



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS**

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

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

**“UTILIZACIÓN DE EXOSQUELETO DE CRUSTÁCEOS PARA  
APLICACIONES EN CONCRETO REFORZADO”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS CON OPCIÓN  
TERMINAL EN TECNOLOGÍA DE MATERIALES**

**PRESENTA:**

**IBETH RIVERA ORTIZ**

**ASESORES:**

**DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN**

**DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS**

**CUERNAVACA, MOR.**

**NOVIEMBRE 2019**

---

Cuernavaca, Morelos, a 10 de diciembre de 2019.

**DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO EN**  
**INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "UTILIZACIÓN DE EXOSQUELETO DE CRUSTÁCEOS PARA APLICACIONES EN CONCRETO REFORZADO" que presenta la alumna IBETH RIVERA ORTIZ, para obtener el título de DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS con opción terminal en TECNOLOGÍA DE MATERIALES.

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. ESTELA SARMIENTO BUSTOS	Aprobado	
DRA. MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ (UVM)	Aprobada	
DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN	Aprobada	
DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS	Aprobada	

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.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento a las personas e instituciones que durante este tiempo me ayudaron a poder realizar este trabajo, en especial:

Centro de Investigación e Ingeniería y Ciencias Aplicadas por el apoyo otorgado para la realización de mi maestría y desarrollo profesional.

Al CONACyT por el apoyo económico otorgado, sin cuyos fondos no hubiese sido posible este trabajo.

Al Dr. Jorge Uruchurtu y Dra. Carmina Menchaca, por ser mis guías y mi apoyo. Mi gratitud ya que sin su aportación, paciencia y tiempo, no hubiese sido posible este trabajo.

Al laboratorio LACONTE dirigido por el M.C. Juan Carlos García González, por prestar sus instalaciones para las pruebas mecánicas.

A mi madre, ya que su apoyo fue fundamental para la terminación de mi trabajo de investigación.

## RESUMEN

A causa de los diversos problemas que aquejan a la industria y a la sociedad por fallas estructurales en obras civiles, en las que la corrosión juega un papel muy importante, se dio a la tarea de investigar nuevos mecanismos capaces de mejorar las propiedades mecánicas del concreto reforzado y disminuir la corrosión en las varillas. En trabajos previos se ha demostrado las mejoras en la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, mayor vida útil, entre otros al utilizar el concreto polimérico [McCarter y Barclay 1993].

El polímero en forma de fibra ha demostrado ser un excelente aditivo para el concreto reforzado, sus múltiples beneficios entre ellos el bajo costo, motivó para ampliar las investigaciones en el tema [Martínez 2005].

La realización de esta tesis lo que pretende es ampliar los beneficios que los biopolímeros tienen al ser agregados al concreto y al ser utilizados como recubrimientos sobre la superficie de la varilla, en este trabajo se utilizó el quitosano como agregado con un retenido mayor en la malla n° 100, y el recubrimiento compuesto por 0.5g de quitosano con vinagre de manzana como disolvente.

### Material como agregado

Se fabricaron seis probetas de trabajo para las pruebas electroquímicas en las que se agregaron las diferentes formas de exoesqueleto de camarón: entero, molido, fibra, quitina, quitosano y quitina grado reactivo. Dichos agregados se mezclaron en el concreto y se utilizó un arreglo de tres electrodos iguales compuesto por tres varillas de acero del #3 (3/8") sumergidas en el concreto. Para las pruebas mecánicas se fabricaron seis probetas y cada una contenía un tipo diferente de forma de exoesqueleto de camarón (descritas anteriormente).

### Material como recubrimiento

Se fabricaron tres probetas con recubrimiento: blanco, 0.5g VM y 0.5g AA. El recubrimiento fue aplicado sobre la superficie expuesta de la varilla. Se utilizaron tres varillas de acero del #3 (3/8") sumergidas en el concreto.

Las técnicas electroquímicas utilizadas para el estudio de la corrosión fueron: potenciales de corrosión, ruido electroquímico, resistencia a la polarización lineal, curvas de polarización e impedancia. Para las pruebas mecánicas se utilizaron las técnicas de resistencia a la compresión. Dichas pruebas fueron elegidas dependiendo de las necesidades de información que se requerían para el estudio de esta tesis.

Los resultados de las pruebas electroquímicas para los materiales como agregados demuestran poca efectividad, al obtener valores muy semejantes al de la probeta blanco. En el caso de las pruebas mecánicas el material como agregado a la mezcla de concreto, obtuvo excelentes resultados al tener la probeta con quitosano una mayor resistencia a la compresión  $f'c = 125.02 \text{ kg/cm}^2$  con respecto a la probeta blanco con una  $f'c = 91.33 \text{ kg/cm}^2$ .

En el caso de las pruebas electroquímicas los resultados para las probetas con recubrimiento fueron exitosos ya que la probeta con 0.5g de quitosano y vinagre de manzana (VM) obtuvo valores de potencial de -890 mV a -12.98 mV y una densidad de corriente de  $1.8E-3 \text{ mA/cm}^2$  a diferencia de la probeta de diseño blanco que tuvo valores de -892 mV a -558.6 mV y una densidad de corriente de  $1.7E-4 \text{ mA/cm}^2$ . Las probetas con recubrimiento mostraron pocas probabilidades de corrosión, velocidad de corrosión moderada y mayor resistencia a la solución, en cambio la probeta blanco presento 90% de probabilidades de corrosión y poca resistencia a la solución de NaCl al 3%.

En ambas pruebas tanto electroquímicas como mecánicas, se obtuvo información importante con respecto a la agresividad del ambiente marino y el comportamiento del concreto biopolimérico. Algunas de las recomendaciones que se pueden dar derivadas de este trabajo es moler el quitosano a un tamaño menor que el que se estudió para seguir mejorando las propiedades mecánicas del concreto y estudiar

más a fondo el efecto que tiene el vinagre de manzana en el recubrimiento. Todo esto con el fin de encontrar un punto en que tanto los resultados electroquímicos como los mecánicos sean exitosos.

## ABSTRACT

The research about the new mechanisms to improve the mechanical properties of reinforced concrete structures and decreased corrosion on the steel rods, plays an important role in the corrosion study due to problem afflicting to industry and society. The structural failures in civil works are the main cause of corrosion, specially on the steel rods. In previous work, improvements in compressive strength, flexural strength, longer life, among others when using polymer concrete [McCarter and Barclay 1993] have been detected.

The polymer in the form of fiber has an excellent additive for reinforced concrete, the multiple benefits including low cost, motivated to expand research on the subject [Martínez 2005].

The main objective of this thesis is intended to increase the benefits that biopolymers have when added to concrete and when used as coatings on the surface of the steel rod, in this work, the chitosan is used as an aggregate with a greater retention in the mesh No. 100, and the coating composed of 0.5g of chitosan with apple cider vinegar as coating.

Chitin and chitosan (Biopolymers) used as aggregate concrete-based materials.

Six test specimens were manufactured for electrochemical prove in which the different forms of shrimp exoskeleton are added: whole, ground, fiber, chitin, chitosan and chitin analytical grade. These aggregates are mixed in the concrete and an arrangement of three equal electrodes composed of three # 3 (3/8 ") steel rods submerged in the concrete is added. For the mechanical tests, six specimens were manufactured and each contained a different type of shrimp exoskeleton shape (described above).

Chitin and chitosan (Biopolymers) used as coating concrete-based materials.

Three coated specimens were manufactured: control sample, 0.5 g VM and 0.5 g AA. The coating was applied on the exposed surface of the steel rod. Three # 3 (3/8 ") steel rods submerged in the concrete were used.

The electrochemical techniques used for the study of corrosion were: corrosion potentials, electrochemical noise, resistance to linear polarization, polarization and impedance curves. The mechanical tests were carried out using compression resistance techniques. These tests were chosen from the information required for the study of this thesis.

The results of the electrochemical tests of these materials as aggregates demonstrated little effectiveness, because were obtained values very similar to the control specimen. On the other hand, by the mechanical tests, the material as an aggregate to the concrete mixture was obtained excellent results. The test tube with chitosan had a greater compressive strength  $f'c = 125.02 \text{ kg / cm}^2$  respect to the control test tube against to  $f'c = 91.33 \text{ kg / cm}^2$ .

In the case of electrochemical tests, the results for the coated specimens were successful since the specimen with 0.5 g of chitosan and apple cider vinegar (VM) obtained potential values of -890 mV to -12.98 mV and a current density of  $1.8E-3 \text{ mA / cm}^2$  under the control-design specimen that had values from -892 mV to -558.6 mV and a current density of  $1.7E-4 \text{ mA / cm}^2$ . Coated specimens showed a decrease ratio of corrosion, moderate corrosion rate and greater resistance to the solution, while the control specimen had a 90% chance of corrosion and poor resistance to the 3% NaCl solution.

In both electrochemical and mechanical tests, important information was obtained regarding the aggressiveness of the marine environment and the behavior of biopolymer concrete. Some recommendations that can be derived from this work, are to grind the chitosan to a size smaller than the one studied to continue

improving the mechanical properties of the concrete and further study the effect that apple cider vinegar has on the coating. All this in order to find a point where both electrochemical and mechanical properties of the biopolymer concrete studied results are successful.

## ÍNDICE

Introducción	14
Antecedentes	18
Justificación	21
Objetivos	23
Objetivo general	23
Objetivos específicos	23
Hipótesis	24
Alcances	24
Capítulo I – Conceptos Básicos	25
1.1 – Materiales	25
1.1.1 – Cemento, Concreto y Acero	25
1.1.2 – Exoesqueleto de camarón	26
1.1.2.1 – Quitina	28
1.1.2.2 – Quitosano	30
Capítulo II – Corrosión	32
2.1 – Que es la corrosión	32
2.2 – Tipos de corrosión	32
2.2.1 – Corrosión localizada	32
2.2.1.1 – Corrosión por picadura	32
2.2.1.2 – Corrosión por espacios confinados	33
2.2.1.3 – Corrosión bajo tensión	33
2.2.1.4 – Corrosión por corrientes de interferencia	33
2.2.2 – Corrosión uniforme/generalizada	33
2.2.3 – Corrosión galvánica	34
2.3 – Mecanismos de transporte	34
2.3.1– Permeabilidad	34
2.3.2 – Succión capilar	35
2.3.3 – Difusión	36
2.3.4 – Absorción	36
2.3.5 – Migración	36

---

---

2.3.6 – Carbonatación	37
2.4 – Corrosión de acero de refuerzo	37
2.4.1 – Estados de corrosión de acero de refuerzo	38
Capítulo III – Técnicas de caracterización	40
3.1 – Técnicas electroquímicas	40
3.1.1 – Potencial de corrosión	40
3.1.2 – Resistencia a la polarización lineal	41
3.1.3 – Ruido electroquímico	42
3.1.4 – Curvas de polarización	42
3.1.5 – Índice de localización	43
3.1.6 – Velocidad de corrosión	43
3.1.7 – Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	45
3.1.8 – Difracción de rayos X	45
3.1.9 – Espectroscopía de infrarrojo mediante la transformada de Fourier (FTIR)	45
3.1.10 – Electrodo de referencia	46
3.2- Caracterización mecánicas	47
3.2.1 – Resistencia a la compresión	47
3.3 – Microscopio electrónico de barrido	48
Capítulo IV – Métodos experimentales	50
4.1 – Materiales y fabricación de especímenes	50
4.1.1 – Materiales utilizados como agregados	51
4.1.1.1– Pruebas mecánicas	52
4.1.1.2– Pruebas electroquímicas	56
4.1.2 – Materiales utilizados para recubrimiento	60
4.1.2.1– Pruebas electroquímicas	61
4.2 – Técnicas electroquímicas	65
4.2.1 – Potenciales de corrosión	65
4.2.2 – Resistencia a la polarización lineal	66
4.2.3 – Ruido electroquímico	67
4.2.4 – Curvas de polarización	68
4.2.5 – Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	69

---

---

4.2.6 – Difracción de rayos x	69
4.2.7 – Espectroscopía de infrarrojo mediante la transformada de Furier (FTIR)	69
4.3 – Pruebas mecánicas	70
4.3.1 – Resistencia a la compresión	70
4.3.2 – Microscopio electrónico de barrido	71
Capítulo V – Resultados	72
5.1 – Técnicas electroquímicas	72
5.1.1 – Potenciales de corrosión	72
5.1.2 – Resistencia a la polarización lineal	74
5.1.3 – Ruido electroquímico	75
5.1.4 – Curvas de polarización	77
5.1.5 – Índices de localización	81
5.1.6 – Velocidad de corrosión	83
5.1.7 – Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	84
5.1.8 – Difracción de rayos X	86
5.1.9 – Espectroscopía de infrarrojo mediante la transformada de Furier (FTIR)	88
5.2 – Pruebas mecánicas	89
5.2.1 – Resistencia a la compresión	89
5.2.2 – Imágenes de MEB	91
Conclusiones generales	92
Recomendaciones	93
Referencias	94

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Exoesqueleto de camarón	26
Fig. 1.2. Proceso productivo para la obtención de la Quitina y Quitosano.	27
Fig. 1.3. Estructura química de la Quitina	28
Fig. 1.4. Presentación de la Quitina	29
Fig. 1.5. Presentación de la Quitina grado reactivo	30
Fig. 1.6. Estructura química del Quitosano	30
Fig. 1.7. Presentación del Quitosano	31
Fig. 3.1. Electrodo de referencia Calomel	47
Fig. 3.2 Microscopio electrónico de barrido	49
Fig. 4.1.a) Geometría de las probetas para ensayos mecánicos	52
Fig. 4.2. Cimbra de madera	53
Fig. 4.3. Mezcla de mortero con material propuest	53
Fig. 4.4. Vertido del mortero preparado con el material propuesto	54
Fig. 4.5. Moldes preparados.	54
Fig. 4.6. Espécimen desmoldado, clasificado y listo para curado.	55
Fig. 4.7. Geometría de las probetas para pruebas electroquímicas.	56
Fig. 4.8.a) Varilla de acero corrugada de 3/8" de espesor	57

---

Fig. 4.9. Cimbra de madera engrasada	57
Fig. 4.10. Fabricación de especímenes	58
Fig. 4.11. Espécimen terminado y clasificado	59
Fig. 4.12. a) Quitina soluble en N,N Dimetilacetamina con cloruro de litio al 5%	61
Fig. 4.13. Varillas de acero de 3/8" encapsuladas	62
Fig. 4.14. Elaboración de recubrimiento	62
Fig. 4.15. Probeta de trabajo sumergida en el recubrimiento	63
Fig. 4.16. Tonalidad que se observa en la superficie de la varilla que está expuesta con recubrimiento	63
Fig. 4.17. Celda electroquímica utilizada	65
Fig. 4.18. Voltímetro	66
Fig. 4.19. Esquema de celda utilizado para pruebas de resistencia	66
Fig. 4.20. Potenciostato-galvanostato	67
Fig. 4.21. Celda electroquímica con tres electrodos idénticos	67
Fig. 4.22. Potenciostato ruido electroquímico	68
Fig. 4.23. Arreglo de tres electrodos utilizando potenciostato	69
Fig. 4.24. Equipo de Rayos x	69
Fig. 4.25. Equipo FTIR	69

Fig. 4.26. Prensa hidráulica, resistencia a la compresión.	70
Fig. 4.12. Imagen MEB.	71
Fig. 5.1. Variación potencial de corrosión de probetas con agregados	72
Fig. 5.2. Variación potencial de corrosión de probetas con recubrimiento	73
Fig. 5.3. Variación de la resistencia a la polarización lineal en el tiempo	74
Fig. 5.4. Variación de la resistencia a la polarización lineal recubrimiento	75
Fig. 5.5. Variación de la resistencia de ruido de probetas agregados	76
Fig. 5.6. Variación de la resistencia de ruido de probetas recubrimiento,	77
Fig. 5.7. Grafica curva de polarización de probetas recubrimiento	78
Fig. 5.8. Grafica curva de polarización de probetas a diferentes capas	79
Fig. 5.9. Grafica curva de polarización de probetas con recubrimiento	80
Fig. 5.10. Grafica curva de polarización de probetas con recubrimiento	81
Fig. 5.11. Variación del índice de localización de probetas agregados	82
Fig. 5.12. Variación del índice de localización de probetas recubrimiento	83
Fig. 5.13. Gráfica velocidad de corrosión de probetas con recubrimiento	84
Fig. 5.14. Gráfica Bode-Impedancia de probetas con recubrimiento	85
Fig. 5.15. Gráfica Bode-Impedancia; Angulo-fase de probetas	86

Fig. 5.16. Caracterización DRX de probetas con recubrimiento	87
Fig. 5.17. Caracterización FTIR.	89
Fig. 5.18. Gráfica pruebas de resistencia a la compresión probetas agregados.	90
Fig. 5.19. Gráfica pruebas de resistencia a la compresión probetas agregados.	91

## TABLAS

Tabla 1.1. Análisis químico proximal (A.Q.P)	29
Tabla 1.2. Caracterización del quitosano	31
Tabla 3.1. Potenciales de corrosión	40
Tabla 3.2. Medidas de velocidad de corrosión	44
Tabla 4.1. Especificaciones de materiales	51
Tabla 4.2. Proporciones de los agregados	55
Tabla 4.3. Clasificación especímenes pruebas electroquímicas	59
Tabla 4.4. Clasificación especímenes resistencia a la compresión	64
Tabla 4.5. Clasificación especímenes resistencia a la flexión	88

---

## INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental hoy en día tiene una dimensión global, la contaminación afecta a todos los ecosistemas, trayendo como consecuencia su deterioro y con el pasar de los tiempos su destrucción. El aumento de la contaminación en el planeta nos lleva a un estudio más exhaustivo de nuevos materiales y procesos que puedan ayudar al mejoramiento del medio ambiente. Concretamente el exoesqueleto de camarón, tan sólo para el año 2013 se tuvo una producción de camarón de 127 mil 517 toneladas. Sin embargo, la producción de camarón ha generado efectos colaterales, ya que ocasiona grandes cantidades de desperdicios. Según estudios de la SAGARPA se estima que las cantidades de desperdicio de camarón ascienden a la mitad de lo producido [Shirai Matsumoto 2011]. El aprovechamiento de residuos para la obtención de productos de alto valor agregado constituye un camino hacia la economía sostenible. Actualmente en el área de la ciencia de los biomateriales, los científicos se han enfocado al estudio de la quitina y el quitosano por su alto potencial y aplicabilidad [Genescá *et. al.* 2002]. El quitosano posee excelentes propiedades tales como antifúngico, antivirósico, antimicrobiano, material biocompatible, biodegradable, no tóxico, emulsionante, absorbente de grasas, adsorbente de metales contaminantes entre otros. Su manejo sustentable, hacen que sea considerado de gran aplicación en distintos campos. [Dima *et. al.* 2019].

Debido a las interesantes propiedades fisicoquímicas, estructurales y funcionales del quitosano, se convierte en un candidato adecuado en el desarrollo de recubrimientos anticorrosivos, particularmente por su carácter filmogénico, capacidad de adherencia a superficies metálicas y la capacidad que tiene para formar complejos [Park *et. al.* 2017].

Otro tema importante es la problemática, en el caso de las obras civiles, las cuales sufren desgaste por corrosión en el acero embebido en el concreto, a pesar de que las primeras observaciones de corrosión en el acero embebido en el concreto fueron hechas a principios de este siglo, principalmente en ambientes marinos y plantas químicas, sólo a mediados del mismo se inició el estudio

---

sistemático de este problema que ha llegado a ocupar un lugar muy importante dentro de las investigaciones sobre corrosión a nivel mundial, por los problemas y tipos de estructuras involucradas. Por otro lado, existe una gran problemática de corrosión a nivel mundial, concretamente en las obras civiles, causadas por el desgaste por corrosión del acero embebido en concreto principalmente en ambientes marinos y plantas químicas. Dicho problema tuvo sus primeras observaciones a principios de siglo, pero sólo a mediados del mismo se inició un estudio sistemático para resolver los problemas relacionados a este tipo de estructuras involucradas. [Escalante 1990].

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto se está convirtiendo rápidamente en un problema importante en todo el mundo. El costo anual de la reparación de estacionamientos debido a la corrosión en las armaduras se estima en \$300 a \$400 millones de dólares. El daño por corrosión de la cubierta de puentes y estructuras de apoyo sólo en EE.UU. oscila entre \$165 a \$500 millones dólares [NACE *et. al.* 1983].

Estos costos son los estimados para países desarrollados, por lo que en países que están en desarrollo en los que no se tiene un registro completo de las pérdidas económicas por los daños causados por la corrosión, el costo al que puede ascender el mantenimiento o reparaciones que se necesiten podría ser aún mayor.

El estudio de la corrosión en la armadura del concreto es un área claramente interdisciplinaria donde la química, en especial la electroquímica y la cinética, tienen un papel principal [NACE 2008]. Sobre este tema se debe resaltar que, la calidad de los materiales, proporción en los agregados, prácticas constructivas, espesor del recubrimiento, relación agua-cemento ( $a/c$ ) pueden mejorar o disminuir el grado de protección del concreto contra agentes externos. Cabe resaltar que la mezcla de concreto fabricado con cemento portland proporciona a los materiales embebidos en él una protección adecuada contra la corrosión [Hostalet 1994]. Esto se debe a que sirve como una barrera que protege a la

armadura de agentes agresivos externos y creando una capa pasivante sobre el acero por su alcalinidad que lo mantiene protegido por un tiempo indefinido.

En ambientes marinos el principal responsable de la corrosión son los cloruros, iones despasivantes, los cuales al mezclarse con el agua y el oxígeno, dan lugar a ataques puntuales que pueden reducir la sección del trabajo del acero. En este punto, no solo se debe considerar las pérdidas económicas que se registran a causa de la corrosión, sino también, las pérdidas humanas que se presentan al haber derrumbes o accidentes causados por fallas en las estructuras que colapsan al no poder soportar el esfuerzo para lo cual fueron diseñadas.

A pesar de la protección contra la corrosión que usualmente proporciona el concreto, el acero no está exento de sufrir ataques de iones agresivos que estimulan la corrosión. Tomando esto como base, se tiene como objetivo general, la búsqueda de un nuevo material capaz de mejorar las propiedades mecánicas del concreto y disminuir la velocidad de corrosión en las varillas de acero, con la finalidad de utilizar sistemas mejorados, económicamente accesibles y la prevención de corrosión en futuras construcciones de obras civiles.

