo de la probeta después de realizada la prueba.

### 3.7 Técnicas electroquímicas.

#### 3.7.1 Medición del potencial de media celda.

La medición del potencial de media celda se realizó tomando como referencia un electrodo saturado de calomel (S.C.E.). En este caso, se realizaron lecturas de los 3 electrodos de acero de cada probeta y se determinó el promedio de las tres mediciones.

## **CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”**

---

La primera lectura fue tomada 24 horas después de elaboradas las muestras, además se realizaron mediciones semanales por un período de 240 y 300 días. Para ello, se utilizó un multímetro conectando una terminal al electrodo de trabajo y la otra al electrodo de referencia de calomel, tal y como se observa en la Figura 3.15

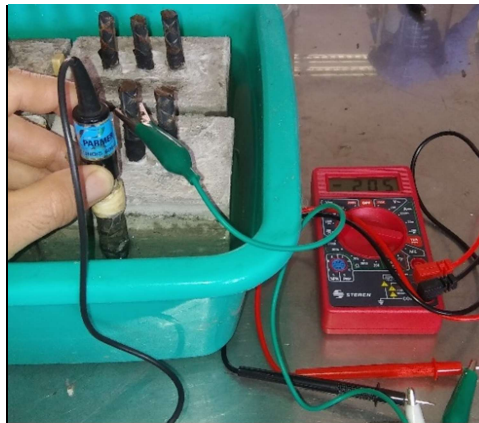


Figura 3. 15. Medición de potencial de media celda a los electrodos de acero.

### **3.7.2 Aplicación de la técnica de ruido electroquímico.**

Tomando en cuenta la norma ASTM G-199 la medición de ruido en potencial y corriente se realizó de manera simultánea. Para este trabajo se utilizaron 3 electrodos nominalmente idénticos como acero de refuerzo en las muestras de concreto. Con esta configuración la medición del ruido en corriente se realizó entre los electrodos de trabajo W1 y W2, y la medición del ruido en potencial entre los electrodos W1 y W2 monitoreado con respecto a un tercer electrodo W3 que se tomó como electrodo de referencia, tal y como se observa en la Figura 3.16.

## CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

---



Figura 3. 16. Medición de ruido electroquímico.

En cada medición de ruido se tomaron lecturas de 1024s, por tanto fueron adquiridos 1024 datos de potencial y de corriente por cada medición. Todos los datos fueron procesados estadísticamente a partir de la desviación estándar de la corriente y el voltaje. A cada serie de datos se le realizó la remoción lineal de la tendencia.

### **3.7.3 Aplicación de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica.**

Para la aplicación de la técnica E.I.S. se utilizó un rango de frecuencia desde 10000 Hz a 0.01 Hz y una señal externa de voltaje de  $\pm 20$  mV. Algunos autores plantean que los valores de la señal de amplitud deben estar entre 5-20 mV. Las lecturas por prueba fueron de 60 puntos y se utilizó un potencióstato tal y como se observa en la Figura 3.17. Las mediciones se realizaron a la barra de acero que se fijó como electrodo de trabajo W3, usando un electrodo de referencia de calomel y un contra electrodo de grafito.

## CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

---



Figura 3. 17. Esquema de la celda para la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica.

### 3.7.4 Aplicación de la técnica de resistencia a la polarización lineal.

En la técnica L.P.R. se aplicó una pequeña señal de voltaje entre -30 mV y +30 mV (ASTM G-59), por lo que se realizó al final de todas las pruebas. Se utilizó un potencióstato/galvanostato, tal y como se observa en la Figura 3.18 y una velocidad de barrido de 10 mV/min.



Figura 3. 18. Aplicación de la Resistencia a la Polarización Lineal.

El electrodo deberá ser ligeramente polarizado aproximadamente entre 20-50 mV alrededor del potencial de corrosión  $E_{\text{corr}}$ . Al igual que en la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica las mediciones se realizaron al electrodo de trabajo W3 de cada probeta.

## **CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”**

---

De la recta formada a partir de los datos de potencial y corriente, se determina la pendiente de la misma, que no es más que la  $R_p$ . Por último, y haciendo uso de la ecuación [2.5], se determinó la rapidez de corrosión ( $I_{corr}$ ) del sistema acero-concreto en una solución de cloruro de sodio al 3%. Esta rapidez de corrosión, no es más que la cantidad de la corrosión producida por una unidad de superficie (área) cuando se hace referencia a un período específico.

### **3.8 Técnicas de caracterización.**

#### **3.8.1 Aplicación de la técnica de espectroscopía de infrarrojo en el mucílago de nopal.**

El mucílago de nopal se analizó usando la técnica F.T.IR. en el equipo ALPHA (BRUKER) que mide la reflectancia total atenuada (A.T.R.) bajo un cristal de ZnSe en un intervalo de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $450\text{ cm}^{-1}$ .

#### **3.8.2 Aplicación de la técnica de difracción de rayos-X al concreto con mucílago de nopal.**

Las muestras de concreto con mucílago de nopal se analizaron después de 28, 42 y 56 días de curado, a partir de la técnica de difracción de rayos-X. Se utilizó un difractómetro (D2 Phaser, Bruker con una radiación de  $\text{Cu K}\alpha$  de longitud de onda de  $1,5406\text{E}^{-10}\text{ m}$ ), operado a  $30\text{ kV} / 10\text{ mA}$  con un barrido del ángulo  $2\theta$  de 15 a 65 grados.

## CAPÍTULO 3. “MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

### 3.9 Nomenclatura de las Muestras.

En la Tabla 3.2 se describen las nomenclaturas y códigos utilizados para la identificación de los diferentes materiales dentro del concreto, y el correcto análisis de los resultados que se muestran en el siguiente capítulo.

Tabla 3. 2. Nomenclatura de todas las muestras analizadas.

Leyenda por color	Muestras con PET	Código	Muestras con muc. nopal	Código	Muestras con PET+muc. de nopal	Código
	Concreto	CO	Concreto	CO	Concreto	CO
	3% fibras largas	CO+3%FL	1-1 nopal maceración	CO+1-1N	3% rectángulos + 1-3 muc. nopal	CO+3%R+1-3N
	5% fibras largas	CO+5%FL	1-2 nopal maceración	CO+1-2N	3% fibras largas + rect. + 1-3 muc. nopal	CO+3%FL-R+1-3N
	8% fibras largas	CO+8%FL	1-3 nopal maceración	CO+1-3N	3% fibras cortas + 1-3 muc. nopal	CO+3%FC+1-3N
	3% rectángulos	CO+3%R	1-1 nopal maceración con temp.	CO+1-1NT		
	5% rectángulos	CO+5%R	1-2 nopal maceración con temp.	CO+1-2NT		
	8% rectángulos	CO+8%R	1-3 nopal maceración con temp.	CO+1-3NT		
	3% fibras largas-rect.	CO+3%FL-R				
	5% fibras largas-rect.	CO+5%FL-R				
	8% fibras largas-rect.	CO+8%FL-R				
	3% fibras cortas	CO+3%FC				
	5% fibras cortas	CO+5%FC				
	8% fibras cortas	CO+8%FC				

## Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados.

### 4.1 Resultados de técnicas de caracterización.

#### 4.1.1 Resultados de la técnica de espectroscopía por F.T.IR. para el mucílago de nopal.

En la Figura 4.1, se muestran los espectros de F.T.IR. obtenidos para diferentes soluciones de mucílago de nopal.

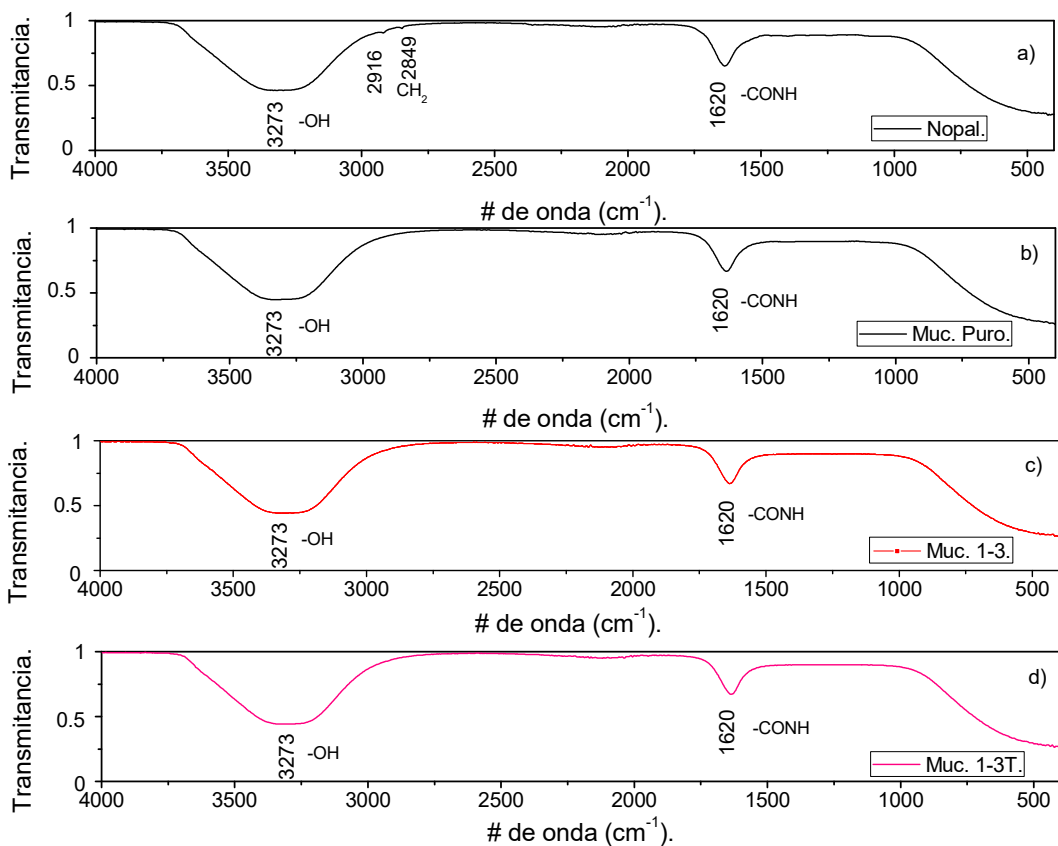


Figura 4. 1. Diagramas de transmitancia para las siguientes elementos: a) nopal, b) mucílago de nopal puro, c) concentración de mucílago 1-3 y d) concentración de mucílago 1-3T.

## **CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”**

---

De manera general, se aprecia una banda característica del mucílago de nopal alrededor de  $3273\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde a la frecuencia de estiramiento del grupo hidroxilo -OH. Todos los espectros muestran una banda en el número de onda  $1620\text{ cm}^{-1}$ , correspondiente al grupo amida. En el caso del espectro del nopal sólido, ocurrió una vibración del grupo  $\text{CH}_2$  aproximadamente en  $2916\text{ cm}^{-1}$  y en  $2849\text{ cm}^{-1}$ . Estos picos coinciden con los reportados en otras investigaciones, en las cuales, se encontraron otras bandas como:  $1316$  y  $1032\text{ cm}^{-1}$  relacionada con el grupo C-O-C, C-O-H y C-C-H y  $1393\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al estrechamiento del grupo -COO (Chandra, Eklund and Villarreal, 1998; León-Martínez *et al.*, 2014).

### **4.1.2 Resultados de la técnica de difracción de rayos-X del concreto con mucílago de nopal.**

Estos compuestos al reaccionar con el agua forman otros elementos tales como: silicato de calcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ , CSH) y portlandita (hidróxido de calcio), que son los principales responsables de garantizar las características del material resultante (Vetter *et al.*, 2019).

En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran las gráficas de difracción de rayos-x para los distintos días de curado. En todas las muestras se aprecian los picos de las fases del silicato de calcio (CS), hidratos de silicato de calcio (CSH), portlandita (P) y etringita (E). Estos resultados concuerdan con otros estudios sobre las fases cristalinas del concreto (Morozov *et al.*, 2013; Siddique *et al.*, 2016). Otros picos se asocian a las fases de los agregados en forma de cuarzo (Q) y cristobalita (Cb). En esta investigación se observó el efecto que tiene el mucílago de nopal en la microestructura del concreto y en las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión.



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

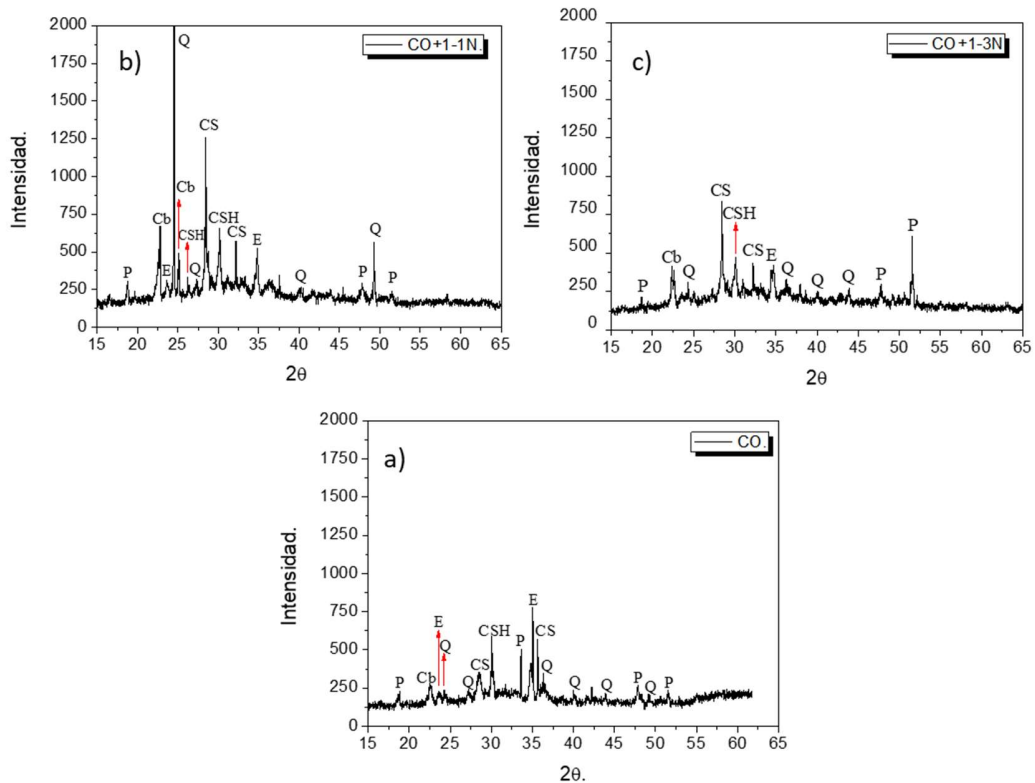


Figura 4. 2. Difractogramas de rayos-X de las siguientes muestras, a los 28 días de curado: a) CO, b) CO+1-1N y c) CO+1-3N.

Tabla 4. 1. Valores de intensidad relativa a los 28 días de curado.

Compuestos	Muestras		
	CO $I_R$ (%)	CO+1-1N $I_R$ (%)	CO+1-3N $I_R$ (%)
CS	51	100	70
CSH	90	100	100
P	91	58	100
E	100	84	42

En la Tabla 4.1, se muestran los valores de intensidad relativa obtenidas de la Figura 4.2. La intensidad relativa se determinó tomando la mayor intensidad de manera aleatoria para cada compuesto. A los 28 días de curado se presenta una mayor intensidad del CS en las muestras con mucílago de nopal, por lo que hay una mayor cantidad de los principales compuestos sólidos del cemento sin reaccionar, a diferencia de la muestra control donde hay una

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

menor intensidad de este compuesto. Además, se reportan intensidades pequeñas para la fase cristalina de la portlandita en la muestra CO-1-1N y de etringita en ambas muestras con mucílago de nopal.

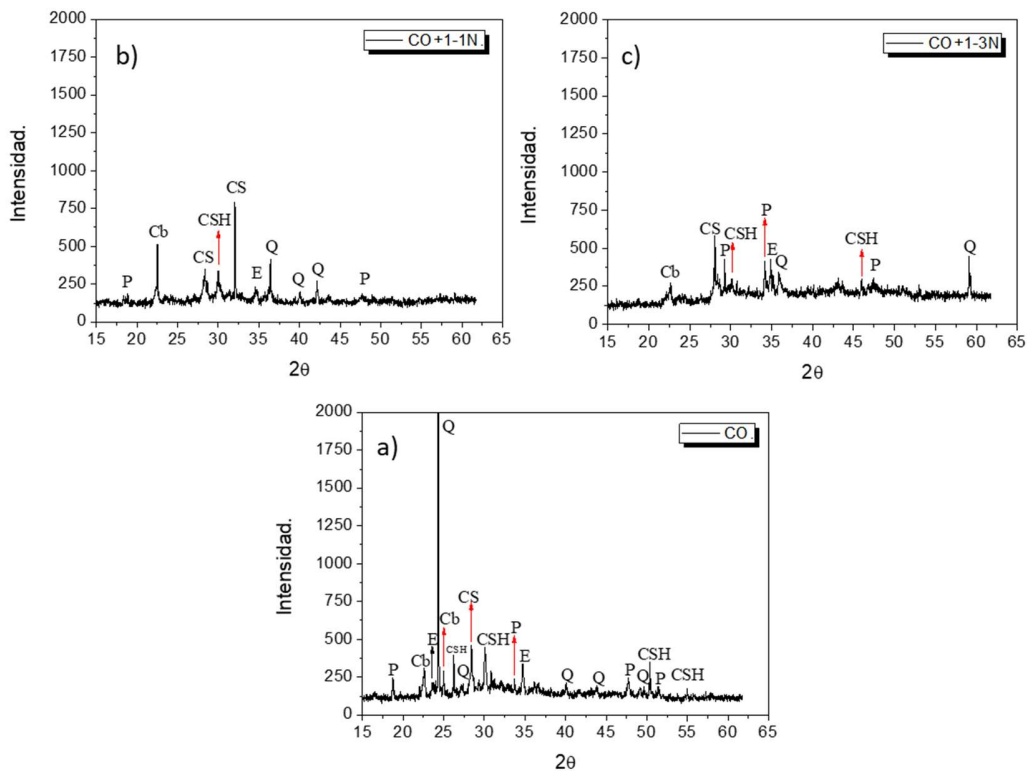


Figura 4. 3. Difractogramas de rayos-X de las siguientes muestras, a los 42 días de curado: a) CO, b) CO+1-1N y c) CO+1-3N.

Tabla 4. 2. Valores de intensidad relativa a los 42 días de curado.

Compuestos	Muestras		
	CO I <sub>R</sub> (%)	CO+1-1N I <sub>R</sub> (%)	CO+1-3N I <sub>R</sub> (%)
CS	39	100	50
CSH	100	28	49
P	66	34	100
E	81	56	100

A los 42 días de curado se observa una relación entre el consumo del compuesto CS y la concentración del mucílago de nopal, con una menor

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

intensidad para la muestra CO y una mayor intensidad para la muestra CO+1-1N. Por el contrario, la formación de los silicatos de calcio hidratados es mayor para la muestra control. No obstante ya se aprecia que la muestra CO-1-3N presenta una intensidad mayor para los compuestos de portlandita y etringita. Estos resultados están en correspondencia con los valores de resistencia a la compresión, para los cuales, a esta edad de prueba la muestra CO+1-3N alcanza un valor de resistencia ligeramente superior que la muestra CO. Este comportamiento se atribuye a que el mucílago de nopal actúa como un aditivo retardar del fraguado del cemento y disminuye el micro-agrietamiento del concreto.

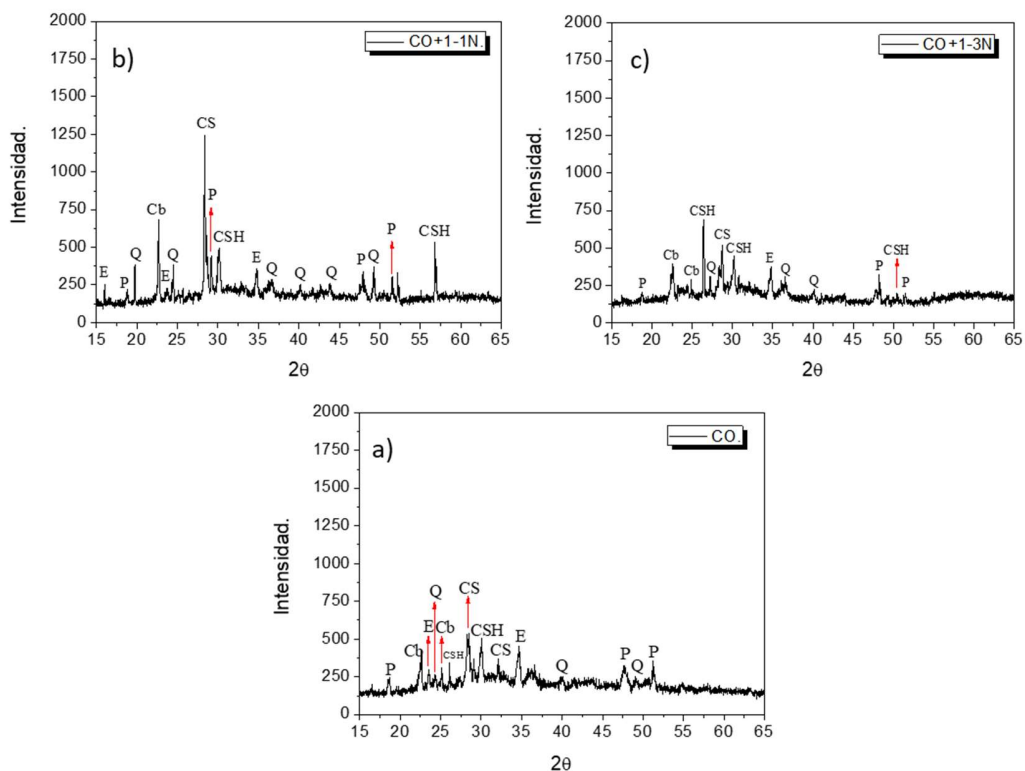


Figura 4. 4. Difractogramas de rayos-X de las siguientes muestras, a los 56 días de curado: a) CO, b) CO+1-1N y c) CO+1-3N.

En la Tabla 4.3, se muestran los valores de intensidad relativa obtenidas de la Figura 4.4.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Tabla 4. 3. Valores de intensidad relativa a los 56 días de curado.

Compuestos	Muestras		
	CO I <sub>R</sub> (%)	CO+1-1N I <sub>R</sub> (%)	CO+1-3N I <sub>R</sub> (%)
CS	72	100	42
CSH	74	88	100
P	94	100	74
E	100	79	49

Con el avance del tiempo de curado, el comportamiento se mantiene y sigue siendo la muestra CO+1-3N quien mantiene los valores de intensidad relativa más bajos para los silicatos de calcio y los más elevados para los silicatos de calcio hidratados.

### 4.2 Ensayo de resistencia a la compresión.

#### 4.2.1 Resultado de la técnica de resistencia a la compresión para las probetas con agregados de PET.

Tabla 4. 4. Valores de F'c (kg/cm<sup>2</sup>) para las muestras con PET a los 28 días de curado del concreto.

Probetas	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )			Prom. F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. E. (kg/cm <sup>2</sup> )
	Lote #1	Lote #2	Lote #3		
CO	243	252	247.1	247.4	4.51
CO+3%FL	244.1	246.1	241.5	243.8	2.41
CO+5%FL	239.3	233.8	238.1	237	2.95
CO+8%FL	219	227	223.4	223.4	4.23
CO+3%FC	238.5	239	237.1	238.5	1.28
CO+5%FC	228.9	227.8	231.9	229.5	2.12
CO+8%FC	215.2	213.6	223.8	217.2	5.39
CO+3%FL-R	241.9	244.3	237.1	241.05	3.69
CO+5%FL-R	229.4	224.6	228.1	227.35	2.48
CO+8%FL-R	220.2	223.5	219.2	220.95	2.25
CO+3%R	240	231.5	238	236.5	4.44
CO+5%R	229.2	226.1	218.9	224.7	5.28
CO+8%R	217.3	210.3	218.2	215.2	4.38

## **CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”**

---

Como se puede observar en la Tabla 4.4, se calcularon los valores de resistencia promedio, así como la desviación estándar de las tres muestras de cada configuración diseñada. En el caso de la muestra control, se alcanzó una resistencia máxima de 252 kg/cm<sup>2</sup> para el lote #2, superando el valor de diseño de 250 kg/cm<sup>2</sup>.

El efecto favorable de las fibras poliméricas en las propiedades mecánicas del concreto, se reportan en otros estudios para este tipo de geometría de PET, ya que estas actúan como un elemento supresor en la propagación y formación de fisuras y grietas (Foti, 2013; Foti and Paparella, 2014). Este efecto se aprecia en los resultados obtenidos, pues las muestras con fibras largas fueron las que alcanzaron los mayores valores de resistencia a la compresión, sobre todo la probeta con 3% de fibras largas con un valor de 243.8 kg/cm<sup>2</sup>. El otro valor significativo fue de 241.05 kg/cm<sup>2</sup>, el cual se obtuvo para la probeta CO+3%FL-R.