La quitina como uno de los biopolímeros más abundantes en la naturaleza junto con el quitosano, su principal derivado, son excelentes candidatos para su uso como agregados en la mezcla de concreto y como recubrimiento de la varilla de acero para evitar o en su defecto disminuir productos de corrosión en el concreto reforzado. Un desecho de camarón que por lo general es responsable de un problema ambiental [Pacheco2010], puede convertirse en una solución para problemas de corrosión en las estructuras.

En este trabajo se estudió la efectividad y comportamiento del recubrimiento base quitina y quitosano empleado en el refuerzo del concreto en estudio. Para llevar a cabo dicho análisis, se simularon condiciones de laboratorio de ambiente marino, uno de los ambientes más agresivos. Aunado a esto se estudiaron las propiedades mecánicas de quitina y quitosano empleado como agregado a la mezcla de concreto.

Por todo esto se puede decir, sin temor a equivocarse, que se vive en una civilización basada en el metal y que por lo tanto se requiere que los materiales metálicos en los cuales está basada dicha civilización industrial sean estables en la atmósfera terrestre y que al menos duren en uso varios años y que estos sean amigables con el medio ambiente [Ávila y Genescá 1996].

## ANTECEDENTES

El descubrimiento del quitosano y su caracterización inició en el siglo XIX como un interés científico, dicho hallazgo ha estado en constante evolución y su empleo actual es de tipo médico, agrícola, industrial y ambiental [Zhang *et al.* 2016; Pakdel y Peighambardoust 2018.]

Historia del quitosano (Ambore *et. al.*, 2013)

En 1811 el naturalista francés Braconnot, al estudiar los hongos descubrió la quitina de la que se obtiene el quitosano. El quitosano es un material que se obtiene del esqueleto de varios crustáceos. Por ejemplo del caparazón de la langosta, el camarón y el cangrejo, entre otros.

20 años después Lassaigue publicó un artículo donde mencionaba la presencia de quitosano en la estructura de los insectos y las plantas dándole el nombre de quitina. La palabra quitina se deriva del griego “quitón” cuyo significado es túnica, cáscara, envoltura, entre otros. Este mismo material fue estudiado por Lassaigue quien encontró nitrógeno en su estructura.

Después del descubrimiento de la quitina se dio el del quitosano. Fue descubierto por primera vez por el científico Rouget mientras trabajaba con quitina. Rouget logró obtener quitosano soluble mediante tratamientos químicos y térmicos.

En 1878 Ledderhose reportó que la quitina es una combinación de moléculas de glucosamina y ácido acético. En 1894 el científico Hoppe-Seyler describió al quitosano como un derivado de la quitina.

A partir de 1920 el quitosano se convirtió en un material popular para proyectos de investigación. Muchos investigadores lo obtenían de cangrejos, conchas y setas.

---

Rammelberg en 1930 trabajó con diversos productos naturales y descubrió que en muchos de ellos se encontraba presente la quitina. Además se dio cuenta de que hidrolizando la quitina de muchas formas se obtenía un polisacárido de la glucosamina.

En 1950 el empleo de la técnica de rayos X mejoró el estudio de la presencia de quitina y quitosano en los hongos. Debido a esta técnica identifico la celulosa en las paredes celulares de las plantas. Después de 140 años de los primeros trabajos sobre quitina publicados por Brocconot se editó en 1951 el primer libro sobre quitosano.

La obtención de quitina y quitosano dependen fuertemente de la materia prima de partida y de la técnica empleada para su extracción. Es un recurso renovable. Actualmente se han desarrollado procesos de extracción que son amigables con el medio ambiente, y de igual forma para la elaboración del recubrimiento a base de quitosano se utilizan productos que no son dañinos para las personas y que pueden ser desechados por las coladeras.

El concreto hecho a base de cemento Portland es actualmente el material manufacturado más extensamente utilizado por el hombre, que de acuerdo con las tendencias mundiales, su futuro tiende a ser más significativo e importante [O'Reilly 2007]. Hasta hace unos años se pensaba que las estructuras de hormigón hidráulico tenían una vida útil ilimitada y que su durabilidad dependía únicamente de sus características mecánicas, por lo que, durante la etapa de su diseño, no se tomaban en cuenta las condiciones ambientales a las cuales iban a ser expuestas [Zamora *et. al* 2009].

El crecimiento de la población y el avance de la ciencia, fueron permitiendo, a través de los años, superar retos y llegar a resultados que antes ni siquiera se imaginaban. Al igual que el uso del concreto reforzado se diversificaba, dentro de éste ocurría un fenómeno el cual de manera silenciosa ocasionada un desgaste a la varilla de acero, los ingenieros al darse cuenta de dicho problema tuvieron que

idear formas o procesos con los cuales se pudiera revertir o reparar el daño a las estructuras que se encontraban de pie. Dichos daños no solo ocasionarían pérdidas económicas, sino también humanas.

Numerosos organismos a nivel mundial como la PCA, NMAB, SHRP, ACI, ASTM, NACE International, RILEM y CEB, han trabajado consistentemente para documentar el tema [Uller *et. al.*1998]. Cabe resaltar que, la mayoría de los estudios sobre el desempeño de la durabilidad de probetas de concreto expuestos a entornos que contienen cloruros se han llevado a cabo en el corto plazo o en pruebas aceleradas en el laboratorio [M.A. Pech 2002].

El instituto nacional de estándares y Tecnología reporta 150 Mpa de resistencia a la compresión de concreto armado con resinas epóxicas o poliéster; sin embargo, estas tecnologías son costosas y complejas [Martínez 2005]. Otros procedimientos utilizados, como el ataque químico o tratamiento térmico, son costosos y requieren mucho tiempo. Una alternativa que se ha decidido explorar es el uso de quitina y quitosano derivados del exoesqueleto de camarón para mejorar las propiedades mecánicas del concreto.

La corrosión en las estructuras de concreto con refuerzo se ve reflejado en la pérdida de resistencia del material así como en la tensión interna generada por los productos de corrosión del acero, la cual no logra ser soportada por la deformación plástica limitada del concreto y conduce al agrietamiento [Taylor 1990]. La modificación en el concreto mediante el uso de materiales poliméricos se ha estudiado durante las últimas cuatro décadas [Dodson 1989], desde entonces se han hecho investigaciones tratando de encontrar un biopolímero capaz de disminuir la velocidad de corrosión y sus efectos sobre la estructura de acero. Para dicho caso, en este trabajo se empleará un recubrimiento y agregado base quitina y quitosano con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del concreto y disminuir la velocidad de corrosión del acero utilizado en la estructura del concreto.

## JUSTIFICACIÓN

Esta investigación tiene un realce en su importancia, debido a que, una posible alternativa de industrialización en cuanto a fuentes de materia prima para elaborar recubrimientos para varillas de acero, a base de quitina y quitosano, puedan ser utilizados. México cuenta con estados camaroneros de los cuales se puede obtener el exoesqueleto del camarón. Sin embargo, la producción de camarón ha generado efectos colaterales, ya que ocasiona grandes cantidades de desperdicios. Según estudios de la SAGARPA se estima que las cantidades ascienden a la mitad de lo producido [Shirai Matsumoto 2011], el resto se desperdicia por la baja demanda y desconocimiento de sus propiedades.

La quitina y el quitosano son un recurso renovable y su elaboración como recubrimiento es amigable con el medio ambiente. El campo de los materiales poliméricos ha crecido considerablemente en los últimos treinta años debido a un aumento significativo en el consumo. La producción de polímeros a partir de recursos renovables alternativos contribuye a resolver algunas de las preocupaciones causadas por el agotamiento de los recursos petroquímicos convencionales y se suma a las áreas que buscan reducir el impacto ambiental y están utilizando procedimientos de producción verde. Dentro de los biopolímeros que combinan ambas características, se encuentran la quitina y el quitosano [Castelló et. al.2019].

La corrosión del acero de refuerzo es la causa principal del daño y el fracaso temprano de las estructuras de concreto armado. En ambientes marinos, la principal causa de la corrosión en las barras de refuerzo ha sido identificada como el cloruro, que induce la despasivación del acero [Pech-Canul y Castro 2002].

Los iones cloruro presentes en el agua, son absorbidos por el concreto, el cual es poroso, llegando hasta la estructura de acero, y ocasionando el agrietamiento o desprendimiento del concreto. De igual forma, los cloruros presentes en el ambiente pueden ser transportados por el aire hasta construcciones cercanas o medianamente cercanas al mar.

---

En la actualidad, aunque ya se cuenta con procesos efectivos para el combate a la corrosión, dichos procesos no combaten a la misma en su totalidad, dejando un nicho de oportunidades, en las cuales, se han propuesto materiales capaces de ayudar al acero de refuerzo que está embebido en el concreto.

Esta investigación busca desarrollar un método por medio del cual, se pueda controlar y disminuir la corrosión. El concreto polimérico ha demostrado grandes beneficios. Con esta nueva tecnología de material para construcción, se pretende mejorar las propiedades mecánicas del concreto, como son: la resistencia a la compresión, mayor vida útil, disminuir la velocidad de corrosión y por último pero no menos importante, mejorar las propiedades que tiene éste en comparación con el concreto hidráulico convencional.

Otras características, por las cuales se eligió utilizar un polímero son: su alta resistencia al impacto y resistencia a la abrasión, buen desempeño en ambientes adversos (viento, humedad, etc.), de menor peso y menores costos [Martínez 2005].

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general.**

- Evaluar electroquímica y mecánicamente el exoesqueleto del camarón como recubrimiento y como agregado.

### **Objetivos específicos.**

- Evaluar las propiedades mecánicas del concreto con agregados del exoesqueleto del camarón.
- Estudiar el comportamiento electroquímico del concreto reforzado con agregados del exoesqueleto de camarón.
- Aplicación del polímero sobre el acero (quitina y quitosano), en forma de recubrimiento.
- Evaluación electroquímica del recubrimiento en presencia de cloruros, en material desnudo y ahogado en concreto.
- Estimar la vida útil del sistema

Con base en la información anterior estimar la vida útil del espécimen.

---

## **HIPÓTESIS**

El exoesqueleto de camarón mejora las propiedades mecánicas del concreto, y la quitina y quitosano extraída de los mismos, resulta en un buen recubrimiento anticorrosivo.

## **ALCANCES**

En trabajos previos se ha demostrado las mejoras en la resistencia a la compresión, mayor vida útil, entre otros al utilizar el concreto polimérico. En esta tesis se propone extender esta técnica para el análisis de la corrosión que se presenta en las varillas de acero, utilizando derivados del exoesqueleto de camarón.

---

## Capítulo I. CONCEPTOS BÁSICOS

### 1.1.- Materiales

#### 1.1.1.- Cemento, Concreto y Acero

El **cemento** - CPO (Cemento Portland Ordinario), es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas. De ahí pasa a un horno rotativo donde se calienta a 1400°C. El producto que se obtiene se conoce como clinker [ASTM C31]. El clinker finamente pulverizado, producido por la cocción a elevadas temperaturas, de mezclas que contiene cal, alúmina, hierro y sílice en proporciones, previamente establecidas, para lograr las propiedades deseadas.

El **concreto** de uso común, se produce mediante la mezcla de cuatro componentes esenciales, cemento, agua, arena y grava los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. Este alcanza su resistencia máxima a los 28 días, días en los que el concreto se pone a curar. El concreto al ser mezclado con agua, al hidratarse se convierte en una pasta moldeable con propiedades adherentes, que en pocas horas fragua y se endurece tornándose en un material de consistencia pétreo.

Los estándares de la ASTM definen la forma y el tamaño de los agregados. El concreto fabricado con cemento portland es el más utilizado debido a su amplia gama de aplicaciones (estructuras, bloques, pavimento, etc.) y las propiedades resultantes incluyen durabilidad y plasticidad [Martínez 2005].

El **acero** es la denominación que comúnmente se le da, en ingeniería metalúrgica, a una aleación de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,03% y el 1,76% en peso de su composición, dependiendo del grado [NMX-C-407].

Para este trabajo se utilizara varilla 3/8" de grado 42 que es el más usado en la construcción y equivale a una resistencia de 4,200 kg/cm<sup>2</sup>.

---

### 1.1.2.- Exoesqueleto de camarón

La utilización de polímeros naturales ha nacido como una alternativa para reducir el uso de polímeros sintéticos. La industria procesadora de mariscos, es altamente generadora de desechos sólidos debido a que del 75% al 85% del peso vivo de estos, son desechos que contaminan el medioambiente y se convierten en una carga económica para las industrias procesadoras, ya que su eliminación es costosa [Gildberg y Stenberg 2001]. Dentro de las ventajas de la utilización del exoesqueleto de camarón están que no daña al medio ambiente, genera bajo costos y constituyen recursos naturales renovables.



*Fig. 1.1. Exoesqueleto de camarón.*

Los exoesqueletos de crustáceos, particularmente el exoesqueleto de camarón, contiene una alta concentración de quitina, de la cual es posible obtener quitosano [Hernández *et. al.* 2009].

El exoesqueleto de camarón que se utilizó para especímenes con agregado en este proyecto proviene de procesadoras industriales ubicadas en el mercado La Puntilla, en Tampico Tamaulipas.

---

Proceso de obtención de polímeros naturales.

El proceso por el cual se obtuvo la quitina y el quitosano, es mediante microorganismos (cultivo iniciador) y enzimas que se encargan de manera suave de purificar la Quitina de proteínas y minerales. El siguiente diagrama resume el proceso productivo mediante bloques con base en la transformación de la materia prima y productos resultantes [Keiko Shirai 2011].

Producto y proceso

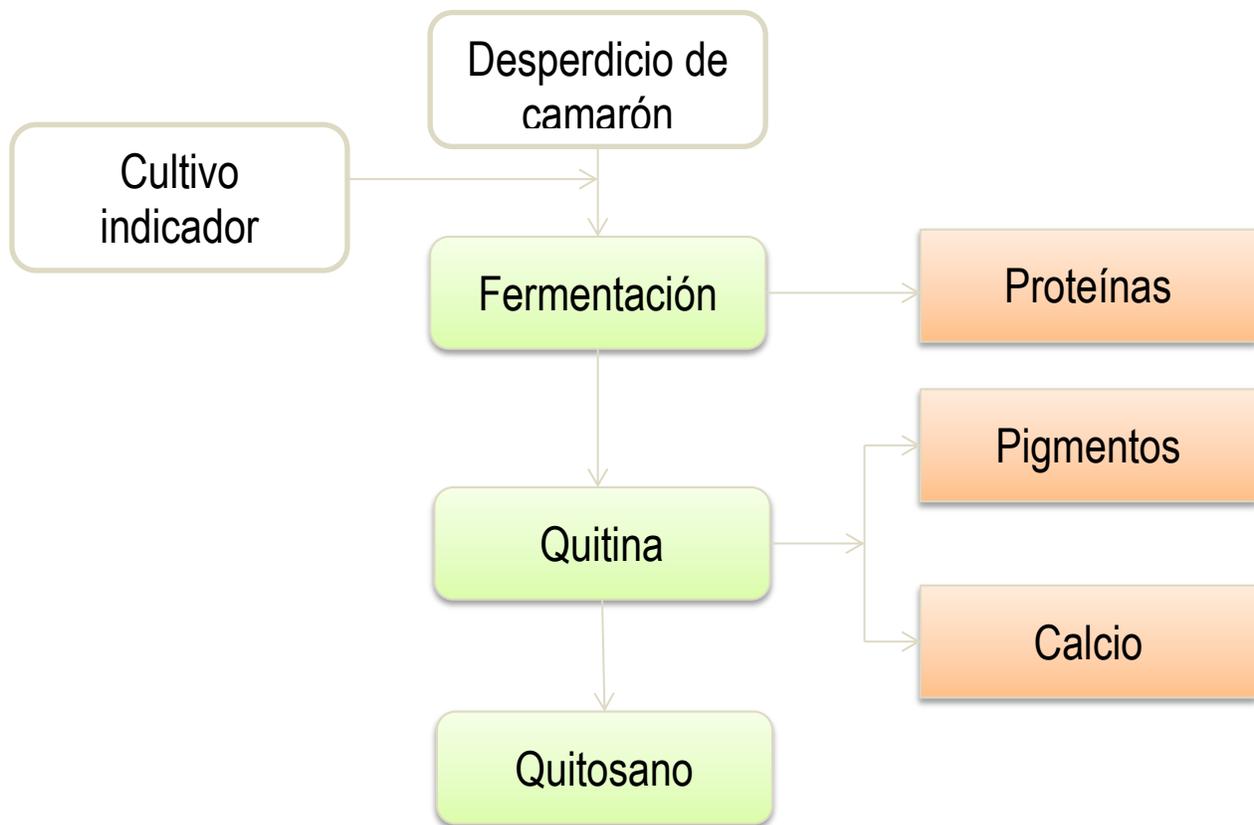


Fig. 1.2. Proceso productivo para la obtención de la Quitina y Quitosano.  
Fuente: UAM

El producto obtenido del proceso anterior fue adquirido en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa en el departamento de biotecnología, área microbiología. Dra. Concepción Keiko Shirai Matsumoto encargada del área.

Teniendo en cuenta las propiedades del concreto, los principales objetivos de la adición de un polímero son: alta compresión y resistencia a la tracción, alto impacto y resistencia a la abrasión, el servicio en ambientes adversos (viento, humedad, etc) de menor peso y menores costos [Martínez 2005].

### 1.1.2.1.- Quitina

La quitina es un biopolímero que se encuentra presente en el exoesqueleto de artrópodos como: langostas, cangrejos y camarón; insectos y también se encuentra en la pared celular de las diatomeas, y otras algas, y hongos; este material por sí mismo no es tóxico y es relativamente fácil de degradar, por lo que su aplicación es ambientalmente aceptable (Crin G. 2005).

La quitina se halla en muchas especies de animales y plantas inferiores en los que actúa como refuerzo de las células. Se localiza sobre todo en la pared celular de los hongos o mohos, levaduras y exoesqueletos de invertebrados como cangrejos, gambas e insectos. La quitina comercial se obtiene principalmente de las cáscaras de los crustáceos, [J. Gacén e I. Gacén 1996].

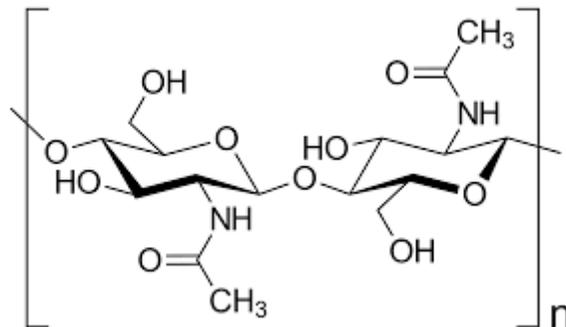


Fig. 1.3. Estructura química de la Quitina.

Es el segundo biopolímero de mayor importancia en nuestro planeta (sólo después de la celulosa); es un polisacárido que contiene grupos funcionales acetamidas (figura 1.2), cuando a la quitina se le eliminan esos grupos mediante el proceso denominado desacetilación se obtiene el quitosano, el cual sigue siendo un biopolímero con una distribución regular de grupos amino. [Hernández *et. al.*2009].

La tabla 1.1 describe el análisis químico proximal del lote de quitina utilizado en este trabajo investigación.

**Tabla 1.1.** Análisis químico proximal (A.Q.P)

Muestra	Cenizas (%)	Grasa (%)	Proteína (%)	Quitina (%)
Lote KITIN2015-1				
<b>Quitina pura</b>	1.75±0.05	0.80±0.17	1.58±0.30	95.85±0.42

lote KITIN2015-1.



*Fig. 1.4. Presentación de la Quitina.*

En los especímenes que utilizaron la quitina como agregado, también se utilizó la quitina grado reactivo de la marca Sigma, para comparar el resultado que se obtiene utilizando diferentes formas de extracción y pureza de la quitina.



Fig. 1.5. Presentación de la Quitina grado reactivo.

### 1.1.2.2.- Quitosano

El quitosano es el producto parcialmente desacetilado de la quitina. Es un polisacárido catiónico lineal compuesto por unidades de  $\beta$ -(1-4)-2-desoxi-2- amino-D-glucopiranososa (D-glucosamina) y  $\beta$ -(1-4)-2-desoxi-2-acetamido-D-glucopiranososa (Nacetil-D-glucosamina) [Sastre *et al.*, 2004], presenta una configuración helicoidal tridimensional estabilizada mediante enlaces de hidrógeno entre los monómeros que lo forman [Andradel *et. al.*, 2003].

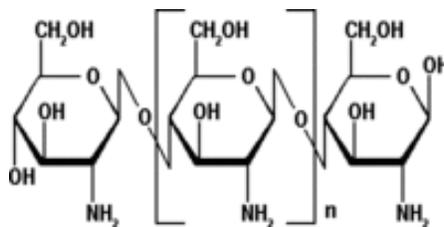


Fig. 1.6. Estructura química del Quitosano.

Debido a sus características funcionales se ha utilizado en la industria de alimentos y bebidas [KNORR 1991; Rodríguez *et. al.*, 2000] también tiene aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales y en procesos de purificación

de aguas potables [Acosta *et. al.*, 2000] y una de sus más prometedoras aplicaciones podría ser como plástico biodegradable.

La tabla 1.2 describe la caracterización del lote de quitosano utilizado en este trabajo investigación

**Tabla 1.2.** Caracterización del quitosano en base seca obtenido del lote KITON2015-1.

Muestra Lote	Humedad (%)	Cenizas (%)	Solubles en ácido acético (%) <sup>1</sup>	Grado de acetilación (%) <sup>2</sup>	Peso molecular (kDa) <sup>3</sup>
Quitosano KITON2015-1	4.65±0.60	1.46±0.05	95.61 ± 0.72	9.91±0.21	285.55 ±0.19

<sup>1</sup>La cantidad de solubles se determinó disolviendo 0.1g de quitosano en 25 ml de una solución de ácido acético (0.1M) durante 24 h, con agitación mecánica, determinando por gravimetría. <sup>2</sup> Grado de acetilación determinado mediante espectroscopia de RMN de protón (Hirai et al 1991). <sup>3</sup>Peso molecular determinado mediante viscosimetría ecuación Mark Houwink Sakurada



*Fig. 1.7. Presentación del Quitosano.*

## **Capítulo II. CORROSIÓN**

### **2.1.- ¿Qué es la corrosión?**

La corrosión no es más que la degradación de los materiales de tipo electroquímico, producida por el medio ambiente que la rodea, por la tendencia de los metales de regresar a su estado natural [Ávila y Genescá 1996].