No obstante, las geometrías tales como las fibras cortas y los rectángulos presentaron valores inferiores a los 240 kg/cm<sup>2</sup>. Esta disminución en los valores de resistencia, es más notoria, debido posiblemente a diversos factores como son: distribución del PET en la matriz del concreto, formación de fisuras y grietas, entre otros.

En la Figura 4.5 se muestran los valores de resistencia en porcentaje. De manera general, se observa una disminución entre un 1.7 y 13.9% de los valores de F'c para todas las geometrías con el incremento en porcentaje de PET. La resistencia del concreto disminuye con la adición de fibras de PET entre 1.5 y 8.5% en comparación con la muestra control, para diferentes porcentajes de PET entre 0.5 y 1% en relación volumen a la matriz de concreto. (Borg, Baldacchino and Ferrara, 2016).

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

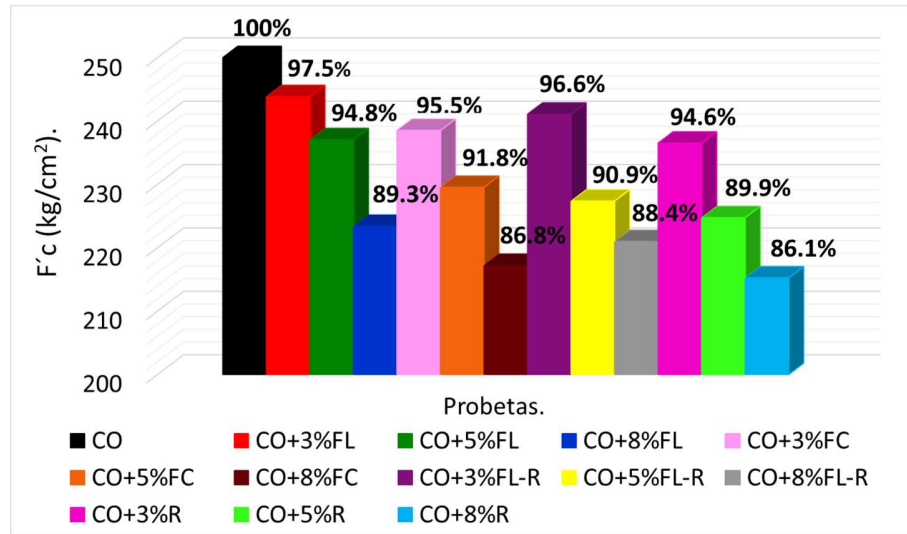


Figura 4. 5. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de muestras con diferentes geometrías de PET.

### ✚ Fallo de las probetas con agregados de PET.

Otra manera de poder analizar los resultados arrojados por esta técnica, es a través de la observación visual de las muestras. Esta vía de análisis es muy simple y brinda una información diferente, pero muy útil. En las Figuras 4.6 y 4.7 se detallan los tipos de fallo de diferentes muestras.



Figura 4. 6. Tipo de fallo de muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

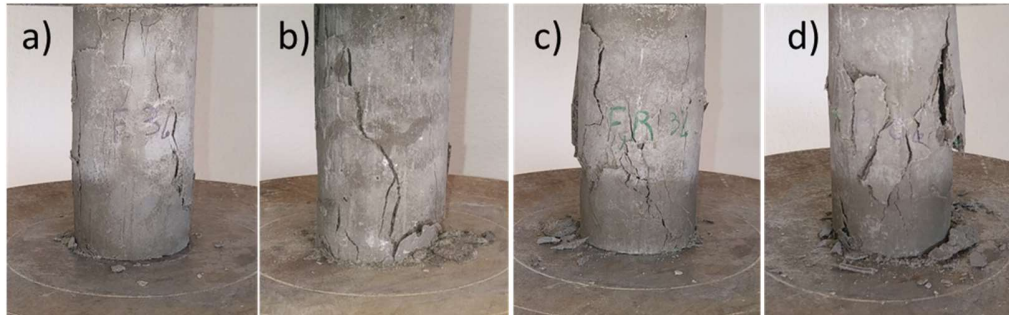


Figura 4. 7. Tipo de fallo de las probetas con 3% de PET. a) Probeta con fibras largas, b) Probeta con fibras cortas, c) Probeta con fibras largas + rectángulos, y d) Probeta con rectángulos.

Los resultados son coherentes cualitativamente con los de otras investigaciones anteriores (Albano *et al.*, 2009; Bui, Satomi and Takahashi, 2018). Todas las probetas con agregados poliméricos presentaron un fallo frágil al igual que la muestra control. Posterior a la rotura de las probetas, se evidencia un mayor control en la formación y propagación de grietas en la superficie del concreto, sobre todo en las muestras con fibras largas. En presencia de fibras se mejoran las propiedades estáticas y dinámicas del concreto (Borg, Baldacchino and Ferrara, 2016). Con estos resultados se aporta nueva información de cómo influyen estas geometrías de PET en la respuesta mecánica del concreto y en su estructura física después del fallo.

Las fibras cortas y la mezcla de fibras largas + rectángulos, también tienen un efecto favorable controlando el agrietamiento del concreto posterior a su rotura. En cambio, este comportamiento no es tan notorio en las muestras con solo rectángulos con un mayor número de grietas. Además, el PET actúa como un elemento que retiene los fragmentos de concreto y evita que estos se desprendan una vez ocurrido el fallo de la muestra.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

### 4.2.2 Resultado de la técnica de resistencia a la compresión para las probetas con mucílago de nopal.

El mucílago de nopal tiene un efecto muy diferente al PET en la respuesta mecánica del concreto, debido a que este gel actúa como un aditivo retardador del fraguado del cemento. Esta es una ventaja importante, sobre todo en climas cálidos, ya que las altas temperaturas disminuyen los tiempos de fraguado y por lo tanto se cuenta con un menor tiempo de transportación, colocación y acabado en obra como lo plantean diversos autores ([Ramírez-Arellanes et al., 2012](#)). Por lo anterior, la respuesta mecánica del concreto a una edad, tanto temprana como tardía, se ve modificada por esta solución.

A partir de los valores descritos en la Tabla 4.5, se puede apreciar que a los 28 días de curado del concreto las muestras con la concentración de nopal 1-3 alcanzan valores entre 244.1 y 246.5 kg/cm<sup>2</sup>, acercándose a la resistencia de diseño de 250 kg/cm<sup>2</sup>. A diferencia de las muestras CO+1-1N y CO+1-1NT, las cuales se mantiene entre 223.5 y 225.8 kg/cm<sup>2</sup> debido a la alta concentración del mucílago de nopal. Estos resultados están en correspondencia con los descritos por ([Chandra, Eklund and Villarreal, 1998](#)).

Tabla 4. 5. Valores de F'c (kg/cm<sup>2</sup>) para las muestras con mucílago de nopal a los 28 días de curado del concreto.

Probetas	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )			Prom. F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. E. (kg/cm <sup>2</sup> )
	Lote #1	Lote #2	Lote #3		
CO	247.2	254	245.7	248.9	4.42
CO+1-1N	229.1	223.1	218.5	223.5	5.31
CO+1-2N	236.5	237.4	230.9	234.9	3.52
CO+1-3N	244.9	248.8	245.8	246.5	2.04
CO+1-1NT	231.2	224.1	222.3	225.8	4.70
CO+1-2NT	235.4	237.8	230.6	234.6	3.66
CO+1-3NT	242.6	241.4	248.4	244.1	3.74



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

A los 42 días de curado, las muestras con mucílago de nopal obtenido por maceración a temperatura ambiente, presentan un incremento en los valores de resistencia. El valor más significativo es de 253.2 kg/cm<sup>2</sup>, valor que supera la resistencia de diseño, tal y como se observa en la Tabla 4.6. Este resultado demuestra que el mucílago de nopal es un aditivo natural que puede mejorar la resistencia a la compresión del concreto.

Tabla 4. 6. Valores de F'c (kg/cm<sup>2</sup>) para las muestras con mucílago de nopal a los 42 días de curado del concreto.

Probetas	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )			Prom. F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. E. (kg/cm <sup>2</sup> )
	Lote #1	Lote #2	Lote #3		
CO+1-1N	226.1	232.2	224.6	227.6	4.03
CO+1-2N	235.7	234.2	239.2	236.4	2.56
CO+1-3N	257.2	254.4	248.1	253.2	4.66

Después de 56 días de curado, se mantiene la tendencia con un aumento en los valores de resistencia, tal y como se observa en la Tabla 4.7.

Tabla 4. 7. Valores de F'c (kg/cm<sup>2</sup>) para las muestras con mucílago de nopal a los 56 días de curado del concreto.

Probetas	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )			Prom. F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. E. (kg/cm <sup>2</sup> )
	Lote #1	Lote #2	Lote #3		
CO+1-1N	232.2	235.5	229.3	232.3	3.10
CO+1-2N	243.3	241.4	236	240.2	3.78
CO+1-3N	253.2	255.6	263.8	257.5	5.55

En la Figura 4.8, se muestran los valores en porcentaje de F'c a los 28 días de curado para las probetas con mucílago de nopal. De manera general, no se aprecia una diferencia significativa según el método de extracción del gel. Existe una tendencia a alcanzar los valores de la resistencia de diseño a los 28 días, con la disminución de la concentración del gel de nopal.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

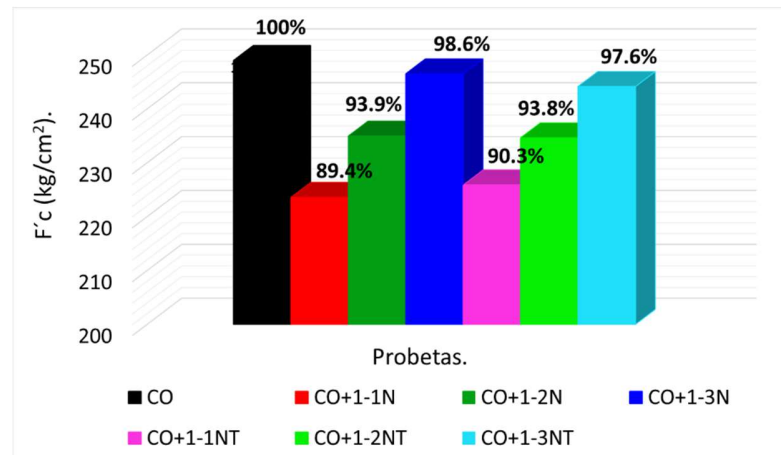


Figura 4. 8. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de las muestras con mucílago de nopal a los 28 días de curado.

En las Figuras 4.9 y 4.10, se describe el comportamiento mecánico en porciento de las muestras con mucílago de nopal extraído por maceración a temperatura ambiente, para más de 28 días de curado. Tanto a los 42, como a los 56 días de curado los valores de resistencia para todas las muestras con mucílago de nopal aumentan considerablemente, sobre todo la muestra CO+1-3N que alcanza 101.3 y 103% superando la resistencia de diseño. La muestra CO+1-2N alcanza un valor de 96,8% acercándose significativamente a la resistencia característica establecida en el estudio.

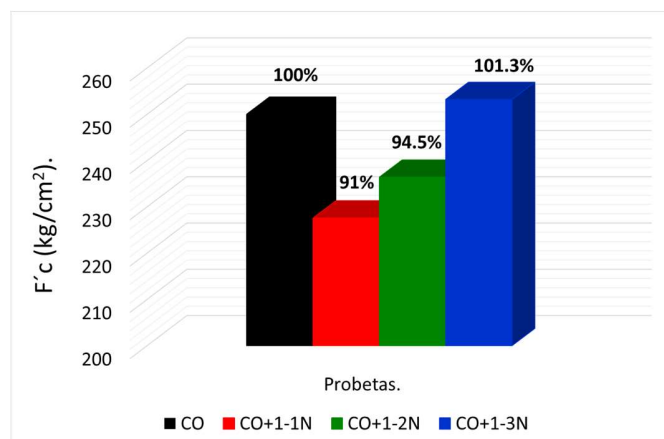


Figura 4. 9. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de las muestras con mucílago de nopal a los 42 días de curado.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

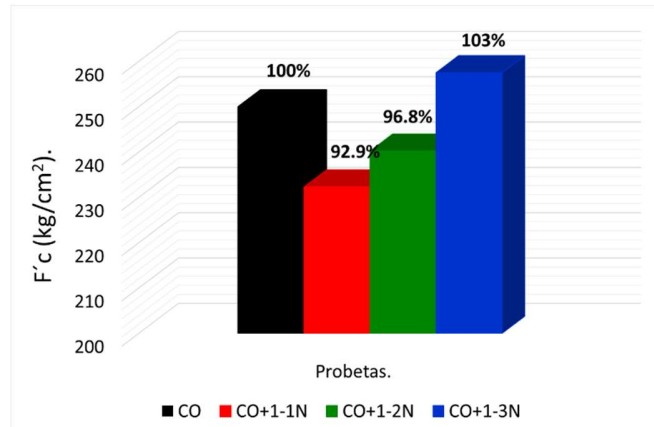


Figura 4. 10. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de las muestras con mucílago de nopal a los 56 días de curado.

Al entrar en contacto el gel de nopal con las partículas de cemento, la reacción de hidratación de los granos de cemento es más lenta, así como el endurecimiento del concreto, debido a la elevada viscosidad del mucílago de nopal. Este fenómeno se evidencia en los resultados de resistencia a la compresión para todas las muestras con mucílago de nopal.

### ✚ Fallo de las probetas con mucílago de nopal.

En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se presentan las imágenes posteriores al fallo de las probetas para todas las muestras con mucílago de nopal en comparación con la muestra control.



Figura 4. 11. Tipo de fallo de la muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

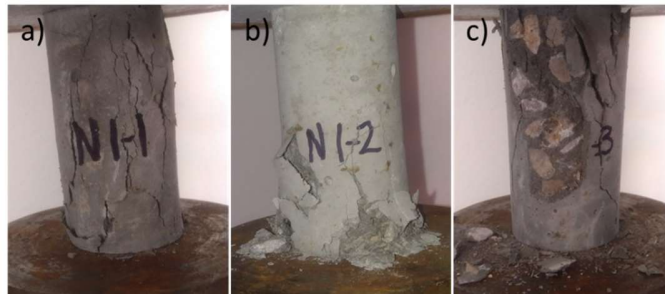


Figura 4. 12. Tipo de fallo de las probetas con mucílago de nopal obtenido por maceración a temperatura ambiente: a) CO+1-1N, b) CO+1-2N, y c) CO+1-3N.

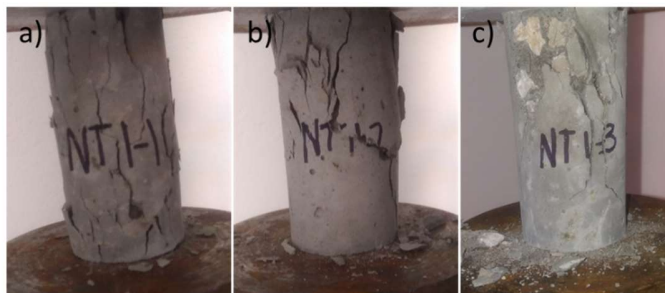


Figura 4. 13. Tipo de fallo de las probetas con mucílago de nopal obtenido por maceración aplicando temperatura: a) CO+1-1NT, b) CO+1-2NT, y c) CO+1-3NT.

A diferencia del efecto que tiene el PET después de la rotura de las muestras, el mucílago de nopal no tiene ningún efecto en este parámetro. Todas las muestras presentaron un fallo frágil, muy similar entre ellas.

### **4.2.3 Resultado de la técnica de resistencia a la compresión para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal.**

Con base en los resultados de resistencia a la compresión de las muestras con PET y con mucílago de nopal por separados, así como los resultados electroquímicos que se describen más adelante en este capítulo se determinó evaluar el comportamiento en muestras que contenían una concentración de nopal 1-3, macerado a temperatura ambiente, y 3% de PET para las fibras cortas, mezcla de fibras largas y rectángulos, y rectángulos. Las fibras largas

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

no fueron evaluadas en combinación con el mucílago de nopal debido a que no mejoraron las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo.

En la Tabla 4.8 se muestran los valores promedio de resistencia a la compresión así como la desviación estándar calculada determinada a partir de los resultados de tres lotes de muestras.

Tabla 4. 8. Valores de resistencia a la compresión de muestras con PET + mucílago de nopal a los 28 días de curado del concreto.

Probetas	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )			Prom. F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. E. (kg/cm <sup>2</sup> )
	Lote #1	Lote #2	Lote #3		
CO	247.2	254	245.7	248.9	4.42
CO+3%R+1-3N	226.2	232.9	234.3	231.1	4.32
CO+3%FL-R+1-3N	240.3	239.2	236.1	238.5	2.18
CO+3%FC+1-3N	232.2	237.1	229.8	233.0	3.72

Los valores de resistencia a los 28 días de curado son inferiores a los resultados obtenidos para cada agregado por separado. No obstante, debido al efecto del mucílago de nopal, al aumentar el tiempo de curado la resistencia a la compresión seguirá aumentando ligeramente hasta alcanzar un valor determinado. Aunque, los valores se mantendrán por debajo de la resistencia de la muestra control, teniendo en cuenta el efecto de los agregados de PET, los valores serán superiores a los obtenidos por las muestras con solo PET.

No se observa una correlación en los valores de desviación estándar, sin embargo, estos valores demuestran que no se crea mucha heterogeneidad en el concreto con la adicción mucílago de nopal y PET reciclado. Además los valores de desviación estándar de F'c se encuentran entre 2 y 3% con respecto al valor medio como lo especifican otros autores ([Imcyc, 2006](#)).

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

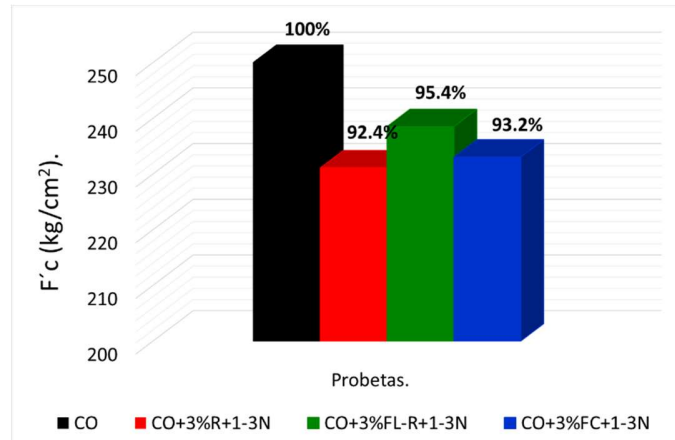


Figura 4. 14. Gráfica de valores de resistencia a la compresión de muestras con PET + mucílago de nopal a los 28 días de curado.

Los valores promedio en porcentaje se describen en la Figura 4.14. El mayor valor de resistencia a la compresión se alcanzó para la muestra CO+3%FL-R+1-3N, con un 95,4% de la resistencia de diseño. Queda demostrado el efecto favorable que tiene las fibras de PET en una matriz de concreto.

### 4.3 Técnicas electroquímicas y de observación visual.

#### 4.3.1 Resultados de la técnica de potencial de media celda.

##### ✚ Probetas con agregados de PET.

Los valores de potencial de corrosión  $E_{corr}$  en función del tiempo para todas las muestras con polímero se detallan en la Figura 4.15. Durante el proceso de curado del concreto, es evidente que el potencial de todas las muestras adquiere valores más nobles, entre -80 y -20 mV. Estos valores se mantienen en el rango de un 10% de probabilidad de corrosión.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

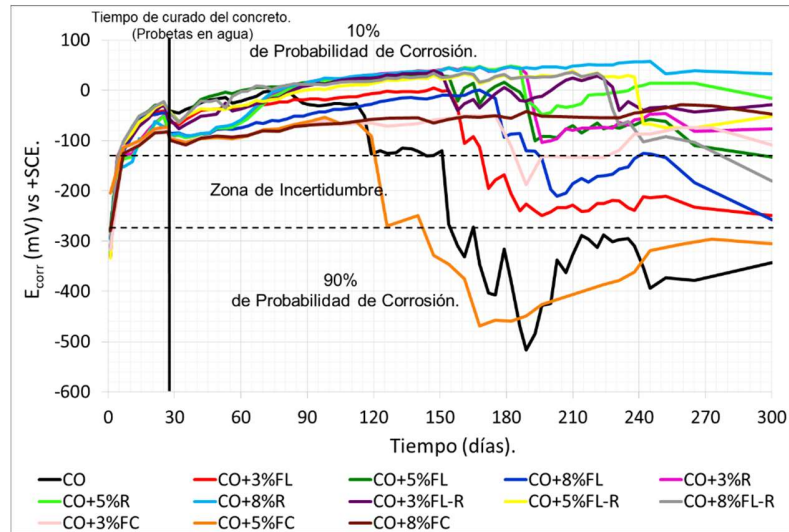


Figura 4. 15. Variación del potencial de media celda en función del tiempo para las probetas con PET y la muestra control.

En la literatura, se reportan valores entre -300 y -50 mV para muestras de concreto con agregados de carbono. Estos valores se obtuvieron durante el proceso de curado del concreto (Garcés *et al.*, 2007). En determinadas condiciones el acero de refuerzo del concreto forma una capa de óxidos protectora ( $Fe_3O_4$ ) de muy pequeño espesor, impermeable y compacta. Lo anterior se debe principalmente a: una buena calidad del concreto con un pH entre 12-13 en la solución de la red de poros sin la presencia de otros factores externos (Hansson, 1984).

Entre los días 120 y 150 del período de prueba, se observa una caída del potencial para las muestras CO y CO+5%FC hasta alcanzar valores alrededor de -500 mV con un 90% de probabilidad de corrosión. Este cambio, posiblemente esté relacionado con la presencia de los iones cloruro sobre la superficie del acero de refuerzo. Los iones cloruro en contacto con el acero, provocan corrosión localizada sobre la capa de óxidos protectora y después de cierto valor umbral de cloruros, tiene lugar el rompimiento permanente de la capa pasiva (Trocónis de Rincón *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2007). En condiciones similares, diversos autores han demostrado que el inicio de la

## **CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”**

---

corrosión depende de la relación entre  $\text{Cl}^-$  and  $\text{OH}^-$  en la superficie del metal (Andrade y Alonso, 1996; Legat, Leban y Bajt, 2004).

El concreto por sí solo, es una barrera física que mantiene el acero aislado de los agentes agresivos por un tiempo determinado (Morozov *et al.*, 2013). No obstante, adicionando PET en diferentes geometrías como los rectángulos y las fibras cortas se está generando otra barrera física que retarda el tiempo que tardan estos iones agresivos en llegar a la superficie del acero.

El efecto antes mencionado es evidente, teniendo en cuenta que las muestras con partículas en forma de rectángulos, fibras cortas y la mezcla de fibras largas + rectángulos presentaron valores más nobles de potencial, entre -100 y 50 mV durante casi todo el período de prueba. En cambio, las muestras con fibras largas no presentaron este comportamiento.

### **Probetas con mucílago de nopal.**

El mucílago de nopal es una solución que por sus propiedades también puede mejorar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo en el concreto. La gráfica que se describe en la Figura 4.16 muestra los valores de potencial de corrosión  $E_{\text{corr}}$  en función del tiempo para todas las muestras con mucílago de nopal.



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

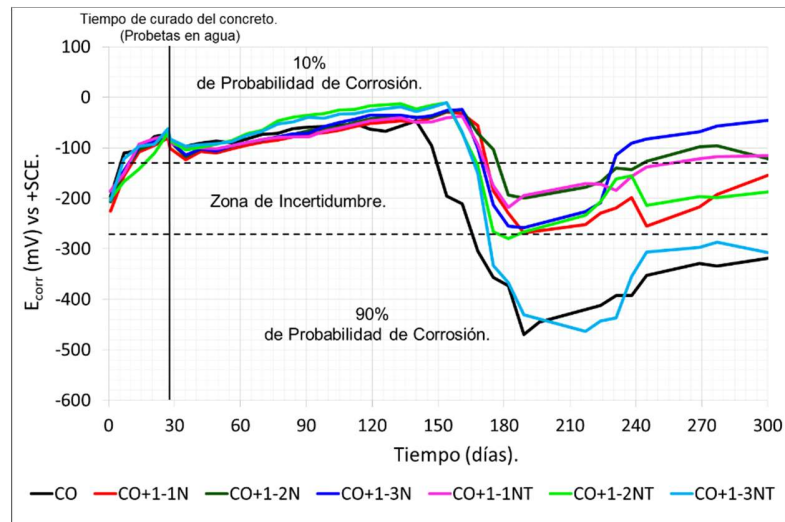


Figura 4. 16. Variación del potencial de media celda en función del tiempo para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.

A diferencia del PET, el mucílago de nopal actúa como un aditivo retardador del fraguado del cemento. Este comportamiento se ha corroborado en otras investigaciones (Dúran-Herrera *et al.*, 2012). Todas las muestras con mucílago de nopal presentaron un fraguado más lento debido a la humedad presente en las mismas, en comparación con la muestra control.

El mucílago es capaz de retener la humedad por un mayor período de tiempo, debido a que los polisacáridos tienen un carácter de retención de agua y disminuyen la velocidad de secado del concreto (Chandra, Eklund and Villarreal, 1998). Por lo anterior, se reduce el proceso de micro-agrietamiento del concreto, fenómeno que tiene lugar sobre todo en climas cálidos.

Durante los primeros meses de prueba, se observa un comportamiento muy similar al descrito por las muestras con PET, con valores de potencial más nobles y una probabilidad de corrosión del 10%. Todas las muestras con mucílago de nopal, presentan una caída en sus valores y alcanzan la zona de corrosión de incertidumbre. Posiblemente, por la presencia de iones cloruro en contacto con el acero de refuerzo se produce el rompimiento de la capa pasiva

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

de óxidos en algunos puntos de la superficie metálica como lo plantean otros autores para concretos expuestos a ambientes salinos (Caré and Raharinaivo, 2007). Aunque con el avance del período de exposición, las condiciones idóneas del concreto parecen mantenerse sobre todo para la muestra CO+1-3N. Los valores de potencial se recuperan progresivamente, acercándose a valores más nobles de potencial, entre -180 y -40 mV. Estos resultados son un indicativo de que en las muestras con mucílago de nopal, hubo un cambio en la superficie metálica más significativo en la muestra CO+1-3NT, en la cual pudo haberse superado el umbral de contenido de cloruros sobre la varilla.

### 4.3.2 Resultados de la técnica de ruido electroquímico.

#### ✚ Probetas con agregados de PET.

A partir del cálculo de la desviación estándar del ruido en corriente ( $\sigma_i$ ) se puede hacer un análisis del comportamiento de la corrosión del acero de refuerzo (Katwan, Hodgkiess and Arthur, 1996; Cottis, 2001). La relación que existe entre la desviación estándar del ruido en corriente, la rapidez de corrosión y el área afectada del electrodo, permite realizar este acercamiento. La magnitud de las fluctuaciones espontaneas de corriente se determinan a partir de  $\sigma_i$ . A partir de estos valores se puede estimar la actividad corrosiva sobre el acero de refuerzo (Zhao *et al.*, 2007). En la Figura 4.17, se describen los valores de  $\sigma_i$  para las muestras con agregados de PET.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

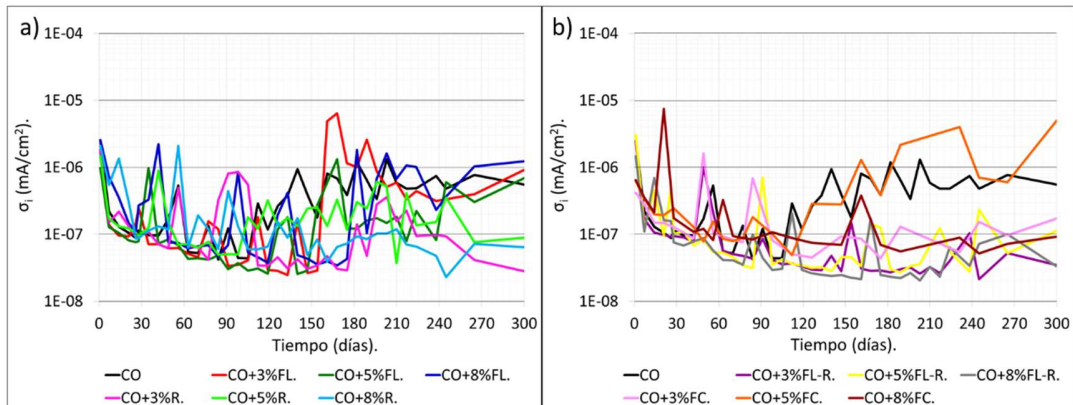


Figura 4. 17. Gráfica de valores de la desviación estándar del ruido en corriente  $\sigma_i$ , a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.

Al inicio del período de prueba, se observan altos valores de  $\sigma_i$ , alrededor de 1E-06 mA/cm<sup>2</sup>, los cuales disminuyen en un orden de magnitud durante el proceso de curado del concreto. Progresivamente, con el avance del tiempo de exposición los valores de la desviación estándar del ruido en corriente descienden hasta 2E-08 y 8E-08 mA/cm<sup>2</sup>, sugiriendo una baja actividad corrosiva sobre la superficie del acero de refuerzo. Se ha encontrado similitud con otros resultados obtenidos en muestras de morteros expuestas a ciclos de inmersión y secado, con valores que oscilan entre 1E-07 y 1E-09 mA/cm<sup>2</sup> después de varios ciclos (Zhao *et al.*, 2007).

Para el día 300 de prueba, las probetas CO, CO+3%F, CO+5%F, CO+8%F y CO+5%FC, presentan elevados valores de  $\sigma_i$  alrededor de 1E-06 mA/cm<sup>2</sup> relacionados con la alta actividad corrosiva del metal. En cambio, el resto de las muestras se mantienen entre 2E-07 y 2E-08 mA/cm<sup>2</sup>, sugiriendo una baja actividad corrosiva.

Otra manera de analizar los resultados de la técnica de ruido electroquímico es a través de los valores de ruido en resistencia ( $R_n$ ), obtenidos a partir del cociente de la desviación estándar del ruido en voltaje entre la desviación

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

estándar del ruido en corriente dada por la ecuación [2.2], tal y como se describen en la Figura 4.18.

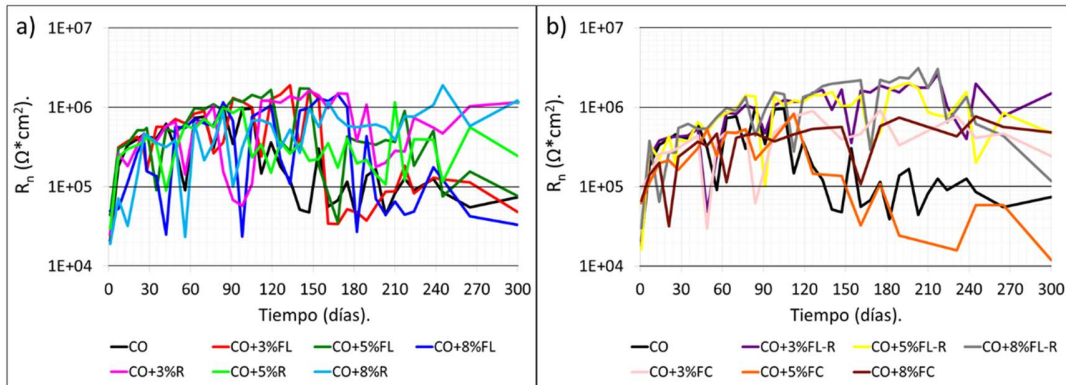


Figura 4. 18. Gráfica de valores de  $R_n$ , a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.

De manera general, todas las muestras exhiben un comportamiento similar durante los primeros meses de prueba. Se observa un incremento gradual de la resistencia de ruido, alcanzándose valores cercanos a  $1\text{E}+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , relacionados con la formación de una capa pasiva sobre el acero. Los valores de  $R_n$  tienen una relación con los valores de  $\sigma_i$ , ya que son inversamente proporcionales, tal y como se observa en las Figuras 4.17 y 4.18.

Después de 120 días de prueba, la muestra control presenta una caída en los valores de  $R_n$ . Progresivamente, se observan fluctuaciones con picos significativos entre  $4\text{E}+04$  y  $2\text{E}+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , indicando que el inicio de la corrosión no es solo un cambio en los valores, sino consiste en una secuencia de estos. Este comportamiento se describe en otras investigaciones que reflejan los cambios en las fluctuaciones de la  $R_n$  en función del tiempo (Legat, Leban and Bajt, 2004). Finalmente, la corrosión se vuelve más severa con el incremento de la concentración de cloruros sobre la superficie del metal.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Al finalizar el tiempo de exposición de las probetas al medio agresivo, los mayores valores de  $R_n$  se alcanzan para las muestras con rectángulos y con la mezcla de fibras largas + rectángulos. Aunque, las fibras cortas también le brindan al concreto un comportamiento similar, a excepción de la muestra CO+5%FC, la cual presenta los valores más bajos de resistencia de ruido inferiores a  $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Posiblemente, la muestra CO+5%FC tuvo algún defecto constructivo durante su elaboración, pues es la única probeta que presenta un comportamiento atípico en comparación con el resto de las geometrías diseñadas.

Lo más significativo son los valores alcanzados por las muestras con la mezcla de fibras largas + rectángulos, la cuales durante varios meses llegan a tener una  $R_n$  de  $2E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Posiblemente, se mantuvieron por más tiempo las condiciones de humedad, altos valores de pH superiores a 9, presencia de oxígeno en la superficie del metal y una baja concentración de iones cloruro; manteniéndose así, la pasividad del acero.

A través de la técnica E.N., también se puede determinar el tipo de corrosión del acero de refuerzo en el concreto mediante el Índice de Localización, tal y como se observa en la Figura 4.19.

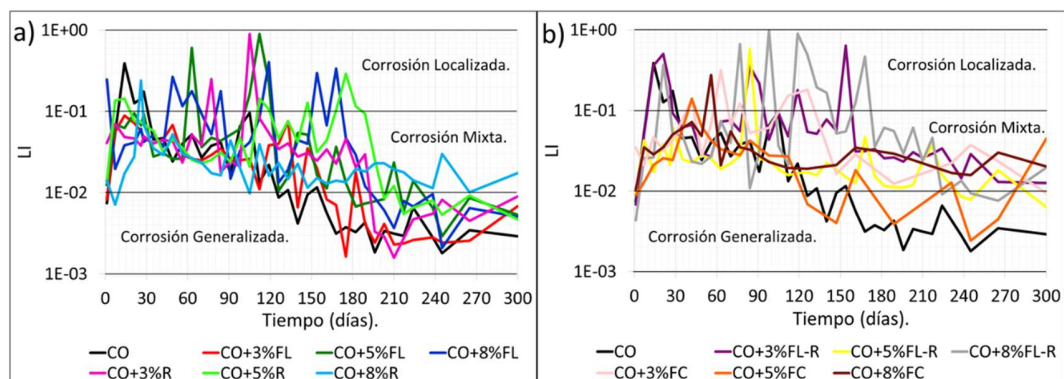


Figura 4. 19. Gráfica de valores de L.I., a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.

## **CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”**

---

Como se puede apreciar, durante los primeros meses de prueba el comportamiento de las muestras se mantiene en el rango de corrosión mixta, con valores entre 0.01 y 0.1. El acero dentro del concreto, en condiciones de altos valores de pH, presencia de oxígeno y humedad, desarrolla una capa de óxidos. Con el tiempo, esta película pasiva evoluciona siempre y cuando se mantengan las condiciones descritas como lo confirman otras investigaciones (Hansson, 1984).

A este período de prueba, se evidencian algunos transitorios en el rango de corrosión localizada, entre 0.1 y 1. Estos eventos, pudieran estar asociados a cambios localizados sobre la superficie del acero, debido a la propia evolución de la capa pasiva.

Después de 150 días de exposición, hay una caída en los valores de L.I. del rango de corrosión mixta entre hacia el rango de corrosión generalizada, entre 0.001 y 0.01. Este cambio es más marcado para las muestras CO, CO+3%FL, CO+5%FL, CO+8%FL, y CO+5%FC. Posiblemente, hay un ataque en algunos puntos de la superficie metálica por la presencia de iones agresivos (cloruros). Progresivamente, estas áreas de corrosión aumentan en tamaño y cantidad en correspondencia con el aumento de los valores de  $\sigma_i$ , sugiriendo una mayor actividad corrosiva sobre la superficie del metal, por lo que se evidencia una corrosión más generalizada.

### **✚ Probetas con mucílago de nopal.**

En el caso de las probetas con mucílago de nopal, el comportamiento de la desviación estándar del ruido en corriente es similar al comportamiento de las probetas con agregados de PET, según la Figura 4.20.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

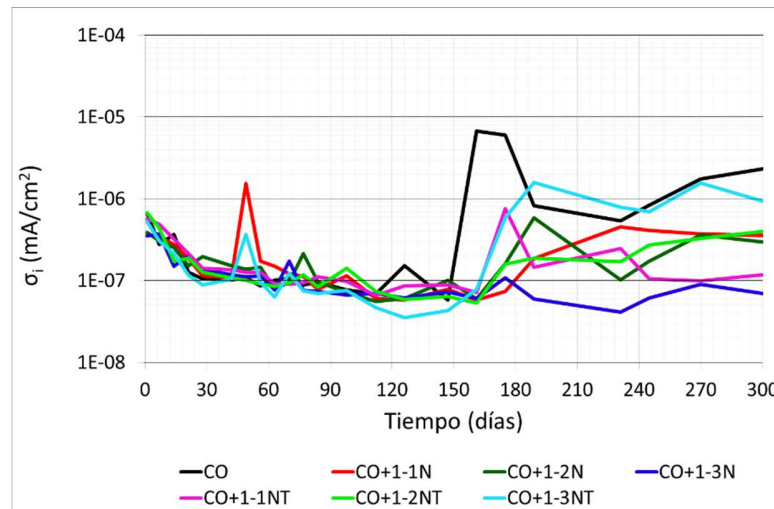


Figura 4. 20. Gráfica de valores de  $\sigma_i$ , para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.

Después de 28 días de curado del concreto, los valores de  $\sigma_i$  disminuyen en un orden de magnitud de 5E-07 mA/cm<sup>2</sup> y 5E-08 mA/cm<sup>2</sup> evidenciando una disminución en la actividad corrosiva del acero de refuerzo. Lo más significativo, son los valores alcanzados por la muestra control superiores a 5E-05 mA/cm<sup>2</sup>, sugiriendo una elevada actividad corrosiva. Este valor se encuentra en el orden de los reportados en la literatura entre 1E-05 y 1E-06 mA/cm<sup>2</sup> (Zhao *et al.*, 2007).

Diversos autores reportan estudios en concreto, que entre los 3 y 4 meses de exposición a cloruros el acero de refuerzo comienza a sufrir corrosión por el ataque de estos iones agresivos (Andrade, 1982; Morris *et al.*, 2002).

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

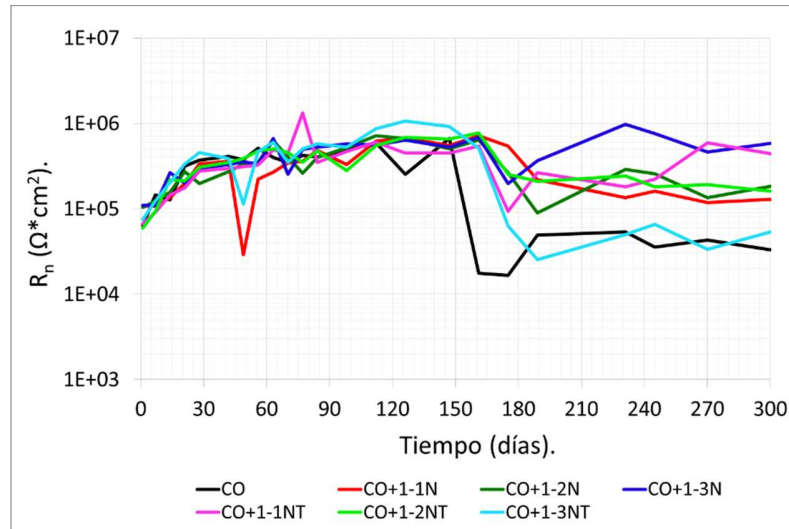


Figura 4. 21. Gráfica de valores de  $R_n$ , para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.

En la Figura 4.21, se observa el comportamiento electroquímico a partir de los valores de resistencia de ruido ( $R_n$ ). Al inicio de las pruebas, se observa un aumento progresivo de  $R_n$ , con una tendencia similar al comportamiento descrito en la figura 4.18, donde se muestran los valores de  $R_n$  obtenidos para las muestras con PET. Estos resultados evidencian, que el mucílago de nopal no afecta negativamente el proceso de curado del concreto, garantizando las condiciones para que el acero de refuerzo desarrolle una película pasiva.

Durante los últimos meses de prueba, la muestra control presenta una caída en los valores de  $R_n$  cercanos a  $2\text{E}+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , a diferencia del resto de las muestras que mantienen valores superiores a  $1\text{E}+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Esta respuesta evidencia parte de las ventajas que ofrece este gel de nopal, pues no solo actúa como retardante del fraguado del concreto, sino también como un aditivo que puede mejorar la respuesta electroquímica del acero de refuerzo, retrasar el inicio y propagación activa de la corrosión en el acero como lo demuestran otras investigaciones (Martinez-Molina *et al.*, 2016).



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Solo la muestra CO+1-3NT, tiene un comportamiento ligeramente superior a la muestra CO, aunque en varias etapas de evaluación presenta valores de hasta 3 veces el valor de la resistencia de la muestra control.

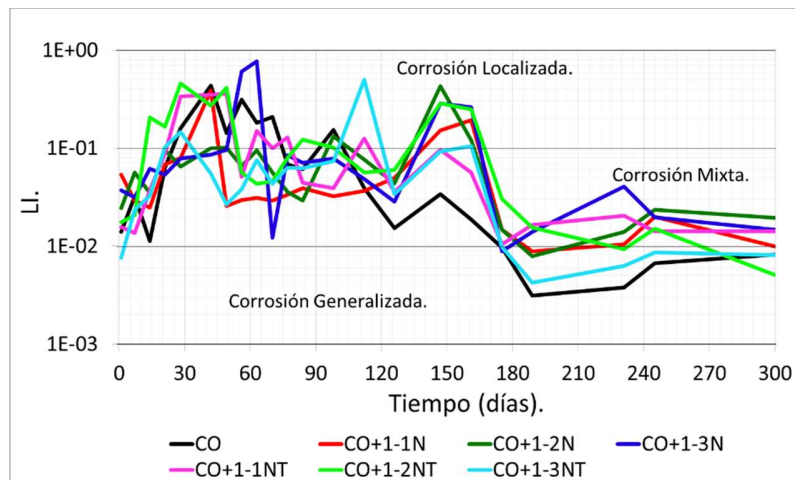


Figura 4. 22. Gráfica de valores de L.I., para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.

En la Figura 4.22, se muestra el tipo de corrosión para el acero de refuerzo para las muestras con mucílago de nopal. Durante los primeros meses de prueba, las probetas se mantienen en el rango de corrosión mixta y algunos transitorios alcanzan el rango de corrosión localizada. Con el transcurso del período de prueba, todas las muestras describen un cambio en los valores del índice de localización, acercándose al límite entre corrosión mixta y corrosión generalizada. Este cambio, es más significativo para la muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

### 4.3.3 Resultados de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica.

#### ✚ Probetas con agregados de PET.

Una forma de interpretar los resultados de la técnica E.I.S. es a través del diagrama de Nyquist, la impedancia real ( $Z'$ ) se representa en el eje X y la impedancia imaginaria ( $Z''$ ) en el eje Y (Andrade and Alonso, 1996). Estos diagramas se muestran en las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25.

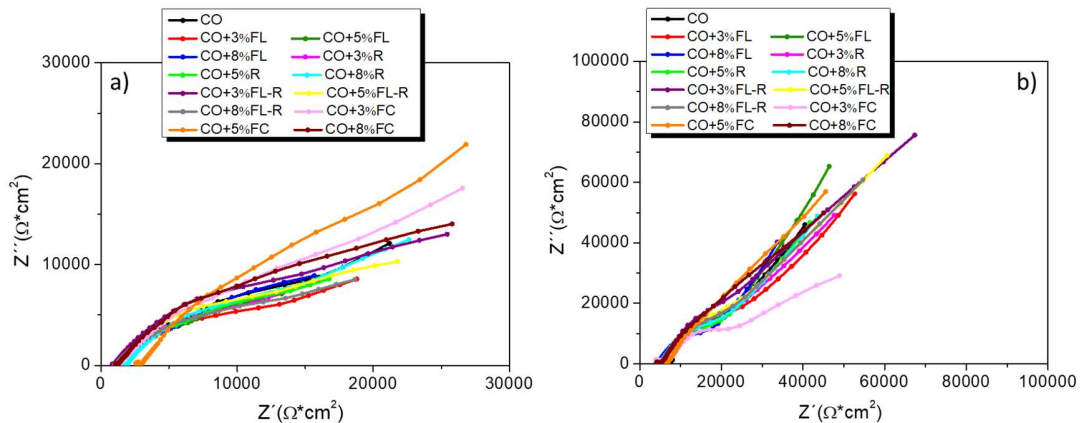


Figura 4. 23. Diagrama de Nyquist para las muestras con PET y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28.

Al inicio de las pruebas, se observa un semicírculo deprimido asociado a una resistencia de óxidos sobre la superficie del acero. Además, se aprecia otro arco correspondiente a un segundo semicírculo, el cual se atribuye a la resistencia de la transferencia de carga. Si el semicírculo asociado a la resistencia a la transferencia de carga se reduce significativamente, entonces hay un proceso de corrosión en la superficie del acero (Ribeiro and Abrantes, 2016). Este comportamiento se puede apreciar en el diagrama de Nyquist para el día 1. Por lo tanto, cuanto más bajos sean los valores de resistencia a la transferencia de carga, más avanzada será la actividad corrosiva en el metal.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

A los 28 días de curado del concreto, se puede ver que el semicírculo a baja frecuencia de todas las muestras se agrandó significativamente y tanto  $Z'$  y  $Z''$  alcanzaron valores similares. En esta etapa se termina el proceso de curado de las muestras, por tanto, el concreto presenta las condiciones ideales tales como: presencia de oxígeno, humedad y una elevada alcalinidad en sus poros.

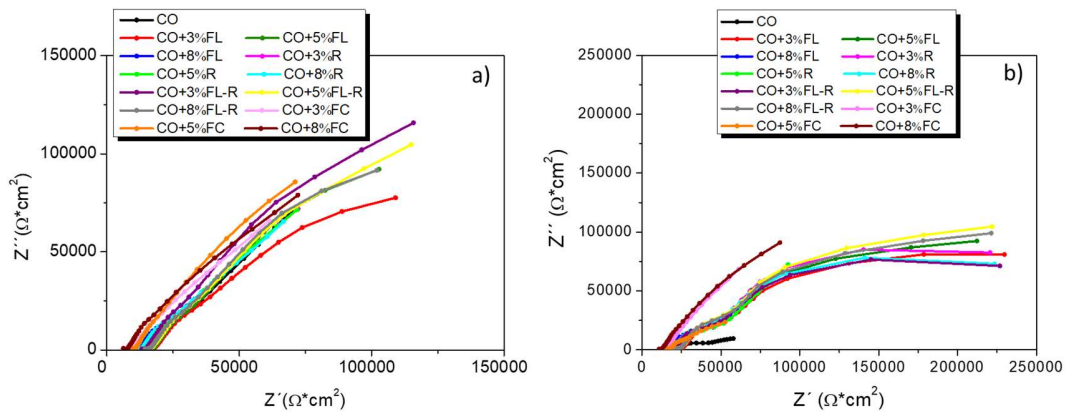


Figura 4. 24. Diagrama de Nyquist para las muestras con PET y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160.

Entre los días 84 y 160 de los diagramas de Nyquist, se observa un cambio importante en algunas muestras, donde se observa la formación del segundo semicírculo relacionado con la resistencia a la transferencia de carga. En estas muestras el diámetro del semicírculo es significativamente grande, con valores de  $Z'$  elevados. Además, la muestra CO presenta una caída significativa en los valores de  $Z'$  y una reducción del diámetro de ambos semicírculos.

Para los días 245 y 300, la muestra CO mantiene el mismo comportamiento, lo que evidencia un cambio en los óxidos formados sobre la superficie metálica. Otros estudios reportan similitud en los resultados obtenidos en muestras de concreto contaminadas con cloruros y expuestas a una atmosfera con 100% de humedad (Andrade *et al.*, 2001). Las muestras CO+3%FL, CO+5%FL y CO+8%FL, a este tiempo de prueba comienzan a mostrar un comportamiento similar.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

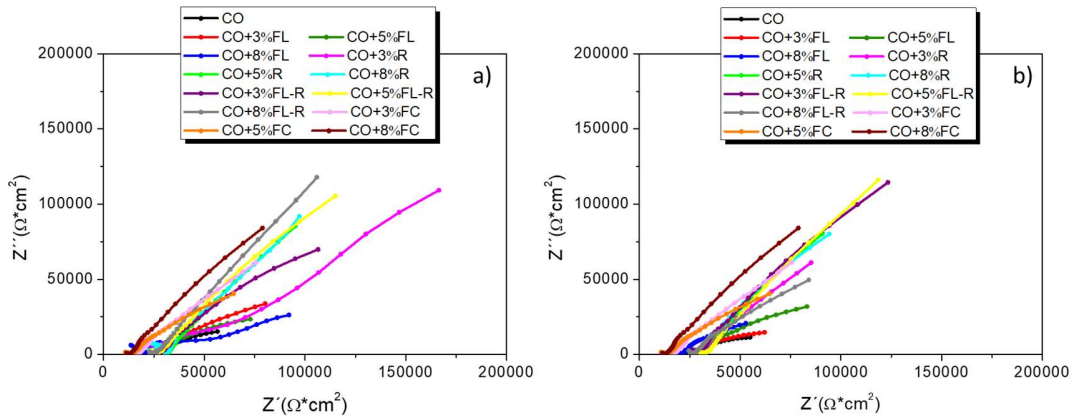


Figura 4. 25. Diagrama de Nyquist para las muestras con PET y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300.