La norma NACE/ASTM G193-12b define el proceso de corrosión como el deterioro de un material, usualmente un metal, que resulta de la reacción química o electroquímica con su medio ambiente.

En realidad, la corrosión es la causa general de la alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre. Si bien esta fuerza destructiva ha existido siempre, no se le ha prestado atención hasta los tiempos modernos, como efecto de los avances de la civilización en general y de la técnica en particular [Ávila y Genescá 1996].

Como un inicio primero se debe de entender que es la corrosión y sus efectos.

### **2.2.- Tipos de corrosión**

Antes de analizar los efectos para la sociedad que tiene la corrosión, se tiene que estudiar los diversos tipos de corrosión que existen. Los tipos de corrosión se pueden clasificar de la siguiente manera:

#### **2.2.1.- Corrosión localizada**

La corrosión localizada se subdivide en otros tipos de corrosión. A continuación se verán los más destacados.

##### **2.2.1.1.- Corrosión por picaduras**

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva, típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea porque provienen del medio exterior o porque fueron incorporados en la masa de

---

concreto que rodea a las varillas. Las picaduras son autocatalíticas, ya que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento [Uller *et. al.*1998].

#### **2.2.1.2.- Corrosión en espacios confinados**

La corrosión de este tipo puede ocurrir cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo de oxígeno a esta zona, pudiendo crearse celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión del refuerzo.

Existen varias situaciones que pueden inducir a este daño, entre ellas se pueden mencionar inyección de grietas, corrosión del acero de refuerzo con revestimientos, daño mecánico, etc.

#### **2.2.1.3.- Corrosión bajo tensión**

Ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo. Esto ocurre preferencialmente en el concreto pre- o postensado, donde se utilizan aceros de alta resistencia debida, en general, a la presencia de hidrógeno atómico difundido a través del metal.

#### **2.2.1.4.- Corrosión por corrientes de interferencia**

Las corrientes de interferencia, llamadas también vagabundas, erráticas o de fuga pueden ser definidas como las corrientes que fluyen en una estructura y que no forman parte del circuito eléctrico/celda electroquímica específica. Para que exista corrosión por corrientes de interferencia debe existir un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico.

#### **2.2.2.- Corrosión uniforme/generalizada**

Es aquella corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme producto de la pérdida regular del metal superficial. La corrosión uniforme es el resultado de la pérdida generalizada de la película pasivante, resultante de la carbonatación del concreto y/o la presencia de excesiva cantidad de iones de cloruro.

---

### **2.2.3.- Corrosión galvánica**

La corrosión galvánica es una de las más comunes que se pueden encontrar, es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos se unen eléctricamente en presencia de un electrolito. El ataque galvánico puede ser uniforme o localizado en la unión entre aleaciones, dependiendo de las condiciones. La corrosión galvánica puede ser particularmente severa cuando las películas protectoras de corrosión no se forman o son eliminadas por erosión.

Existen otros tipos de corrosión los cuales ya no se tratán, pero que forman parte de los diversos medios que favorecen a la corrosión: industriales, marinos, rurales, entre otros.

### **2.3.- Mecanismos de transporte**

La corrosión es inevitable, el concreto puede deteriorarse ya sea por procesos físicos como agrietamiento y la erosión, por procesos químicos derivados de ataques químicos, por ácidos y por álcalis, por procesos biológicos y por corrosión del acero derivada de procesos de carbonatación y/o penetración de cloruros.

La penetración de sustancias en el concreto se produce a través de sus poros interconectados en él, es decir, por la microestructura porosa de la pasta de cemento hidratada, sumado a las microfisuras que aparecen en la misma [O'Reilly 2007].

Los procesos más significativos que pueden presentarse son los siguientes:

#### **2.3.1.- Permeabilidad**

La permeabilidad es el flujo de líquidos o gases a través de la masa de material, producto de un gradiente de presión. Al ser el agua el líquido que más se pone en contacto con el concreto por las construcciones, la permeabilidad se evalúa de acuerdo con la "Ley de Darcy" la cual se expresa en la ecuación [2.1] de la forma siguiente:

---

$$K_w^* = \frac{Q}{t} \frac{l}{A} \frac{1}{\Delta h} \quad [2.1]$$

donde:

$K_w^*$  = coeficiente de permeabilidad ( $m^2/s$ )

$Q$  = volumen de agua ( $m^3$ )

$l$  = espesor del elemento penetrado por el agua (m)

$A$  = área del elemento penetrado por el agua ( $m^2$ )

$t$  = tiempo (s)

$\Delta h$  = presión de agua (m)

### 2.3.2.- Succión capilar

La succión capilar en la red porosa del concreto es una fuerza que está dada por la “Ley de Darcy” modificada para flujo de agua en un medio semisaturado como se muestra en la ecuación [2.2]:

$$F = \frac{k_p}{\eta} \cdot \frac{d_{pw}}{d_x} \quad [2.2]$$

donde:

$F$  = succión capilar

$\frac{d_{pw}}{d_x}$  = gradiente de presión de vapor de agua ( $N/m^2$ )

$k_p$  = coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (kg/m)

$\eta$  = viscosidad ( $Ns/m^2$ ) (característica del fluido)

---

### 2.3.3.- Difusión

La difusión es la transferencia de moléculas libres o iones en la solución acuosa de los poros, generada por la existencia de su gradiente de concentración. La velocidad de transferencia de masa a través de la unidad de área cuando el proceso se ha estabilizado está definida por la primera “Ley de Fick”, expresada por la ecuación [2.3]:

$$F = -D \cdot \frac{d_c}{d_x} \quad [2.3]$$

donde:

F = flujo de masa ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{S}$ )

D = coeficiente de difusión ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

c = concentración ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

x = distancia (m)

### 2.3.4.- Adsorción

La absorción es la fijación de las moléculas de un líquido o gas sobre la superficie de un sólido como consecuencia de la actuación de fuerzas de tipo Van der Waals, lo que origina la formación de monocapas o de multicapas. La liberación de las partículas previamente absorbidas por una superficie, proceso inverso a la adsorción se denomina desorción [Castro 1995].

### 2.3.5.- Migración

La migración es el transporte de iones mediante un electrólito, como consecuencia de la acción de su campo eléctrico. La migración genera diferencias entre las concentraciones de iones existentes en una solución homogénea, generando difusiones en el sentido de los gradientes de concentración.

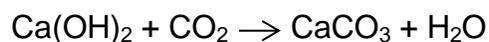
---

Por lo anterior, la dosificación del concreto es un factor que influye de forma significativa en el comportamiento futuro de éste, como elemento protector del acero de refuerzo.

De tal forma que se recomienda que el concreto sea sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura, de las acciones agresivas de los agentes externos [Uller et. al.1998].

### **2.3.6 – Carbonatación**

La carbonatación es la penetración del  $\text{CO}_2$  del aire a través de los poros del concreto. Como ya se ha comentado con anterioridad el concreto es un material poroso y es ahí donde se produce una reacción con el hidróxido de calcio de la solución:



Dado que el  $\text{Ca(OH)}_2$  es el que mantiene el pH del concreto alrededor de 12.5, cuando éste se ha carbonatado el pH tiende a descender a un valor de 9. La difusión del  $\text{CO}_2$  es rápida cuando los poros están llenos de aire, en casos en donde el concreto está totalmente saturado de agua, prácticamente no se carbonata [Uller et. al.1998].

### **2.4.-Corrosión del acero de refuerzo**

Como material de construcción, se pensó que el concreto reforzado podría tener una duración ilimitada. Sin embargo, en la actualidad se reporta un número cada día creciente de estructuras prematuramente deterioradas por corrosión del acero de refuerzo.

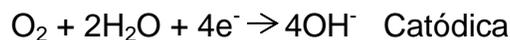
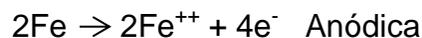
El umbral del cloruro para desarrollar corrosión activa en el acero de refuerzo, no parece ser un valor único y depende de varios factores, tales como proporciones

---

de la mezcla de concreto, tipo de cemento, contenido de C<sub>3</sub>A (Aluminato tricálcico) de cemento, materiales mezclados, relación agua/cemento, la temperatura, humedad relativa, condiciones de la superficie de acero y fuente de penetración de cloruros entre otros [Alonso *et. al* 2000].

En ambientes marinos el cloruro es la principal causa de la corrosión del acero de refuerzo y por ello es importante evaluar los mecanismos por los cuales penetra desde la superficie del concreto hasta el nivel de las barras. El seguimiento de estos procesos permite hallar correlaciones con los diferentes parámetros de corrosión [Castro 1995]. Este proceso de corrosión en las estructuras de concreto con refuerzo se ve reflejado en la pérdida de resistencia del material así como en la tensión interna generada por los productos de corrosión del acero, la cual no logra ser soportada por la deformación plástica limitada del concreto y conduce al agrietamiento [Izquierdo *et. al* 2013].

Reacciones del acero de refuerzo:



#### **2.4.1.-Estados de corrosión del acero de refuerzo**

Se puede definir la corrosión como el daño que sufren los materiales por las acciones del medio en que se encuentran, produciendo pérdidas en sus propiedades mecánicas de resistencia, lo que da lugar a cambios en la geometría de las estructuras y componentes que les hacen perder la función para la cual estaban determinadas, ocasionando [Rosario y Yácono 2003]:

- Pérdidas directas, como el cambio de estructuras y equipos corroídos.
  - Pérdidas indirectas, como la pérdida de producción por suspensión temporal de los sistemas productivos y las instalaciones, y la contaminación de los bienes creados.
  - Pérdidas de recursos naturales escasos.
-

- Pérdidas de bienestar y vidas humanas.
- Pérdidas de la eficiencia.
- Sobredimensionamiento.
- Aumento de los costos de explotación.

---

## Capítulo III. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

### 3.1.- Técnicas electroquímicas

La aplicación de técnicas de polarización, tales como la potenciostática y la potenciodinámica ha sido muy exitosa en la evaluación de la velocidad de corrosión y también en el estudio de los fenómenos involucrados en la reacción de corrosión [Genescá *et. al* 2002]. La elección de las mismas se debió a los fenómenos involucrados en el proceso que en este trabajo se quiere estudiar.

#### 3.1.1.-Potencial de corrosión

El potencial de corrosión se puede medir experimentalmente utilizando un electrodo de referencia (que mantiene un potencial constante) y un voltímetro. Es importante tener siempre en cuenta que el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) corresponde a un potencial mixto en el que las dos reacciones anódica y catódica ocurren a la misma velocidad, por lo cual la corriente neta es cero. Sin embargo esto no significa que se esté en una condición de equilibrio pues el sistema está cambiando, el metal se va disolviendo y pierde masa [Norma ASTM C876].

La interpretación de los valores de los potenciales de corrosión se hizo con base en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Potenciales de corrosión en concreto reforzado

<b>Criterios de potencial de corrosión (norma ASTM C876).</b>	
Más positivos que -200 mV	10% de probabilidad de que no exista corrosión
Entre -200 y -350 mV	50% (Incertidumbre)
Más negativo que -350 mV	90% de probabilidad de corrosión

---

### 3.1.2.-Resistencia a la Polarización Lineal

La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) o Polarización lineal es una técnica ampliamente usada desde los últimos 50 años, la cual permite determinar velocidades de corrosión [Rodríguez 2001]. Se trata de una técnica cuantitativa y no destructiva, que permite la estimación de la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un medio [ASTM G59], no hace falta instrumentación muy sofisticada pues solamente se necesita de un potenciostato y en consecuencia es una técnica económica.

La ecuación desarrollada por Stern y Geary, que lleva el nombre de los investigadores se presenta de la siguiente manera, ecuación [3.1]:

$$i_{corr} = B/R_p \quad [3.1]$$

$$B = (b_a b_c) / [2.303 (b_a + b_c)] \quad [3.2]$$

La constante  $B$  en la ecuación [3.2] sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel, donde  $b_a$  y  $b_c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente [Genescá *et al* 2002]. La aproximación de bajo campo implica que aunque el sobrepotencial y la corriente se relacionan a través de una ecuación que implica la diferencia entre dos exponenciales en la intermediación del potencial de corrosión se puede asumir que el comportamiento es lineal, por lo que es bueno recordar que la  $R_p$ , ecuación [3.3], también es definida como [Rodríguez 2002]:

$$R_p = (\partial E / \partial I)_{I \rightarrow 0} \quad [3.3]$$

Los valores de  $R_p$  son inversamente proporcionales a la corriente, donde  $\partial E$  es la desviación estándar de potencial y  $\partial I$  desviación estándar de corriente según lo establece la ley de Faraday, la corriente de corrosión es directamente proporcional

---

a la velocidad de corrosión del metal lo cual implica que la velocidad de corrosión del metal es inversamente proporcional a la resistencia a la polarización [ASTM G59-91]. Se utilizó un equipo marca ACM Instruments GillAC.

### **3.1.3.- Ruido Electroquímico**

Ruido es un término general usado para describir las fluctuaciones de una señal con respecto al tiempo. El ruido electroquímico son oscilaciones en potencial o en corriente electroquímica y se define como las oscilaciones estocásticas del potencial de un electrodo de trabajo respecto a un electrodo de referencia. El ruido en corriente es la oscilación estocástica de la corriente electroquímica [Genescá 2002].

La técnica de ruido electroquímico detecta el tipo de corrosión, pero no existen reglas generales para su análisis. En este trabajo se analizó la resistencia en ruido, como la razón de las desviaciones estándar, en analogía con la ley de Ohm ecuación [3.4].

$$Rn = dv/dc \quad [3.4]$$

Donde  $Rn$  es la resistencia en ruido,  $dv$  es la desviación estándar del potencial y  $dc$  es la desviación estándar de la corriente [Malo y Uruchurtu 2002].

### **3.1.4.- Curvas de Polarización**

Las curvas de polarización nos permiten determinar si un metal es susceptible a la corrosión uniforme o al ataque localizado. Si se polariza un electrodo primero en sentido anódico y luego en sentido catódico se puede obtener pares de valores de corriente y potencial. Si en el eje de las abscisas se grafica el valor absoluto de la corriente y en el de las ordenadas el valor del potencial  $E$  se obtendrá el diagrama de Evans.

Se observa que existe un valor para el cual la corriente anódica es igual que la corriente catódica que se denomina  $i_{corr}$  y que corresponde a un potencial  $E_{corr}$ .  $E_a$  es el potencial del ánodo y  $E_c$  el potencial del cátodo,  $E_a$  y  $E_c$  son los

---

potenciales medidos cuando circula una corriente  $i$ . La técnica de polarización es una técnica destructiva. Se utilizó un equipo marca ACM Instruments GillAC.

Los parámetros encontrados en las curvas de polarización (pendientes anódica y catódica) permiten hacer uso de la ecuación de Stern – Geary para hallar las densidades de corriente de corrosión y velocidad de corrosión en milésimas de pulgada por año (mpy) o mm/año [Uller *et. al.*1998].

### **3.1.5.- Índice de Localización**

Una relación utilizada comúnmente como índice o grado de corrosión localizada es el coeficiente de variabilidad, que determina el índice de localización (IL), dado por la ecuación [3.5]:

$$IL = \frac{d_i}{i_{rms}} \quad [3.5]$$

Donde  $d_i$  es la desviación estándar de la corriente, e  $i_{rms}$  es la raíz cuadrada o valor medio de la corriente. Un valor de este índice de localización (IL) entre 0.1 y 1 indica corrosión localizada, valores entre 0.01 y 0.1 indican corrosión mixta, mientras valores que se encuentran entre 0.001 y 0.01 indican corrosión generalizada [Chávez 2007].

### **3.1.6.- Velocidad de corrosión**

La velocidad de corrosión determina la pérdida de sección de la estructura de acero por corrosión de la misma. Para la realización de las medidas de la velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ) se utilizó el método de la Resistencia de Polarización ( $R_p$ ). Las unidades habituales en las que se expresa la velocidad de corrosión son  $\mu A/cm^2$ . La tabla 3.2 muestra el criterio de corriente de corrosión [Izquierdo *et. al* 2013].

---

**Tabla 3.2.** Medidas de velocidad de corrosión

<b>Velocidad de corrosión (<math>\mu\text{A}/\text{cm}^2</math>)</b>	<b>Nivel de corrosión</b>
$\leq 0.1$	Despreciable.
0.1 a 0.5	Baja
0.5 a 1	Moderada
$> 1$	Alta

Con la finalidad de aplicar los procesos de seguridad y funcionalidad con los que se determina una estructura, se debe determinar la vida útil, que es el periodo en el cual la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad.

Los valores de  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  se transforman en pérdida de espesor de la varilla, ecuación [3.6], con respecto al tiempo mediante la Ley de Faraday [Uller *et. al.*1998].

$$\frac{\mu m}{\text{año}} = \frac{M}{\delta n.F} \cdot i_{\text{corr}} = 11.6 \cdot i_{\text{corr}} ; \text{ donde:} \quad [3.6]$$

M = masa atómica del metal

n = N° de electrones transferidos

F = constante de Faraday (96,500 coulombios)

$\delta$  = densidad del metal

### **3.1.7.- Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)**

La técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS por sus siglas en ingles), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal de corrosión) y determinando la respuesta correspondiente [Juan Mendoza *et. al.*2016].

Mediante esta técnica se puede estimar el grado de corrosión.

### **3.1.8.- Difracción de rayos X**

Los rayos x son ondas electromagnéticas de longitudes de onda muy pequeñas. La fuente más común de los rayos X es la desaceleración de electrones de alta energía al bombardear un blanco metálico; estos rayos se usan como un medio de diagnóstico en la metalurgia, en la determinación de fallas estructurales, en la determinación de las estructuras cristalinas de muestras sólidas, etc. [Barco y Rojas 2001].

### **3.1.9.- Espectroscopía de infrarrojo mediante la transformada de Furier (FTIR)**

El método o la técnica de la espectroscopia infrarroja se realiza con un instrumento llamado espectrómetro infrarrojo (o espectrofotómetro) para producir un espectro infrarrojo. Un espectro de IR se puede visualizar en un gráfico de la absorbancia de luz infrarroja (o transmitancia) en el eje vertical en función de la frecuencia o la longitud de onda en el eje horizontal.

Las unidades típicas de frecuencia utilizadas en los espectros IR son centímetros recíprocos (a veces llamados números de onda), con el símbolo  $\text{cm}^{-1}$ . Las unidades de longitud de onda IR se suelen dar en micrómetros (antes llamados "micrones"), símbolo  $\mu\text{m}$ , que están relacionados con los números de onda de forma recíproca. Un instrumento de laboratorio común que utiliza esta técnica es una transformada de Fourier infrarroja (FTIR) espectrómetro.

Por medio del estudio de los espectros de absorción se puede determinar cuantitativamente la cantidad de una sustancia determinada presente en una muestra.

### 3.1.10.- Electrodo de referencia

Los procesos que tienen lugar en la interfase metal-solución de cualquier metal en contacto con un electrolito (medio agresivo), no se pueden medir de una manera absoluta (tiene que ser tan sólo relativa). El metal en contacto con el electrolito tiene, por un lado, tendencia a disolverse, con lo que queda cargado negativamente [Ávila y Genescá 1995].



y, por otro lado, a que iones del electrolito se depositen sobre el metal:



con lo que se alcanza el equilibrio en un determinado momento:



Se ha creado, una diferencia de potencial entre el metal y el electrólito. Para poder medir esta diferencia de potencial se adoptó un electrodo patrón que es el electrodo normal de hidrógeno, al cual, por convención y a cualquier temperatura, se le asignó el valor cero. Para este trabajo se utilizará un electrodo de referencia de Calomel, figura 3.1.



*Fig. 3.1. Electrodo de referencia Calomel.*

## **3.2.- Caracterización Mecánica**

### **3.2.1.-Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión, tal como lo especifica la norma ASTM C 150, es la obtenida a partir de pruebas en cubos de mortero estándar de 10 cm, ensayados de acuerdo a la norma ASTM 109. Estos cubos se hacen y se curan de manera prescrita y utilizando una arena estándar. Su objetivo es obtener el esfuerzo máximo que presenta un material a la compresión sin romperse.

La resistencia a la compresión está influida por el tipo de cemento, para precisar, por la composición química y la finura del cemento. La norma ASTM C 150 sólo fija un requisito mínimo de resistencia que es cómodamente rebasado por la mayoría de los fabricantes. Por lo anterior, no se debe pensar que dos tipos de cemento Portland que cubran los mismos requisitos mínimos produzcan la misma resistencia en el mortero o en el concreto cuando no se hayan modificado las proporciones de las mezclas.

En general, las resistencias de los cementos (teniendo como base las pruebas de cubos de mortero) no se pueden usar para predecir las resistencias de los concretos con exactitud debido a la gran cantidad de variables en las características de los agregados, mezclas de concreto y procedimientos constructivos.

Para pruebas de compresión se utilizan tres tipos de especímenes: cubos, cilindros y prismas. Los cubos se emplean en Inglaterra, Alemania y muchos países europeos. Los cilindros son especímenes estándar de Estados Unidos, Canadá, Australia y Nueva Zelanda. El diámetro del molde deberá ser de al menos 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado y su altura deberá ser el doble del diámetro. Cuando el tamaño máximo nominal del agregado grueso exceda de 2", la muestra de concreto deberá ser tamizada a través del tamiz de 2" [Rodríguez 2002]. Las pruebas se hacen con una prensa hidráulica.

### **3.3.- Microscopio electrónico de barrido**

Los componentes del microscopio electrónico de barrido son: cañón de electrones (fuente de iluminación), lentes magnéticas, bobinas de barrido, detectores, columnas, cámara y sistema de vacío [Barba *et. al.* 1983]. Son varias las señales que se generan en el MEB:

- Haz de electrones incidente.
- Catodoluminiscencia.
- Electrones Auger.
- Bremsstrahlung.
- Electrones secundarios.
- Rayos x característicos.
- Electrones retrodispersados.
- Electrones dispersados eléctricamente.
- Electrones transmitidos y dispersados inelásticamente.