En general, las muestras con partículas en forma de rectángulos, fibras cortas y con la mezcla de fibras + rectángulos mantienen durante un período más largo valores elevados tanto de  $Z'$  como de  $Z''$ , atribuido al tipo de geometría y porcentaje utilizado del polímero.

Otra manera de analizar los resultados de impedancia es graficar el módulo de la impedancia y el ángulo de fase en función de la frecuencia. Estos tipos de gráficos se conocen como diagramas de Bode (Andrade and Alonso, 1996). Estos diagramas se muestran en las Figuras 4.26, 4.27 y 4.28.

El comportamiento a valores de alta frecuencia se puede atribuir al electrolito presente en la red de poros del concreto. Las frecuencias bajas están asociadas con procesos característicos de la interfaz acero-hormigón y pueden correlacionarse con la actividad corrosiva (Morozov *et al.*, 2013). En los diagramas de Bode a lo largo del período de exposición, se puede observar un aumento a altas frecuencias de la resistencia de la solución en la red de poros de concreto ( $R_{ps}$ ).

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

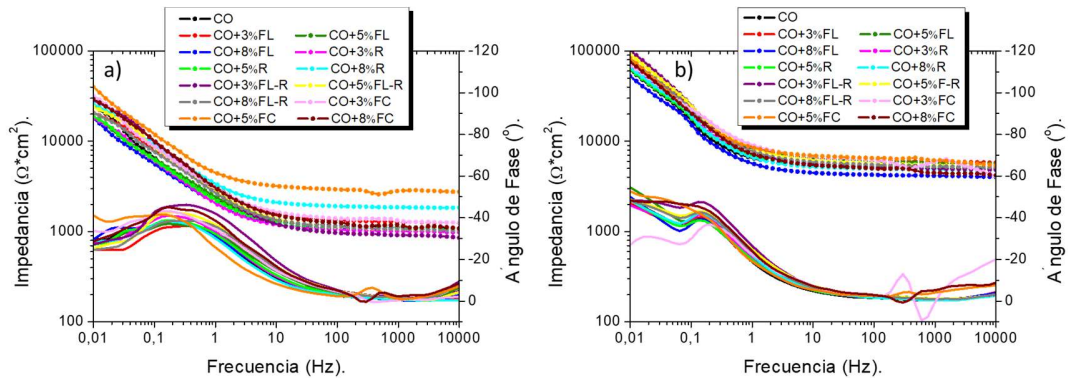


Figura 4. 26. Diagrama de Bode para las muestras con PET y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28.

Al comienzo, los valores de  $R_{ps}$  son aproximadamente  $1E+03 \Omega \cdot cm^2$ , sin embargo, al final del tiempo de prueba la muestra control alcanzó un valor de  $2.2E+04 \Omega \cdot cm^2$  y las muestras con rectángulos y la mezcla de fibras + rectángulos presentaron valores entre  $2.5E+04$  y  $3E+04 \Omega \cdot cm^2$ . Este comportamiento está asociado con el efecto barrera de las diferentes geometrías de PET inmersas en la matriz de concreto y con el continuo proceso de hidratación del cemento.

Los procesos de hidratación del cemento se relacionan con la resistividad del concreto (Giannotti da Silva and Liborio, 2006), y la evolución de este mecanismo de reacción puede indicar una mejora en la resistividad del concreto (Morozov *et al.*, 2013). En muestras completamente sumergidas en una solución de cloruro de sodio al 3% la resistividad del concreto está directamente relacionada con el tiempo de exposición y la composición química del cemento (Montemor, Simões and Salta, 2000).

En contraste, para el día 300 de pruebas las muestras con fibras cortas presentaron valores muy bajos de  $R_{ps}$  alrededor de  $1.6E+04 \Omega \cdot cm^2$ , este comportamiento se puede atribuir a que las condiciones de fabricación, así como del período de evaluación de las muestras fueron diferentes. Además,

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

los materiales presentaron las mismas características pero procedieron de lotes diferentes y condiciones diferentes de almacenamiento.

En estudios de muestras de concreto de alto rendimiento con agregados de humo de sílice y sílice de cáscara de arroz, se evidencia un aumento significativo de los valores de  $R_{ps}$ , sobre todo en muestras con ambos agregados de sílice. Los valores reportados son cercanos a  $3.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$  después de 8 meses de inmersión en cloruro de sodio al 3.5% (Giannotti da Silva and Liborio, 2006).

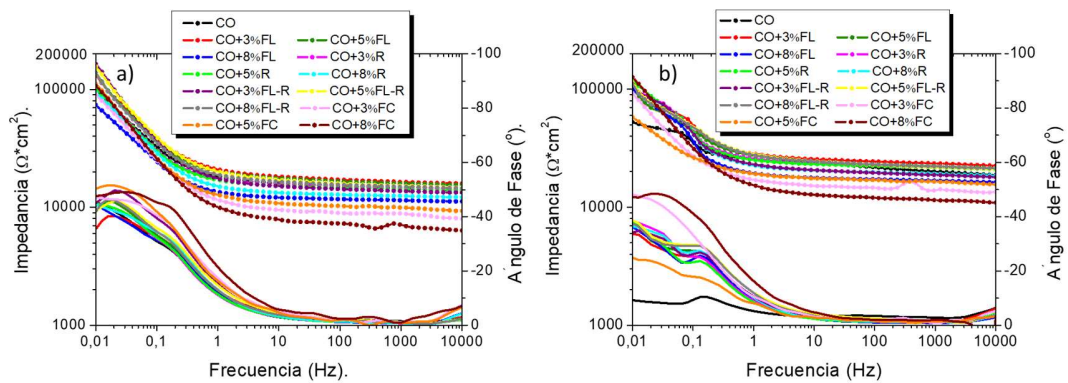


Figura 4. 27. Diagrama de Bode para las muestras con PET y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160.

En el diagrama de Bode para el día 84 hay un incremento significativo de la impedancia, así como del ángulo de fase que alcanza valores de hasta  $-40^\circ$ , indicando un comportamiento capacitivo. En cambio para el día 160 de prueba, se aprecia un cambio brusco en la pendiente de la impedancia en función de la frecuencia, sobre todo para la muestra CO, seguido de la muestra CO+5%FC. En diagramas de Bode para muestras de concreto contaminadas con cloruros y expuestas a una solución de cloruro de sodio al 3% durante 35 días, se reportan cambios similares en la pendiente de la impedancia (Morozov *et al.*, 2013). Este comportamiento indica posiblemente el inicio de la corrosión sobre la superficie del acero de refuerzo. (Giannotti da Silva and Liborio, 2006).

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

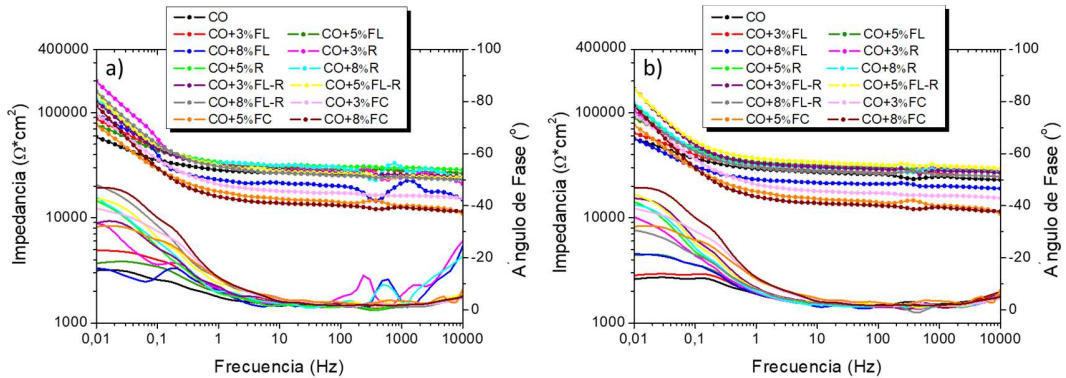


Figura 4. 28. Diagrama de Bode para las muestras con PET y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300.

Después de 245 días de exposición al medio agresivo, se puede observar que las muestras CO+3%FL, CO+5%FL y CO+8%FL progresivamente comienzan a tener un comportamiento similar a las muestras CO con una disminución de la impedancia alcanzando valores entre  $6E+04$  y  $8E+04 \Omega^*cm^2$ . El resto de las muestras mantienen valores superiores a  $1E+05 \Omega^*cm^2$ , sin cambios significativos en los valores del ángulo de fase a bajas frecuencias.

En la Figura 4.29 se pueden observar los valores de la impedancia total para todas las muestras con polímero.

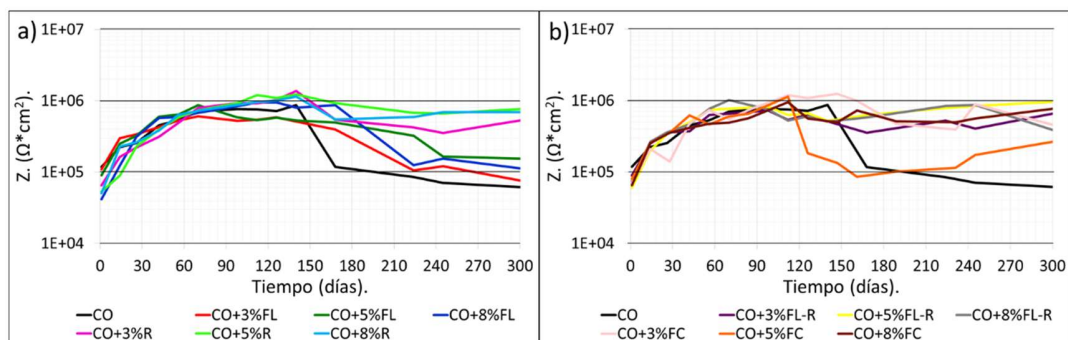


Figura 4. 29. Gráfica de valores de impedancia total (Z) en función del tiempo para a) Probetas con fibras largas, rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

De manera general se aprecia un comportamiento similar en comparación con los valores de  $R_n$  y  $R_p$ , afirmando las técnicas de E.N., L.P.R. y E.I.S. son apropiadas para el análisis electroquímico del sistema acero-concreto.

### ✚ Probetas con mucílago de nopal.

Los diagramas de Nyquist para las probetas con mucílago de nopal se muestran en las Figuras 4.30, 4.31 y 4.32.

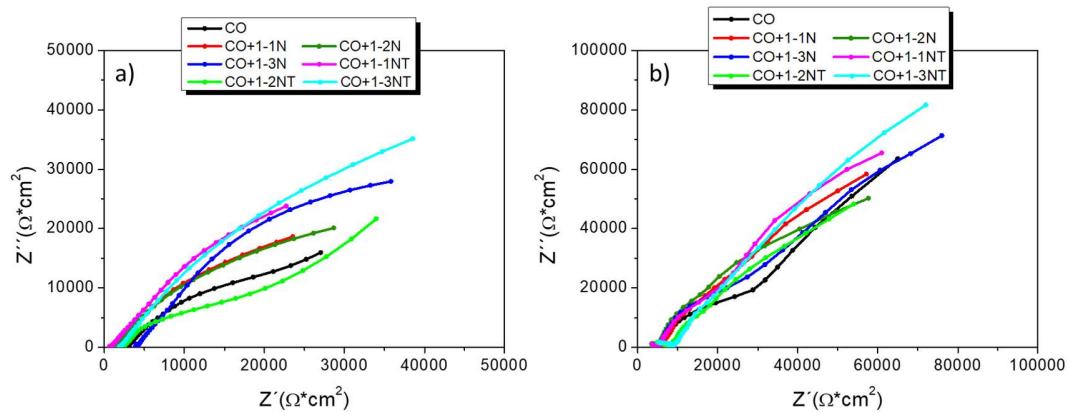


Figura 4. 30. Diagrama de Nyquist para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28.

Para el día 1 de prueba, las muestras presentan pequeños valores, tanto para  $Z'$  como la  $Z''$  con un semicírculo deprimido e incompleto, que sugiere un comportamiento no ideal de la capacitancia. Un comportamiento similar se reporta en otros estudios (Pech-Canul and Castro, 2002).

Para el día 28 de prueba ya se aprecia un primer semicírculo asociado a la resistencia de la película de óxidos y un segundo semicírculo relacionado con la resistencia a la transferencia de carga. Además, se observa un aumento de los valores tanto de  $Z'$  como de  $Z''$  así como del diámetro de ambos semicírculo. Este comportamiento, evidencia un cambio en la superficie del



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

acero por el efecto que causa el proceso de curado en el concreto y el acero de refuerzo.

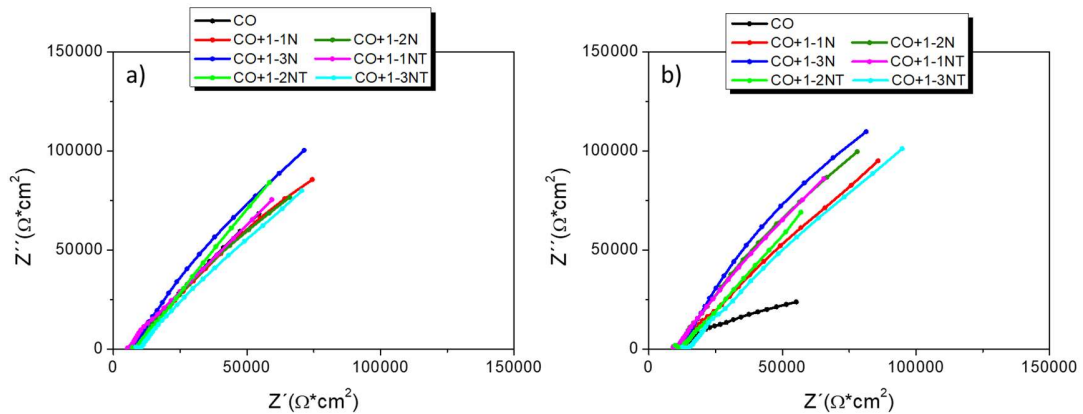


Figura 4. 31. Diagrama de Nyquist para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160.

Entre los días 84 y 160, se aprecia un cambio significativo en el comportamiento de la muestra CO. Posiblemente por un cambio en la superficie del acero relacionado con la corrosión activa del acero. Por otro lado, el resto de las muestras mantienen elevados valores de  $Z'$  y  $Z''$ . Estos valores de impedancia se asocian a un estado pasivo del acero.

En otras investigaciones se afirma que el gel de nopal es capaz de reducir el tamaño de los poros dentro del concreto, debido a que los polímeros naturales presentes en su composición son capaces de reaccionar con los compuestos del cemento para formar un compuesto más compacto (Chandra, Eklund and Villarreal, 1998; Ramírez-Arellanes *et al.*, 2012). Otros autores han planteado que la elevada viscosidad del mucílago de nopal puede afectar la solución dentro de los poros del concreto (Bentz *et al.*, 2009), limitando la velocidad de penetración de los agentes agresivos del medio externo.

Con el avance del tiempo de exposición las muestras CO+1-1N, CO+1-2NT y CO+1-3NT comienzan a presentar un comportamiento similar a la muestra

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

control, aunque al finalizar el período de prueba se aprecia un aumento en los valores de  $Z'$  y  $Z''$ , para todas las muestras con mucílago de nopal, tal y como se observa en la Figura 4.32. Lo anterior demuestra, que aun en presencia de cloruros el mucílago de nopal es capaz de proteger el acero de refuerzo en el concreto.

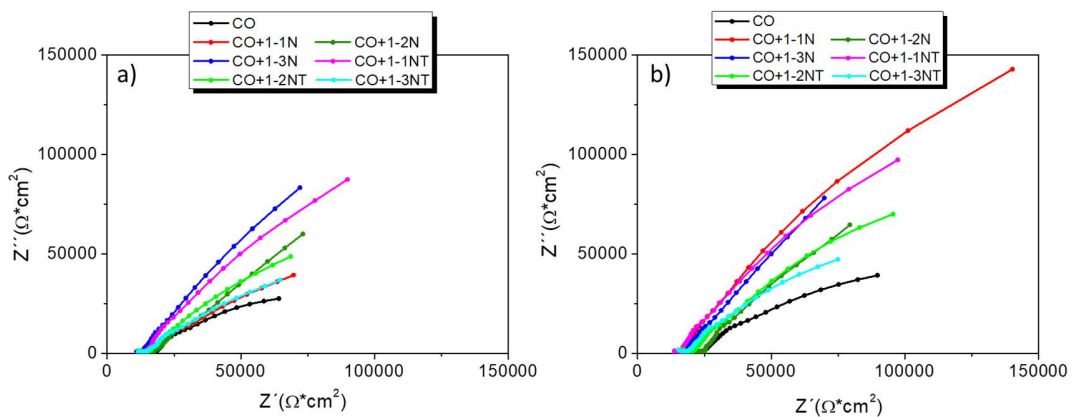


Figura 4. 32. Diagrama de Nyquist para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300.

Los diagramas de Bode para las muestras con mucílago de nopal se representan en las Figuras 4.33, 4.34 y 4.35.

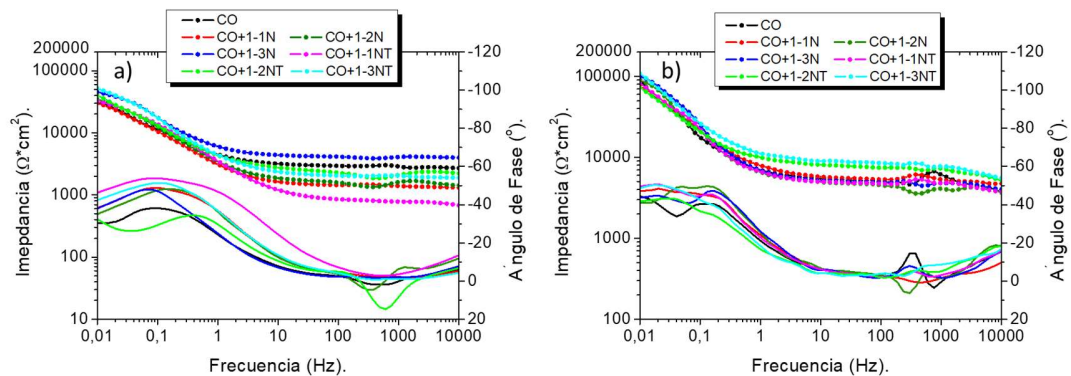


Figura 4. 33. Diagrama de Bode para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 1 y b) Día 28.

Al inicio del período de prueba se observa a altas frecuencias los valores de la resistencia de la solución en los poros del concreto que varía entre  $1E+03$  y

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

$5E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para todas las muestras. Similar a los resultados obtenidos por las muestras con PET, la  $R_{ps}$  va aumentando progresivamente con el avance del tiempo de exposición. En el caso del mucílago de nopal los valores de la  $R_{ps}$  al finalizar el período de prueba fueron inferiores a los de la muestra CO, posiblemente por el efecto retardador de este aditivo natural en las reacciones de fraguado del cemento. Otros estudios han demostrado el efecto retardante del mucílago de nopal en las reacciones de hidratación del cemento. (Dúran-Herrera *et al.*, 2012; Ramírez-Arellanes *et al.*, 2012).

A los 28 días de curado los valores de impedancia se incrementan considerablemente debido a que se han garantizado las condiciones de humedad, pH (12-13) y presencia de oxígeno, bajo las cuales el acero desarrolla una capa pasiva. Cabe mencionar, que la alcalinidad del concreto propicia las condiciones para que el acero este pasivo (Andrade, Alonso and Sarfá, 2002). Se aprecian valores negativos del ángulo de fase de hasta  $-40^\circ$ , indicando un comportamiento capacitivo de la doble capa.

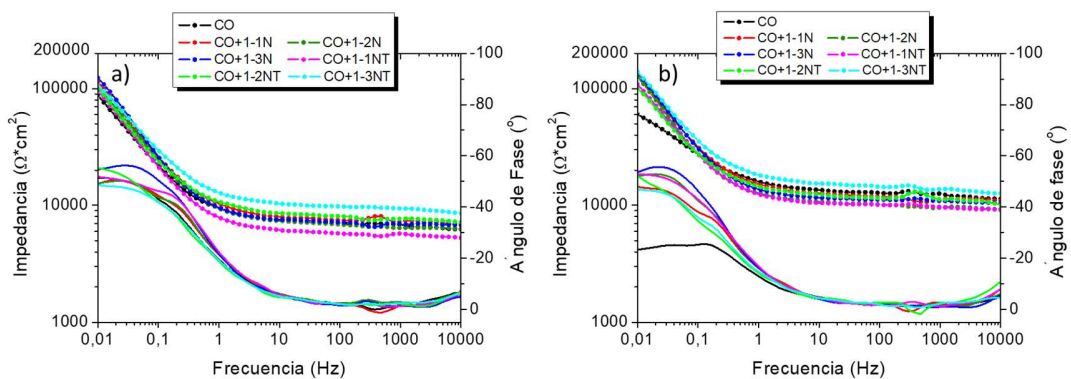


Figura 4. 34. Diagrama de Bode para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 84 y b) Día 160.

Para los días 84 y 160 las condiciones descritas parecen mantenerse, excepto para la muestra CO, la cual describe un cambio en la pendiente de IZI en función de la frecuencia y una disminución de los valores del ángulos de fase, sugiriendo un comportamiento menos capacitivo. Posiblemente se empieza a

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

desarrollar un cambio en la superficie metálica por la interacción de los iones cloruros con el acero. Progresivamente las muestras CO+1-1N, CO+1-2NT y CO+1-3NT, describen esta tendencia aunque los valores de la impedancia siguen siendo superiores a la muestra CO. Posiblemente el método de extracción del mucílago de nopal aplicando temperatura pudo haber tenido un efecto menos favorable en la respuesta electroquímica del acero de refuerzo.

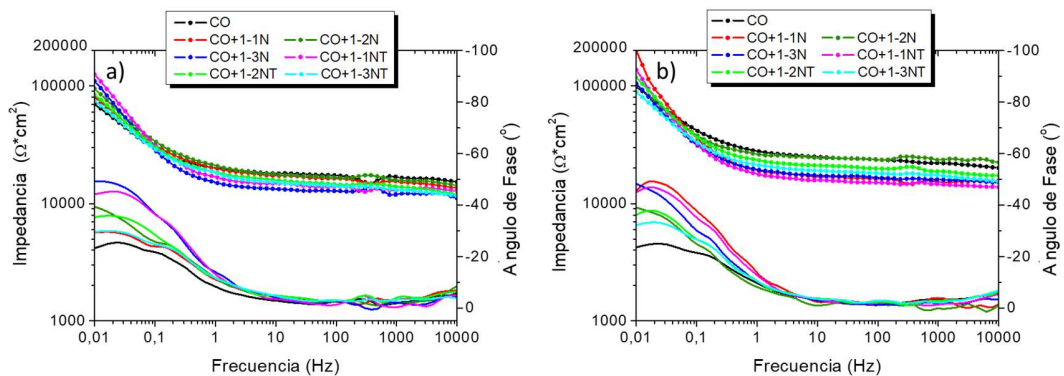


Figura 4. 35. Diagrama de Bode para las muestras con mucílago de nopal y muestra control. a) Día 245 y b) Día 300.

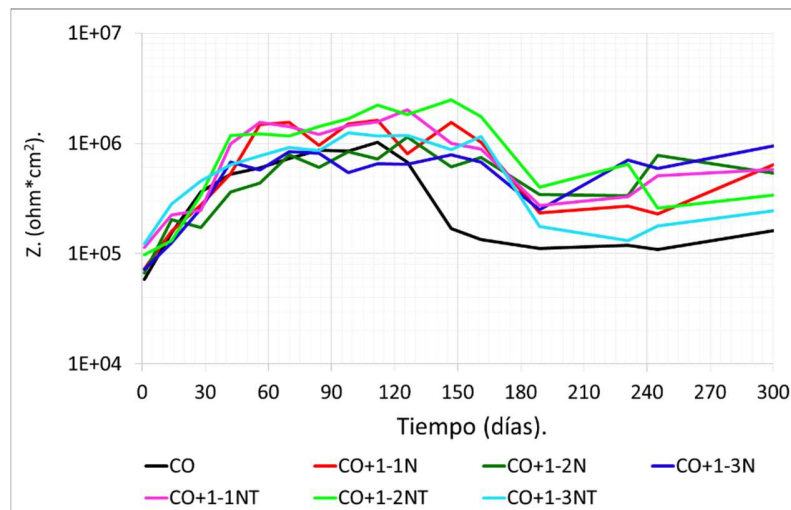


Figura 4. 36. Gráfica de valores de impedancia total (Z) en función del tiempo, para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.

Los valores totales de la impedancia se describen en la Figura 4.36. Cabe destacar el buen comportamiento de todas las muestras con mucílago de

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

nopal, las cuales mantiene valores superiores con respecto a la muestra control durante casi todo el período de prueba.

Las muestras CO+1-1N, CO+1-1NT y la muestra CO+1-2NT, alcanzaron valores superiores a  $1.5E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$  entre los días 50 y 150, pero después de 300 días de exposición al medio agresivo las muestras CO+1-2N y CO+1-3N describen los valores más elevados de IZI. Sin embargo, las muestras CO+1-2N, CO+1-3N y CO+1-1NT al finalizar el período de prueba mantienen valores superiores a  $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Estos resultados evidencia el buen comportamiento de las muestras con mucílago de nopal.

### 4.3.4 Resultados de la técnica de resistencia a la polarización lineal.

#### ✚ Probetas con agregados de PET.

Los valores de  $R_p$  para las muestras con diferentes geometrías de PET, se describen en la Figura 4.37.

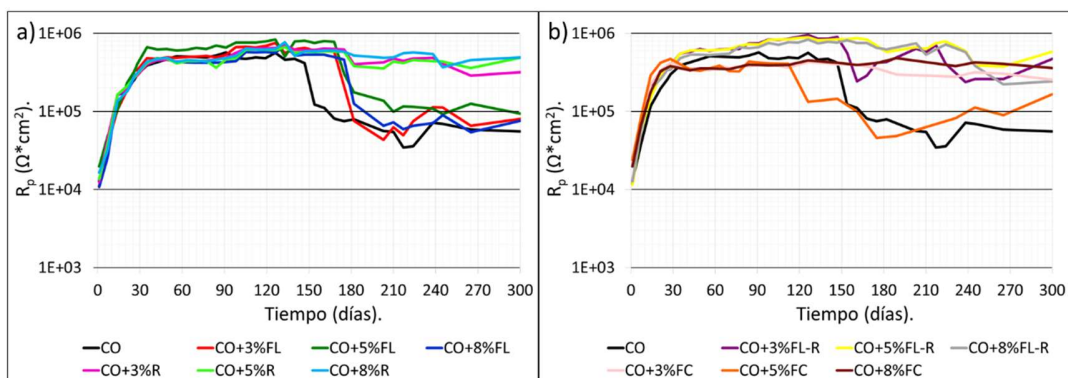


Figura 4. 37. Gráfica de valores de  $R_p$  en función del tiempo para a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.

## **CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”**

---

Al inicio del período de prueba, se observa un rápido incremento de los valores de  $R_p$  cercanos a  $2E+04 \Omega^*cm^2$  para el día 1 y superiores a  $4E+05 \Omega^*cm^2$  para el día 28 de prueba. Según la literatura durante este período se llevan a cabo un complejo de reacciones entre los diferentes compuestos del cemento y el agua presente en los poros del concreto, garantizando la elevada alcalinidad del concreto y las condiciones para que el acero este pasivo ([Andrade, Alonso and Sarfa, 2002](#)). Además, los valores de resistencia a la polarización tan elevados son un indicativo de que el acero esta pasivo.

Después de 150 días de exposición al medio agresivo, la muestra CO y CO+5%FC presentan una caída en los valores de  $R_p$  cercanos a  $5E+04 \Omega^*cm^2$ . Progresivamente, las probetas con 3, 5 y 8% de fibras largas experimentan este comportamiento de manera menos significativa. En cambio, todas las muestras con rectángulos y la mezcla de fibras largas + rectángulos mantienen valores entre  $2E+05$  y  $5E+05 \Omega^*cm^2$ .

Cada geometría del PET actúa de manera diferente en el concreto. En el caso de los rectángulos, estos tienen un efecto barrera dentro de la matriz de concreto, retrasando así la presencia de iones agresivos sobre la superficie del metal. Este comportamiento también se evidenció en las probetas con fibras cortas, por tener dimensiones algo similar a los rectángulos. Por su parte, las fibras largas no fueron tan favorables para mejorar las propiedades electroquímicas, aunque estas previenen la formación y propagación de fisuras y grietas, y controlan el desprendimiento de material después de la rotura. Otros autores han demostrado el efecto favorable de las fibras de PET en la respuesta mecánica del concreto ([Frigione, 2010](#); [Foti, 2011](#)).

Los mayores valores de  $R_p$  se alcanzan para las probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, cercanos a  $1E+06 \Omega^*cm^2$ . En estas muestras,

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

ambas geometrías de PET dentro de la misma matriz de concreto, mejoran el comportamiento de cada geometría por separado.

En la Figura 4.38, se observan los valores de la rapidez de corrosión para el acero de refuerzo del concreto en muestras con agregados de PET.

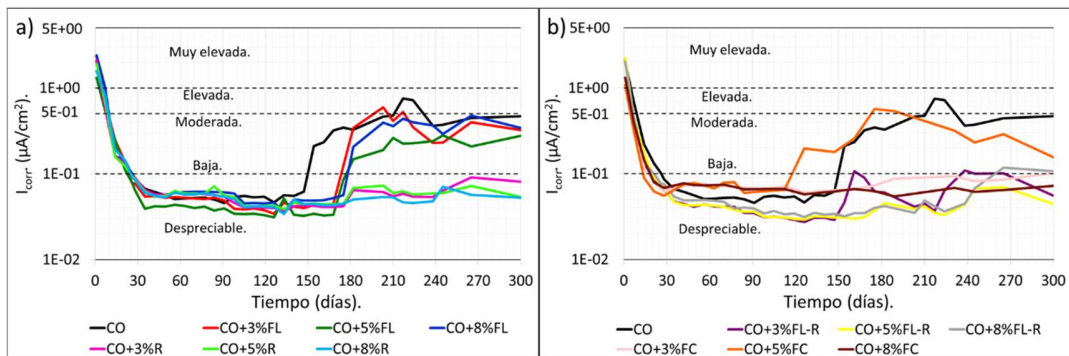


Figura 4. 38. Gráfica de valores de  $I_{corr}$  en función del tiempo para a) Probetas con fibras largas, partículas en forma de rectángulos y muestra control, y b) Probetas con la mezcla de fibras largas + rectángulos, fibras cortas y muestra control.

La rapidez de corrosión es inversamente proporcional a la  $R_p$ , valores a partir de los cuales se determinó la  $I_{corr}$  para todas las muestras. En consecuencia, se pueden observar elevados valores de  $I_{corr}$  superiores a  $1 \mu A/cm^2$  al inicio del período de prueba, a diferencia de los valores de  $R_p$  que son muy bajos.

Después de 28 días, los valores de  $I_{corr}$  disminuyen considerablemente hasta alcanzar el rango de rapidez de corrosión despreciable, entre  $0.01$  y  $0.1 \mu A/cm^2$ . Estos valores están en correspondencia con los reportados en la literatura, para diferentes condiciones de exposición a este período de prueba (Garcés *et al.*, 2008).

Entre los días 150 y 180, un aumento significativo de la  $I_{corr}$  es apreciable en la muestra control, las muestras con fibras largas y la muestra con 5% de fibras cortas. Estas muestras alcanzan un rango de rapidez de corrosión de bajo a

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

moderado, llegando a ser elevado sobre todo para la muestra control con valores superiores a  $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Estos valores indican el inicio de la corrosión activa del acero de refuerzo en el concreto así como al formación de óxidos no protectores sobre la superficie del metal como lo reportan otros autores (Pech-Canul and Castro, 2002). Por el contrario, el resto de las muestras se mantiene en un rango de rapidez de corrosión despreciable, con valores inferiores a  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Por lo anterior, se puede afirmar que el PET agregado a una matriz de concreto en geometrías como rectángulos, mezcla de fibras+ rectángulos y fibras cortas con las dimensiones establecidas en esta investigación, previene y alargan el inicio de la corrosión del acero de refuerzo.

A partir de los valores de  $R_n$  y  $R_p$ , se realizó un ajuste lineal tal y como se observa en la Figura 4.39. Con los resultados obtenidos el coeficiente de correlación fue de 0.61. Este valor indica una correlación razonable entre los resultados de ambas técnicas electroquímicas, teniendo en cuenta que un valor de cero indica que no hay correlación y un valor de uno indica una muy buena correlación.

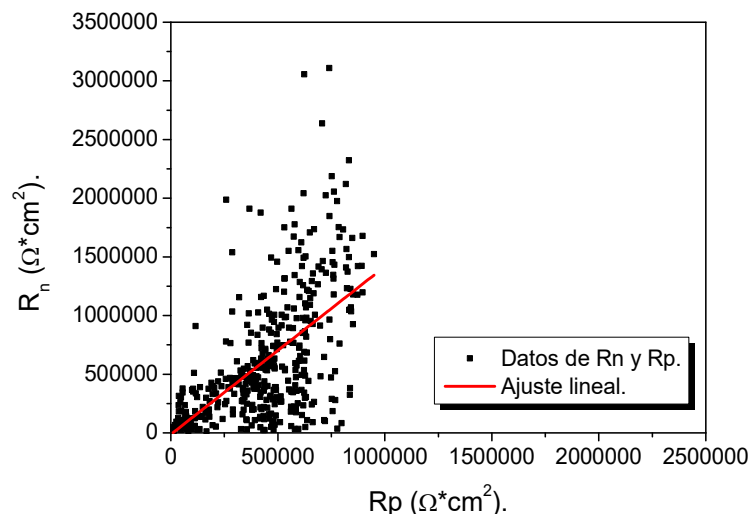


Figura 4. 39. Gráfica de correlación entre los valores de  $R_n$  y  $R_p$  para las muestras con PET.



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Otras investigaciones han determinado buenos valores de coeficiente de correlación entre 0,84 y 0.95 para diferentes parámetros electroquímicos (Kearns *et al.*, 1996). En la literatura se han reportado excelentes valores de coeficiente de correlación de 0.92, para el estudio de la rapidez de corrosión obtenida por técnicas gravimétricas y electroquímicas en muestras de concreto reforzado (Alghamdi y Ahmad, 2014).

### ✚ Probetas con mucílago de nopal.

El comportamiento de los valores de  $R_p$  para las muestras con mucílago de nopal se describe en la Figura 4.40.

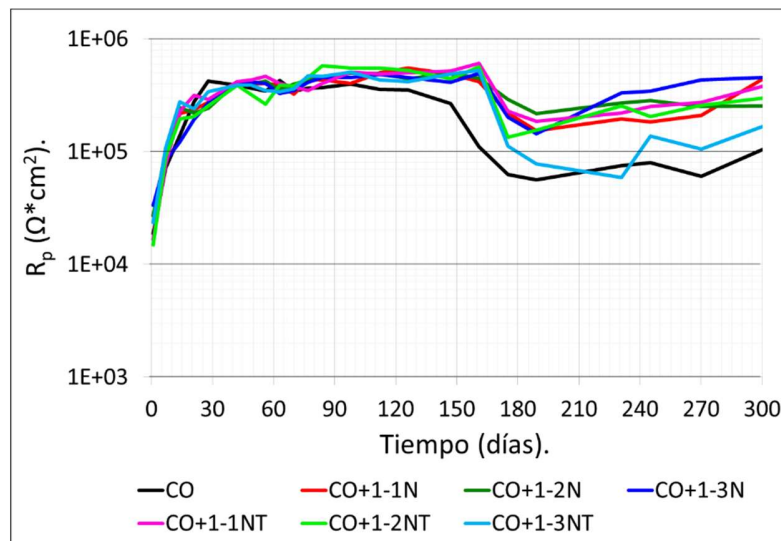


Figura 4. 40. Gráfica de valores de  $R_p$  en función del tiempo para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.

Comparando esta gráfica con la Figura 4.37, es evidente la similitud de ambas, si se tiene en cuenta que de manera general se observa la misma tendencia. Aunque los valores de  $R_p$  alcanzados por las muestras con mucílago de nopal son ligeramente inferiores, en comparación con los valores de  $R_p$  obtenidos por las probetas con rectángulos, fibras largas + rectángulos, y fibras cortas.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Es evidente el buen desempeño del mucílago de nopal dentro del concreto, pues a pesar de presentar una caída en los valores de  $R_p$  después de 150 días de prueba; progresivamente va aumentando la resistencia de todas las muestras. Algunos autores describen este comportamiento en pruebas con nopal, afirmando que esta solución no solo mejorar las propiedades mecánicas del concreto, sino también, que lo hace menos permeable (Ramírez-Arellanes *et al.*, 2012), y disminuye el agrietamiento a corto y largo plazo (Dúran-Herrera *et al.*, 2012).

En la Figura 4.41, se observan los valores de  $I_{corr}$  para las muestras con mucílago de nopal y la muestra control durante un tiempo de exposición de 300 días.

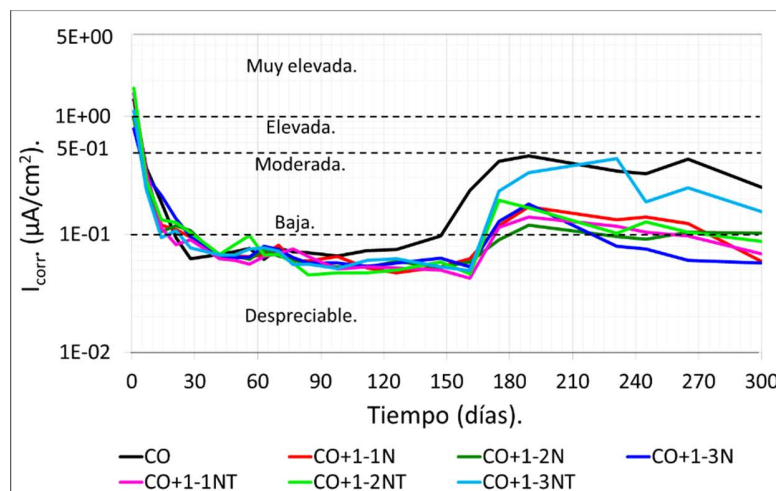


Figura 4. 41. Gráfica de valores de  $I_{corr}$  en función del tiempo para las probetas con mucílago de nopal y la muestra control.

En el caso de las muestras con mucílago de nopal, la tendencia del comportamiento de la rapidez de corrosión es muy similar. Con valores elevados de  $I_{corr}$  durante los primeros días de prueba, y una rapidez de corrosión despreciable después de los 28 días de curado del concreto.

A los 180 días, se observa un ligero incremento de los valores de  $I_{corr}$  para las muestras con mucílago, excepto para la muestra CO+1-3NT y la muestra

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

control, las cuales experimentan elevados valores de  $I_{corr}$  cercanos a  $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Al finalizar el período de prueba la muestra CO+1-3NT se acerca al límite de corrosión entre despreciable a baja ( $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) y el resto de las muestras con mucílago vuelven a alcanzar bajos valores de  $I_{corr}$  inferiores a  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Este comportamiento indica que el mucílago de nopal no solo mejora las propiedades electroquímicas del acero, sino también que en presencia de cloruros puede mantener protegido el acero de refuerzo por un mayor tiempo como se evidencia en otras investigaciones (Martinez-Molina *et al.*, 2016). Por el contrario, la muestra control se mantiene en el rango de rapidez de corrosión moderada.

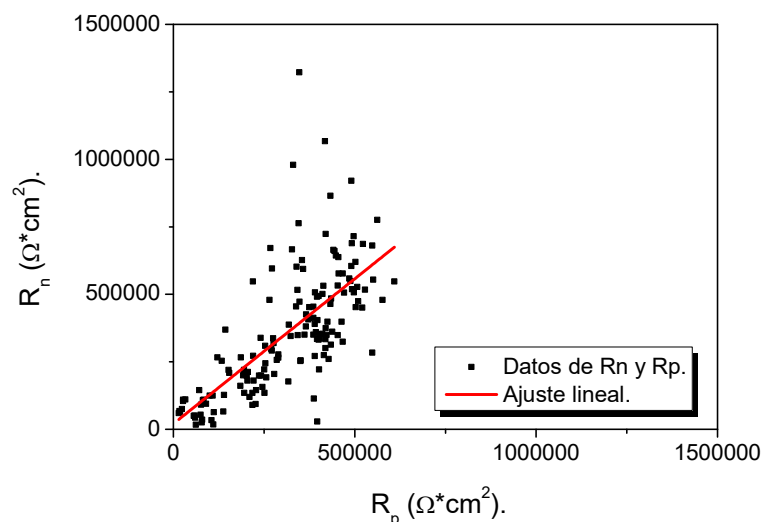


Figura 4. 42. Gráfica de correlación entre los valores de  $R_n$  y  $R_p$  para las muestras con PET.

En la Figura 4.42 se pueden observar los valores de  $R_n$  y  $R_p$ , para las muestras con mucílago de nopal. Del ajuste realizado se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.69, ligeramente superior al valor obtenido para las muestras con PET. Este valor indica una correlación razonable entre los resultados de ambas técnicas electroquímicas.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

### 4.3.5 Resultados a partir de la observación visual de las barras de acero.

#### ✚ Probetas con agregados de PET.

En las Figuras 4.43, 4.44, 4.45, 4.46 y 4.47, se presentan las barras de acero extraídas del concreto posterior al tiempo de evaluación, para todas las muestras.



Figura 4. 43. Varillas de acero de la muestra control, extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo.

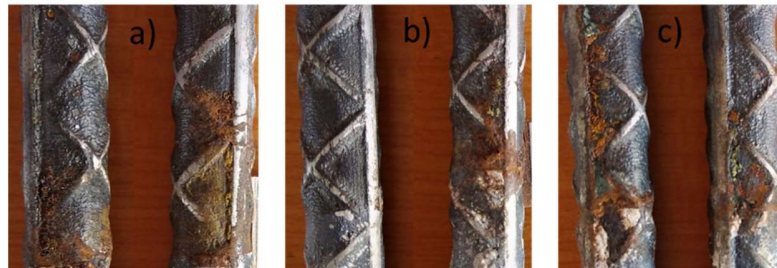


Figura 4. 44. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con fibras largas de PET; a) CO+3%FL, b) CO+5%FL y c) CO+8%FL.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

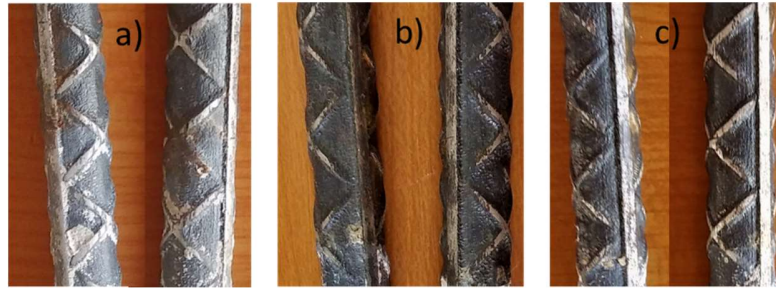


Figura 4. 45. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con rectángulos de PET; a) CO+3%R, b) CO+5%R y c) CO+8%R.

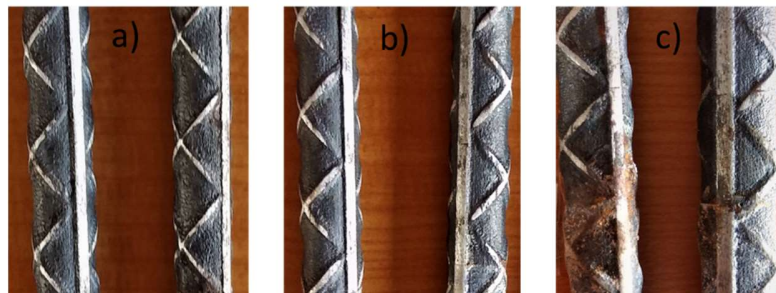


Figura 4. 46. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con fibras largas + rectángulos de PET; a) CO+3%FL-R, b) CO+5%FL-R y c) CO+8%FL-R.



Figura 4. 47. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con fibras cortas de PET; a) CO+3%FC, b) CO+5%FC y c) CO+8%FC.

En la actualidad, la simple observación visual, sin que esté acompañada de otras indicaciones más exactas, se valora con ciertas precauciones por la subjetividad que engloba (Andrade, 1982).

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

De manera general se pueden observar zonas de color rojizo distribuidas sobre gran parte de la superficie metálica, para la muestra control y las muestras con fibras largas. Este tono rojizo está asociado a productos de corrosión, también llamados herrumbre formados por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Song *et al.*, 2019),  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Fang *et al.*, 2019) y  $\text{FeOOH}$  (Ji *et al.*, 2015). En cambio, el resto de las muestras con rectángulos, la mezcla de fibras largas + rectángulo y las fibras cortas, presentan un color gris en casi toda la varilla, asociado a la capa pasiva desarrollada sobre la superficie del acero. Esta capa pasiva está compuesta por  $(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  (Hansson, 1984), es muy compacta (Andrade, 1982), impermeable y de muy pequeño espesor.

### ✚ Probetas con mucílago de nopal.

Para el caso de las probetas con mucílago de nopal se procedió de la misma manera para realizar la extracción de las barras de acero. En las Figuras 4.48, 4.49 y 4.50, se pueden apreciar las varillas de acero para la probeta control y las probetas con mucílago de nopal obtenido por maceración a temperatura ambiente y maceración aplicando temperatura.



Figura 4. 48. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para la muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

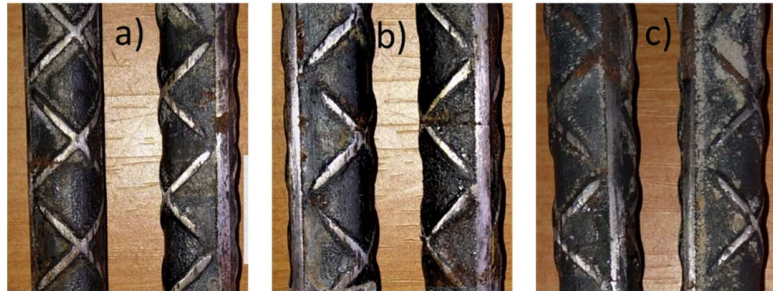


Figura 4. 49. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con mucílago de nopal extraído por maceración a temp. ambiente; a) CO+1-1N, b) CO+1-2N y c) CO+1-3N.

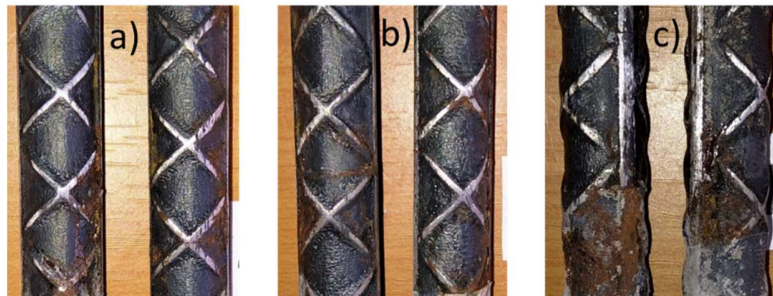


Figura 4. 50. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 300 días de exposición al medio agresivo, para las muestras con mucílago de nopal extraído por maceración aplicando temp.; a) CO+1-1NT, b) CO+1-2NT y c) CO+1-3NT.

En estas imágenes se puede observar el efecto que tiene el mucílago de nopal en la durabilidad del acero de refuerzo en el concreto. Solo la muestra control presenta una mayor área de productos de corrosión no protectores o herrumbre y en menor medida la muestra CO+1-3NT, posiblemente en esta muestra el método de extracción del mucílago tuvo un efecto desfavorable. El resto de las muestras solo presentan zonas muy pequeñas de color rojizo, evidenciándose una menor formación de productos de corrosión no protectores sobre el acero. Estos resultados en conjunto con los obtenidos a través de las diferentes técnicas electroquímicas demuestran el efecto favorable del mucílago de nopal en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

### 4.3.6 Resultados electroquímicos para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal.

A partir de los resultados electroquímicos y mecánicos obtenidos en esta investigación se determinó la concentración óptima de mucílago de nopal para su uso en combinación con las geometrías y porcentaje de PET que mantuvieron el acero en estado pasivo por un mayor tiempo de exposición.

#### ✚ Potencial de media celda.

La Figura 4.51 representa los valores promedio del potencial de media celda (H.C.P.) en función del tiempo, medido contra un electrodo saturado de calomel (S.C.E.).