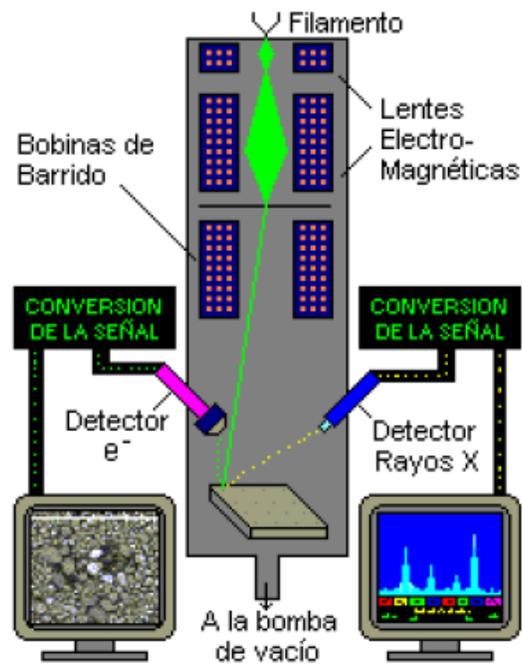


Fig. 3.2 Microscopio electrónico de barrido.

## Capítulo IV. MÉTODOS EXPERIMENTALES

### 4.1.- Materiales y fabricación de especímenes

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta, así como también todos los espacios entre partículas de agregado [Polanco 2012].

Los materiales que se utilizaron para este trabajo cumplen con ciertos requisitos para su utilización. La norma ASTM C33 establece que los agregados finos (arena) y gruesos (grava) deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

El nivel de iones cloruro solubles en el agua en el cual la corrosión del acero de refuerzo comienza en el concreto es de aproximadamente 0.15% del peso del cemento. Del contenido total de ion cloruro en el concreto, sólo es soluble en el agua aproximadamente del 50% al 85%: el resto se combina químicamente en reacciones del cemento. La elección del concreto hidráulico se realizó con respecto al uso en el área de la edificación.

El exoesqueleto de camarón utilizado como agregado fue previamente lavado con agua destilada y deshidratado en horno eléctrico a 200 °C por 30 min. En la actualidad, la principal fuente de exoesqueletos proviene de los desechos de la industria camaronera, los cuales representan millones de toneladas de basura a nivel mundial [Hernández *et. al.* 2009].

La Quitina y el quitosano fueron utilizados en la misma presentación en que fueron adquiridos.

Para una mejor comprensión del trabajo de investigación los especímenes bajo estudio fueron fabricados y clasificados de la siguiente forma:

---

#### 4.1.1.- Materiales utilizados como agregados

Los materiales utilizados se clasifican de la siguiente manera:

**Tabla 4.1.** Especificaciones de materiales

Material	Especificación	
1. Cemento	Cemento Portland Ordinario (CPO) 20R, marca Cemex	
2. Arena	Piedra triturada, pasa malla #4	
3. Grava	Grava de la región, 3/4"	
4. Agua	Potable	
5. Acero	Varilla corrugada de 3/8", grado 42-resistencia de 4,200 kg/cm <sup>2</sup>	
6. Relación a/c:	0.5	
7. Revenimiento	9.8 cm.	
8. Exoesqueleto entero	Retenido malla 4	
9. Exoesqueleto molido	Retenido malla 30	
10. Exoesqueleto fibra	Retenido malla 8	
11. Quitina	Retenido malla 8	

12. Quitina grado reactivo

Retenido malla 100



13. Quitosano

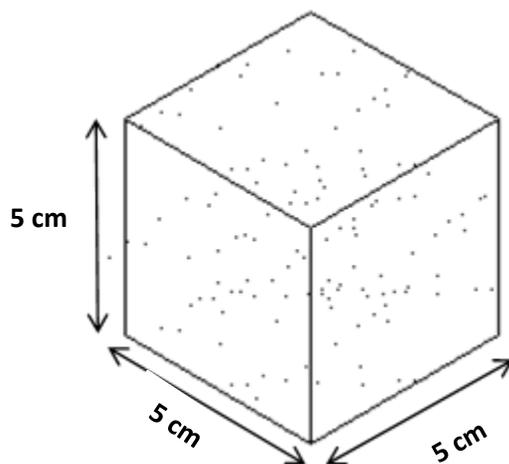
Retenido malla 30



Las mallas utilizadas en la clasificación de los materiales son marca GRUPO FIICSA, fabricante de equipo para laboratorio mecánica de suelos, concreto asfalto y terracería.

#### 4.1.1.1.- Pruebas mecánicas

Los especímenes fueron fabricados según la norma ASTM C192 para morteros. Mortero prop. 1:4 con medidas de 5 cm x 5 cm x 5 cm.



a)



b)

Fig. 4.1.a) Geometría de las probetas para ensayos mecánicos y b) fotografía del espécimen.

Para la fabricación de los especímenes se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La cimbra será de madera para los diferentes tipos de molde (Fig. 4.2).



*Fig. 4.2. Cimbra de madera.*

2. Previamente al llenado de los moldes, las superficies interiores deben engrasarse con aceite quemado, especialmente en las esquinas para evitar que la mezcla de concreto se adhiera a la cimbra y se rompa al desmoldarse.
3. Previo antes de verterse el mortero en el molde de madera, se prepara la mezcla compuesta por cemento-arena prop. 1:4, se bate hasta lograr una mezcla homogénea y se agrega 1g de uno de los materiales propuestos.



*Fig. 4.3. Mezcla de mortero con material propuesto.*

4. Se vierte la muestra de mortero dentro del molde (figura 4.4), hasta llenar la mitad de éste. Se golpea ligeramente los lados del molde hasta que desaparezcan las huellas.



*Fig. 4.4. Vertido del mortero preparado con el material propuesto dentro del molde de madera.*

5. Se procede a retirar el concreto sobrante enrasando la superficie del molde con la cuchara de albañil para dejar la superficie lisa.



*Fig. 4.5. Moldes preparados.*

6. Todo el proceso desde la preparación de la muestra de concreto hasta el paso N° 5, no debe exceder de 15 minutos.
7. Se Identifica el espécimen y se protege la superficie del molde. El cubo de concreto no debe desmoldarse ni moverse hasta después de que transcurran 24 horas desde el momento de su fabricación.

8. A continuación proceda a curar los especímenes por 28 días, hasta obtener su resistencia máxima



*Fig. 4.6. Especimen desmoldado, clasificado y listo para curado.*

El exoesqueleto de camarón es utilizado en diferentes formas para comprobar si esta afecta en el resultado de las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión.

**Tabla 4.2.** Clasificación de especímenes para pruebas mecánicas

<b>Especimen</b>	<b>Dosificación</b>
1.- Blanco	mortero mezcla normal
2. Exoesqueleto entero	1g + mortero mezcla normal
3. Exoesqueleto molido	1g + mortero mezcla normal
4. Exoesqueleto fibra	1g + mortero mezcla normal
5. Quitina	1g + mortero mezcla normal
6. Quitina grado reactivo	1g + mortero mezcla normal

La clasificación de los especímenes nos servirá para comparar efectividad con respecto a la resistencia del espécimen de diseño- blanco.

#### 4.1.1.2.- Pruebas electroquímicas

Los especímenes fueron fabricados según la norma ASTM C31. Concreto prop. 1:2:3 con medidas de 10 cm x 7 cm x 10 cm.

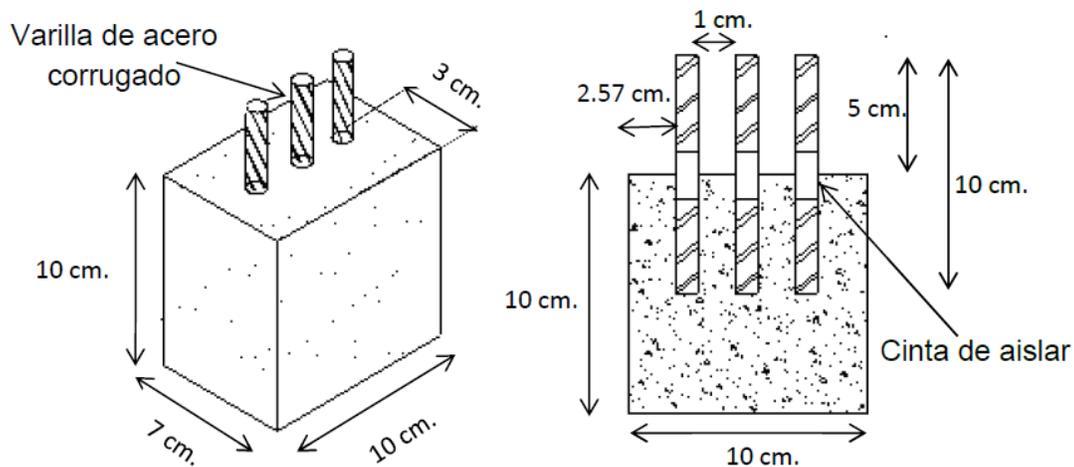


Fig. 4.7. Geometría de las probetas para pruebas electroquímicas.

Para la fabricación de los especímenes se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Al momento de comprar la varilla se debe observar que no exista oxidación importante, grasa o escamas en la superficie, que no existan fracturas, deformaciones o imperfecciones que puedan afectar la resistencia o adherencia al concreto. Estas solo serán utilizadas para los especímenes de pruebas electroquímicas, y estarán sumergidas en la mezcla de concreto.

2. Las varillas corrugadas de acero de 10 cm. de  $3/8''$  se encintaron previamente en la parte de en medio aproximadamente 2.00 cm. con cinta aislante, como se muestra en la figura 4.8, para prevenir que por capilaridad ingrese solución de la parte externa a la interna.

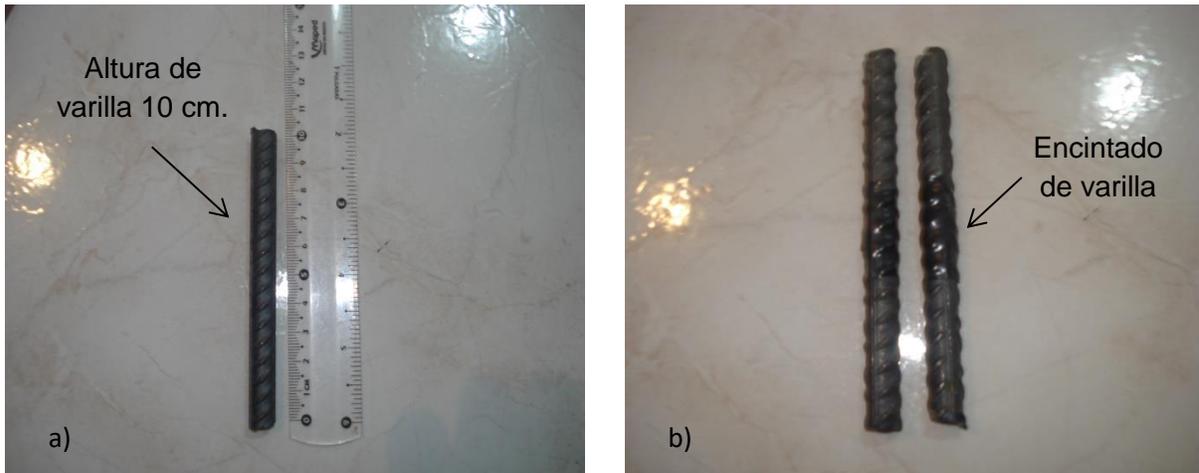


Fig. 4.8.a) Varilla de acero corrugada de  $3/8''$  de espesor con medida de 10 cm. y b) encintado de varilla de acero.

3. La cimbra será de madera para los diferentes tipos de molde.
4. Previamente al llenado de los moldes, las superficies interiores deben engrasarse con aceite quemado, especialmente en las esquinas para evitar que la mezcla de concreto se adhiera a la cimbra y se rompa al desmoldarse (figura 4.9).

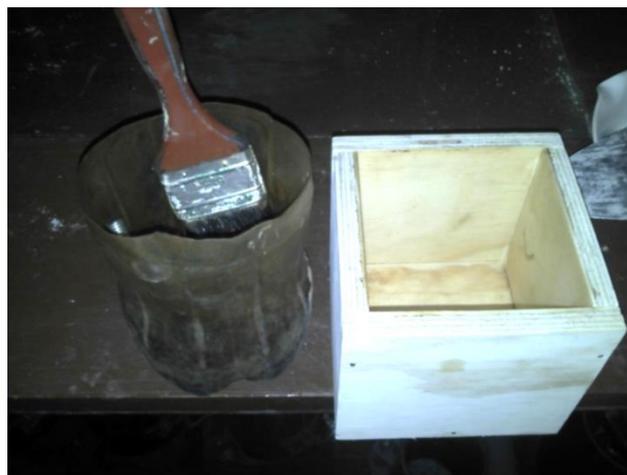


Fig. 4.9. Cimbra de madera engrasada.

5. Previo antes de verterse la mezcla de concreto en el molde de madera, se prepara la mezcla, se bate hasta lograr una mezcla homogénea y se agrega 8.38g de uno de los materiales propuestos.
6. Se vierte la muestra de concreto dentro del molde (figura 4.10), hasta llenar la mitad de éste. Se golpea ligeramente los lados del molde hasta que desaparezcan las huellas.



*Fig. 4.10. Fabricación de especímenes.*

7. Se procede a retirar el concreto sobrante enrasando la superficie del molde con la cuchara de albañil para dejar la superficie lisa.
8. Todo el proceso desde la preparación de la muestra de concreto hasta el paso N° 7, no debe exceder de 15 minutos.
9. Se Identifica el espécimen y se protege la superficie del molde. El cubo de concreto no debe desmoldarse ni moverse hasta después de que transcurran 24 horas desde el momento de su fabricación.
10. A continuación proceda a curar los especímenes por 28 días, hasta obtener su resistencia máxima.



Fig. 4.11. *Especimen terminado y clasificado.*

El exoesqueleto de camarón es utilizado en diferentes formas para comprobar si esta afecta en el resultado de las pruebas electroquímicas.

**Tabla 4.3.** Clasificación de especímenes para pruebas electroquímicas

<b>Especimen</b>	<b>Dosificación</b>
1.- Blanco	concreto normal
2. Exoesqueleto entero	8.38g + concreto normal
3. Exoesqueleto molido	8.38g + concreto normal
4. Exoesqueleto fibra	8.38g + concreto normal
5. Quitina	8.38g + concreto normal
6. Quitina grado reactivo	8.38g + concreto normal
7. Quitosano	8.38g + concreto normal

La fabricación de los especímenes, tanto para pruebas electroquímicas como para mecánicas, se hicieron con base en las normas ASTM C31, C192, C109.

#### **4.1.2.- Materiales utilizados para recubrimiento**

En el caso de los materiales que se utilizaran para recubrimiento, estos son aplicados sobre la superficie de la varilla, por lo que se tuvo que disolver los materiales propuestos con anterioridad.

El exoesqueleto de camarón se trató de disolver mediante ácidos, acetonas y otros productos con los que no se tuvo éxito, por lo cual se desecha la utilización del exoesqueleto para utilizarlo como recubrimiento.

En el caso de la quitina y el quitosano se tomó como referencia la receta reportada en la literatura.

##### Solubilidad de quitosano

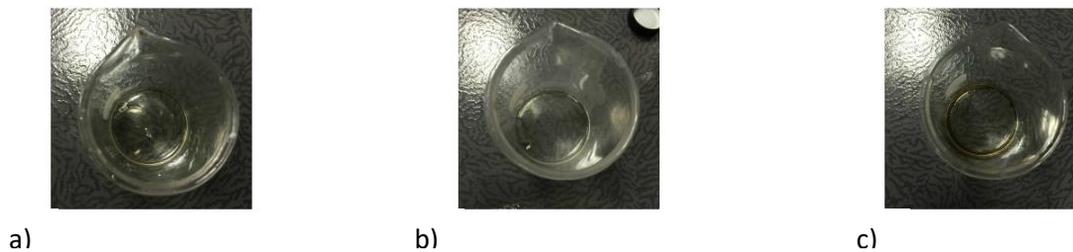
El porcentaje de solubles del quitosano se calculo disolviendo 0.1 g en 25 ml de una solución de ácido acético glacial (0.1M) durante 72 h, con agitación constante a temperatura ambiente, posteriormente se filtró con papel filtro de celulosa (0.45 micras) y por diferencia de peso se determinó la cantidad de quitosano soluble [Shrinivas y col., 2005].

##### Solubilidad de quitina

El porcentaje de solubles de la quitina se calculó disolviendo 0.1 g de quitina en 25 ml de una solución de N, N,-dimetilacetamida (DMAc) con cloruro de litio al 5% [Shrinivas y col., 2005], durante 72 h, aplicando calor (50°) esporádicamente, con agitación constante a temperatura ambiente.

En el caso de la quitina, la utilización de cloruro de litio hace que este recubrimiento no sea apto para su utilización ya que una parte fundamental de este proyecto es mantener productos que sean amigables con el medio ambiente, por lo que la idea es desechada.

En el caso del quitosano se buscó otra alternativa para la utilización del ácido acético necesario para su disolución, por lo cual se sustituyó el ácido acético grado reactivo por vinagre de manzana, esto con la finalidad de utilizar un solvente menos agresivo. El vinagre de manzana se encuentra en cualquier tienda de autoservicio a precios accesibles y hace la misma función que el ácido acético (figura 4.12).



*Fig. 4.12. a) Quitina soluble en N,N Dimetilacetamina con cloruro de litio al 5%, b) Quitosano soluble en ácido acético, c) Quitosano soluble en vinagre de manzana.*

Se varió la cantidad de quitosano de 0.1g hasta 1g para demostrar si la cantidad del mismo contribuía en una mayor resistencia a la corrosión. Las varillas con el recubrimiento se sumergen en solución hidróxido de calcio y cloruro de calcio para simular las mismas condiciones que el concreto.

#### **4.1.2.1.- Pruebas electroquímicas**

1. Se corta una parte de la varilla de acero de 3/8" a la cual se le soldara en un extremo un cable de cobre, este servirá para tomar las lecturas de potenciales, posteriormente será encapsulada con resina (figura 4.13).



Fig. 4.13. Varillas de acero de 3/8" encapsuladas.

2. Teniendo una vez listas las probetas de trabajo, se procede a la fabricación de los recubrimientos, se utilizara quitosano el cual se disolverá en ácido acético grado reactivo, y aparte en vinagre de manzana (figura 4.14).

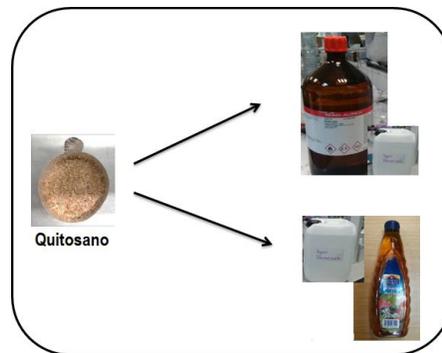


Fig. 4.14. Elaboración de recubrimiento.

3. Las soluciones fabricadas se ponen en agitación mecánica por 72 hrs.
4. Una vez listos los recubrimientos, la zona de la varilla que está expuesta para pruebas electroquímicas es pulida hasta la lija N°600.
5. Una vez lista la superficie de nuestra probeta de trabajo, se sumerge la probeta en el recubrimiento como lo muestra la figura 4.15, se pone a secar durante 15 min y se repite el proceso dos veces más, de tal forma

que se cubra lo mejor posible la superficie de la varilla expuesta con el recubrimiento.



*Fig. 4.15. Probeta de trabajo sumergida en el recubrimiento.*



*Fig. 4.16. Tonalidad que se observa en la superficie de la varilla que está expuesta con recubrimiento.*

Las probetas de trabajo que se utilizaran para pruebas electroquímicas con recubrimiento, se clasificaron como se muestra en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Clasificación de probetas de trabajo

<b>Recubrimiento utilizando vinagre de manzana</b>		<b>Recubrimiento utilizando ácido acético grado reactivo</b>	
<b>Espécimen</b>	<b>Dosificación</b>	<b>Espécimen</b>	<b>Dosificación</b>
1.- Blanco	sin recubrimiento	1.- Blanco	sin recubrimiento
2. Quitosano	0.1g + disolvente	2. Quitosano	0.1g + disolvente
3. Quitosano	0.2g + disolvente	3. Quitosano	0.2g + disolvente
4. Quitosano	0.3g + disolvente	4. Quitosano	0.3g + disolvente
5. Quitosano	0.4g + disolvente	5. Quitosano	0.4g + disolvente
6. Quitosano	0.5g + disolvente	6. Quitosano	0.5g + disolvente
7. Quitosano	0.6g + disolvente	7. Quitosano	0.6g + disolvente
8. Quitosano	0.8g + disolvente	8. Quitosano	0.8g + disolvente
9. Quitosano	1g + disolvente	9. Quitosano	1g + disolvente

## 4.2.- Técnicas Electroquímicas

### 4.2.1. Potenciales de corrosión

Para obtener los potenciales de corrosión se utilizaron los especímenes que contienen las tres varillas, se tomaron mediciones a cada una de las varillas por probeta de trabajo las cuales estaban sumergidas en solución de NaCl al 3%. Se obtuvo el promedio por cada una de las probetas de trabajo. Las mediciones se realizaron en un periodo de 160 días. En la figura 4.17 se muestra el tipo de celda electroquímica utilizada. Se utilizó un electrodo de referencia de Calomel.

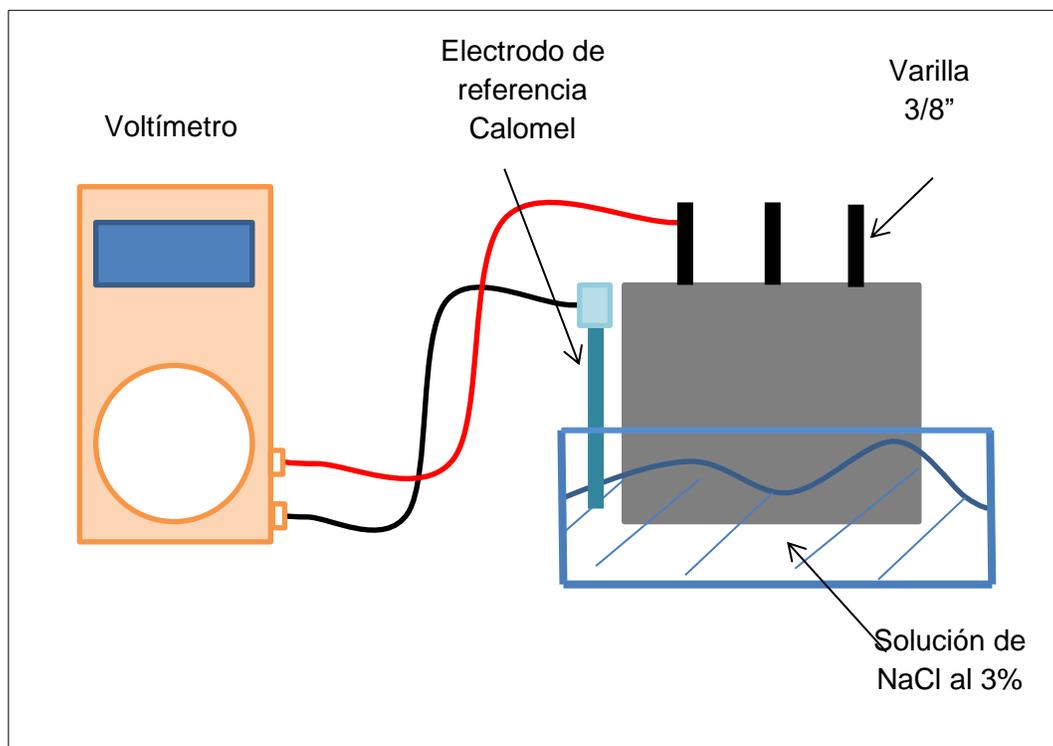


Fig. 4.17. Celda electroquímica utilizada.