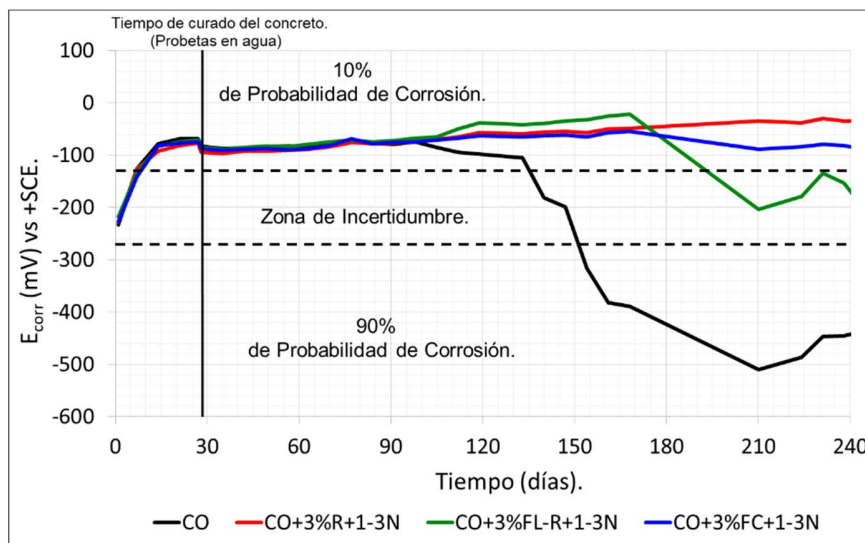


Figura 4. 51. Gráfica de valores del potencial de media celda en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control.

Al combinar ambos agregados (PET y mucílago de nopal) en el concreto la respuesta que se obtiene a partir de la técnica H.C.P. es muy favorable. Se puede apreciar que los valores de potencial son más nobles durante casi todo



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

el período de prueba en comparación con la muestra control que alcanza valores de hasta -500 mV, con una probabilidad corrosión del 90%.

De las muestras con PET y mucílago, solo la CO+3%FL-R+1-3N tiene una disminución en sus valores de potencial cercano a -200 mV, aunque al finalizar el tiempo de exposición adquiere valores más nobles. Estos resultados son un indicativo de que tanto el PET como el mucílago de nopal en conjunto pueden mejorar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo. Con el apoyo de los resultados del resto de las técnicas electroquímicas se puede corroborar el efecto de estos agregados.

### ✚ Ruido electroquímico.

A partir de las series de tiempo de ruido en corriente se determinó la desviación estándar ( $\sigma_i$ ) y su representación se describe en la Figura 4.52.

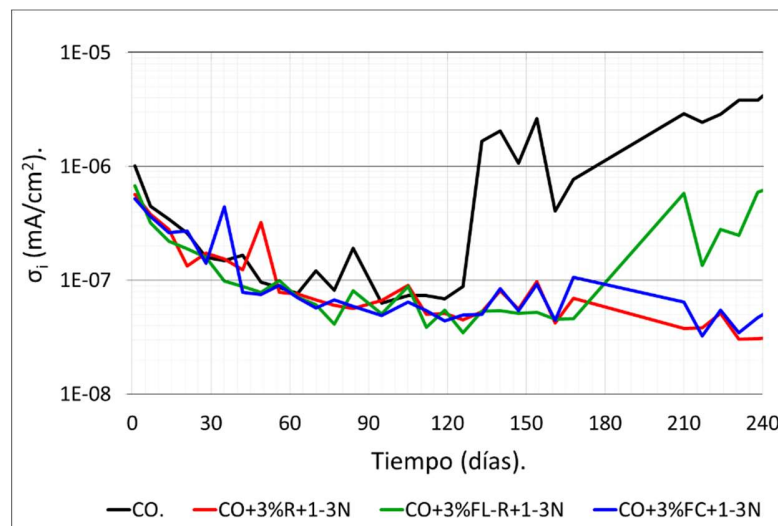


Figura 4. 52. Gráfica de valores de  $\sigma_i$  en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal en comparación a la muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Al igual que en las Figuras 4.17 y 4.20, el comportamiento de  $\sigma_i$  es muy similar, con valores altos al inicio del período de prueba cercanos a  $1E-06$  mA/cm<sup>2</sup> indicando una alta actividad corrosiva en la superficie del metal. Similares valores han sido reportados en la literatura (Zhao *et al.*, 2007). En la medida en que la capa pasiva del acero se desarrolla, los valores de  $\sigma_i$  disminuyen progresivamente hasta en un orden de magnitud, debido a la protección que la misma.

De manera general, los valores de  $\sigma_i$  se mantienen inferiores en comparación con la muestra control durante todo el período de prueba, indicando que los agregados de PET y mucílago de nopal en conjunto garantizan la protección del acero de refuerzo por un tiempo más largo, ya que retardan el inicio de la corrosión en este sistema.

En la Figura 4.53 se muestran los resultados obtenidos dividiendo la desviación estándar del ruido en voltaje  $\sigma_v$  entre la desviación estándar del ruido en corriente  $\sigma_i$ , dando como resultado la resistencia de ruido  $R_n$ .

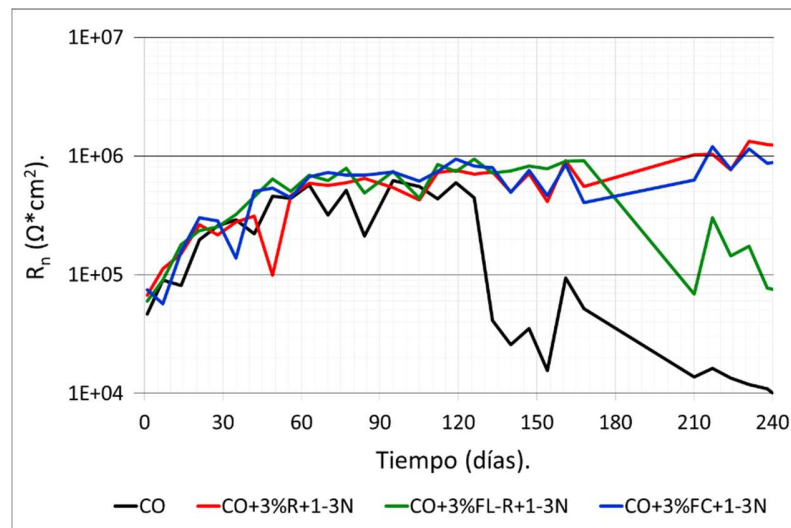


Figura 4. 53. Gráfica de valores de  $R_n$  en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Según diversos autores la resistencia de ruido tiene una relación directa con los valores de desviación estándar del ruido en corriente (Gusmano *et al.*, 1997). Comparando las Figuras 4.52 y 4.53 se puede apreciar que la  $R_n$  es inversamente proporcional a la  $\sigma_i$ .

Después de 150 días de inmersión, se observa una caída brusca en los valores de la muestra CO. Progresivamente, ocurren fluctuaciones significativas en los valores de  $R_n$ , demostrando que el inicio de la corrosión activa del acero no está dada por un cambio, sino por una secuencia de eventos severos. Al finalizar el tiempo de exposición se observan algunos cambios para la muestra CO+3%FL-R+1-3N, evidenciando algún proceso corrosivo posiblemente por la presencia de iones cloruros en la superficie del metal; aunque los valores se mantienen alrededor de  $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . El resto de las muestras alcanza valores superiores a  $1E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , evidenciando el efecto positivo al combinar el mucílago de nopal y el PET dentro de una matriz de concreto.

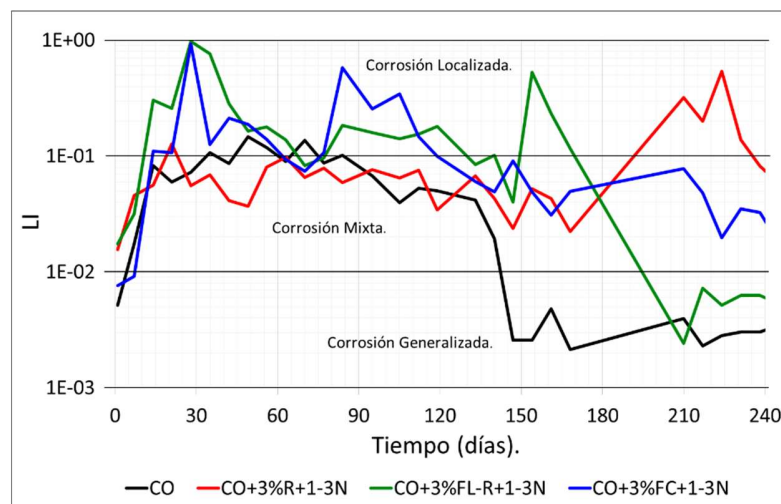


Figura 4. 54. Gráfica de valores de L.I. en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control.

En la Figura 4.54 se pueden observar los valores L.I. y sus intervalos según el tipo de corrosión.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Una de las cualidades de la técnica E.N. es que ofrece información acerca del tipo de corrosión del acero de refuerzo en el concreto (Botona Pedemonte, Aballe Villero and Marcos Bárcena, 2002).

Como se ha podido apreciar, al agregar la combinación de PET y mucílago de nopal en muestras de concreto no se observan diferencias significativas en el comportamiento para el caso del índice de localización. La tendencia es la misma que cuando se incorporan estos elementos por separado. Durante los primeros meses de prueba predomina una corrosión del tipo mixta, con transitorios muy marcados hacia el rango de corrosión localizada debido a la propia evolución de la capa pasiva. Después de un tiempo de exposición al medio agresivo, se observa sobre todo en la muestra CO que el tipo de corrosión se hace más generalizado, asociado a un cambio en la superficie del metal.

### ✚ Espectroscopía de impedancia electroquímica.

A partir de los datos obtenidos por la técnica E.I.S. para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal se realizó la simulación a través del software  $Z_{view}$ . Para el análisis se determinó que la muestra CO+3%R+1-3N fue la que presentó el mejor comportamiento y se compararon sus resultados con los de la muestra control.

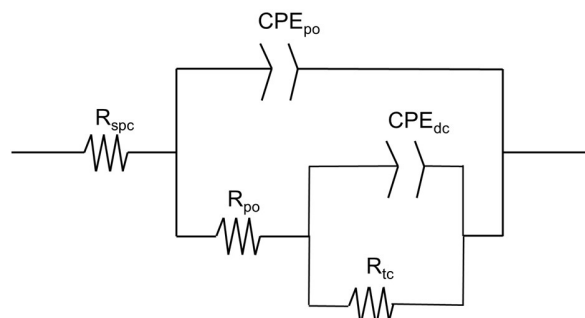


Figura 4. 55. Circuito equivalente utilizado para la simulación de los datos de EIS.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

El circuito utilizado se representa en la Figura 4.55, con una resistencia de la solución de la red de poros del concreto  $R_{spc}$ , la cual también tiene en cuenta el efecto de la resistividad del concreto. Posteriormente se incluye un primer elemento de fase constante ( $CPE_{po}$ ), que representa la capacitancia no-ideal de la película de óxidos sobre la superficie del acero, y una resistencia ( $R_{po}$ ) atribuida a la resistencia de la misma película. Finalmente, se incluye un segundo elemento de fase constante ( $CPE_{dc}$ ) y una segunda resistencia  $R_{tc}$ , los cuales se atribuyen a la capacitancia no-ideal de la doble capa y a la resistencia a la transferencia de carga. Diversos autores han utilizado este circuito equivalente para el estudio del acero de refuerzo en el concreto (Andrade *et al.*, 2001; Aperador, Bautista-Ruiz and Delgado, 2013; Ribeiro and Abrantes, 2016).

Teniendo en cuenta que no se forma un ángulo cercano o similar a  $45^\circ$  en el arco formado en los diagramas de Nyquits de las figuras 4.60, 4.61 y 4.62, el acoplamiento de un elemento de Warburg no logró un ajuste de los datos experimentales. Esto se debe posiblemente a que hay varios fenómenos de transporte de masa involucrados.

En las Figuras 4.56, 4.57, 4.58 y 4.59, se muestran los diagramas de Nyquist experimentales y simulados.

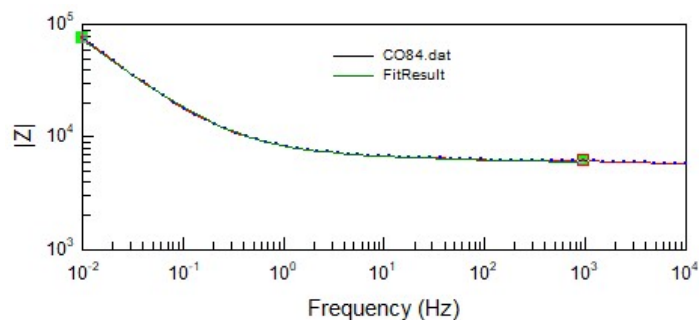


Figura 4. 56. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO para el día 28 de prueba.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

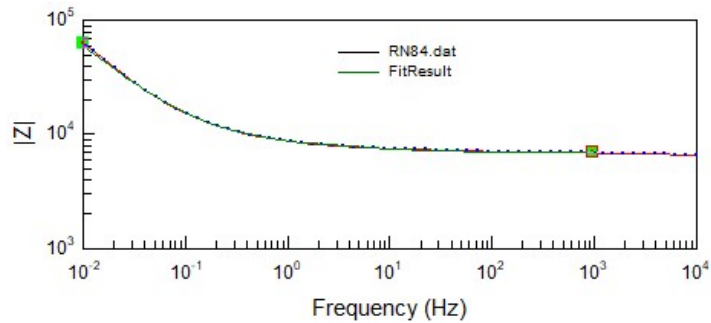


Figura 4. 57. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO+3%R+1-3N para el día 28 de prueba.

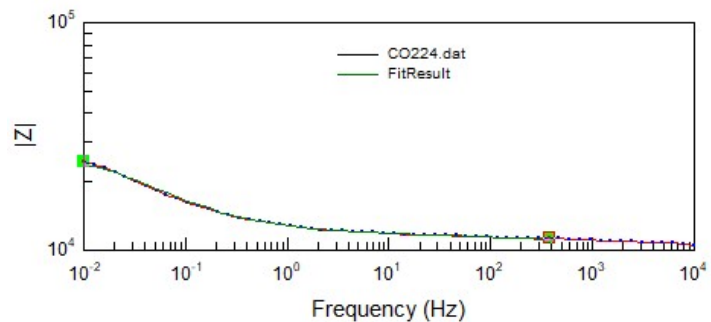


Figura 4. 58. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO para el día 224 de prueba.

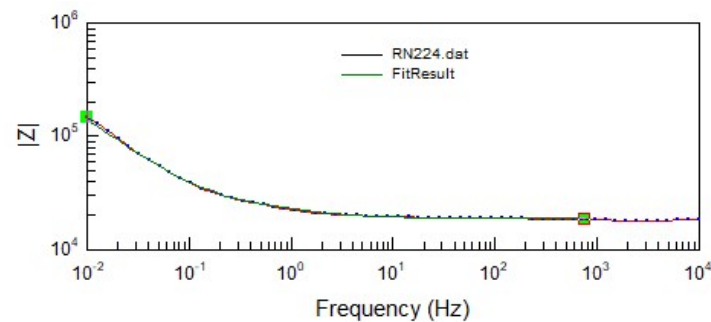


Figura 4. 59. Simulación de los datos experimentales de IZI de la muestra CO+3%R+1-3N para el día 224 de prueba.

Se puede observar el buen ajuste entre los datos experimentales y simulados de todas las gráficas, teniendo en cuenta además, que los errores de cada parámetro simulado fueron inferiores al 5% y la chi-cuadrada fue menor a 0.01. El resto de los valores de cada elemento del circuito utilizado se representan en la Tabla 4.9.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

Tabla 4. 9. Parámetros electroquímicos obtenidos de la simulación.

Probetas	Día	$R_{spc}$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CPE1-T ( $Fcm^2s(1-\alpha_1)$ )	CPE 1-P	$R_{po}$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CPE2-T ( $Fcm^2s(1-\alpha_1)$ )	CPE 2-P	$R_{tc}$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )
CO	84	6230	6.79E-5	0.74	46600	4.86E-5	0.83	510800
CO+3%R +1-3N	84	7030	9.15E-5	0,75	48000	6.81E-5	0.94	690000
CO	224	11400	9.51E-5	0.76	8100	48.8E-5	0.56	12400
CO+3%R +1-3N	224	17950	2.46E-5	0.73	31500	2.89E-5	0.68	800500

Como se puede apreciar los valores de la  $R_{spo}$  en el caso de muestra CO+3%R+1-1N aumenta significativamente con el avance del tiempo de exposición, debido al efecto tanto del PET como del mucílago de nopal en la resistividad del concreto. Tanto la  $R_{po}$  como la  $R_{tc}$  en el caso del blanco disminuyen considerablemente después de 224 días de prueba, debido a un cambio en la superficie metálica y la formación de productos de corrosión no protectores. Para la muestra con ambos agregados los valores de  $R_{po}$  y  $R_{tc}$  se mantienen muy elevados, lo cual es un indicativo de que el acero de refuerzo presenta una película pasiva. Con respecto a los valores de la capacitancia se mantienen en el orden reportados en otros estudios para el mismo circuito equivalente ([Andrade et al., 2001](#)).

Los diagramas de Nyquist se describen en las Figuras 4.60, 4.61 y 4.62. Desde el día 1 de prueba se puede apreciar el efecto que tienen ambos agregados en conjunto en las propiedades internas del concreto, describiendo la formación de semicírculos incompletos y deprimidos de mayor tamaño, con respecto a la muestra control.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

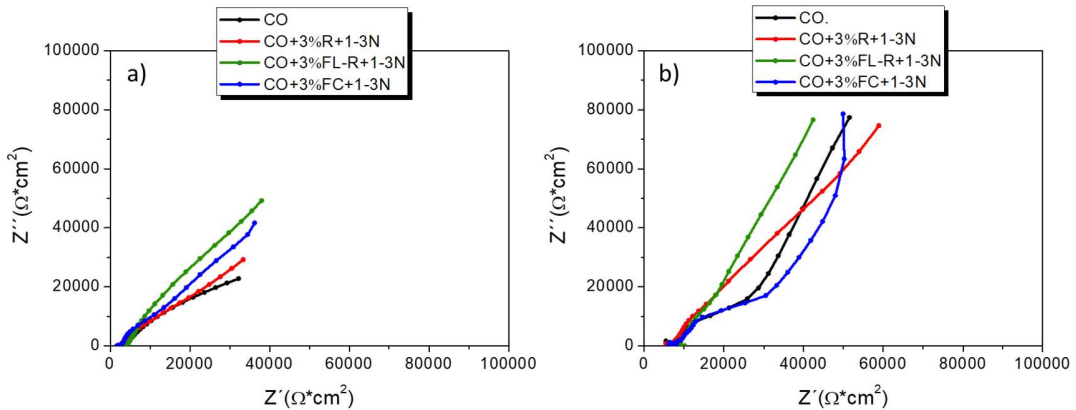


Figura 4. 60. Diagrama de Nyquist para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 1 y b) Día 28.

Después de 28 días de curado todas las muestras presentan un aumento considerable en los valores de  $Z'$  y  $Z''$ . Estos resultados están en correspondencia con otros estudios realizados en concreto reforzado (González *et al.*, 1985; Pech-Canul and Castro, 2002). Además, ya se aprecia el primer semicírculo incompleto representado por una primera  $CPE_{po}$  y una  $R_{po}$ , y un arco formado a las frecuencias más bajas correspondiente a un segundo semicírculo de gran tamaño. Aunque se aprecia una línea recta, el ángulo formado entre esta y el eje de la impedancia real no forma un ángulo de  $45^\circ$ , por lo que el elemento que se ajusta al sistema es una segunda  $CPE_{dc}$  y una  $R_{tc}$ . Además, debido al rango de frecuencia aplicado en el estudio solo se aprecia en las frecuencias muy bajas el inicio del segundo semicírculo.

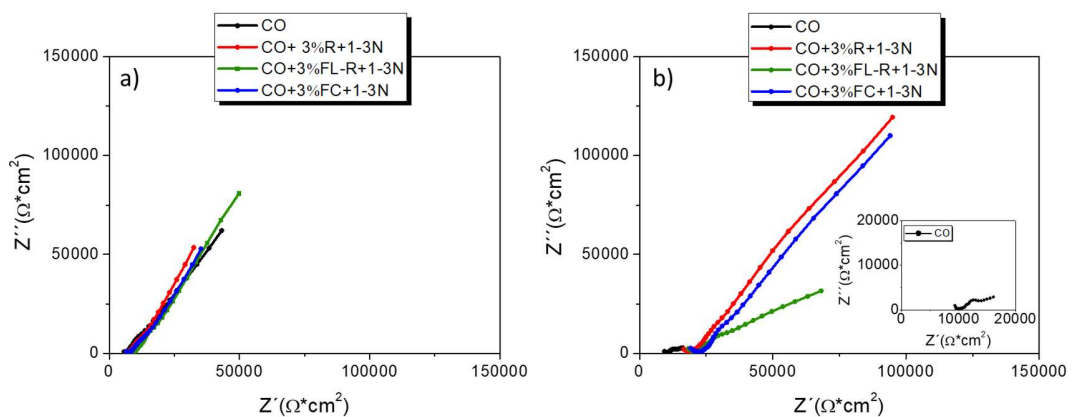


Figura 4. 61. Diagrama de Nyquist para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 84 y b) Día 210.



## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

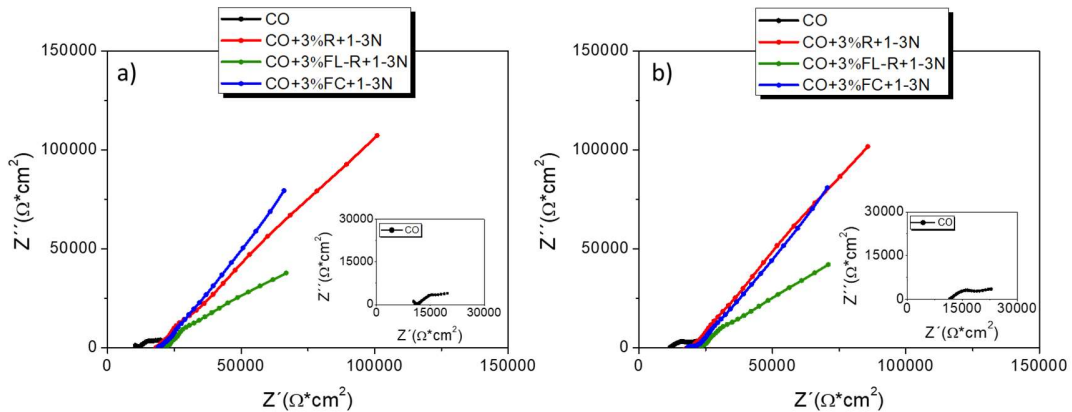


Figura 4. 62. Diagrama de Nyquist para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 224 y b) Día 240.

Entre los días 84 y 210 de exposición al medio agresivo, el comportamiento antes descrito parece mantenerse, excepto para la muestra control pues se aprecia una reducción significativa en los valores de  $Z'$ .

En la Figura 4.62 se aprecian los valores de  $Z'$  y  $Z''$  de todas las muestras para los días 224 y 240. De manera general las gráficas describen un comportamiento similar, destacando que para este período de prueba las probetas CO+3%R+1-3N, y CO+3%FC+1-3N, presentan los mayores valores de  $Z'$  y  $Z''$ . El arco que se observa en los últimos datos, similar a una línea recta, se atribuye a la segunda constante de tiempo que representa la  $CPE_{dc}$  y la  $R_{ic}$ .

En las Figuras 4.63, 4.64 y 4.65, se observan los diagramas de Bode para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal. Entre los días 1 y 28 se aprecia un aumento en los valores de impedancia total para todas las muestras. Así mismo, se evidencia un aumento de la resistencia de la solución en la red de poros del concreto  $R_{sp}$ , relacionado con la hidratación del cemento y el proceso de curado del material. En investigaciones anteriores se demostrado el efecto que tiene la hidratación de cemento en la resistividad del concreto (Giannotti da Silva and Liborio, 2006).

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

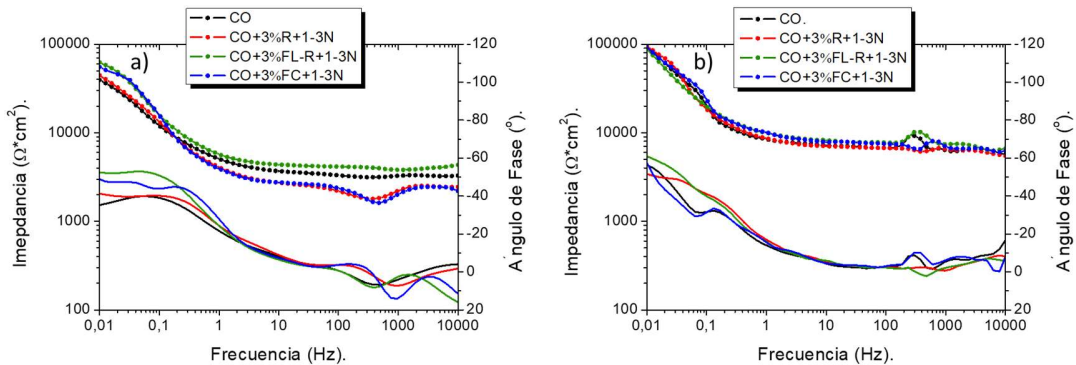


Figura 4. 63. Diagrama de Bode para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 1 y b) Día 28.

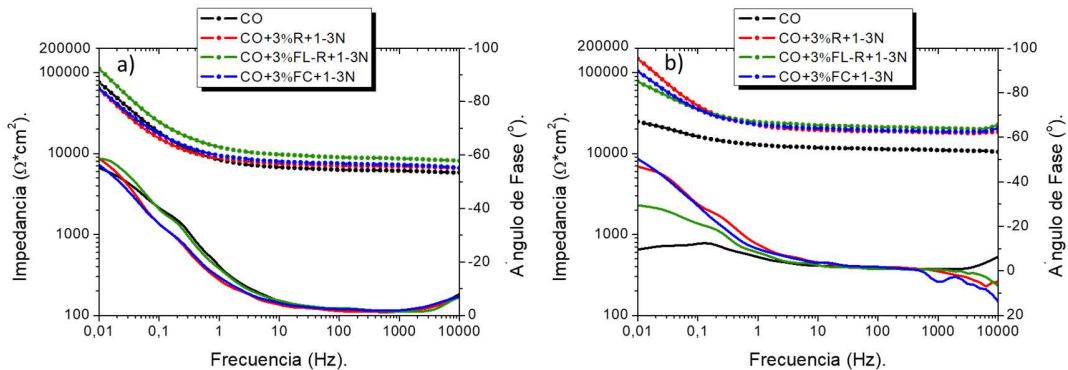


Figura 4. 64. Diagrama de Bode para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 84 y b) Día 210.

Con el avance del tiempo de exposición lo más significativo es el incremento en los valores de  $R_{ps}$  para las muestras con ambos agregados que llegan a alcanzar hasta  $2.5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para el día 210 de prueba, en comparación con la muestra control que se mantiene cercano a  $1.2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Este comportamiento mejora los valores de  $R_{ps}$  obtenidos para las muestras con cada agregado por separado, demostrando el efecto que tiene el PET como barrera física en la matriz de concreto y en conjunto con el mucílago de nopal se incrementa su efectividad.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

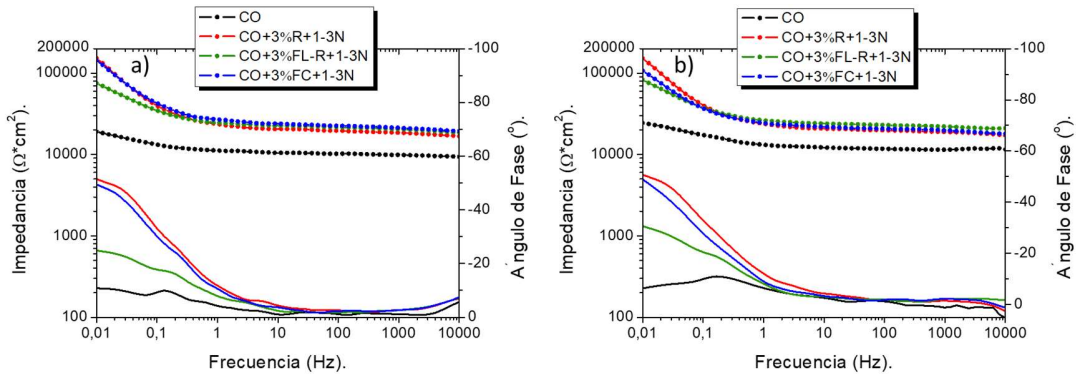


Figura 4. 65. Diagrama de Bode para las muestras con la combinación de PET y mucílago de nopal con respecto a la muestra control. a) Día 224 y b) Día 240.

A partir del día 210 y hasta finalizar el período de prueba, hay un cambio en la pendiente de la impedancia en función de la frecuencia con una disminución en los valores de IZI y del ángulo de fase para la muestra control asociado a un comportamiento menos capacitivo del sistema. Los bajos valores de IZI y los potenciales negativos cercanos a -500 mV que presenta la muestra control indican un cambio en el proceso corrosivo sobre la superficie del acero de refuerzo. El resto de las muestras todavía presenta un comportamiento muy superior.

### ✚ Resistencia a la polarización lineal.

Los resultados obtenidos a partir de la técnica de L.P.R. se representan en el la Figura 4.66. Estos valores están en correspondencia con los resultados obtenidos por la técnica de E.N., con valores de  $R_n$  muy similares a los descritos en esta gráfica, demostrando la equivalencia entre la  $R_n$  y la  $R_p$ .

Aunque la muestra CO+3%FL-R+1-3N alcanzó los mayores valores de  $R_p$  entre los días 30 y 150 de prueba, son las muestras CO+3%R+1-3N, y CO+3%FC+1-3N las que al finalizar el período de prueba alcanzan valores cercanos a  $1E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

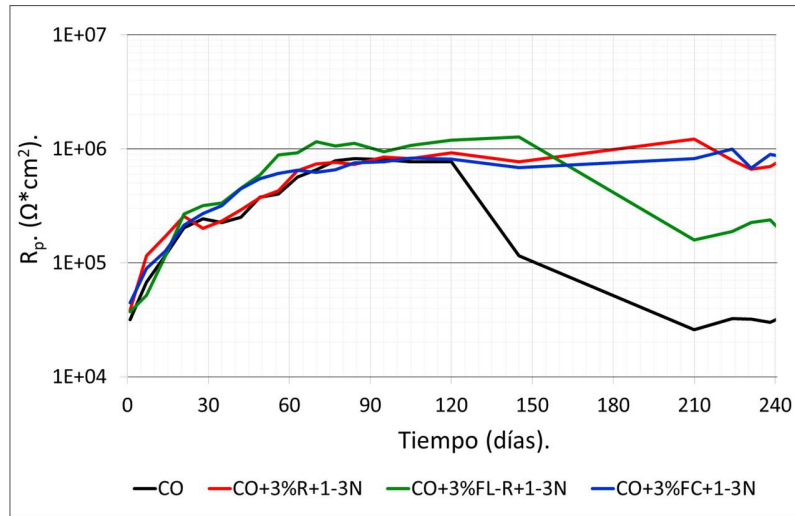


Figura 4. 66. Gráfica de valores de  $R_p$  en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal en comparación con la muestra control.

En la Figura 4.67 se detallan los valores de la rapidez de corrosión en términos de  $I_{\text{corr}}$  calculados a partir de la  $R_p$ .

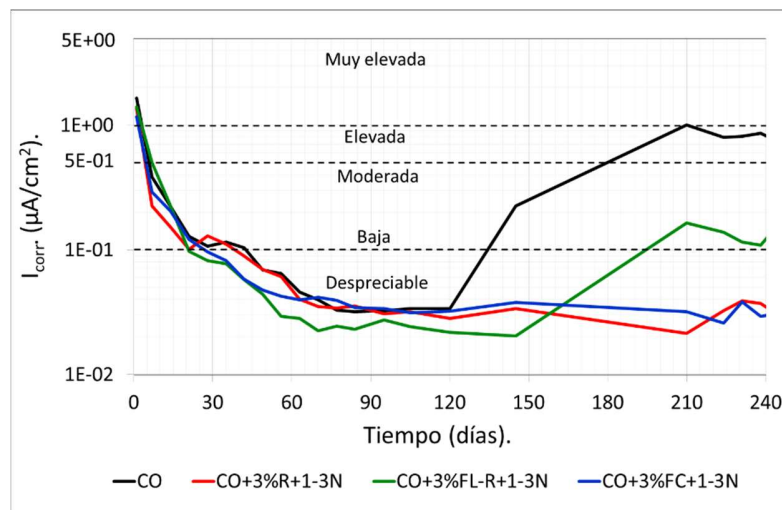


Figura 4. 67. Gráfica de valores de  $I_{\text{corr}}$  en función del tiempo para las probetas con la combinación de PET y mucílago de nopal en comparación con la muestra control.

Al inicio de la etapa de curado del concreto las muestras presentan una rapidez de corrosión muy elevada, pero con el avance de este proceso el resultado alcanzado es una disminución de los valores de  $I_{\text{corr}}$  de hasta un orden de magnitud. Después de 28 días es significativo el efecto que tienen ambos

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

agregados en los valores de  $I_{corr}$ , pues progresivamente se mantiene en el rango de rapidez de corrosión despreciable hasta el día 240 de prueba, excepto la muestra CO+3%FL-R+1-3N que alcanza valores cercanos a  $1.5E-01$  mA/cm<sup>2</sup>.

En la Figura 4.68 se muestra el ajuste entre los valores de  $R_n$  y  $R_p$ , para las muestras con PET + mucílago de nopal. Del ajuste realizado se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.80, superando los valores del ajuste entre la  $R_n$  y la  $R_p$  para el PET y el mucílago de nopal por separados. Este valor indica una buena correlación entre los resultados de ambas técnicas electroquímicas.

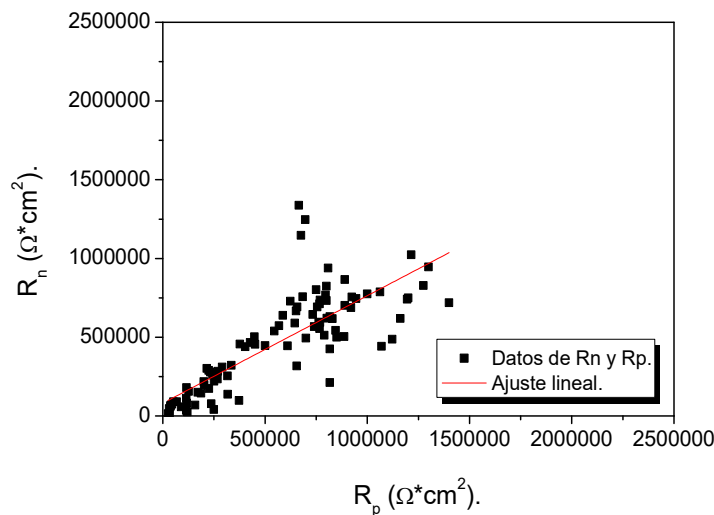


Figura 4. 68. Gráfica de correlación entre los valores de  $R_n$  y  $R_p$  para las muestras con la combinación de PET.

### ✚ Observación visual de las barras de acero.

Una vez terminado la evaluación electroquímica de todas las muestras se procedió a realizar el análisis visual de las varillas del acero de refuerzo.

## CAPÍTULO 4. “ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS”

---

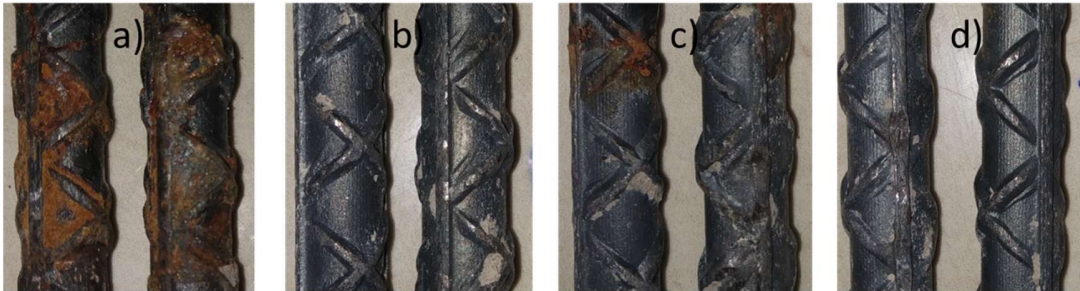


Figura 4. 69. Varillas de acero extraídas del concreto posterior a los 240 días de exposición al medio agresivo, para las muestras: a) CO, b) CO+3%R+1-3N, c) CO+3%FL-R+1-3N, y d) CO+3%FC+1-3N.

Como se puede apreciar en la Figura 4.69, se aprecian productos de corrosión de color rojizo principalmente en casi toda la superficie de la muestra control. Muchos autores asocian este tono rojizo con los siguientes productos de corrosión no protectores:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Song *et al.*, 2019),  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Fang *et al.*, 2019) y  $\text{FeOOH}$  (Ji *et al.*, 2015). También se puede encontrar el  $\text{FeCl}_2$  como producto formado por la reacción del hierro con los iones cloruro.

El resto de las muestras presentan un tono gris metálico en toda la superficie del acero excepto la muestra CO+3%FL-R+1-3N que presenta pequeñas zonas con herrumbre. Según la literatura este tono gris se asocia a la capa de óxidos pasivantes de  $(\text{Fe}_3\text{O}_4)$  sobre la superficie metálica, la cual es muy compacta e impermeable (Hansson, 1984). Este óxido  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  es un producto formado a partir del compuesto  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  que es una capa precursora, la cual sigue reaccionando para formar la magnetita. Esta técnica de observación a pesar de ser muy sencilla, es capaz de fortalecer y corroborar los resultados obtenidos por las diferentes técnicas electroquímicas.

### **Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.**

#### **Conclusiones.**

Concreto con agregados de PET:

- De manera general se observaron valores entre 215.2 y 243.8 kg/cm<sup>2</sup> para para todas las muestras con agregados de PET. Fue la muestra con 3% de fibras largas la que obtuvo un 97.5% de la resistencia de diseño, desmostrando el buen comportamiento mecánico de las fibras largas dentro de la matriz de concreto.
- Todas las probetas con agregados poliméricos presentaron un fallo frágil al igual que la muestra control, significativamente las muestras con fibras largas restringieron la formación y propagación de fisuras y grietas, así como el desprendimiento de material.
- Las muestras con rectángulos y la mezcla de fibras largas + rectángulos, presentaron los valores de potenciales entre 100 mV y 50 mV, con un incremento significativo de la  $R_p$  y  $R_n$  alcanzando valores de hasta 2E6  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ . Se obtuvo un coeficiente de correlación razonable de 0,61 entre ambas técnicas.
- Se alcanzó una rapidez de corrosión insignificante para las muestras con rectángulos y la mezcla de fibras largas + rectángulos, con valores inferiores a 0.1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . En cambio, la muestra CO alcanzó una rapidez de corrosión moderada.

## **CAPÍTULO 5. “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”**

---

Concreto con mucílago de nopal:

- Para las muestras con la concentración 1-3 de mucílago de nopal, se lograron valores de  $F'c$  entre 244.1 y 246.5 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de curado, teniendo en cuenta que este aditivo natural actúa como un retardante del fraguado del concreto.
- La muestra CO+1-3N alcanzó un valor de  $F'c$  de 253.2 y 257 kg/cm<sup>2</sup> después de 42 y 56 días de curado, superando el valor de la resistencia a la compresión para la muestra control.
- La muestra CO+1-3N alcanzó los valores de potencial alrededor de -50 mV al final del período de prueba. Se apreció el efecto favorable del mucílago de nopal como un aditivo que puede retrasar la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.
- Todas las muestras con mucílago nopal mantuvieron una rapidez de corrosión entre, insignificante y baja, así como superiores valores de  $R_n$  y  $R_p$  con respecto a la muestra control. Se obtuvo un coeficiente de correlación razonable entre la  $R_n$  y la  $R_p$  fue de 0,69.

Concreto con PET + mucílago de nopal:

- Se alcanzó un valor de  $F'c$  de 238.5 kg/cm<sup>2</sup> para la muestra CO+3%FL-R+1-3N, aunque debido al efecto del mucílago de nopal esta resistencia puede seguir aumentando con el incremento del tiempo de curado del concreto.
- Todas las muestras mantuvieron una rapidez de corrosión entre, insignificante y baja, así como los valores más altos de  $R_n$  y  $R_p$  con respecto



## **CAPÍTULO 5. “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”**

---

a la muestra control. Se obtuvo un ajuste entre los valores de  $R_n$  y  $R_p$  con un valor de coeficiente de correlación de 0.80.

- Las barras de acero de refuerzo generalmente muestran una susceptibilidad al tipo de corrosión mixta, con valores de índice de localización entre 0.01 y 1, sin embargo, con el avance del tiempo de exposición al medio agresivo, la muestra control presenta valores entre 0.001 y 0.01 en el rango de corrosión generalizada.

## **CAPÍTULO 5. “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”**

---

### **Recomendaciones.**

Para trabajos futuros se recomiendan realizar estudios para el análisis de otras propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido a partir de los porcentajes y geometrías de PET utilizadas, así como para las concentraciones de nopal. En consecuencia, se establecerían todas las características del material compuesto para su uso en estructuras de concreto reforzado. Además, aunque el PET es uno de los principales desechos sólidos en todo el mundo, existen otros materiales de desecho que se pueden incorporar en mezclas de concreto, en la búsqueda de materiales alternativos que sean más amigables con el medio ambiente y respondan a las necesidades de la sociedad. De manera similar, la utilización de otros aditivos naturales como el gel de aloe vera, o gel de algas pueden ser alternativas viables para mejorar algunas de las propiedades del concreto.

## Referencias Bibliográficas.

- ACI ‘Guide to Durable Concrete Reported’, *ACI Committee 201* (2008) 1–41. Available at: [http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI\\_201.2R-08\\_Guide\\_to\\_Durable\\_Concrete\\_MyCivil.ir.pdf](http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI_201.2R-08_Guide_to_Durable_Concrete_MyCivil.ir.pdf).
- Aguirre A. M., Mejía de Gutiérrez R. ‘Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas’, *Materiales de Construcción*, 63(309) (2013) 7–38. doi: 10.3989/mc.2013.00313.
- Ahmad S. ‘Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review’, *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003) 459–471. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00086-0.
- Albano C., Camacho N., Hernández M., Matheus A., Gutiérrez A. ‘Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios’, *Waste Management*, 29(10) (2009) 2707–2716. doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007.
- Alghamdi S. A., Ahmad S. ‘Service life prediction of RC structures based on correlation between electrochemical and gravimetric reinforcement corrosion rates’, *Cement and Concrete Composites*, 47 (2014) 64–68. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.06.003.
- Andrade C. ‘Precisiones sobre la corrosión del acero en contacto con hormigón.’, *Materiales de Construcción*, 32(187) (1982) 55–66. doi: 10.3989/mc.1982.v32.i187.1011.
- Andrade C., Keddani M., Nóvoa X.R., Pérez M.C., Rangel C.M., Takenouti H. ‘Electrochemical behaviour of steel rebars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry’, *Electrochimica Acta*, 46(24–25) (2001) 3905–3912. doi: 10.1016/S0013-4686(01)00678-8.
- Andrade C., Alonso C., Gulikers J., Polder R., Cigna R., Vennesland Ø., Salta M., Raharinaivo A., Elsener B. ‘Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- resistance method’, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 37(273) (2004) 623–643. doi: 10.1617/13952.
- Andrade C., Alonso C. ‘Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site’, *Construction and Building Materials*, 10(5) (1996) 315–328. doi: 10.1016/0950-0618(95)00044-5.
  - Andrade C., Alonso C., Sarfa J. ‘Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere’, *Cement and Concrete Composites*, 24(1) (2002) 55–64. doi: 10.1016/S0958-9465(01)00026-9.
  - Andrade C., Buják R. ‘Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion’, *Cement and Concrete Research*, 53 (2013) 59–67. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.06.004.
  - Aperador W., Bautista-Ruiz J. H., Delgado A. E. ‘Monitoreo de la Corrosión de Aceros Embebidos en Concretos obtenidos a partir de Subproductos Industriales’, *Información tecnológica*, 24(4) (2013) 13–14. doi: 10.4067/S0718-07642013000400007.
  - Arellano-Pérez J. H., Ramos Negrón O. J., Escobar-Jiménez R. F., Gómez-Aguilar J. F., Uruchurtu-Chavarín J. ‘Development of a portable device for measuring the corrosion rates of metals based on electrochemical noise signals’, *Measurement*, 122 (2018) 73–81. doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.008.
  - Barraza-Garza G., De La Rosa L. A., Martínez-Martínez A., Castillo-Michel H., Cotte M., Alvarez-Parrilla E. ‘La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos’, *Revista Latinoamericana de Química*, 41(3) (2013) 125–148.
  - Bautista A., Vergara A., Dávila J. V., Mariaca L., González J. A. ‘Comparación del ruido electroquímico con las técnicas de impedancia y resistencia de polarización en el sistema acero/hormigón’, *Revista de Metalurgia*, 33(2) (2010) 113–119. doi: 10.3989/revmetalm.1997.v33.i2.869.
  - Bentz D. P., Peltz M. A., Snyder K. A., Davis J. M. ‘VERDiCT: Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology. A new approach to

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- decreasing transport’, *Concrete International*, 31(1) (2009) 31–36.
- Betancourth D. G., Fernando Gomez J. C., Mosquera J. C., Tirado-Mejía Liliana. ‘ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE ROCAS PROVENIENTES DE REGIÓN ESMERALDÍFERA X-ray Diffraction Analysis on Rocks from Emerald Mining Region’, *Scientia et Technica Año XVI*, (44) (2010) 257–260.
  - Borg R. P., Baldacchino O., Ferrara L. ‘Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete’, *Construction and Building Materials*, 108 (2016) 29–47. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029.
  - Botona Pedemonte F. J., Aballe Villero A., Marcos Bárcena M. *Ruido Electroquímico. Métodos de Análisis*. Septem Edi (2002) España.
  - Bui N. K., Satomi T., Takahashi H. ‘Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study’, *Waste Management*, 78 (2018) 79–93. doi: 10.1016/j.wasman.2018.05.035.
  - Cárdenas A., Higuera-Ciapara I., Goycoolea F. M. ‘Rheology and Aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution’, *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2 (1997) 152–159.
  - Caré S., Raharinaivo A. ‘Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel’, *Cement and Concrete Research*, 37(12) (2007) 1598–1612. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.08.022.
  - Castro P., De Rincon O. T., Pazini E. J. ‘Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments’, *Cement and Concrete Research*, 31(4) (2001) 529–537. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00453-7.
  - CEMEX *Manual del Constructor.*, CEMEX CONCRETOS. Available at: <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicacion-es-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3->

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

86ba78c80cb4.