Equipo de medición: Voltímetro marca Steren, MUL-010, figura 4.18:



Fig. 4.18. Voltímetro.

#### 4.2.2.- Resistencia a la polarización lineal

Las mediciones de resistencia a la polarización lineal se realizaron utilizando un arreglo de tres electrodos, empleando un electrodo de Calomel como referencia, en el caso de las pruebas electroquímicas con agregados el electrodo de trabajo es la varilla central de la probeta (para esta prueba se utilizó este arreglo pero se puede utilizar cualquiera de las tres varillas como electrodo de trabajo) y barra de grafito como contra electrodo. La resistencia a la polarización lineal (RPL) se midió conforme a la norma ASTM G59, con parámetros de operación de  $\pm 20$  mV con respecto al potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), a una velocidad de barrido de 10mV/min en un periodo de 160 días. En la figura 4.19 se muestra el tipo de celda electroquímica utilizada.

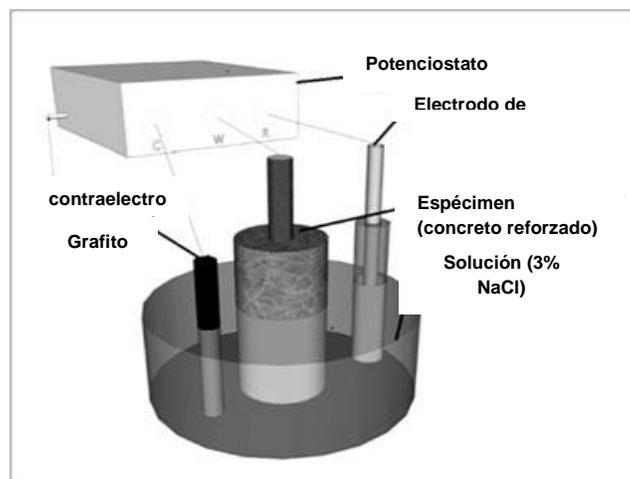


Fig. 4.19. Esquema de celda utilizada para pruebas de resistencia a la polarización.

Equipo de medición: Potenciostato/galvanostato/ZRA, Gamry instruments, interface 1000, software Gamry framework, figura 4.20:



*Fig. 4.20. Potenciostato-galvanostato, resistencia a la polarización lineal.*

Para el cálculo de la corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) se aplicó la fórmula de Stern-Geary; donde B representa la constante dependiente de las pendientes tafel del sistema, en este caso se utilizó  $B=0,026$  V, valor que simula condición activa de corrosión.

#### **4.2.3.- Ruido electroquímico**

Las mediciones de ruido electroquímico se realizaron utilizando un arreglo de tres electrodos idénticos, empleando para esto las tres varillas insertadas en la probeta de trabajo, para el caso de las probetas con agregados. La primer varilla se utilizó como electrodo de referencia, la de en medio como electrodo de trabajo y la tercera varilla como contraelectrodo. La resistencia de ruido se midió conforme a la norma ASTM G 199 en potencial y en corriente, en un periodo de 160 días. En la figura 4.21 se muestra el tipo de celda electroquímica utilizada. Las mediciones de corriente y potencial de ruido se monitorearon simultáneamente con un intervalo de 1 s/dato, obteniendo 1024 puntos.



Fig. 4.21. Celda electroquímica con tres electrodos idénticos.

Los especímenes se colocaron en una habitación a una temperatura de  $25^{\circ} \pm 2.0^{\circ}$  C, por un periodo que va desde la curación del espécimen día 1 hasta 160 días.

Equipo de medición: Potenciostato marca ACM instruments auto ZRA, software V2-AZRA, figura 4.22.



Fig. 4.22. Potenciostato ruido electroquímico.

#### 4.2.4.- Curvas de polarización

Para las mediciones de curvas de polarización se utilizó un arreglo de tres electrodos, empleando un electrodo de Calomel como referencia, electrodo de trabajo probeta y barra de grafito como contra electrodo. Se utilizaron parámetros de operación del último potencial libre (figura 5.1 y 5.2) a 200 mV por encima y por

debajo con respecto al potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) a una velocidad de barrido de 10mV/min.

El esquema de celda y equipo utilizado para pruebas de curvas de polarización es el mismo que se utilizó en la prueba de resistencia a la polarización lineal, figuras 4.19 y 4.20.

#### 4.2.5.- Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

La técnica de Espectroscopía de impedancia electroquímica se utilizó para estudiar la corrosión en las varillas que contienen el recubrimiento y están sumergidas en solución de hidróxido de calcio y cloruro de calcio figura 4.23. Se utilizó un potenciostato marca ACM Instruments GillAC.



Fig. 4.23. Arreglo de tres electrodos utilizando potenciostato.

#### 4.2.6.- Difracción de rayos X

La difracción de rayos x fue utilizada para obtener los productos de corrosión en las varillas embebidas en el concreto, en solución de NaCl al 3% por 160 días, rango de escaneo  $2^\circ$  min  $2\theta$  (grados) rango de  $10^\circ$  a  $90^\circ$ . Se utilizó equipo Bruker D2 PHASER figura 4.24.

#### 4.2.7.- Espectroscopía de infrarrojo mediante la transformada de Fourier (FTIR)

Mediante esta técnica se determinó el cambio en estructura de los compuestos utilizados: quitina, exoesqueleto de camarón y quitina grado reactivo, en un rango de frecuencia  $500 - 4000\text{cm}^{-1}$ , con una resolución  $4\text{cm}^{-1}$ , mediante un espectrofotómetro de marca Bruker modelo vector 22 equipado con software OPUS 5.5, figura 4.25.

### 4.3.- Pruebas Mecánicas

#### 4.3.1.- Resistencia a la compresión

Las mediciones de resistencia a la compresión se realizaron a las siete probetas de trabajo en forma de cubo de  $5\text{ cm.} \times 5\text{ cm.} \times 5\text{ cm.}$  Las probetas se colocaron en una prensa hidráulica la cual ejerció una presión sobre ellas, al momento de presentarse la falla el equipo se detuvo y arrojó un valor el cual será multiplicado por el área del cubo, de esta forma se obtuvo una  $f'c$  la cual será comparada con  $f'c$  de diseño [ASTM C109].

Equipo de medición: modelo 300DX, marca SATEC, solo compresión, figura 4.26.



*Fig. 4.26. Prensa hidráulica, resistencia a la compresión.*

### 4.3.2.- Microscopio electrónico de barrido

Se utilizan los mismos protocolos de preparación, dependiendo de si se requiere MEB solo o en combinación con análisis de rayos X, los principales criterios para la preparación de muestras MEB son que la muestra sea conductora, que se encuentre limpia, y lo suficientemente pequeña como para entrar en la cámara de muestras, en este caso el polímero cumple con los requisitos. Las muestras se recubrieron con una capa delgada de oro para darle propiedades conductoras. Posteriormente es barrida con los electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector midió la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones, proyectados en una imagen digital.

Se estudiaron las muestras de varillas de acero con recubrimientos fabricados con vinagre de manzana y quitosano, y de ácido acético grado reactivo con quitosano, también se analizó la probeta de trabajo sin recubrimiento blanco.

El propósito de estudiar las varillas con los recubrimientos en el MEB es la de observar y caracterizar la superficie del producto.

Equipo de medición: LEO 1450 VP, figura 4.27.



Fig. 4.12. Imagen MEB.

## Capítulo V. RESULTADOS

### 5.1.- Técnicas Electroquímicas

#### 5.1.1.- Potenciales de corrosión

La variación de potencia de corrosión en el tiempo, para probetas de trabajo que contienen el material como agregado, en una solución de NaCl al 3% se puede apreciar en la figura 5.1 en un periodo de 160 días.

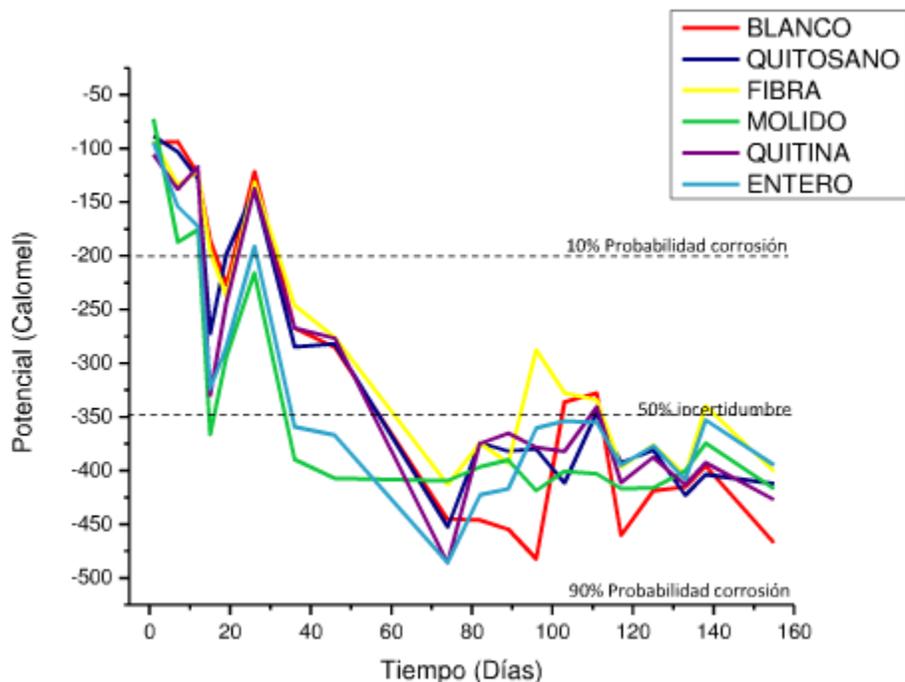


Fig. 5.1. Variación potencial de corrosión en el tiempo de probetas con agregados en solución de NaCl al 3%.

Se observa que los potenciales de corrosión negativos, con 90% de probabilidades de corrosión como lo marca la norma ASTM C876, se aplica para todas las probetas de trabajo. La tendencia de todas las probetas de trabajo incluyendo el blanco (línea color rojo) se ubican en la zona con probabilidades altas de corrosión, al estar sumergidas por 160 días en solución NaCl al 3%.

En la gráfica 5.2 se observan los resultados de variación de  $E_{corr}$  en el tiempo de las probetas con recubrimiento sobre las varillas embebidas en el concreto 0.5g de quitosano con disolvente de vinagre de manzana (VM) y 0.5g de quitosano con ácido acético (AA), al estar sumergidas en una solución de NaCl al 3% por 200

días. Se puede observar que ambas probetas con VM (línea azul) y AA (línea verde) presentan 10% de probabilidades de corrosión, teniendo un comportamiento constante del día 100 al día 200, en cambio el blanco en el día 100 tuvo una caída drástica de los potenciales ubicándose hasta el día 200 en la zona con 90% de probabilidad de corrosión.

Comparando ambas probetas 0.5g de quitosano con disolvente de vinagre de manzana (VM) y 0.5g quitosano con ácido acético (AA), se puede observar que los potenciales son casi iguales lo que nos indica que al utilizar el vinagre de manzana se puede obtener los mismo resultados que al ácido acético, con la diferencia que el primero es amigable con el medio ambiente.

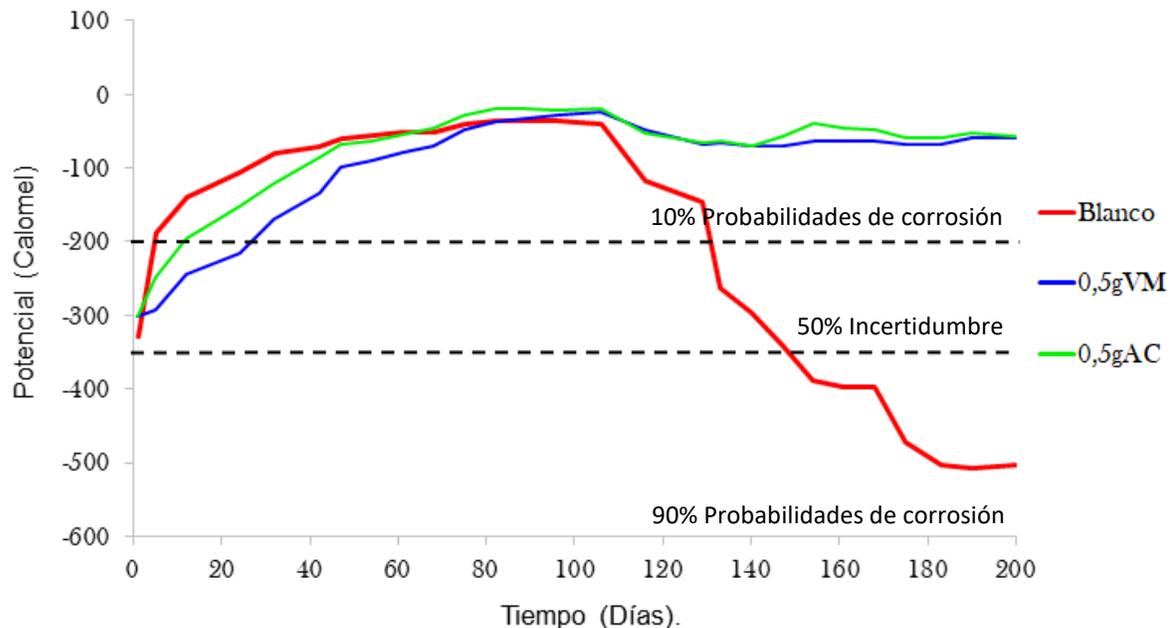


Fig. 5.2. Variación potencial de corrosión en el tiempo de probetas con recubrimiento en solución de NaCl al 3%.

### 5.1.2.- Resistencia a la Polarización Lineal

En la figura 5.3 se muestran las variaciones de la RPL en el tiempo obtenidos de las probetas de trabajo con los diferentes materiales como agregados en el concreto. En la figura 5.3 se puede observar que la densidad de corriente de corrosión para todas las muestras en la solución de NaCl al 3%, es la mismas presentando poca resistencia y con valores constantes desde el día 1 hasta el día 160 de estar sumergidas. El comportamiento de las probetas de trabajo con diferentes presentaciones de exoesqueleto de camarón se comportan casi de la misma forma que la probeta blanco.

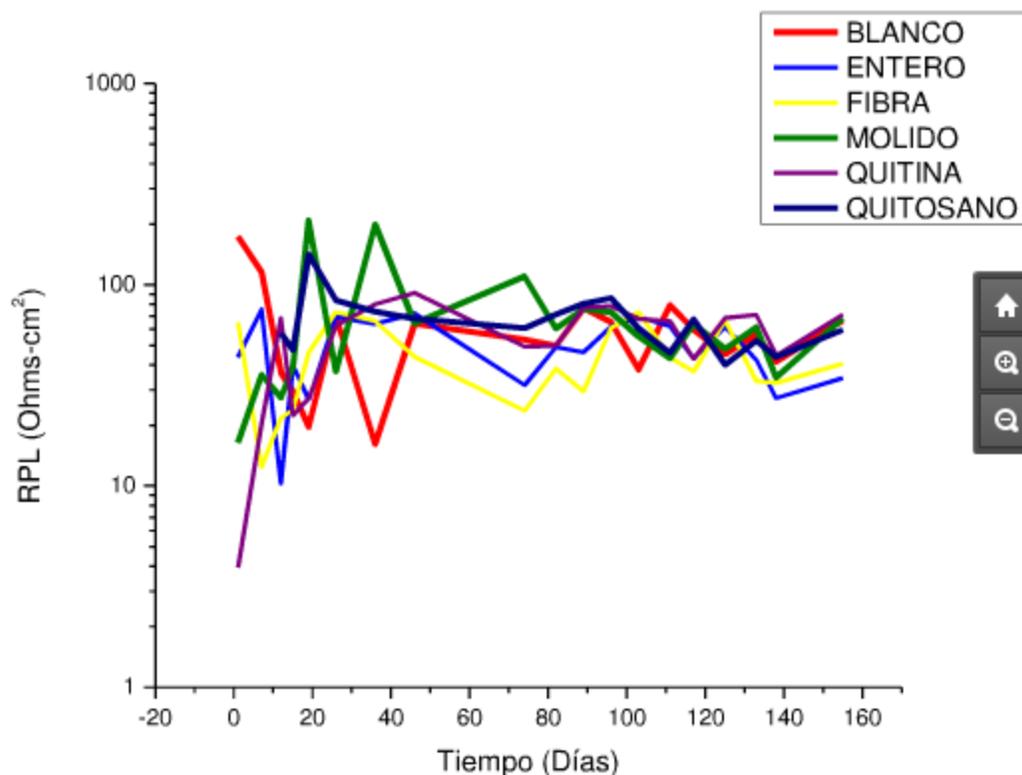


Fig. 5.3. Variación de la resistencia a la polarización lineal en el tiempo con agregados, en solución de NaCl al 3%.

En la figura 5.4 se obtuvo los resultados para las probetas con recubrimiento sobre las varillas embebidas en el concreto 0.5g de quitosano con disolvente de vinagre de manzana (VM) y 0.5g de quitosano con ácido acético (AA), al estar sumergidas en una solución de NaCl al 3% por 200 días. En estas se observan los

valores de resistencia que muestran las probetas de 0.5g de quitosano con VM (línea azul) y AA (línea verde). En el día 160 las probetas sufren una ruptura de la capa pasiva para posteriormente regresar a valores constantes. Las probeta que muestran una menor resistencia es la probeta blanco (línea roja) la cual no se le aplico ningún recubrimiento.

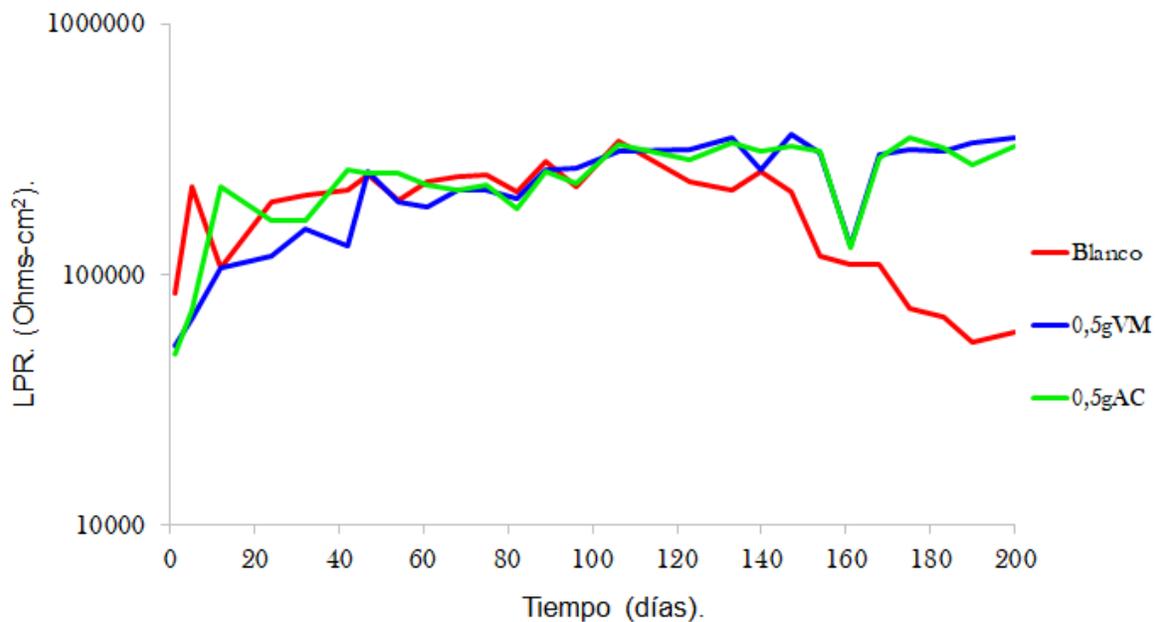


Fig. 5.4. Variación de la resistencia a la polarización lineal en el tiempo con recubrimiento, en solución de NaCl al 3%.

### 5.1.3.- Ruido Electroquímico

Se realizaron pruebas de ruido electroquímico en potencial y en corriente los cuales se basaron en la norma ASTM G199. Para esta prueba se utilizó un arreglo de electrodos de trabajo idénticos. Las mediciones de corriente y potencial de ruido se monitorearon simultáneamente con un intervalo de 1 seg, obteniendo 1024 puntos.

En la figura 5.5 se presentan los resultados de la técnica de resistencia de ruido para las diferentes muestras con agregados en solución de NaCl al 3%. Se observa que las probetas sufren de corrosión localizada y mixta [Uller *et. al.*1998],

debido al ataque de los iones  $\text{Cl}^-$ . Este ataque continúa hacia el interior de la muestra por la red de poros del concreto. Las probetas muestran comportamiento muy similar desde el día 1 hasta el día 160 de estar sumergidas, del día 40 al día 80 se presenta una ruptura de la capa pasiva y de ahí valores bajos de resistencia. Las probetas de trabajo con agregados presentan casi el mismo comportamiento que la probeta de diseño (línea roja). Los datos más altos, alrededor del  $1 \times 10^8 \Omega\text{-cm}^2$ , se presentaron entre el día 75.

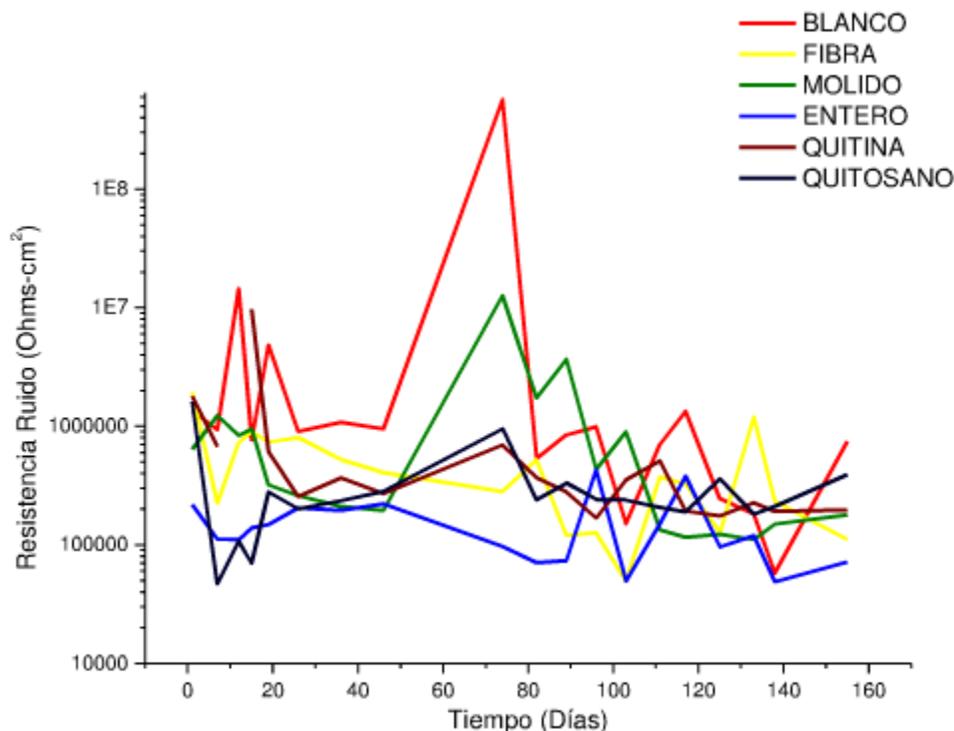


Fig. 5.5. Variación de la resistencia de ruido en el tiempo de probetas con agregados, en solución de NaCl al 3%.

En la figura 5.6 se obtuvieron los resultados de la resistencia de ruido para probetas con recubrimiento sobre las varillas embebidas en el concreto 0.5g de quitosano con disolvente de vinagre de manzana (VM) y 0.5g de quitosano con ácido acético (AC), al estar sumergidas en una solución de NaCl al 3% por 200 días. Se observa un comportamiento similar en las probetas que contienen el recubrimiento muestran valores más altos en la mayor parte del tiempo que estuvieron sumergidas en la solución de NaCl al 3% con  $1 \times 10^5$  a  $1 \times 10^6 \Omega\text{-cm}^2$ . El

día 195 las probetas sufren rompimiento de la capa pasiva y aunque se vuelven a repasar los valores constantes son bajos alrededor de  $1 \times 10^5 \Omega\text{-cm}^2$ . La probeta blanco (línea roja) muestra los valores más bajos al final de la prueba.

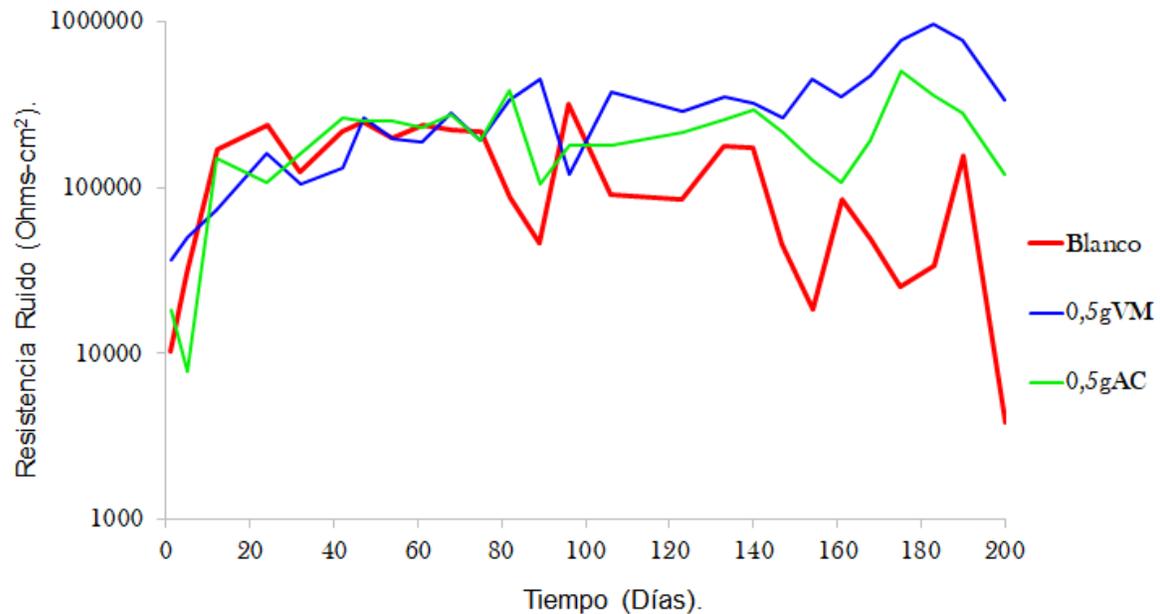


Fig. 5.6. Variación de la resistencia de ruido en el tiempo de probetas con recubrimiento, en solución de NaCl al 3%.

En las figuras 5.5 y 5.6 se observa la corrosión global de las probetas en las cuales ambas muestran corrosión localizada y mixta [Uller *et. al.*1998], a consecuencia del ataque de los iones  $\text{Cl}^-$ . Cabe destacar que la aplicación del recubrimiento si tuvo una repercusión ya que las probetas con recubrimiento presentan valores más altos con respecto de la que no, retardando el proceso de corrosión.

#### 5.1.4.- Curvas de Polarización

Las pruebas de curvas de polarización se realizaron a probetas con recubrimiento con diferentes cantidades de quitosano con el vinagre de manzana como disolvente, sumergidas en solución de hidróxido de calcio con cloruro de calcio

para simular el comportamiento que tiene la varilla al estar ahogada en el concreto.

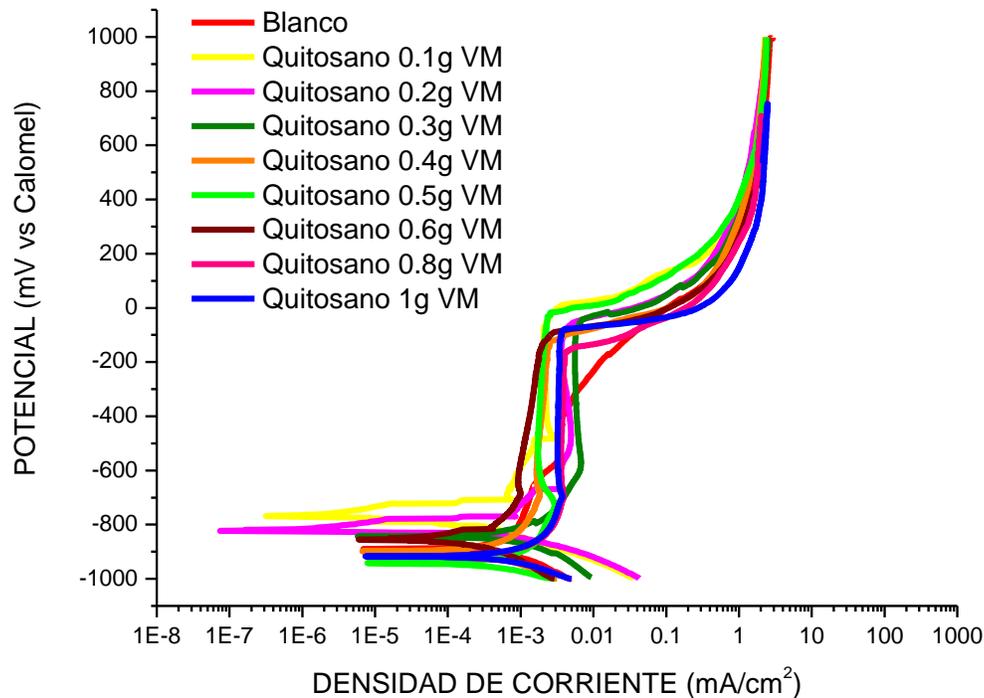


Fig. 5.7. Gráfica curva de polarización de probetas con recubrimiento a diferentes cantidades de quitosano con vinagre de manzana, en solución hidróxido de calcio y cloruro de calcio.

La figura 5.7 muestra los resultados de las pruebas de curvas de polarización para probetas con recubrimiento con diferentes cantidades de quitosano con el vinagre de manzana como disolvente, y la variación de la velocidad de corrosión. Todas las probetas que tienen el recubrimiento forman una capa en la superficie del metal que lo pasiva. Las probetas con recubrimiento presentan un excelente comportamiento al tener valores de potencial de -860 mV a 9.27 mV y una densidad de corriente de 1E-3 mA/cm<sup>2</sup>. La probeta que muestra mayor velocidad de corrosión es la probeta blanco, la cual en un inicio al igual que las otras probetas tiende a pasivarse pero después se rompe esta capa pasiva y queda activa hasta el término de la prueba.

En el caso de esta gráfica, solo se utilizó el vinagre de manzana como disolvente ya que en pruebas anteriores (figura 5.2, 5.4 y 5.6) mostraban el mismo

comportamiento que las probetas que contenían quitosano y ácido acético, por lo que se decidió seguir el trabajo de investigación con el vinagre de manzana. Aunque la mayoría de las probetas con recubrimiento muestran valores muy semejantes, la que mejor comportamiento tuvo es la probeta con recubrimiento compuesto por 0.5g de quitosano y vinagre de manzana (línea color verde) con valores de potencial de -890 mV a -12.98 mV y una densidad de corriente de  $1.8E-3 \text{ mA/cm}^2$ .

La probeta de 0.5g VM (línea color verde) al mostrar mayor polarización, mejor velocidad de corrosión y mayor resistencia a la solución, queda seleccionada como la probeta con mejor desempeño y con la cual se trabajó para mejorar sus propiedades.

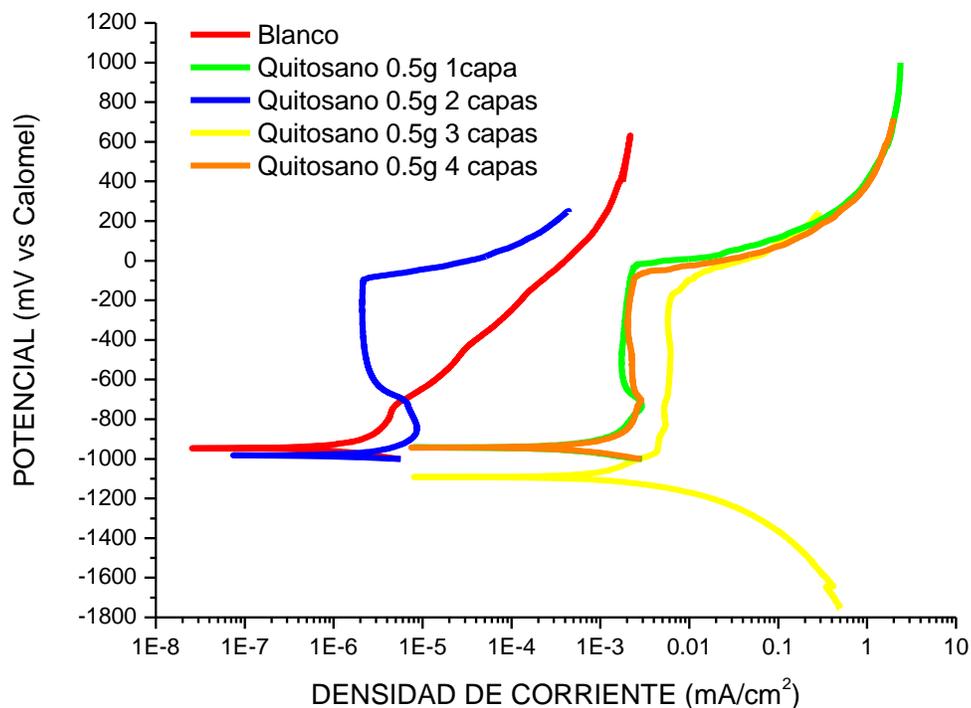


Fig. 5.8. Gráfica curva de polarización de probetas a diferentes capas de recubrimiento de quitosano y vinagre de manzana, en solución hidróxido de calcio y cloruro de calcio.

Como se observa en la figura 5.8, la cantidad de capas aplicadas a la superficie de la varilla contribuye a un buen o mal funcionamiento del recubrimiento. Las probetas a las cuales se les aplicaron 1, 3 y 4 capas de recubrimiento son las que

muestran mayor velocidad de corrosión, con valores menores de densidad de corriente. En cambio la probeta con 2 capas de recubrimiento muestra (línea color azul) valores de potencial de -977.90 mV a -84.99 mV y una densidad de corriente de  $1.7E-6 \text{ mA/cm}^2$ .

Otro factor que se tomó en cuenta para el desempeño del recubrimiento, por el hecho de ser orgánico, era de que éste no perdiera sus propiedades protectoras contra la corrosión con el paso del tiempo. Por lo cual se tomaron las muestras del primer recubrimiento con el que se trabajó compuesto de 0.1g de quitosano y vinagre de manzana, dando como resultado la figura 5.9.

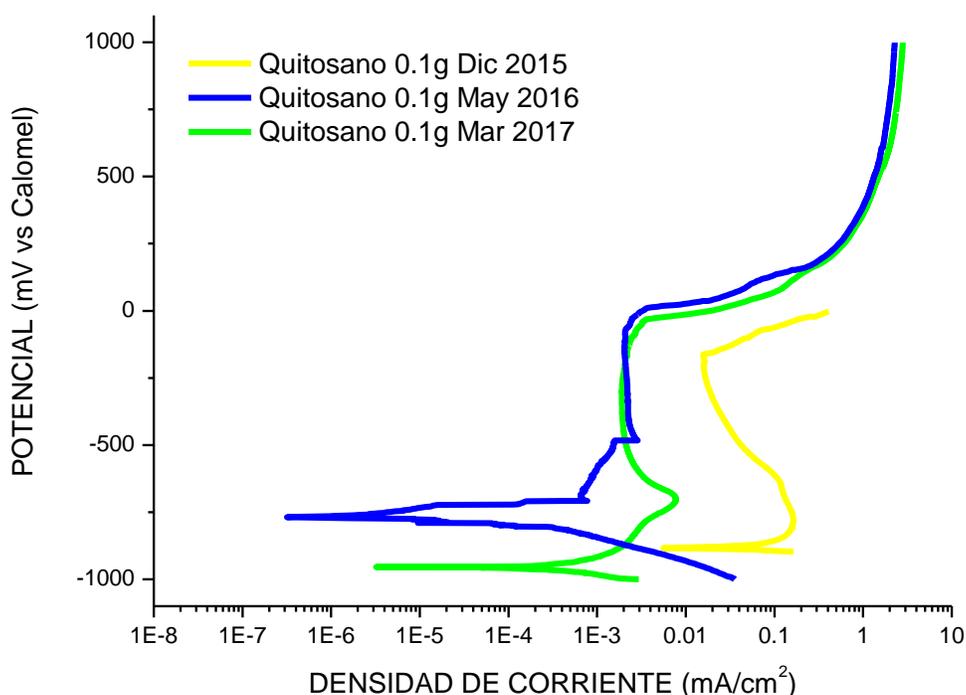


Fig. 5.9. Grafica curva de polarización de probetas con recubrimiento a 0.1g de quitosano y vinagre de manzanas fabricados en diferente tiempo, en solución hidróxido de calcio y cloruro de calcio.

La figura 5.9 muestra los resultados de las pruebas de curvas de polarización para probetas con recubrimientos fabricados en diferentes tiempos. La probeta con recubrimiento fabricado en Diciembre del 2015 (línea color amarillo) presenta mayor velocidad de corrosión, en cambio los recubrimientos fabricados en Mayo del 2016 (línea color azul) y Marzo del 2017 (línea color verde), presentan menor

velocidad de corrosión, mayor resistencia a la solución con valores de potencial entre -800 mV a 20 mV y una densidad de corriente de  $1\text{E-}3 \text{ mA/cm}^2$ .

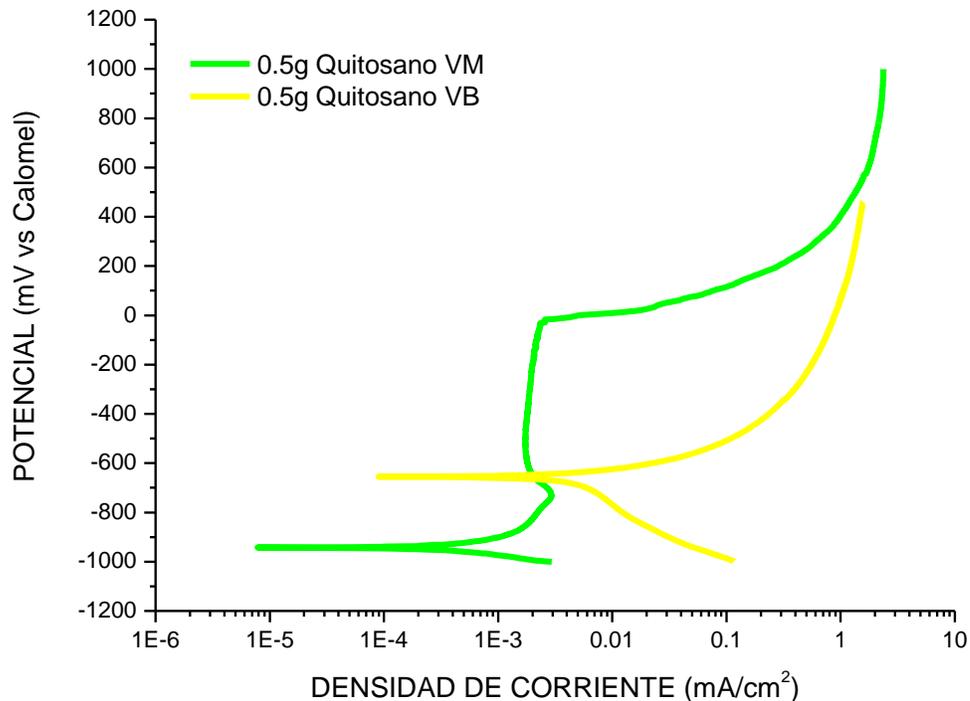


Fig. 5.10. Grafica curva de polarización de probetas con recubrimiento a base de quitosano con vinagre de manzana y quitosano con vinagre blanco, en solución hidróxido de calcio y cloruro de calcio.

Para corroborar que el vinagre de manzana representa un factor importante en el desempeño del recubrimiento, se realizaron pruebas de curvas de polarización a recubrimientos compuestos por quitosano y vinagre de manzana (VM), y quitosano con vinagre blanco (VB). En la figura 5.10 se observa que el recubrimiento que contiene 0.5g VM (línea color verde) muestra mejor resultado con un potencial de -941.58 mV a -22.74 mV y una densidad de corriente de  $1\text{E-}3 \text{ mA/cm}^2$ . En cambio la probeta con el recubrimiento 0.5g VB, muestra menor resistencia a la solución y mayor velocidad de corrosión.

### 5.1.5.- Índices de Localización

Para corroborar que tipo de corrosión se presentó en las varillas de acero, fue necesario obtener el índice de localización (LI).

Los resultados para todas las probetas con agregados y el blanco en la figura 5.11, en la cual se observa principalmente corrosión localizada y mixta [Chávez 2007], con valores entre 1 y 0.01. Estos valores son correspondientes para aceros que han estado expuestos a medios salinos. Las probetas al estar sumergidas en solución de NaCl al 3% por un periodo de 160 días mostraron en este tiempo cinco picos aproximadamente en los días 10, 40, 80, 110 y 140.

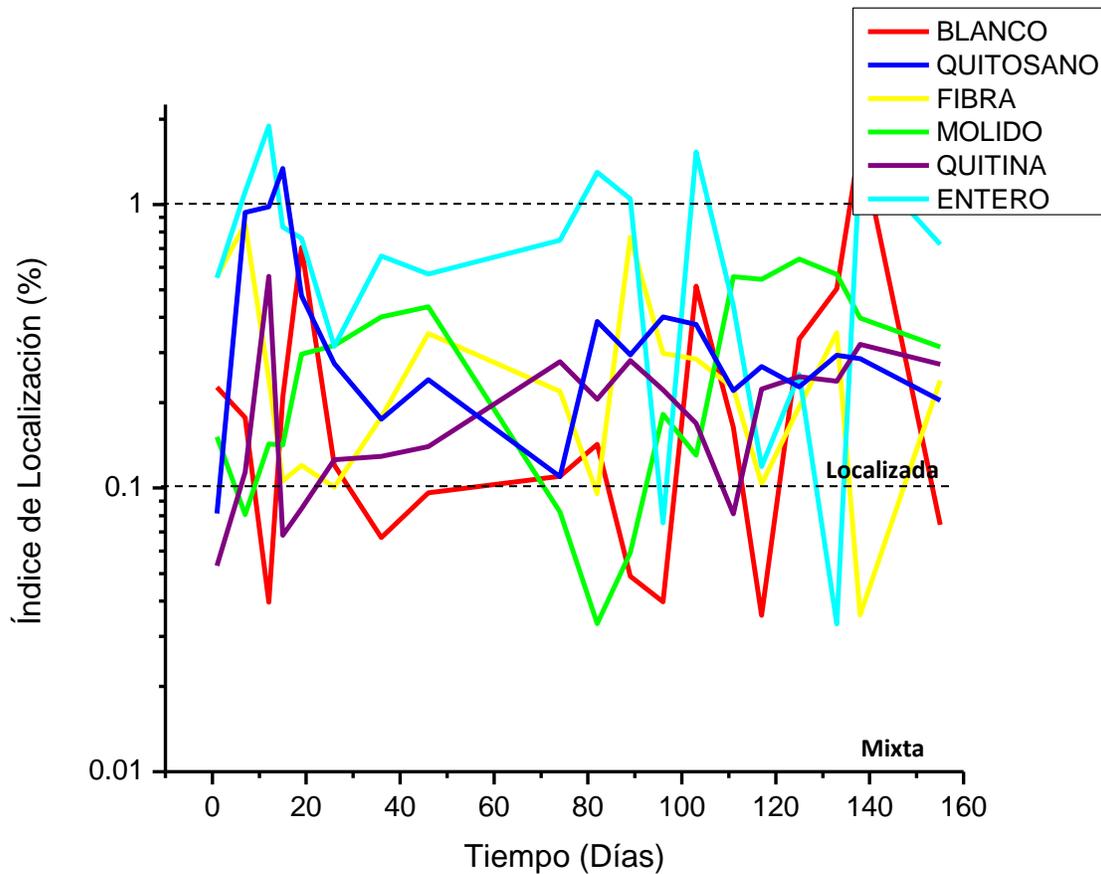


Fig. 5.11. Variación del índice de localización en el tiempo de probetas con agregados, en solución de NaCl al 3%.

En la figura 5.12 se obtuvieron los resultados de la resistencia de ruido para probetas con recubrimiento sobre las varillas embebidas en el concreto 0.5g de quitosano con disolvente de vinagre de manzana (VM) y 0.5g de quitosano con ácido acético (AA), al estar sumergidas en una solución de NaCl al 3% por 200 días.

Las probetas con recubrimiento 0.5g VM y 0.5g AC, se localizan principalmente en la zona mixta y tienen un comportamiento más contante en los 200 días de estar sumergidas en solución de NaCl al 3%, teniendo mayor resistencia a la solución. La probeta blanco por su parte se ubica en las zonas localizada y mixta.

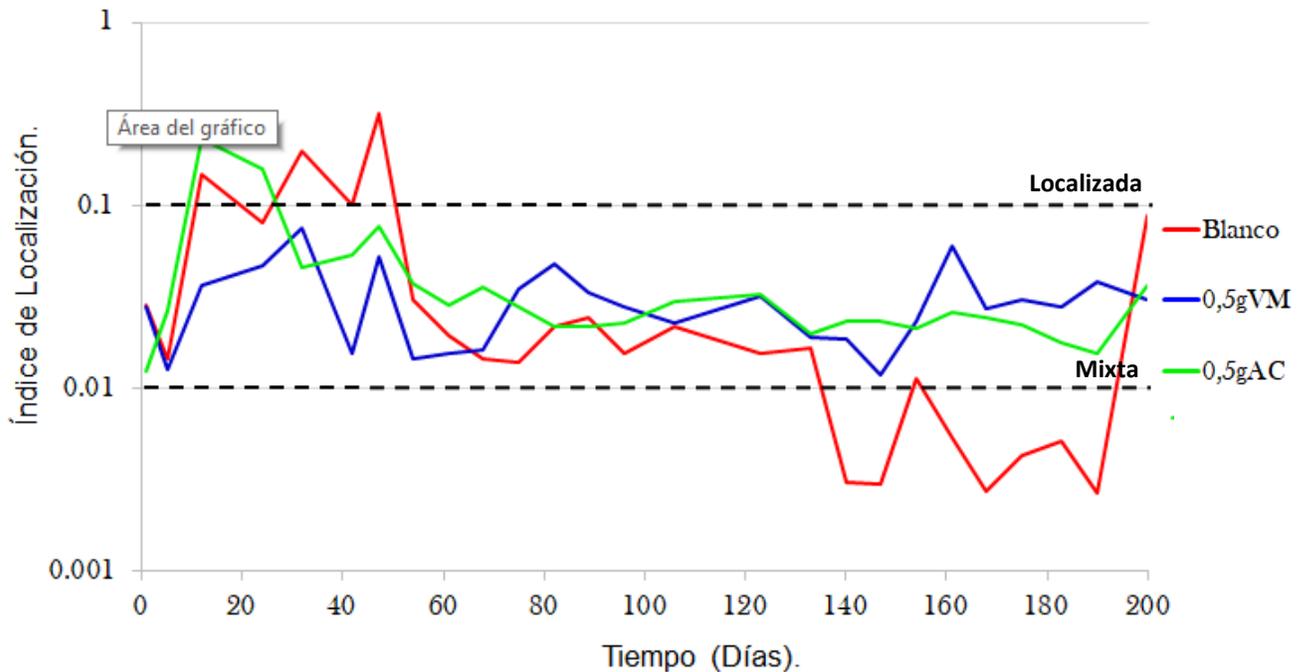


Fig. 5.12. Variación del índice de localización en el tiempo de probetas con recubrimiento, en solución de NaCl al 3%.

### 5.1.6.- Velocidad de corrosión

De los datos de RPL se determinó la velocidad de corrosión en términos de la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) usando la ecuación de Stern y Geary [Uller *et. al.*1998].

Los resultados mostrados en la figura 5.13, muestran alto nivel de corrosión en la probeta blanco, localizándose en la zona de corrosión moderada a alta [Izquierdo *et. al.* 2013]. Las probetas que tienen recubrimiento se localizan en la zona de corrosión baja, lo que nos indica que el recubrimiento con ambos disolventes es efectivo.

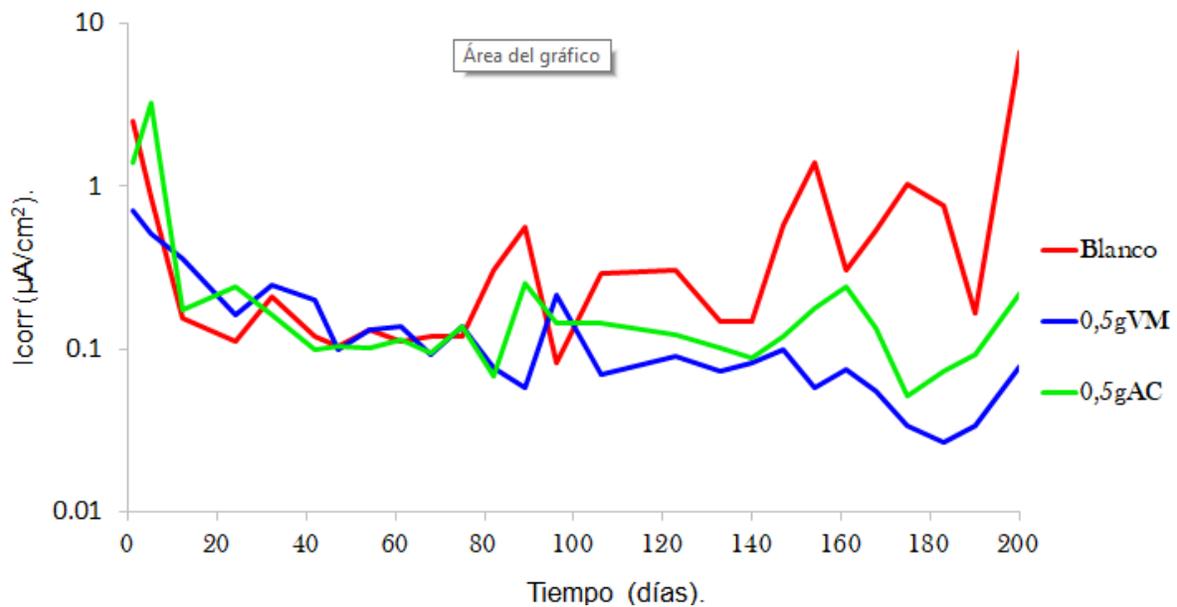


Fig. 5.13. Gráfica velocidad de corrosión de probetas con recubrimiento, en solución de NaCl al 3%.

### 5.1.7.- Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

En la figura 5.14, se puede observar que las probetas de trabajo que contienen el recubrimiento con diferentes cantidades de quitosano con vinagre de manzana, en solución de hidróxido de calcio y cloruro de calcio, al igual que en graficas anteriores, presentan resultados muy semejantes lo que nos habla del funcionamiento del recubrimiento aunque la cantidad en gramos de quitosano varíe.

En el caso de la probeta blanco, aunque inicialmente muestra comportamiento semejante al de las probetas con recubrimiento, presenta menor resistencia de impedancia.

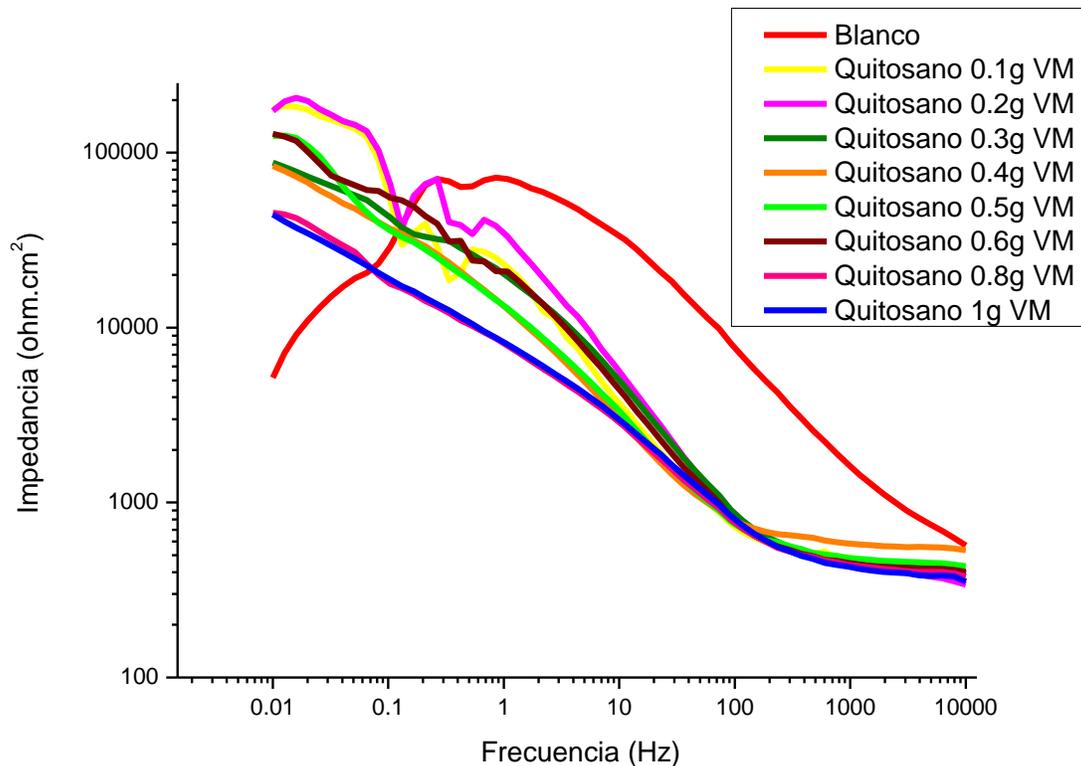


Fig. 5.14. Gráfica Bode-Impedancia de probetas con recubrimiento, en solución de hidróxido de calcio y cloruro de calcio.

El resultado de las probetas con recubrimiento sobre las varillas embebidas en el concreto 0.5g de quitosano con disolvente de vinagre de manzana (VM) y 0.5g de quitosano con ácido acético (AA), al estar sumergidas en una solución de NaCl al 3% por 200 días, muestran mayor resistencia de impedancia con respecto a la probeta blanco figura 5.15. De esta forma se puede confirmar los resultados que se han presentado en pruebas electroquímicas anteriores (5.6, 5.12 y 5.13), en donde el tipo de solvente VM y AA se comportan forma muy semejante protegiendo a la varilla de los ataques de los iones cloruro, en cambio el blanco en ambas pruebas, presenta valores menores de resistencia a la solución de mayor velocidad de corrosión.

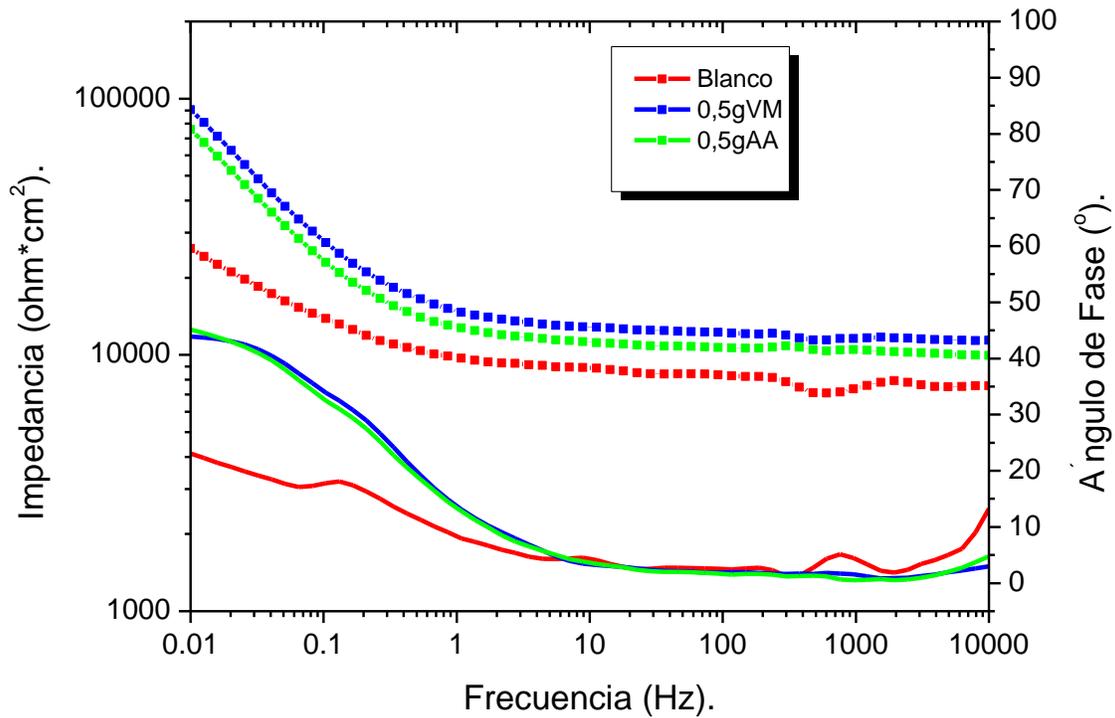


Fig. 5.15. Gráfica Bode-Impedancia; Angulo-fase de probetas con recubrimiento, en solución de NaCl al 3%.

### 5.1.8.- Difracción de rayos X

Los resultados obtenidos por difracción de rayos x, muestran los productos de corrosión en las varillas de las probetas que contenían agregados. En estos resultados podemos observar que las probetas con exoesqueleto de camarón entero y el quitosano presentan productos de corrosión que son protectores para la varilla figura 5.16.

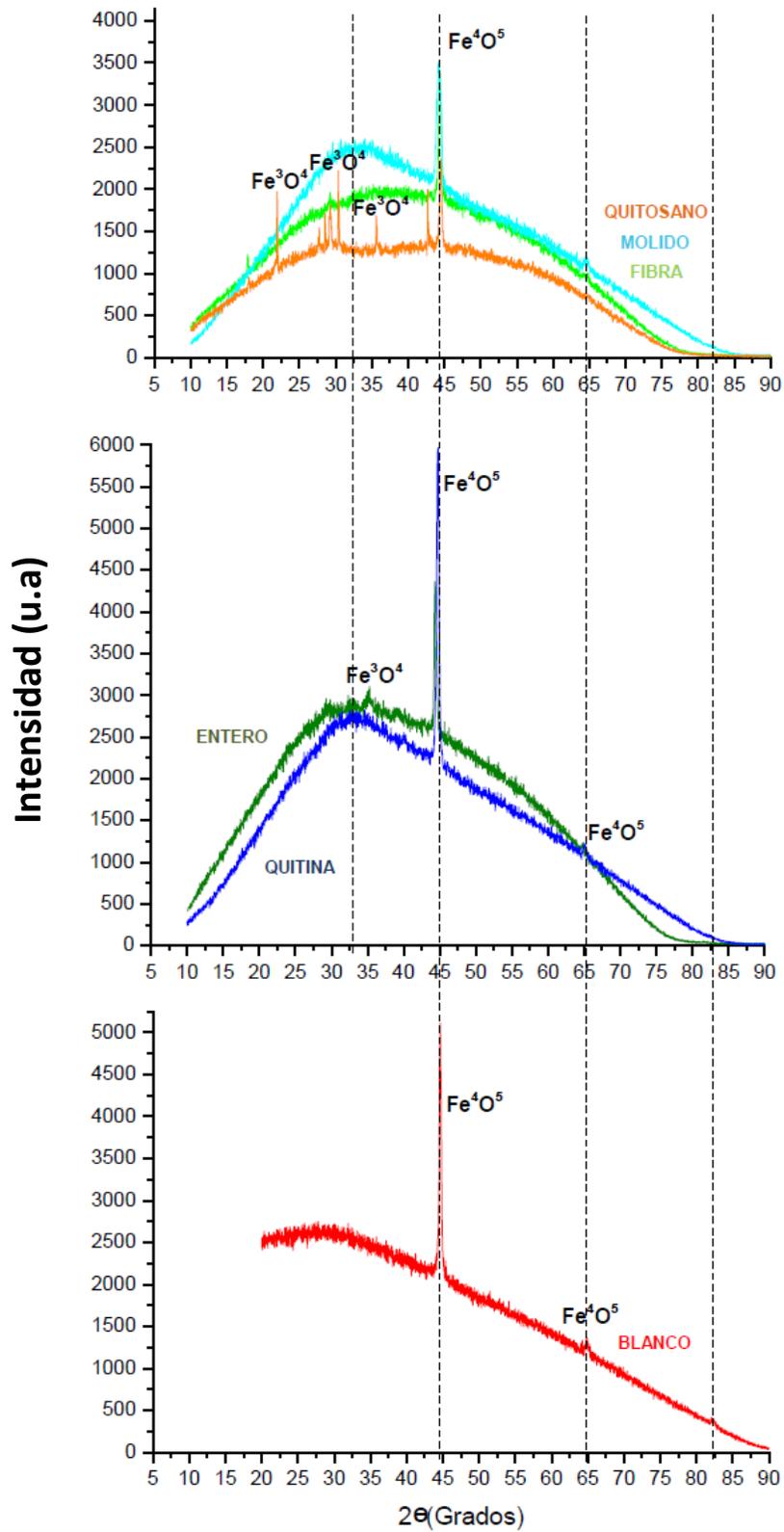


Fig. 5.16. Caracterización DRX de probetas con recubrimiento, sumergidas en solución de NaCl al 3%.

**Tabla 5.1.** Caracterización DXR

	<b>Grados</b>	<b>Sistema Cristalino</b>	<b>Producto</b>	
<b>Blanco</b>	64.87°	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
	44.62°	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
	<b>Grados</b>	<b>Sistema Cristalino</b>	<b>Producto</b>	
<b>Entero</b>	44.62	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
	35.42	Cúbico	Fe <sup>3</sup> O <sup>4</sup>	Magnetita
<b>Quitina</b>	65.22	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
	44.62°	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
	<b>Grados</b>	<b>Sistema Cristalino</b>	<b>Producto</b>	
<b>Fibra</b>	44.62	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
<b>Molido</b>	44.62°	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
<b>Quitosano</b>	44.62	Ortorrómbico	Fe <sup>4</sup> O <sup>5</sup>	Hematita
	35.42	Cúbico	Fe <sup>3</sup> O <sup>4</sup>	Magnetita
	30.46	Cúbico	Fe <sup>3</sup> O <sup>5</sup>	Magnetita
	22.18	Cúbico	Fe <sup>3</sup> O <sup>6</sup>	Magnetita

### 5.1.9.- Espectroscopía de infrarrojo mediante la transformada de Fourier (FTIR)

Otro tema importante a revisar era si el exoesqueleto de camarón sufre alguna modificación en sus propiedades al pasar por diversos procesos de pureza. En la siguiente grafica (figura 5.17) se muestra el estudio de los espectros de absorción presentes en las muestras de quitina (adquirida en UAM), exoesqueleto de camarón y quitina grado reactivo (marca sigma).

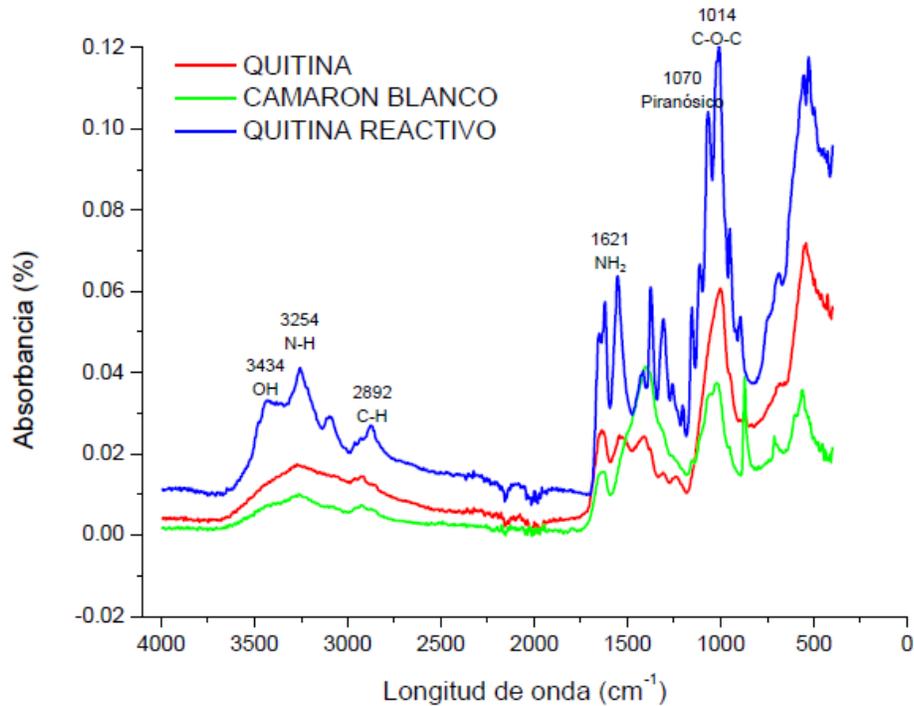


Fig. 5.17. Caracterización FTIR.

## 5.2- Pruebas Mecánicas

### 5.2.1.- Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión, tal como lo especifica la norma ASTM C 150, es la obtenida a partir de pruebas en cubos de mortero estándar de 5 cm, ensayados de acuerdo a la norma ASTM 109. En la figura 5.18 se tienen los resultados de la pruebas de resistencia a la compresión para especímenes con agregados:

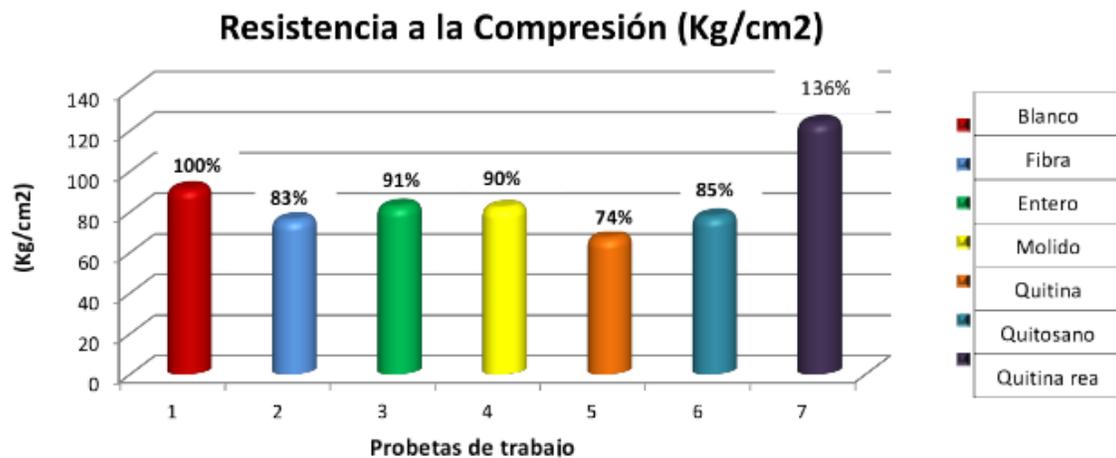


Fig. 5.18. Gráfica pruebas de resistencia a la compresión en probetas con agregados.

En la gráfica de resistencia a la compresión observamos diferentes presentaciones del exoesqueleto de camarón, esto con el objeto de verificar si la forma repercute en el resultado. En este caso la probeta con mayor resistencia a la compresión es el agregado quitina grado reactivo, con un mayor retenido en la malla n° 100. En este caso la forma si contribuyo al resultado de las probetas, de tal forma que, se obsto por moler el quitosano al mismo tamaño que el agregado de quitina reactivo para ver si se obtenía un resultado similar.

En la figura 5.19 se tienen los resultados de la pruebas de resistencia a la compresión, al igualar la forma del quitosano teniendo como mayor retenido en la malla n°100, dicha probeta tuvo casi el mismo resultado que probeta con quitina grado reactivo.

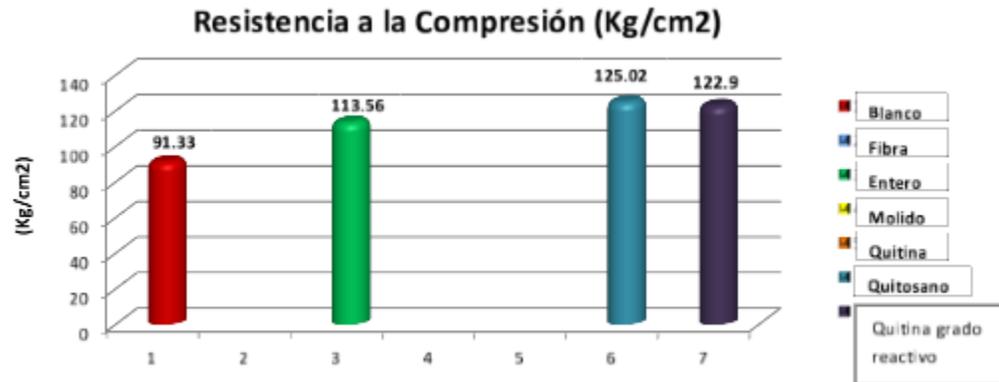


Fig. 5.19. Gráfica pruebas de resistencia a la compresión en probetas con agregados.

### 5.2.2.- Imágenes de MEB

En las micrografías y caracterización química elemental que se obtiene mediante el MEB se observa el espesor del recubrimiento compuesto por 05.g VM. Con un espesor de la película de entre 2.06  $\mu\text{m}$  a 2.89  $\mu\text{m}$ .



Fig. 5.20. Micrografía espesor de película de recubrimiento.

## CONCLUSIONES GENERALES

Basado en los resultados que se obtuvieron en las pruebas electroquímicas para las probetas que contenían los diferentes tipos de agregado, podemos decir que electroquímicamente no se obtuvo los resultados deseados ya que las probetas mostraron un comportamiento casi igual a la probeta blanco que no tenía recubrimiento.

Caso muy diferente se observó en las probetas fabricadas con agregados para pruebas mecánicas, las cuales la forma demostró ser un factor importante para obtener mejores propiedades mecánicas para el concreto. El quitosano obtuvo  $f'c = 125.02 \text{ kg/cm}^2$  al ser molido y tener un mayor retenido en la malla n° 100.

Otro caso en particular son los recubrimientos a base de diferentes cantidades de quitosano y los disolventes, ya que las pruebas electroquímicas demostraron que no hay mucha diferencia entre usar como disolvente el ácido acético o el vinagre de manzana, por otra parte la cantidad de quitosano utilizado tampoco fue un factor muy importante para el desempeño del recubrimiento al estar sumergido en una solución de hidróxido de calcio y cloruro de calcio, aun así se utilizó la cantidad de 05.g de quitosano ya que fue la que mejores resultado obtuvo, con valores de potencial de -890 mV a -12.98 mV y una densidad de corriente de  $1.8E-3 \text{ mA/cm}^2$ .

El factor tiempo en la fabricación de los recubrimientos fue exitoso ya que entre más antigua fuera la fecha de fabricación del recubrimiento mejores resultados se obtuvieron en las pruebas electroquímicas de curvas de polarización. La cantidad de capas de recubrimiento sobre la superficie de la varilla, arrojó como mejor resultado la cantidad de dos capas obteniendo en la prueba de curvas polarización valores de potencial de -977.90 mV a -84.99 mV y una densidad de corriente de  $1.7E-6 \text{ mA/cm}^2$ .

## RECOMENDACIONES

### Calidad de los materiales

Al momento de la fabricación de las probetas los materiales finos (arena) y gruesos (grava) no deben contar con humedad. La granulometría del agregado fino dentro de los límites de la norma ASTM C 33, generalmente es satisfactoria para la mayoría de los concretos. Los materiales de construcción se emplean en grandes cantidades, por lo que deben provenir de materias primas abundantes y de bajo costo. Por ello, la mayoría de los materiales de construcción se elaboran a partir de la gran disponibilidad como arena, arcilla o piedra. Al momento de comprar la varilla se debe observar que no exista oxidación importante, grasa o escamas en la superficie, que no existan quiebres, deformaciones o imperfecciones que puedan afectar la resistencia o adherencia al concreto. De igual forma el cemento a utilizarse debe dar garantía de la calidad del producto.

Existen una gran cantidad de métodos empíricos de diseño de mezclas para obtener concretos con características específicas, sin embargo todos estos métodos deben ser tomados solamente como referenciales pues siempre requieren de pruebas de laboratorio para su afinamiento, se puede tomar como base el proceso propuesto por el ACI en la norma 211.1-70.

---

## REFERENCIAS

A.M. Neville (1999), "Norma ASTM C876-91", Tecnología del Concreto, IMCYC, México.

Alonso C., Andrade C., Castellote M., Castro P. (2000), "Chloride Threshold Values to Depassivate Reinforcing Bars Embedded in a Standardized OPC Mortar, Cement and Concrete Research 30, pp. 1047-1055.

American Association of State Highway and Transportation Officials (1994), "Designation Standard Specification for Electrochemical Chloride Extraction T 260-94 Sampling and Testing for Chloride Ion in concrete and Concrete Raw Materials".

American Association of State Highway and Transportation Officials (1994), "AASHTO T 259-Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration".

American Association of State Highway and Transportation Officials (1994), "AASHTO T 277- Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete".

American Society for Testing and Materials (2004), "ASTM C 42/C 42M Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete".

American Society for Testing and Materials (2007), "ASTM C 900-87 Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete".

American Society for Testing and Materials (2007), "C39/C 39M-03 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens".

American Society for Testing and Materials," C31 Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra".

American Society for Testing and Materials,"C192 Practica para la Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo de concreto en el Laboratorio".

American Society for Testing and Materials,"G59-91 Standard Practice for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements".

American Society for Testing and Materials, " C78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete".

American Society for Testing and Materials, "C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars".

American Society for Testing and Materials, "C199 Standard Test Method for Pier Test for Refractory Mortars".

American Society for Testing and Materials, "C305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency".

American Society for Testing and Materials, "C150 Especificación Normalizada para Cemento Portland".

American Society for Testing and Materials (2008), "C 876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete".

Andrade C., Alonso C., y Goñi S., (1993), "In Concrete 2000", R.K. Dhir and M.R. Jones, Eds., E. and F.N. Spon, London. p. 1640.

Andrade C., Sanjutiñ M.A. y Alonso C. (1993), "Measurement of Chloride Diffusion Coefficient from Migration Test", Corrosion/93, Paper N° 319, NACE.

Arya C., *et al* (1987), "Assessment of Simple Determining the Free Chloride Ion Content of Cement Pastes", Cement and Concrete Research, vol. 17, N° 6, pp. 907-918.

Askeland D. y Phulé P. (2008), "Materials Science and Engineering", Cuarta Edición, Editorial Thompson.

Asrar N., Malik A.U., Ahmad S. y Mujahid F.S. (1999), Constr. Build. Mater., 19213.

Ávila J. (1992), "Estudios Diversos de Corrosión Electroquímica en Refuerzos Metálicos Embebidos en Mortero", Primer Taller Internacional de Corrosión, Mérida, México, Conacyt-Cinvestav, p.127.

Ávila Javier, Genescá Joan (1996), "Más allá de la Herrumbre 1", segunda reimpresión, México, pp. 6-10.

Ávila Javier, Genescá Joan (1995), "Más allá de la Herrumbre 2, La lucha contra la corrosión", Tercera reimpresión, México, p.18.

Ávila J. y Sykes J.M. (1993), "Corrosion Science, vol. 23, N° 6, pp. 547-558.

Aydin F. y Saribiyik M. (2010), "Correlation Between Schmidt Hammer and Destructive Compressions Testing for Concretes in existing Buildings, Scientific Research and Essays vol. 5, pp. 1644-1648.

Basista M. y Weglewski W., "Micromechanical Modelling of Sulphate Corrosion in Concrete: Influence of Ettringite Formation Reaction", Theoret. Appl. Mech. Vol. 35, N° 1-3, pp. 29-52.

Balagurú P. y Ramakrishan V. (1988), "Chloride Permeability and Air-Void Characteristic of Concrete Containing High Range Water Reducing Admixture", Cement and Concrete Research, vol. 18, N° 3, pp. 401-414.

Bamforth P. (1995), "Chloride Penetration and Service Life", Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete – COST-509 Workshop, Sevilla, España.

Barbara L. Gabriel, Packer Engineering Associates, Inc (1983), "Scanning Electron Microscopy", pp. 166-172.

Berker N.S. y Hicks M.C. (1992), "In Corrosion Forms and Control for Infrastructure", ASTM STP 1137, V. Chaker, Ed. American Society for Testing and Materials, p. 207.

British Standard Institution (1997), "BS 5328-1 Concrete Guide to Specifying Concrete and BS 5328-2", Concrete Methods for Specifying Concrete Mixes.

Broomfield J.P., Langford P.E. y Ewins A.J. (1990), "Corrosion Rates of Steel in Concrete", In: NS. Berker, V. Chaker, D. Whiting, Editors, ASTM STP 1065, Philadelphia, USA, p. 157.

Browne R.D., Geoghegan M.P. y Baker A.F. (1993), In: A.P. Crane, editor, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, London, UK, p. 193.

Burillo Montufar Juan C., González Cantú Javier Piñón Carmona Irma Liz (2019), "Evolución del uso del quitosano en el tratamiento de agua", Revista de divulgación científica de la Universidad Autónoma de Chihuahua /Facultad de Ingeniería FINGUACH Año 6, Núm. 21, septiembre – noviembre, pp. 6-7.

Carino N. (1999), "Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structures", J. of Performance of Constructed Facilities, August, pp. 96-106.

Castoreña J.H., Almeraya-Calderón F., Velázquez J.L., Gaona-Tiburcio C., Cárdenas A., Barrios-Durstewitz, López León L. y Martínez-Villafañe A. (2088), "Modeling the Time to Corrosion Cracking of Reinforced Concrete Structures by Finite Element", Corrosion Science Section, NACE.

Castro P., De Coss R. y Maldonado L. (1992), "Difusión de Iones Cl en Concretos de uso común en la península de Yucatán, Memorias 1° Taller Internacional sobre Corrosión, pp. 188-197.

Castro P. (1995), "Difusión y Corrosión por Iones de Cloruro en el Concreto Reforzado", Tesis Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.

Chávez Eduardo (2007), "Tesis Maestría Medición de la Velocidad de Corrosión Mediante la Técnica de Ruido Electroquímico en Aceros Inoxidables 304 y 316L", Instituto Politécnico Nacional CICATA-IPN, Unidad Altamira, pp. 18-19.

Choi Y.S., Jung-Gu K. y Kwang-Myong L. (2005), "Corrosion Behaviour of Steel bar Embedded in Fly ash Concrete", Corr. Sci. In Press.

Clear K.C. y Kay R.E. (1973), "Time to Corrosion of Steel in Concrete Slabs", vol. I, Effect of mix Design and Construction Parameters, FHWA Report N° RD-73-22, Interim Report FHWA.

"Inspection and Remedial Measures", Concrete Society Technical Report, N° 21, Concrete Society, London.

Cook J.E. (1989), "10,000 psi Concrete", Concrete International.

"RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion", Materials and Structures/Matériaux et Constructions, vol. 36, August – September.

Escalante E. (1990), "In: C.L. Page, K. Treadaway y P. Bamforth, Editors, Corrosion of Reinforcement in Concrete, Elsevier Applied Science, London-New York, p. 281.

Esteva L., Díaz – López O. y Ismael Hernandez E. (2010), "Seismic Vulnerability Functions of multi-storey Buildings: Estimation and Applications", Structure and Infrastructure Engineering, 6 (1-2), 3-16.

Feliú S. y Andrade C. (1989), "Manual de Inspección de obras Dañadas por Corrosión de Armaduras", Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas

(CENIM) y el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Madrid, España.

Frangopol D. (2011), "Life-Cycle Performance, Management and Optimisation of Structural Systems under Uncertainty: Accomplishments and Challenges", Structure and Infrastructure Engineering, vol. 7, N° 6, pp. 389-413.

Genescá Joan, Malo José M., Meas Yunny, Uruchurtu Jorge (2002), "Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión", Ed. UNAM, 1° Edición, México.

Gonzalez J.A., Molina A., Otero E. y López W. (1990), "On Mechanism of Steel Corrosion in Concrete the Role of Oxygen Diffusion", Magazine of Concrete Research, vol. 42, N° 150, pp. 23-27.

Hansen T.C. et. al (1986), "Chloride Diffusion and Corrosion Initiation of Steel Reinforcement in Fly ash Concrete", Cement and Concrete Research, vol. 16, N°5, pp. 782-784.

HellierC. (2001), "Handbook of Nondestructive Evaluation", ed. Mc Graw Hill.

H. Hernández Cocoltzi, E. Águila Almanza, O. Flores Agustin, E.L. Viveros Nava, E. Ramos Cassellis (2009), "Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón", Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, Superficies y Vacío 22(3) 57-60, Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Hope B.B. y Manning D.G. (1995), "Cement and Concrete Research", p. 525.

Hostalet F. (1994), "Situación Actual de las Técnicas de Ensayo No Destructivo del Hormigón", Informes de la construcción, Vol. 46, N° 433, Septiembre/Octubre.

Izquierdo Silvia, Jaime Felipe, Gabriel Juan, Mejía Ruby (2013), "Evaluación de la Corrosión de un Acero Embebido en Morteros Adicionados con Catalizador de Craqueo Catalítico usando (FCC)", Artículo de Investigación, Ingeniería y Desarrollo; Universidad del Norte, vol. 31, Enero-Junio.

M.A.Pech-Canul, P.Castro (2002), “Corrosion Measurements of Steel Reinforcement in Concrete Exposed to a Tropical Marine Atmosphere”, *Cement and Concrete Research* 32, pp. 491 – 498.

Madrid M., Acosta A., Del Valle A., Pérez-Quiroz J., Backhoff M.A. y Carrión F. (2007), “Corrosion Damages Evaluation and Diagnosis in the Mexican Highway Network”, *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infraestructure*, Canada, p. 6.

Malo J.M., Uruchurtu J. (2002), “La Técnica de Ruido Electroquímico para el Estudio de la Corrosión”, *Instituto de investigaciones Eléctricas*, cap. 4, pp.93-101.

Martínez I., Andrade C., Castellote C. y García de Viedma P. (2009), “Advancements in non-destructive Control of Efficiency of Electrochemical Repair Techniques”, *Journal of Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 44, N°2.

Martínez I., Andrade C., Rebolledo N., Bouteiller V., Marie-Victoire E. y Oliver G. (2008), “Corrosion Characterization of Reinforced Concrete Slabs with Different Devices”, *Corrosion*, vol. 64, N° 2.

Martínez G., Viguera E., Hernández S., Brostow W., Menchaca C. (2005), “Mechanical Improvement of Concrete by Irradiated Polypropylene Fibers”, *Polymer Engineering and Science*, pp. 1428 – 1431.

Martínez María, Benavides Roberto, Carrasco Héctor (2010), “Efecto de la Radiación Ionizante en Polímeros”, *Contribuciones del instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al Avance de la Ciencia y la Tecnología en México*, cap. 27.

M.B.A. Zamora, D.N. Mendoza, H.H. Zamora, F.A. Calderón (2008), “Influence of the Coating on the Corrosion Rate in Concrete Beams Exposed to Environment-DURACON Project”, *Portugaliae Electrochemical Acta* 27, p. 247.

McCarter W.J. y Barclay A. (1993), “*Cement and Concrete Research*”, 1178.

McCarthy M.J., Giannakou A. y Jones M.R. (2004), “Comparative Performance of Chloride Attenuating and Corrosion Inhibiting Systems for Reinforced Concrete”, *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, vol. 37.

Miranda J.M., Fernandez-Jimenez A., Gonzalez J.A. y Palomo A. (2005), "Corrosion Resistance in Activated fly ash Mortars", *Cement and Concrete Research* 35.

Montemor M.F., Simoes A.M. y Ferreira M.G.S.(2003), "Chloride-Induced Corrosion on Reinforcing Steel: from the Fundamental to the Monitoring Techniques", *Cement and Concrete Composites* 25, pp. 491-502.

Moreno E. (2006), "Determinación del pH de la Solución de los Poros de Concreto después de un proceso acelerado de carbonatación", *Ingeniería Revista Académica*, vol. 10 N°003.

Morris W., Vico A. y Vázquez M. (2002), "Corrosion of Reinforcing Steel Evaluated by Means of Concrete Resistivity Measurements", *Corrosion Science*, vol. 44.

NACE North Central Region, American Concrete Institute, National Association of Corrosion Engineers *et. al.* (1983), "Solving Rebar Corrosion Problems in Concrete".

Naqvi A., Maslehuddin M., Garwan M.A., Nagadi M.M., Al-Amoudi O.S.B., Khateeb-ur-Rehman y Rasshid M. (2011), "Estimation of Minimum Detectable Concentration of Chloride in the Blast Furnace slag Cement Concrete", *Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 269.

National Association of Corrosion Engineering (2007), "SP0290 (actualmente RP0290) Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures".

National Association of Corrosion Engineering (2008), "Standard Practice Inspection Methods for Corrosion Evaluation of Conventionally Reinforced Concrete Structures".

#### NORMA MEXICANA NMX-C-407

O'Reilly, Díaz Vitervo A. (2007), "Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., pp. 48-52.

Pacheco López Neith A. (2010), “Extracción biotecnológica de quitina para la producción de quitosanos: caracterización y aplicación”, Food and Nutrition, Université Claude Bernard - Lyon 1; Universidad Autónoma Metropolitana, pp. 15.

Papworth F. y Ratcliffe R. (1994), “High Performance Concrete the Concrete Future”, Concrete International, vol. 16 , N°10, pp. 39-44.

Pascale G., Di Leo A. y Carli R. (2000), “Evaluation of Actual Compressive Strength of High Strength Concrete by NDT”, 15th WCNDT, Roma 2000.

Polanco Rodríguez Abraham (2012), “Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto”, Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería, pp. 42-50.

Richardson M. (2002), “Fundamentals of Durable Reinforced Concrete”, SponPress.

Rodríguez Gómez Francisco J. (2002), “Técnicas Electroquímicas de Corriente Directa para el Estudio de la Corrosión”, Resistencia a la polarización, Depto. Ing. Metalúrgica, Facultad Química, UNAM, pp. 28-31.

Rojas G. (2008), “Evaluación de Estructuras de Concreto por Corrosión”, Tecnología en Marcha, vol. 21, N°4, pp. 69-78.

Rosario S., Yácono J.C. (2003), Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 6(11), pp. 71 – 77.

Rosenberg A., Hansson C. y Andrade C. (1989), “Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete”, Materials of Science of Concrete, I, The American Ceramic Society, Westerville, Ohio, pp. 285-313.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2001), “El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado”, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2002), “El Uso de una Pintura Rica en Zinc como Sistema de Protección Catódica en Concreto”, México.

Shuang L. y Heng-jing B. (2011), “Corrosion Risk Assessment of Chloride Contaminated Concrete Structures Using Embeddable multi-cell Sensor Systems”, Journal of Cent. South Univ. Technol. 18.

Soto R. (2002), "Efecto de la Trabajabilidad del Concreto Hidráulico Adicionado a la Mezcla, Limo Inorgánico ML de Acámbaro, Guanajuato, Arena del Banco Chamacuero, mpio. De la Piedad, Michoacán, Grava triturada de la piedad, Michoacán", Tesis de Licenciatura, Morelia, Michoacán.

Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion.NACE/ASTM G193, 2012.

Taylor H.F.W. (1991), "Cement Chemistry", Academic Press, London, pp. 203-204.

Troconis de Rincon O. (2011), "Impacto del Ambiente Tropical en la Durabilidad de las Estructuras de Concreto Armado", Revista de la Universidad de Zulia, vol. 2, N°2.

Tuutti K. (1980), "Service Life of Structures with regard to corrosion of embedded Steel", Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65, pp. 223-236.