- Chandra S., Eklund L., Villarreal R. R. 'USE OF CACTUS IN MORTARS AND CONCRETE.', *Cement and Concrete Research*, 28(1) (1998) 41-51.
- Choi Y. W., Moon D. J., Chung J. S., Cho S. K. 'Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete', *Cement and Concrete Research*, 35(4) (2005) 776–781. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.014.
- Cottis R. A. 'Interpretation of Electrochemical Noise Data', *Corrosion*, 57(3) (2001) 265–285.
- Duarte R. G., Castela A. S., Neves R., Freire L., Montemor M. F. 'Corrosion Behavior of Stainless Steel Rebars Embedded in Concrete: an Electrochemical Impedance Spectroscopy Study', *Electrochimica Acta*, 124 (2014) 218–224. doi: 10.1016/j.electacta.2013.11.154.
- Dúran-Herrera A., De-león R., Juárez C. A., Valdez P. *Mucilago de nopal como reductor de retracción en concreto auto-consolidable.*, ANAIS DO 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (2012) - CBC2012 – 54CBC.
- Fajardo G., Valdez P., Pacheco J. 'Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides', *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 768–774. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.023.
- Fang G., Ding W., Liu Y., Zhang J., Xing F., Dong B. 'Identification of corrosion products and 3D distribution in reinforced concrete using X-ray micro computed tomography', *Construction and Building Materials*, 207 (2019) 304–315. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.133.
- Foti D. 'Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers', *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 1906–1915. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066.
- Foti D. 'Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete', *Composite Structures*, 96 (2013) 396–404. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.019.
- Foti D., Paparella F. 'Impact behavior of structural elements in concrete

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- reinforced with PET grids’, *Mechanics Research Communications*, 57 (2014) 57–66. doi: 10.1016/j.mechrescom.2014.02.007.
- Fraternali F., Spadea S., Berardi V. P. ‘Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes’, *Construction and Building Materials*, 61 (2014) 293–302. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.019.
  - Frigione M. ‘Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete’, *Waste Management*, 30 (2010) 1101–1106. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
  - Garcés P., Ga Andión L., De la Varga I., Catalá G., Zornoza E. ‘Corrosion of steel reinforcement in structural concrete with carbon material addition’, *Corrosion Science*, 49(6) (2017) 2557–2566. doi: 10.1016/j.corsci.2006.12.009.
  - Garcés P., Saura P, Méndez A., Zornoza E., Andrade C. ‘Effect of nitrite in corrosion of reinforcing steel in neutral and acid solutions simulating the electrolytic environments of micropores of concrete in the propagation period’, *Corrosion Science*, 50(2) (2008) 498–509. doi: 10.1016/j.corsci.2007.08.016.
  - García-Alonso M. C., Escudero M. L., Miranda J. M., Vega M. I., Capilla F., Correia M. J., Salta M., Bennani A., González J. A. ‘Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete’, *Cement and Concrete Research*, 37(10) (2007) 1463–1471. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.003.
  - Genesca J., Ávila J. *Más allá de la herrumbre*. 2da edn. (1996) México. Available at: <https://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/02/Mas-alla-de-la-herrumbre-11.pdf>.
  - Giannotti da Silva F., Liborio J. B. L. ‘A study of steel bar reinforcement corrosion in concretes with SF and SRH using electrochemical impedance spectroscopy’, *Materials Research*, 9(2) (2006) 209–215. doi: 10.1590/S1516-14392006000200018.
  - Girija S., Mudali U. K., Khatak H.S., Raj B. ‘The application of

## *“REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”*

---

- electrochemical noise resistance to evaluate the corrosion resistance of AISI type 304 SS in nitric acid’, *Corrosion Science*, 49(11) (2007) 4051–4068. doi: 10.1016/j.corsci.2007.04.007.
- González J. A., Molina A., Escudero M. L., Andrade C. ‘Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates-I. polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete’, *Corrosion Science*, 25(10) (1985) 917–930. doi: 10.1016/0010-938X(85)90021-6.
  - González J. A., Miranda J. M., Feliu S. ‘Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete’, *Corrosion Science*, 46 (2004) 2467–2485. doi: 10.1016/j.corsci.2004.02.003.
  - Goycoolea F. M., Cárdenas A. ‘Pectins from Opuntia A Short Review’, *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 5(1) (2003) 17–29.
  - Gu L., Ozbakkaloglu T. ‘Use of recycled plastics in concrete: A critical review’, *Waste Management*, 51 (2016) 19–42. doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.005.
  - Guangling S., Ahmad S. ‘Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction’, *ARRB Transport Research Ltd*, (1998) 1–77.
  - Gusmano G., Montesperelli G., Pacetti S., Petitti A., D’Amico A. ‘Electrochemical Noise Resistance as a Tool for Corrosion Rate Prediction’, *CORROSION*, 53(11) (1997) 860–868. doi: 10.5006/1.3290271.
  - Hansson C. M. ‘Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete’, *Cement and Concrete Research*, 14(4) (1984) 574–584. doi: 10.1016/0008-8846(84)90135-2.
  - Hernández-Castañeda O., Mendoza-Escobedo C. J. ‘Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico’, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 7(1) (2006) 57–70. doi: 10.22201/fi.25940732e.2006.07n1.005.
  - Imcyc. *EL CONCRETO EN LA OBRA. PROBLEMAS, CAUSAS Y SOLUCIONES. Prueba de Resistencia a la Compresión del Concreto.*,



## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- National Ready Mix Concrete Association* (2006). Available at: [www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2007/pdf/FEBRERO.pdf%5Cn](http://www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2007/pdf/FEBRERO.pdf%5Cn).
- Ji Y. S., Zhan G., Tan Z., Hu Y., Gao F. 'Process control of reinforcement corrosion in concrete. Part 1: Effect of corrosion products', *Construction and Building Materials*, 79 (2015) 214–222. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.083.
  - Jumate E., Manea D. L. 'Application of X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) methods to the Portland cement hydration processes', *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2(1) (2012) 35–42.
  - Katwan M. J., Hodgkiess T., Arthur P. D. 'Electrochemical noise technique for the prediction of corrosion rate of steel in concrete', *Materials and Structures*, 29(5) (1996) 286–294. doi: 10.1007/BF02486363.
  - Kearns J. R., Scully J. R., Roberge P. R., Reichert D. L., Dawson J. L. *STP 1277. Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications.*, *ASTM International* (1996). Edited by J. Kearns et al. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. doi: 10.1520/STP1277-EB.
  - Kim J. H. J., Park C. G., Lee S. W., Lee S. W., Won J. P. 'Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites', *Composites Part B: Engineering*, 39(3) (2008), pp. 442–450. doi: 10.1016/j.compositesb.2007.05.001.
  - Kim S. B., Yi N. H., Kim H. Y., Kim J. H. J., Song Young-Chul 'Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete', *Cement and Concrete Composites*, 32(3) (2010) 232–240. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002.
  - Knapen E., Van Gemert D. 'Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers', *Cement and Concrete Research*, 39 (2009) 6–13. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.10.003.
  - Leelalerkiet V., Kyung J. W., Ohtsu M., Yokota M. 'Analysis of half-cell

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- potential measurement for corrosion of reinforced concrete’, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 155–162. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2003.10.004.
- Legat A., Leban M., Bajt, Ž. ‘Corrosion processes of steel in concrete characterized by means of electrochemical noise’, *Electrochimica Acta*, 49 (2004) 2741–2751. doi: 10.1016/j.electacta.2004.01.036.
  - León-Martínez F. M., Rodríguez-Ramírez J., Medina-Torres L. L., Méndez Lagunas L. L., Bernad-Bernad M. J. ‘Effects of drying conditions on the rheological properties of reconstituted mucilage solutions (*Opuntia ficus-indica*)’, *Carbohydrate Polymers*, 84(1) (2011) 439–445. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.12.004.
  - León-Martínez F. M., Cano-Barrita P.F. de J., Lagunez-Rivera L., Medina-Torres L. ‘Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials’, *Construction and Building Materials*, 53 (2014) 190–202. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.068.
  - León-Martínez F. M., Méndez-Lagunas L. L., Rodríguez-Ramírez J. ‘Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization’, *Carbohydrate Polymers*, 81(4) (2010) 864–870. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.03.061.
  - Martínez-Barrera G., Viguera-Santiago E., Hernández-López S., Martínez-Barrera G., Brostow W., Menchaca-Campos C. ‘Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers’, *Polymer Engineering and Science*, 45(10) (2005) 1426–1431. doi: 10.1002/pen.20418.
  - Martínez-Molina W., Torres-Acosta A., Hernández-Leos R., Alonso-Guzman E., Mendoza-Pérez I., Martínez-Peña I. ‘The inhibitive properties of Nopal slime on the corrosion of steel in chloride-contaminated mortar’, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 63(1) (2016) 65–71. doi: 10.1108/ACMM-05-2014-1381.
  - Mohammed A. A. ‘Modelling the mechanical properties of concrete

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- containing PET waste aggregate’, *Construction and Building Materials*, 150 (2017) 595–605. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.154.
- Mondragón Cortez P. *Espectroscopia de infrarrojo para todos ...y 51 espectros de alimentos consumidos en México*. Primera Ed, *Neural Regeneration Research*. Primera Ed (2015) Zapopan, Jalisco.
  - Montemor M. F., Simões A. M. P., Ferreira M. G. S. ‘Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: From the fundamentals to the monitoring techniques’, *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003) 491–502. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00089-6.
  - Montemor M. F., Simões A. M. P., Salta M. M. ‘Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS’, *Cement and Concrete Composites*, 22 (2000) 175–185.
  - Morozov Y., Castela A.S., Dias A.P.S., Montemor M.F. ‘Chloride-induced corrosion behavior of reinforcing steel in spent fluid cracking catalyst modified mortars’, *Cement and Concrete Research*, 47 (2013) 1–7. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.01.011.
  - Morris W., Vico A., Vazquez M., de Sanchez S.R. ‘Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements’, *Corrosion Science*, 44(1) (2002) 81–99. doi: 10.1016/S0010-938X(01)00033-6.
  - Nepomuceno A. A., Andrade C. ‘Steel protection capacity of polymeric based cement mortars against chloride and carbonation attacks studied using electrochemical polarization resistance’, *Cement and Concrete Composites*, 28 (2006) 716–721. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.011.
  - Neves R., Vicente C., Castela A., Montemor M. F. ‘Durability performance of concrete incorporating spent fluid cracking catalyst’, *Cement and Concrete Composites*, 55 (2015) 308–314. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.018.
  - Pech-Canul M. A., Castro P. ‘Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere’, *Cement and Concrete Research*, 32(3) (2002) 491–498. doi:

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- 10.1016/S0008-8846(01)00713-X.
- Pereira E. L., de Oliveira Junior A. L., Fineza A. G. ‘Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete’, *Construction and Building Materials*, 149 (2017) 837–848. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.148.
  - Pérez-Quiroz J. T., Terán J., Herrera M.J., Martínez M., Genescá J. ‘Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation’, *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11) (2008) 1317–1324. doi: 10.1016/j.jcsr.2008.07.024.
  - Peschard A., Govin A., Grosseau P., Guilhot B., Guyonnet R. ‘Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages’, *Cement and Concrete Research*, 34(11) (2004) 2153–2158. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.04.001.
  - Piqué T. M., Vázquez A. ‘Uso De Espectroscopía Infrarroja Con Transformada De Fourier (Ftir) En El Estudio De La Hidratación Del Cemento’, *Concreto y cemento. investigacion y desarrollo*, 3(2) (2012) 62–71. Available at: <http://www.scielo.org.mx/pdf/ccid/v3n2/v3n2a4.pdf>.
  - Poursaee A. ‘Potentiostatic transient technique, a simple approach to estimate the corrosion current density and Stern-Geary constant of reinforcing steel in concrete’, *Cement and Concrete Research*, 40(9) (2010) 1451–1458. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.04.006.
  - Poursaee A., Hansson C. M. ‘Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution’, *Cement and Concrete Research*, 37(7) (2007) 1127–1133. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.04.005.
  - Ramírez-Arellanes S., Cano-Barrita P. F. de J., Julián-Caballero F., Gómez-Yañez C. ‘Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural’, *Materiales de Construcción*, 62(307) (2012) 327–341. doi: 10.3989/mc.2012.00211.

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- Ribeiro D. V, Abrantes J. C. C. ‘Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach’, *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 98–104. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.047.
- Sáenz C., Sepúlveda E. Matsuhira B. (2004) ‘Opuntia spp mucilage’s: A functional component with industrial perspectives’, *Journal of Arid Environments*, 57 (2004) 275–290. doi: 10.1016/S0140-1963(03)00106-X.
- Shi X., Xie N., Fortune K., Gong Jing ‘Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview’, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 125–138. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038.
- Siddique R., Singh K., Kunal P., Singh M., Corinaldesi V., Rajor A. ‘Properties of bacterial rice husk ash concrete’, *Construction and Building Materials*, 121 (2016) 112–119. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.146.
- Song Y., Wightman E., Tian Y., Jack K., Li X., Zhong H., Bond P. L. Yuan, Z., Jiang G. ‘Corrosion of reinforcing steel in concrete sewers’, *Science of the Total Environment*, 649 (2019) 739–748. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.362.
- Stern M., Geary A. L. ‘Electrochemical Polarization I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves’, *Journal of The Electrochemical Society*, 104(1) (1957) 56–63. doi: 10.1149/1.2428653.
- Torres-Acosta A. A. ‘Opuntia-Ficus-Indica (Nopal) mucilage as a steel corrosion inhibitor in alkaline media’, *Journal of Applied Electrochemistry*, 37(7) (2007) 835–841. doi: 10.1007/s10800-007-9319-z.
- Torres-Acosta A. A., Martínez-Madrid M. ‘Mortar improvements from Opuntia Ficus Indica (Nopal) and Aloe Vera Additions’, *Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in Ecological and Sustainable Construction IAC-NOCMAT (2005) - Rio de Janeiro, Brazil*, ISBN: 85-98073-06-7
- Torres Acosta A. A., Pérez Quiroz J. T., Ramírez Rentarías A. J., Martínez Madrid M. Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto

## “REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”

---

- contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales., *Publicación Técnica*, (2006). Sanfandila. Queretaro.
- Torres Acosta A. A., Martínez Molina W., Lomelí González M. G., Pérez Gallardo A. ‘Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto’, *Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte*, (328) (2010) 1–73. Available at: <http://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt328.pdf>.
  - Trocónis de Rincón O., Sánchez M., Millano V., Fernández R., de Partidas E. A., Andrade C., Martínez I., Castellote M., Barboza M., Irassar F., Montenegro J. C., Vera R., Carvajal A. M., de Gutiérrez R. M., Maldonado J., Guerrero C., Saborio-Leiva E., Villalobos A. C., Tres-Calvo G., Torres-Acosta A., Pérez-Quiroz J., Martínez-Madrid M., Almeraya-Calderón F., Castro-Borges P., Moreno E. I., Pérez-López T., Salta M., de Melo A. P., Rodríguez G., Pedrón Miguel, Derrégibus M. ‘Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED’, *Corrosion Science*, 49(7) (2007) 2832–2843. doi: 10.1016/j.corsci.2007.02.009.
  - Uruchurtu-Chavarín J., Malo J. M. ‘Electrochemical noise as a powerful electrochemical technique for corrosion studies.’, *Trend in Corrosion Research*, 2 (1997) 49–58.
  - Valipour M., Shekarchi M., Ghods P. ‘Comparative studies of experimental and numerical techniques in measurement of corrosion rate and time-to-corrosion-initiation of rebar in concrete in marine environments’, *Cement and Concrete Composites*, 48 (2014) 98–107. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.001.
  - Del Valle Moreno A., Pérez López T., Martínez Madrid M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado, *Publicación Técnica* (2001). Sanfandila. Queretaro.
  - Vetter M., Gonzalez-Rodriguez J., Nauha E., Kerr Tanya. ‘The use of Raman

## *“REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS”*

---

spectroscopy to monitor phase changes in concrete following high temperature exposure’, *Construction and Building Materials*, 204 (2019) 450–457. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.165.

- Winston Revie R., Uhlig H. H. *Corrosion and Corrosion Control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. 4th edn, *Proceedings - Annual Meeting of the Decision Sciences Institute*. 4th edn (2008). Edited by J. W. and Sons.
- Zhao B., Jian-Hua L., Rong-Gang H., Rong-Gui D., Chang-Jian L. ‘Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in cement mortar by electrochemical noise measurements’, *Electrochimica Acta*, 52(12) (2007) 3976–3984. doi: 10.1016/j.electacta.2006.11.015.

Anexos.



Revista ALCONPAT

www.revistaalconpat.org  
eISSN 2007-6835



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

**Influencia de un aditivo natural (mucilago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto**

Y. Díaz-Blanco<sup>1</sup> , C. Menchaca-Campos<sup>1</sup> , C. I. Rocabruno-Valdés<sup>2</sup> ,  
J. Uruchurtu-Chavarín<sup>1\*</sup>

\*Autor de Contacto: [juch25@uaem.mx](mailto:juch25@uaem.mx)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>

Recepción: 29/07/2019 | Aceptación: 21/08/2019 | Publicación: 30/08/2019

**RESUMEN**

En esta investigación se evaluó el efecto del mucilago de Nopal sobre las propiedades electroquímicas del concreto. Se diseñaron tres concentraciones de este aditivo con una relación Nopal-agua de 1:1, 1:2 y 1:3. Las pruebas de compresión se realizaron a los 28 días de curado. Las muestras se evaluaron durante 270 días a través de diversas técnicas electroquímicas como: Potencial a Circuito Abierto (OCP), Ruido Electroquímico (EN) y Resistencia a la Polarización Lineal (LPR). Los resultados indican una disminución de la resistencia a la compresión en muestras con mucilago de Nopal a los 28 días. El inicio de la corrosión se retrasó y la velocidad de corrosión fue menor para las muestras con mucilago de Nopal. La conservación y el almacenamiento de este aditivo antes de usarse en el concreto puede ser un desafío para analizar.

**Palabras clave:** mucilago de nopal; concreto reforzado; técnicas electroquímicas; corrosión.

Citar como: Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., Rocabruno-Valdés, C. I., Uruchurtu-Chavarín J. (2019). “Influencia de un aditivo natural (mucilago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto”, Revista ALCONPAT, 9 (3), pp. 260 – 276, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México.

<sup>2</sup> Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Tecnológico Nacional de México (TecNM), Cuernavaca, México.





## Effect of Recycled PET (Polyethylene Terephthalate) on the Electrochemical Properties of Rebar in Concrete

Yohandry Díaz Blanco<sup>1</sup> · Elsa Carmina Menchaca Campos<sup>1</sup> · Carolin Ivette Rocabrano Valdés<sup>1</sup> · Jorge Uruchurtu Chavarín<sup>1</sup>

Received: 20 November 2018 / Revised: 22 September 2019 / Accepted: 30 October 2019  
© Iran University of Science and Technology 2019

### Abstract

This research is focused on the use of recycled PET (Polyethylene terephthalate) as an aggregate to improve the electrochemical properties of reinforcing steel in concrete. Samples were made with different PET geometries such as: fibers (F), rectangles (R), and mixture of fiber and rectangle (F-R). The PET was added as a substitute for sand with a PET/sand ratio by volume percent of 3%/97%, 5%/95%, and 8%/92%. Specimens were exposed to an aggressive solution of sodium chloride at 3%, simulating a marine environment, and were evaluated for 300 days through various electrochemical techniques such as: open-circuit potential, electrochemical noise, electrochemical impedance spectroscopy, and linear polarization resistance. Samples with PET reached more noble values of potential compared to the control sample. The highest values of noise resistance ( $R_n$ ) and polarization resistance ( $R_p$ ) were reached for the reinforcing steel in concrete samples prepared with particle of rectangles and fiber-rectangle mix. Likewise, these samples maintained a diffusive behavior for a longer time. At the end of the test period, the favorable effect of the rectangles and the mixture of fibers and rectangles in the concrete samples are evident, since they remain in the negligible range of corrosion rate, with values below  $1 \times 10^{-1} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . This behavior was not noticeable for samples with only PET fibers, due to the fact that they reach the moderate range of corrosion rate, with values between  $2 \times 10^{-1}$  and  $5 \times 10^{-1} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , similar to the control sample.

**Keywords** Reinforcing concrete · Recycled PET · Electrochemical techniques · Localized corrosion

### 1 Introduction

Corrosion of reinforcing steel is the main cause of deterioration of reinforced concrete structures [1–3]. In the last decades, numerous investigations have been carried out in

this field. The reinforcement corrosion process in concrete is influenced by several factors such as: the design of the mixture, the chemical composition of the solution inside the pores, the characteristics of the concrete cover, the curing process, among others [2]. The causes that most affect steel corrosion are (1) depassivation of reinforcing steel due to localized attack of chloride ions, which enter through to the concrete pore network [4–6] and (2) generalized corrosion of steel due to a process of carbonation in concrete, as a consequence of reactions of the cement matrix and carbon dioxide present in the atmosphere [5–7].

The concrete offers a double protection to the reinforcing steel. First, the concrete acts as a physical barrier, isolating the reinforcing steel from the surrounding environment, which hinders the entry of aggressive agents. In addition, the high alkalinity of the concrete provides a pH between 12 and 13, and at this pH, the steel forms a compact and passive film [6, 8]. Currently, many concrete structures lose these characteristics at an early age. Due to

✉ Jorge Uruchurtu Chavarín  
juch25@uam.mx

Yohandry Díaz Blanco  
yohandry.diaz@alumnos.uam.mx

Elsa Carmina Menchaca Campos  
cmenchaca@uam.mx

Carolin Ivette Rocabrano Valdés  
carolin.rocabruno@uam.mx

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209 Cuernavaca, Morelos, Mexico

# “ANEXOS”



384



**INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL**  
Dirección Divisoral de Patentes

OFICINA REGIONAL CENTRO

Solicitud: **MX/a/2016/018606**  
Expediente: **MX/a/2016/018606** Hora: **13:58:08**  
Fecha: **29/JUL/2016**  
Folio: **MX/E/2016/055722** 153232



Solicitud de Patente  
 Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad

Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál:  
 Modelo Industrial     Dibujo Industrial

Uso exclusivo Delegaciones y Subdelegaciones de la Secretaría de Economía y Oficinas Regionales del  
**SECRETARÍA DE ECONOMÍA**  
RECEBIDO  
**29 JUL 2016**  
DELEGACIÓN FEDERAL  
CUERNAVACA, MOR.

Antes de llenar la forma lee las consideraciones generales al reverso

I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)	
El solicitante es el inventor <input type="checkbox"/>	El solicitante es el causahabiente <input checked="" type="checkbox"/>
1) Nombre (s): <b>Universidad Autónoma del Estado de Morelos</b>	
2) Nacionalidad (es): <b>Mexicana</b>	
3) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: <b>Av. Universidad No. 1001, Col. Chamitpa, C.P. 62209</b>	
Población, Estado y País: <b>Cuernavaca, Morelos, México.</b>	
4) Teléfono (clave): <b>01777 329 7004</b>	5) Fax (clave): <b>01777 329 7004 Ext. 3212</b>
II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)	
6) Nombre (s): <b>Jorge Uruchurtu Chevarín, Elba Carlina Menchaca Campos, Yohandry Díaz Blanco.</b>	
7) Nacionalidad (es): <b>Mexicano, mexicana, cubano.</b>	
8) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: <b>Av. Universidad No. 1001, Col. Chamitpa, C.P. 62209</b>	
Población, Estado y País: <b>Cuernavaca, Morelos, México.</b>	
9) Teléfono (clave): <b>01777 329 7004</b>	10) Fax (clave): <b>01777 329 7004 Ext. 3212</b>
III DATOS DEL (DE LOS) APODERADO (S)	
11) Nombre (s): <b>Dr. Gustavo Urquiza Beltrán</b>	12) R G P: <b>RGP-ODAJ-22/134</b>
13) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: <b>Av. Universidad No. 1001, Col. Chamitpa, C.P. 62209</b>	
Población, Estado y País: <b>Cuernavaca, Morelos, México.</b>	
14) Teléfono (clave): <b>01777 329 7004</b>	15) Fax (clave): <b>01777 329 7004 Ext. 3212</b>
16) Personas Autorizadas para oír y recibir notificaciones: <b>Lic. Emma Rivera Arroyo, Alondra Ortiz Juárez y Biol. Milton René Fragoso Ramírez</b>	

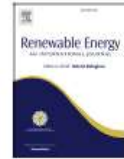




Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)



## Corrosion rate prediction for metals in biodiesel using artificial neural networks



C.I. Rocabruno-Valdés<sup>a</sup>, J.G. González-Rodríguez<sup>a</sup>, Y. Díaz-Blanco<sup>a</sup>, A.U. Juantorena<sup>b</sup>,  
J.A. Muñoz-Ledo<sup>c</sup>, Y. El-Hamzaoui<sup>d</sup>, J.A. Hernández<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICA), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Av. Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62209, Mexico

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Av. Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62209, Mexico

<sup>c</sup> Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Gerencia de Materiales y Procesos Químico Interior Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos, Mexico

<sup>d</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, 24180, Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 9 July 2018

Received in revised form

28 January 2019

Accepted 13 March 2019

Available online 16 March 2019

#### Keywords:

Corrosion rate

Biodiesel

Artificial neural network

Electrochemical noise

### ABSTRACT

The objective of this research was to develop a direct artificial neural network with the ability to predict a corrosion rate of metals in different biodiesel. Experimental values were obtained by the electrochemical noise technique, EN, as well as, information reported in the literature. A backpropagation model was proposed with three layers; metal and biodiesel composition, blend biodiesel/diesel, total acid number (TAN), temperature and exposure time were considered as input variables in the model. The best fitting training data were acquired with 24:4:1, considering a Levenberg–Marquardt learning algorithm, a hyperbolic tangent and linear transfer functions in the hidden and output layer respectively. Experimental and simulated data were compared satisfactorily through the linear regression model with a correlation coefficient of 0.9885 and a mean square error, MSE, of  $2.15 \times 10^{-4}$  in the validation stage. Furthermore, the model agreed the requirements of the slope and the intercept statistical test with a 99% confidence. The obtained results indicated that the ANN model could be attractive as corrosion rate estimator.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

# “ANEXOS”



REDES TEMÁTICAS  
CONACYT 2016  
MEXICO

La Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
El Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,  
a través del Cuerpo Académico:  
UAEMOR-100 “Diseño, ingeniería e impacto de los Procesos”

Otorgan la Presente **CONSTANCIA** a:

**YOHANDRY DÍAZ BLANCO**

Por su participación en el:

**”Primer Encuentro de la Red Temática en  
Sustentabilidad Energética, Medioambiente y Sociedad (Red SUMAS)”**

Llevado a cabo del 29 de agosto a 2 de septiembre del presente en el auditorio del CIICAp

Cuernavaca, Morelos a 2 de Septiembre de 2016



*Dr. Pedro Antonio Márquez Aguilar*  
Director del CIICAp

*Dr. Antonio Rodríguez Martínez*  
Responsable Técnico de la Red SUMAS

# “ANEXOS”



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

CIICAp

SEMANA de la Sustentabilidad

La Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
a través del  
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Otorga el presente reconocimiento a:

**Yohandry Diaz Blanco**

Por su participación  
En la  
Semana de la Sustentabilidad CIICAp – UAEM 2018

Llevado a cabo del 11 al 15 de Junio del presente en el auditorio Dr. Javier Sánchez Mondragón del CIICAp

Dr. Antonio Rodríguez Martínez  
Responsable Técnico de la Red SUMAS

Cuernavaca, Morelos a 28 de Junio de 2018

COLOMBIO  
TALAMBO  
CIICAp  
XX FORO DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS