



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN
CAMPUS TUXTEPEC



Estudio electroquímico de la corrosión del acero embebido en concreto adicionado con composito sustituto de cemento.

TESIS

**P A R A O B T E N E R E L G R A D O D E
L I C E N C I A D O E N C I E N C I A S Q U Í M I C A S**

PRESENTA:

LETICIA VÁSQUEZ ZACARÍAS

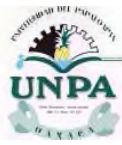
Dra. Martha Emilia Poisot Vázquez

Asesor

Dr. Tezozomoc Pérez López

Co-asesor

San Juan Bautista Tuxtepec, Oax, Octubre 2014.



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la siguiente tesis de licenciatura fue elaborada totalmente por mí y revisada por mi asesor de tesis. Todos los fragmentos recabados de textos han sido referenciados como tal.

Se agradece explícitamente a aquellos que han facilitado algún equipo o método durante la realización de este trabajo.

Atentamente

Leticia Vásquez Zacarías.



*A mis padres
Mauro y Gudelia*

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos, por su cariño, amor y apoyo incondicional durante este proyecto. A Jesús por su compañía y por darme ánimos.

A Dios por estar siempre en mi vida.

A mis compañeros y amigos de la universidad, Clemente, Oscar, Chantal, Jair y Narelle, gracias por los buenos momentos que hemos pasado durante estos años, por el gran esfuerzo, por todos esos desvelos juntos y por su amistad.

A mi asesora de tesis, Dra. Marta Poisot Vázquez, por la amistad, la confianza, el gran apoyo cuando más lo necesitaba, por permitirme trabajar y aprender juntas.

Al Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche (CICORR): Dr. Tezozomoc Pérez López, Dr. Javier Reyes Trujeque, Jose Manuel, David y Damian por compartirme los conocimientos necesarios para este trabajo y apoyarme a usar el potencióstato.

Al Dr. Miguel Velázquez Manzanares y a Faustino por apoyarme en el uso del potencióstato de la Universidad del Papaloapan.

A los sinodales que han revisado esta tesis, por su tiempo.

A MICRONA por apoyarnos con las imágenes de Microscopia electrónica de barrido para este trabajo.

A la Universidad del Papaloapan por ser mi casa de estudios.



Contenido

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
HIPÓTESIS	16
ANTECEDENTES	17
MARCO TEÓRICO	20
Concreto	20
Concreto reforzado	21
Corrosión del acero de refuerzo	22
Carbonatación	24
Cloruros	25
Clasificación de la corrosión	26
Corrosión localizada	26
Corrosión por picaduras	26
Corrosión en hendiduras	27
Corrosión por corrientes de interferencia	28
Corrosión uniforme	28
Corrosión galvánica	29
FUNDAMENTOS DE LAS TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS	29
Ruido Electroquímico (RE)	30
Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)	31
Análisis de resultados	32
Circuitos electrónicos equivalentes para procesos de corrosión.	33
Resistencia a la Polarización (Rp)	34
Potencial de Corrosión (E_{corr})	36
Velocidad de Corrosión (i_{corr})	36



DESARROLLO EXPERIMENTAL	37
Preparación de celulosa residual.....	40
Preparación de celulosa hidrofóbica	40
Preparación de la ceniza hidrofóbica.....	41
Composito de ceniza hidrofóbica y celulosa hidrofóbica	42
Procedimiento del colado de las probetas y pruebas.....	43
Proceso de curado.....	45
Exposición de probetas de ensayo en disolución de NaCl 3%.....	46
RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
PROBETAS EN PROCESO DE CURADO.....	48
Ruido electroquímico	48
Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.....	52
Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).....	54
PROBETAS EN SOLUCIÓN SALINA POR 90 DIAS.....	55
Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE)	55
Resistencia a la Polarización Lineal (LRP).....	56
TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS AL FINAL DE LA EXPOSICIÓN	57
Espectroscopía de Infrarrojo medio (IR)	57
Análisis térmico simultáneo	58
Difracción de Rayos X (DRX)	64
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	66
CONCLUSIONES	69
ANEXOS.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Residuo de celulosa generada por la empresa BIOPAPPEL, b) Ceniza del Ingenio Adolfo López Mateos.....	14
Figura 2. Resina epóxica para uso en la construcción.....	17
Figura 3. Formación del cátodo y ánodo en acero embebido en concreto [9].	23
Figura 4. Proceso de carbonatación [2].	25
Figura 5. Equilibrios del ión cloruro en el concreto [2].....	26
Figura 6. Corrosión por picadura de varilla de acero embebida en concreto [13].	27
Figura 7. Corrosión en hendiduras [13].....	27
Figura 8. Corrosión uniforme [13].	28
Figura 9. Corrosión galvánica [22].....	29
Figura 10. Circuito eléctrico equivalente propuesto para describir los espectros de impedancia asociado al proceso de corrosión.	33
Figura 11. Espectro de impedancia , representación de Nyquist y, ajuste de los datos a un circuito electrónico equivalente en paralelo (R y CPE) y en serie con R_{sol} [16].	34
Figura 12. Curva típica de resistencia a la polarización lineal en concreto.	35
Figura 13. Potenciostato/Galvanostato	37
Figura 14. Potenciostato/galvanostato AUTOLAB 302N.....	38
Figura 15. Espectrofotometro de infrarrojo, spectrum 100 Perkin-Elmer.....	38
Figura 16. Analizador térmico simultaneo, STA 6000, Perkin-Elmer.	38
Figura 17. Difractómetro de rayos X, D8 ADVANCE BRUKER.	39
Figura 18. Microscópio electrónico de barrido JEOL JSM-7600F de MICRONA-UV.	39
Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de celulosa.....	40
Figura 20. Preparación de la celulosa residual	40
Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de celulosa hidrofóbica. .	41
Figura 22. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de ceniza hidrofóbica.	41
Figura 23. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación del composito de ceniza hidrofóbica + celulosa hidrofóbica.	42
Figura 24. Mezcla de componentes para la elaboración de probetas.....	43
Figura 25. Procedimiento de colado de probetas y mediciones electroquímicas	44
Figura 26. Diagrama de flujo de las técnicas electroquímicas.....	45

Figura 27. 24 horas de fraguado.	45
Figura 28. Proceso de curado.....	45
Figura 29. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de celulosa hidrofóbica..	46
Figura 30. Probetas de ensayo expuestas en solución salina.	46
Figura 31. Medición electroquímica con el potencióstato/galvanostato.....	47
Figura 32. Medición electroquímica de las probetas de ensayo.....	47
Figura 33. Serie de potencial-tiempo de la probeta 1 (blanco) en el día 28.	49
Figura 34. Serie de potencial-tiempo de la probeta 2 (GC0) en el día 28.	50
Figura 35. Serie de potencial-tiempo de la probeta 3 (GC1) en el día 28.	50
Figura 36. Serie de potencial-tiempo de la probeta 4 (GC2) en el día 28.	51
Figura 37. Serie de potencial-tiempo de la probeta 5 (GC4) en el día 28.	51
Figura 38. Corriente de corrosión (i_{corr}) de las 5 probetas durante los 28 días del proceso de curado obtenida por impedancia.	53
Figura 39. Corriente de corrosión (i_{corr}) de las 5 probetas durante los 28 días del proceso de curado medida determinada por LRP.	54
Figura 40. Corriente de corrosión (i_{corr}) de las 5 probetas durante 90 días de exposición en NaCl 3%, determinada por EIE.....	55
Figura 41. Velocidad de corrosión (mm/año) de las 5 probetas de ensayo..	56
Figura 42. IR de las muestras de las probetas de ensayo.	57
Figura 43. TG-DTA de concreto de Portland rico en dolomita y bajo en calcita [extraída de la base de datos del STA 6000, Perkin-Elmer].....	58
Figura 44. TG-DTA de referencia de una muestra de pasta de concreto [21].	58
Figura 45. TG-DTA experimental de la probeta 1 (BLANCO).....	59
Figura 46. TG-DTA experimental de la probeta 2 (GC0).....	60
Figura 47. TG-DTA experimental de la probeta 3 (GC1).....	61
Figura 48. TG-DTA experimental de la probeta 4 (GC2).....	62
Figura 49. TG-DTA experimental de la probeta 5 (GC4).....	63
Figura 50. DRX de concreto. [21].	64
Figura 51. DRX de las 5 probetas de ensayo.....	65
Figura 52. SEM del <i>blanco</i> : concreto típico.	66
Figura 53. SEM de <i>GC0</i> : concreto + celulosa (lodo)	67
Figura 54. SEM de <i>GC1</i> : concreto + celulosa (lavada con HCl).....	67



Figura 55. SEM de GC2: concreto + celulosa acetogel + ceniza 68
Figura 56. SEM de GC4: concreto + celulosa acetogel + ceniza + adhetop 68

RESUMEN

La emisión de dióxido de carbono, originado principalmente por las actividades industriales, la operación de automotores y maquinaria, así como del proceso de producción de cemento y de las actividades de la industria de la construcción a venido incrementándose de manera acelerada y es urgente proponer y practicar soluciones que aminoren esta situación que afecta el medio ambiente de este planeta. De tal manera que resulta pertinente proponer nuevos sistemas de construcción que consuman menos cemento o incluso eviten su uso, sin sacrificar la garantías que el concreto nos entrega.

Este trabajo de tesis busca contribuir en el uso de materiales compuestos como sustituto de cemento para generar concreto-verde, es decir, aquel que sustituye el cemento por algún material de desecho y emplea menos energía en su producción. El sustituto de cemento que se ha utilizado en este trabajo proviene del lodo de rechazo del proceso de reciclado de papel, por un lado y, por el otro incorpora la ceniza del bagazo de caña de azúcar resultante del proceso de producción de azúcar. Sin embargo, los resultados de este trabajo se enfocan a determinar la capacidad de inhibición de la corrosión de la varilla de acero usada en una probeta que contiene el sustituto de cemento, bajo las mismas condiciones de elaboración de una probeta de concreto común.

Los datos obtenidos por ruido electroquímico, resistencia a la polarización lineal y espectroscopia de impedancia electroquímica nos indican que a 28 días de curado las probetas presenta estado de pasividad de corrosión, mientras que al exponer las probetas a solución salina al 3%, por tres meses, se encontró que presentan baja probabilidad de corrosión aquellas que contienen el compuesto sustituyendo al cemento.

ABSTRACT

The green-house gas emission mainly provided by industrial activities, car engines, machinery and the cement industry along with building construction activities has increased tremendously day by day so it is urgent to present innovative procedures and practice them trying to solve this risk situation for the planet environment. It is important to propose new building procedures consuming less cement or even avoid using it without losing the properties of concrete pieces.

A supplementary cementitious material was used in this work for producing green-concrete. It means that some waste substance is contained and low energy consumption is required for green-concrete pieces making. The supplementary cementitious material used here contains the waste of paper production from paper recycling and also the sugar cane bagasse ash from sugar production. Both wastes form a composite material. However, the effort of this work is focused on measuring the passivation effect against steel corrosion in concrete comparing common concrete samples and samples containing such supplementary cementitious material. The usual building procedure standards were applied for both concrete samples preparation.

The data was collected from electrochemical noise, linear resistance polarization and impedance electrochemical spectroscopy. The results analysis allows us to conclude that after 28 days curing time all the concrete samples show passivity against steel corrosion, while immersing every sample into sodium chloride solution, 3wt%, during three months indicates that only the samples containing the supplementary cementitious material show higher resistance against steel corrosion than the common concrete samples.

INTRODUCCIÓN

El concreto es un material compuesto, que consiste en un agregado de partículas que están enlazados juntos en un cuerpo sólido por medio del cemento como un medio de unión. El cemento necesita de cierta cantidad de agua para hidratarse, durante el fraguado una parte de ella se evapora y, en su salida, produce una red de capilares y microporos al interior del concreto que posteriormente se llenan de aire. Esta red es causa de los problemas de permeabilidad que suele presentar el concreto, ya que aunado a las fisuras producidas por las condiciones de fraguado y temperatura, se obtiene un material poroso y permeable. Estos poros son los que permiten el paso a los agentes agresivos del ambiente hacia el interior del concreto, lo cual desencadena el proceso de corrosión en la interfase del material.

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto, es el principal problema de deterioro en infraestructura civil, edificios de centros educativos, hospitales, centros de trabajo, hoteles etc., pero la frecuencia es mayor en zonas costeras debido al ambiente marino.

La corrosión metálica en ambiente húmedo es un proceso de naturaleza electroquímica que involucra reacciones de oxidación y reducción, ocasionando el deterioro del material metálico y de sus propiedades. El origen de este fenómeno, es la presencia de heterogeneidades en la superficie de los metales, que producen zonas de diferentes niveles de energía y propician la formación de la celda electroquímica. La corrosión se manifiesta de dos maneras: en corrosión química y corrosión electroquímica. La primera se puede generar en altas temperaturas y la segunda es la forma más común de ataque a los metales en contacto con un electrolito y ocurre cuando los átomos de un metal pierden electrones y se convierten en iones; conforme se consume gradualmente el metal se forma un subproducto de este proceso. La corrosión electroquímica comprende a la corrosión atmosférica, a la producida por los suelos, o a la corrosión provocada por medios electrolíticos (agua de mar, soluciones ácidas,

sales y álcalis) y por sales fundidas; dado que ocurre en un medio acuoso, incluyendo la presencia de iones en el agua o el aire húmedo. En este proceso se crea un circuito eléctrico y el sistema se conoce como celda electroquímica [1].

JUSTIFICACIÓN

La corrosión electroquímica de la interfase acero/concreto es provocada por un medio de alta conductividad, como; soluciones ácidas, sales y álcalis. Estos ambientes húmedos con altos contenidos de iones favorecen el proceso de corrosión. Las pérdidas económicas generadas por los efectos de la corrosión a nivel mundial son cuantiosas. Debido a esto, se han abordado estudios enfocados en la búsqueda de nuevos materiales, sustancias y métodos para el control de este problema (recubrimientos poliméricos, protección catódica, ánodo de sacrificio, etc.)

En este proyecto se busca adicionar un composito a la típica mezcla de concreto para inhibir o reducir la velocidad de corrosión de acero/concreto, y además que sea sustentable. Por lo tanto, se utiliza la celulosa y la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), por lo que se aprovechan los desechos industriales que se generan en la región del Papaloapan, específicamente en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. La CBCA es un subproducto del proceso de refinamiento de azúcar que genera el Ingenio Adolfo López Mateos y la celulosa residual es generada por la empresa Bioppapel a través del proceso de reciclado de papel. Estos desechos industriales, debido a su manejo, consumen recursos de las empresas, así mismo cuando estos desechos se exponen al aire libre y se secan, forman parte de las partículas suspendidas en el medio, por lo que se generan impactos al ambiente y como consecuencia problemas a la salud (Figura 1).

En este trabajo se aplicaron técnicas electroquímicas al estudio del acero de refuerzo embebido en concreto adicionado con un composito de celulosa

hidrofóbica y CBCA. La rapidez de medición y sensibilidad de las técnicas electroquímicas son algunas de sus ventajas, además de ser pruebas no destructivas. Las técnicas que se utilizaron fueron: medición de ruido electroquímico (RE), resistencia a la polarización lineal (RPL) y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE). Cada una de ellas aportó información acerca de las condiciones de la interfase acero-concreto y con ello del grado de corrosión presente en el acero. La técnica de EIE ha mostrado excelentes resultados en el estudio de la interfase metal-concreto siendo útil la información que se obtiene para evaluar el comportamiento del sistema y proponer mecanismos de reacción. Sin embargo, todas estas técnicas aportan información que se complementa con apreciaciones visuales del deterioro físico.



a)



b)

Figura 1. a) Residuo de celulosa generada por la empresa BIOPAPPEL, b) Ceniza del Ingenio Adolfo López Mateos.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el proceso de corrosión del acero embebido en concreto adicionado con composito sustituto de cemento, expuestas durante un mes en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado y posteriormente expuestas a 3 meses en solución de NaCl 3%.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Medir mediante las técnicas de RE, EIE y RPL, la velocidad de corrosión del acero embebido en concreto de las probetas de ensayo durante el proceso de curado.
- Medir mediante la técnica de EIE y RPL, la velocidad de corrosión del acero embebido en concreto de las probetas expuestas en solución de NaCl 3%.
- Identificar la validez de patrones característicos de pasividad, inicio y desarrollo del proceso de corrosión en la interfase acero-concreto como resultado a la exposición a solución alcalina y NaCl 3%.
- Caracterizar las muestras por medio de SEM, IR, TGA y DRX.

HIPÓTESIS

Hasta la fecha no se ha encontrado el uso combinado de celulosa hidrofóbica y ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como agregado del concreto tradicional. Sin embargo, debido a la capacidad puzolánica de la ceniza adicionada en el concreto y la presencia de la fibra y polímeros naturales podrían coadyuvar en la disminución de la velocidad del proceso de corrosión del acero embebido en concreto.

Por lo tanto, se plantea realizar 5 series de probetas de ensayo adicionando celulosa hidrofóbica y ceniza de caña de azúcar al concreto tradicional. Se espera que estos agregados actúen en detrimento de la velocidad de corrosión del acero. Para conocer la velocidad de corrosión del acero en las probetas se miden las pruebas electroquímicas: RE, EIE y RPL, transformando e interpretando los datos para concluir la condición del acero embebido en este material de construcción modificado.

ANTECEDENTES

Desde la década de 1960 científicos e investigadores han mostrado especial interés en la búsqueda de materiales, sustancias y métodos para el control de la corrosión [2]. Uno de los métodos que ha demostrado gran efectividad es la protección catódica. El principio del funcionamiento es una pila galvánica en la que se hace pasar una corriente eléctrica a una pieza metálica para que se comporte como cátodo; al comportarse como cátodo, una estructura queda protegida contra la corrosión. Sin embargo, recientemente se ha iniciado el sistema de protección por ánodo galvánico mediante el rociado térmico de materiales activos y sus aleaciones [2].

El uso de materiales poliméricos como recubrimientos de la varilla de acero fue ampliamente difundido en la década de 1970, con la intención de formar una barrera que impidiera el contacto del acero con agentes agresivos y evitar la corrosión. En 1981, la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, después de llevar a cabo evaluaciones de laboratorio y de campo a tiempos cortos de una serie varillas de acero cubiertas con polímeros epóxicos (Figura 2), encontraron que los procesos de corrosión se inhibían considerablemente, por lo que estos materiales fueron adoptados en los procesos de construcción en los Estados Unidos [2].



Figura 2. Resina epóxica para uso en la construcción.

Otra opción que se ha ensayado a nivel experimental implica el uso de sustancias reductoras de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo conocidas como *inhibidores*. Esta estrategia ha dado buenos resultados a nivel laboratorio pero su eficiencia no se ha comprobado plenamente en estructuras edificadas.

Saviour y colaboradores realizaron un estudio donde demostraron la eficiencia de quitosano como un inhibidor de la corrosión de acero en medios ácidos (HCl 0.1M) mediante el análisis de datos de análisis gravimétrico, polarización potenciodinámica, espectroscopía de impedancia electroquímica, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía UV-visible. Se encontró que la inhibición de corrosión del acero ocurre incluso a una concentración muy baja del quitosano y que la eficacia de inhibición disminuye con la temperatura, 96% a 60°C y 93% a 70°C; mientras que aumenta ligeramente con un aumento en concentración de quitosano [3].

Rani y colaboradores estudiaron la eficacia de inhibición del extracto de las hojas de *Trilobatum Solanum* (STL) en la corrosión del acero inoxidable expuestas en agua de mar natural por medio de técnicas de polarización potenciodinámica y medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica. Los resultados del estudio indicaron que la eficacia de inhibición aumentó con el incremento de la concentración de inhibidor y logra un máximo de más de 80% para la polarización, así como mediciones de la impedancia. Las medidas electroquímicas muestran que las resistencias de transferencia a la polarización y la carga incrementa con el aumento de la concentración de inhibidor [6].

Por su parte Alavéz y colaboradores estudiaron y analizaron el uso de la ceniza del bagazo de limón y el de caña de azúcar (CBCA) como estabilizadores químicos en bloques de tierra. Los bloques se sometieron a pruebas de flexión y compresión, en estado seco y saturado de agua. Los ensayos se realizaron a 7, 14 y 28 días de edad con el fin de evaluar los efectos de la adición de cal y CBCA sobre las propiedades mecánicas de los bloques de tierra compactada. Los resultados indican que los bloques fabricados con 10% de cal en combinación con

10% de CBCA muestran mejor respuesta que los que contienen sólo cal. Sin embargo, la adición de cal mejora la resistencia de los bloques cuando se compara con los bloques fabricados sólo con tierra. Según el análisis por SEM y DRX se observó la formación de fases sólidas, tales como silicato de calcio hidratado (CSH) y aluminato de calcio hidratado (CAH) por la mezcla de la matriz con los aditivos. Este estudio concluyó que la combinación de CBCA y cal pueden reemplazar al cemento en la estabilización de los bloques de tierra compactada parece ser una alternativa prometedora al considerar cuestiones de consumo de energía y de contaminación ambiental [4].

Por otro lado, Janjaturaphan y Wansom demostraron que el efecto de la adición de CBCA tiene potencial para ser utilizado como un material alternativo que complemente al cemento. Reportaron mejoras satisfactorias en la resistencia a compresión cuando se utilizó la CBCA para reemplazar parcialmente el cemento. Estas mejoras resultan en parte por el efecto de relleno y la reacción puzolánica entre SiO_2 reactivas del CBCA y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a partir de la hidratación del cemento. Trabajaron con 4 muestras de CBCA obtenidos a partir de un ingenio azucarero Tailandés, estas muestras se analizaron por sus actividades puzolánicas utilizando diversos métodos. Las CBCAs de cada muestra eran de dos finuras diferentes de tal manera que el relleno y los efectos puzolánicos puedan ser dilucidados. De la extracción química, se encontraron el contenido amorfo de SiO_2 del CBCA en el intervalo de 42 a 49 y 34 a 43 % en peso para CBCAs finas y gruesas, respectivamente. Estos son considerados bajos en comparación con la ceniza de cáscara de arroz típico (> 85 %). Sin embargo, los acuerdos entre el contenido amorfo de SiO_2 , el incremento de conductividad iónica ($\Delta\sigma$) a partir del método de conductividad, y el índice de resistencia a los 28 días (SAI) sugieren que los dos primeros métodos potencialmente pueden ser utilizados para predecir el efecto puzolánico en el SAI. A pesar del bajo contenido de SiO_2 amorfo, los morteros fabricados de cemento con un 10% de sustitución de CBCA siguen mostrando aumentos satisfactorios en resistencia a la compresión, lo que sugiere que el contenido de SiO_2 amorfo no es un factor primario que contribuye a la fuerza en este sistema [5].

MARCO TEÓRICO

Concreto

La preparación del concreto para construcción se lleva a cabo con los siguientes materiales: cemento Portland, agregado fino (arena), agregado grueso (grava) y agua (todo esto genera lo que se conoce como hormigón). Las partículas de agregado actúan como un material de relleno para reducir el costo global del producto, ya que estos son baratos, mientras que el cemento es relativamente caro. Para lograr la resistencia y trabajabilidad de una mezcla de hormigón, los componentes deben ser agregados en las proporciones correctas. Un empaquetamiento denso y bueno se consigue gracias a las 2 partículas de tamaños diferentes; las partículas finas de arena deben llenar los espacios vacíos entre las partículas gruesas de grava. Normalmente estos agregados comprenden entre 60 y 80 % del volumen total [7].

La cantidad de cemento-agua debe ser suficiente para cubrir todas las partículas de arena y grava, de lo contrario la mezcla de cemento será incompleta, además, todos los componentes deben mezclarse bien. Una unión completa entre el cemento y los agregados de partículas depende de la correcta adición de agua. Muy poca agua conduce a la unión incompleta y una porosidad excesiva; en cualquier caso, la resistencia final es menor que la óptima. El carácter de las partículas de agregado es una consideración importante, en particular, la distribución del tamaño de los agregados influye en la cantidad de agua-cemento. El concreto de cemento Portland es un material importante de la construcción, principalmente debido a que se puede verter en su lugar y se endurece a temperatura ambiente, e incluso cuando se sumerge en agua [7].

Concreto reforzado

La resistencia del concreto de cemento Portland puede ser aumentado por un refuerzo adicional. Esto generalmente se logra por medio de varillas de acero, alambres o de malla metálica, que están incrustados en el concreto fresco y sin curar. Esto hace que la estructura endurecida sea capaz de soportar una mayor resistencia a la tracción, a la compresión y tensiones de cizallamiento. Incluso si las grietas se desarrollan en el concreto, se mantiene un considerable refuerzo. El acero sirve como un material de refuerzo adecuado debido a su coeficiente de expansión térmica que es casi el mismo que el del concreto [7]. Pero debido a esas características también puede experimentar una considerable expansión y contracción térmica con las fluctuaciones de temperatura. Además, el agua penetra en los poros externos, que pueden causar severos agrietamiento. La mayor parte de estas deficiencias pueden ser eliminadas o al menos mejoradas con refuerzo y/o incorporación de aditivos [7].

La cantidad de estos poros está relacionada con la cantidad de agua que se agrega al cemento durante el mezclado del concreto, conocida como relación en peso agua-cemento (a/c). De manera ideal el máximo de agua que se debe combinar químicamente con el cemento en las reacciones de hidratación no debe ser mayor que 0.24 veces su peso, sin embargo; en la práctica se usa más agua en la dosificación de concretos, con relaciones a/c que varían entre 0.45 y 0.60, esto permite alcanzar la trabajabilidad deseada en el concreto recién mezclado. Dado lo anterior, al final de la hidratación del cemento, los precipitados o fases sólidas producidas no son suficientes para rellenar los espacios dejados por el agua extra cuando esta se evapora quedando por lo tanto una red de huecos o estructura porosa [8].

La inherente porosidad del concreto es un factor crítico en la corrosión del acero de refuerzo, pero en realidad no es la porosidad sino el contenido de humedad dentro de los poros el factor desencadenante de la degradación del acero, ya que representa el electrolito necesario para el proceso de corrosión, y en muchos casos el medio a través del cual se transportan sustancias agresivas

como los iones cloruro y el CO_2 [8]. Esta agua evaporable o solución-poro nunca alcanza un estado estable ya que varía según la humedad del medio ambiente en función de las estaciones del año y los ciclos diarios, como consecuencia las propiedades de transporte varían, por lo que se considera al concreto como un electrolito que evoluciona con el tiempo [8].

Por último, el transporte de masa a través de los poros parcialmente saturados de agua evaporable o solución-poro se puede visualizar como un intenso transporte de gases N_2 , O_2 , CO_2 , vapor de agua, e iones (transporte multifásico y multiespecie) que entran y salen de la estructura gracias a cuatro mecanismos: capilaridad, permeabilidad debida a gradientes de presión, difusión debida a gradientes de concentración y migración debida a gradientes de potencial eléctrico [8].

Corrosión del acero de refuerzo

La corrosión del acero en el concreto es un proceso electroquímico, que requiere de una reacción de oxidación, otra de reducción y la circulación de iones a través del electrolito. De esta manera se presentan dos áreas sobre la superficie del metal, una de las cuales actúa como ánodo y la otra como cátodo (Figura 3). La pasta de concreto, en cierta forma, funciona como un electrolito, dentro de un circuito cerrado.

El proceso de corrosión afecta de manera global. En la industria de la construcción, por ejemplo, es responsable del deterioro prematuro de las estructuras de concreto armado. El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la integridad estructural del edificio y la vida de sus usuarios.

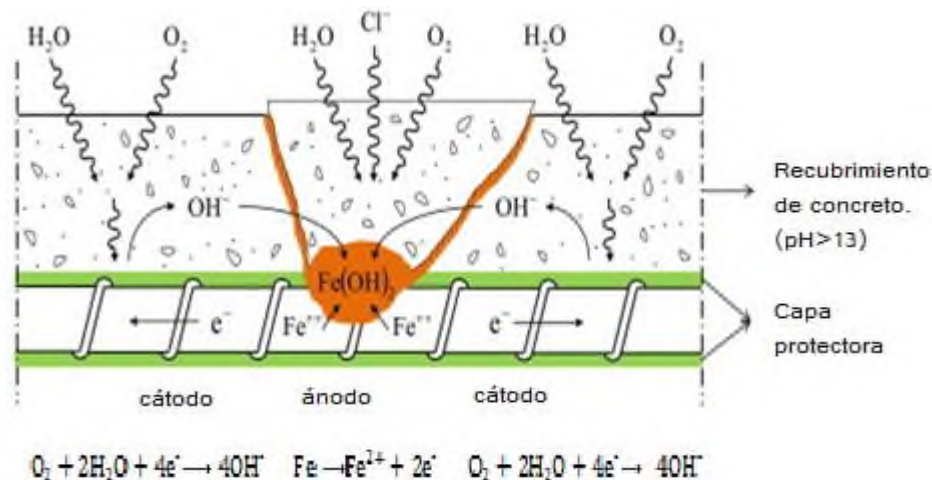


Figura 3. Formación del cátodo y ánodo en acero embebido en concreto [9].

En ambientes marinos o en regiones costeras, la corrosión de la armadura de acero en el edificio se debe a la penetración de los iones cloruro a través de la red de poros del concreto, los cuales son capaces de provocar corrosión localizada y por lo tanto llegan a producir defectos prematuros e inesperados en la estructura edificada [10].

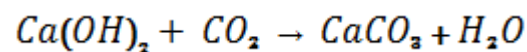
Por otra parte, el consumo desmedido de combustibles fósiles genera la formación de productos de combustión que no sólo afectan al ambiente sino también al sector de la construcción ya que el incremento de CO_2 en la atmósfera favorece el desarrollo de la carbonatación del concreto. Este proceso altera la composición química de la matriz cementante y por lo tanto, facilita la difusión de los iones cloruro dando lugar al desarrollo de la corrosión. El deterioro de estructuras de concreto reforzado en zonas costeras y marinas debido a la corrosión del acero de refuerzo es un problema infraestructural importante. Se calcula un costo de 300 000 millones de dólares por fallas en la infraestructura en los Estados Unidos. Así mismo, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por unos 100 000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión. Esta situación es particularmente severa en México debido a sus extensas costas y el clima

subtropical [2]. Los principales factores que desencadenan el proceso de corrosión son los iones cloruro y la carbonatación.

Carbonatación

La carbonatación es un tipo particular de reacción ácida, de excepcional importancia en la durabilidad del concreto. Debido a los hidróxidos de calcio, de sodio y de potasio disueltos en la solución acuosa de la red de poros del concreto, y en menor medida a los álcalis solubles de los agregados, se alcanza un pH de la disolución presente en los poros entre 12.5 y 13.5.

El concreto es un material muy poroso, el cual permite la penetración en su interior del CO_2 del aire a través de los poros. Cuando esto sucede se produce la reacción del CO_2 con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del concreto y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida, formándose carbonato cálcico. En términos simplificados, la reacción para la fase acuosa se puede describir [11]:



Cuando todo el Ca(OH)_2 , KOH y NaOH presentes en los poros ha sido carbonatado (Figura 4), el pH empieza a decrecer y deja de proteger de la corrosión a las armaduras. Tan pronto como todo el cemento endurecido ha sido completamente carbonatado se genera un pH menor de 9 [11].

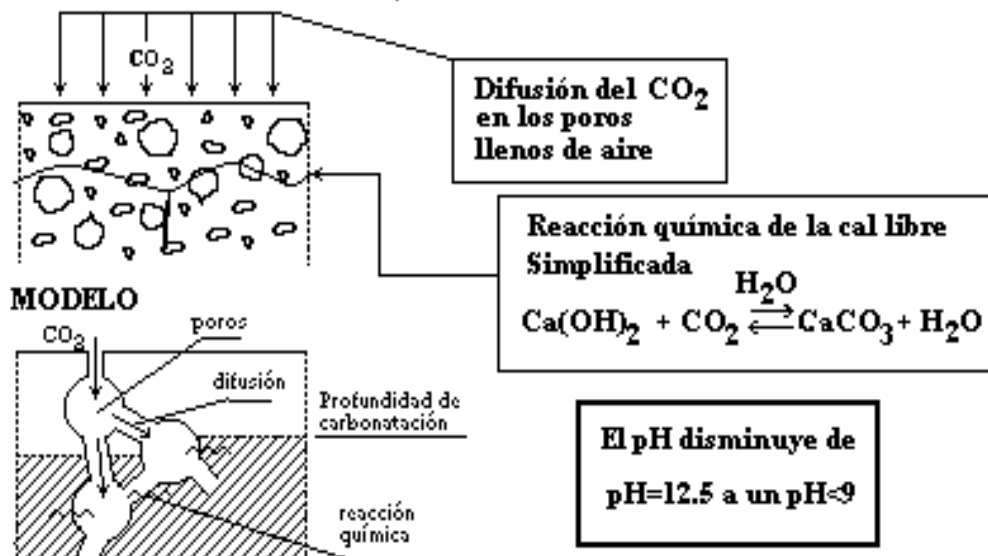


Figura 4. Proceso de carbonatación [2].

Cloruros

Otro factor capaz de desencadenar la corrosión es la presencia de iones despasivantes en cantidad suficiente para romper localmente las películas de óxido submicroscópicas y continuas, a las cuales se le atribuye la pasivación, desencadenando así la corrosión localizada en forma de picaduras [11]. Esta posibilidad se debe a los cloruros, ya sean añadidos al concreto como aditivos o bien porque los contenga el ambiente y penetren por difusión como en las zonas costeras.

Los cloruros son transportados desde la superficie hasta la armadura a través del agua de la estructura de poros (Figura 5). De esta manera, se forma una celda de corrosión con una zona catódica donde se da el proceso de reducción y un área anódica pequeña, la picadura donde se disuelve el acero [11]. Así, el anión Cl⁻ genera un ambiente con una alta conductividad iónica que favorece el fenómeno de corrosión en la celda formada.

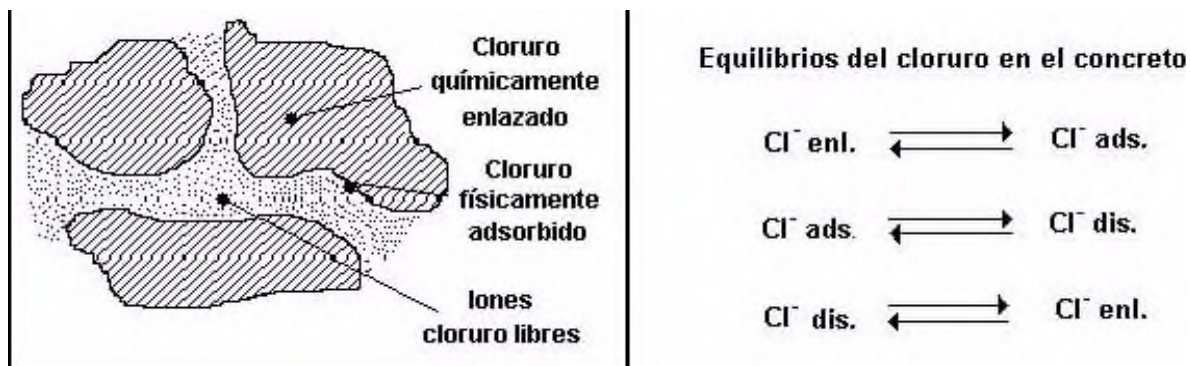


Figura 5. Equilibrios del ión cloruro en el concreto [2].

Clasificación de la corrosión

Existen diferentes tipos de corrosión, y la mayor parte de ellos se pueden presentar en el acero embebido en concreto, de los cuales se tienen los siguientes [12,13]:

Corrosión localizada.

Este ataque actúa solamente en pequeñas áreas anódicas de superficie induciendo la disolución severa hacia el interior de la estructura. Este fenómeno ocurre mucho más rápido que la corrosión generalizada por lo que puede ser más peligrosa ya que puede conducir al fallo prematuro de una pieza.

Corrosión por picaduras.

Es un tipo de corrosión localizada en la cual el ataque se manifiesta en forma de picaduras estrechas y profundas. Son difíciles de visualizar debido a su pequeño diámetro y comúnmente están recubiertas de productos de corrosión. El mecanismo de ataque consta de un período de iniciación de la picadura debido a heterogeneidades, algún daño metálico, o a diferencias de composición en la solución, etc. Una vez iniciada la picadura, se forma una zona anódica en la parte del metal desnudo y como cátodo el metal pasivo, generándose una diferencia de potencial muy grande (Figura 6).

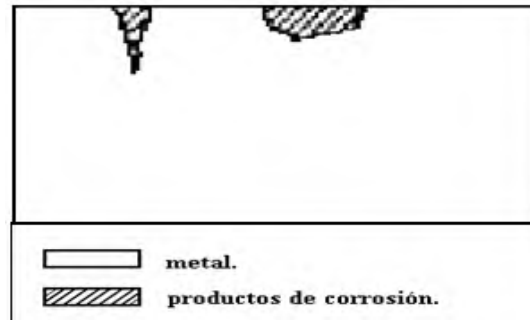


Figura 6. Corrosión por picadura de varilla de acero embebida en concreto [13].

Corrosión en hendiduras.

Se presenta en uniones de piezas metálicas, en rendijas, debajo de arandelas, tuercas o remaches, en juntas solapadas o debajo de depósitos (óxidos o impurezas) u objetos localizados sobre la superficie metálica. Es, en cierta medida, otra forma de corrosión localizada que ocurre generalmente cuando en la unión de los materiales existen espacios vacíos a los cuales no puede llegar el oxígeno. Este tipo de corrosión puede presentarse en el concreto armado cuando existen grietas formadas por la expansión de productos de corrosión que son rellenadas con selladores de fisuras, que limitan el acceso del oxígeno al fondo de la grieta como se observa en la Figura 7.

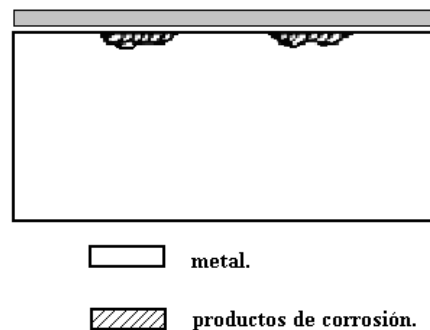


Figura 7. Corrosión en hendiduras [13].

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 ocurra corrosión por corrientes de interferencia debe existir un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico. La corriente continua es la que tiene el efecto más pronunciado sobre la corrosión, ya que ésta fluye continuamente en un solo sentido. Por el contrario, la corriente alterna, que invierte su dirección alrededor de una centena de veces por segundo, puede causar un efecto mucho menos marcado.

Corrosión uniforme

Este tipo de corrosión se puede dar cuando el ataque se extiende casi por igual sobre la superficie. Ejemplos de este tipo se pueden apreciar cuando se exponen piezas de acero en soluciones diluidas ácidas o expuestas a agentes atmosféricos normales, (Figura 8).

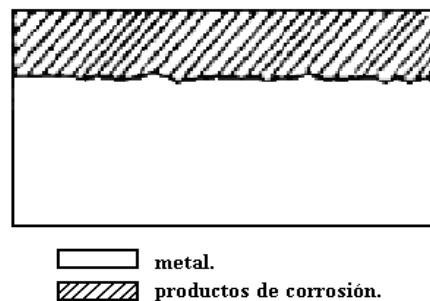


Figura 8. Corrosión uniforme [13].

En el tema de la construcción, este tipo de corrosión se presenta comúnmente en los marcos de estructuras metálicas. Sin embargo, es también común cuando la capa pasiva del acero de refuerzo ha sido destruida como resultado de la carbonatación del concreto o cuando hay suficiente cantidad de cloruros a lo largo de la barra de acero.

Corrosión galvánica

Este tipo de corrosión se puede dar cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico. En el caso del acero en el concreto, esta situación se dará cada vez que en alguna zona se dañe o no se forme la película pasiva característica. Esta zona actuará como un ánodo frente al resto del material, donde permanece la pasivación, el cual actuará como cátodo. También se podría presentar cuando el refuerzo se encuentra en contacto con otros conductores más nobles (Figura 9). En general, se asocia al funcionamiento de una macrocelda. Un ejemplo típico es el caso de armaduras exteriores que se corroen al ingresar los cloruros, mientras que las armaduras interiores permanecen pasivas [14].

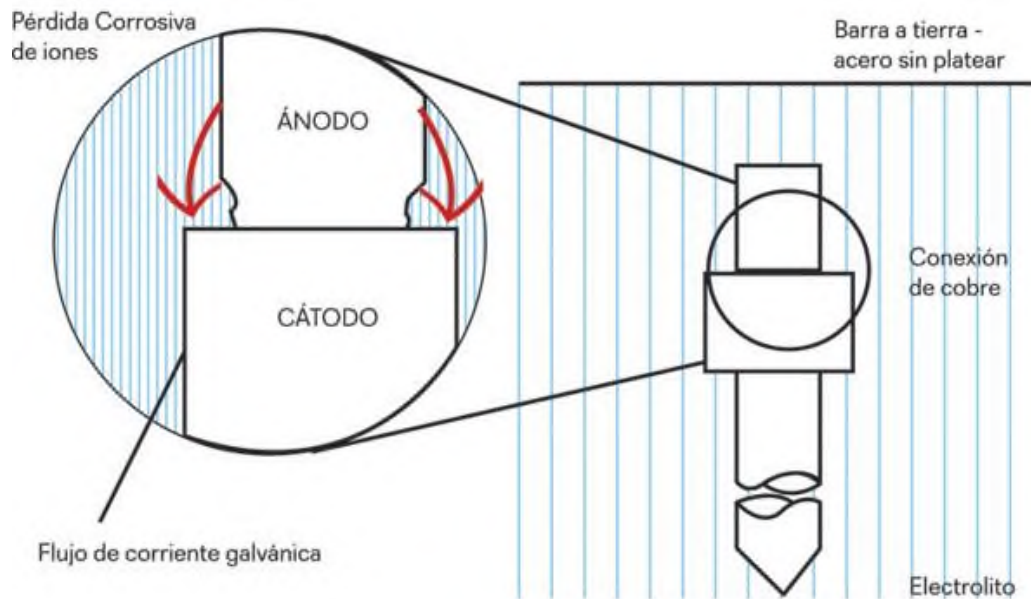


Figura 9. Corrosión galvánica [22]

FUNDAMENTOS DE LAS TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

Componentes de una celda electroquímica

Electrodo de trabajo: electrodo que está siendo investigado; no se trata de un ánodo, también se puede investigar el comportamiento catódico.

Contraelectrodo (Electrodo auxiliar): permite el paso de corriente a través de la interfase que se investiga; materiales no contaminantes: carbón, titanio.

Electrodo de referencia: proporciona una referencia fija de potencial frente a la que medimos el potencial del electrodo de trabajo. El más conveniente es el Electrodo de Calomelanos Saturado (ECS, SCE).

Circuito externo: Instrumento medidor de la corriente (μA). Instrumento medidor del potencial (no debe dejar pasar corriente durante la medición).

Fuente de potencial (potenciostato): aplica potenciales determinados al electrodo de trabajo: se deja pasar una cierta corriente a través del contraelectrodo para fijar la diferencia de potencial trabajo-referencia [24].

El uso de técnicas electroquímicas ha sido una herramienta importante en el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto mediante el análisis de respuestas del sistema a señales eléctricas (potencial y corriente). La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, además de ser pruebas no destructivas. En este trabajo se realizaron pruebas de Ruido electroquímica (RE), Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) y Resistencia a la Polarización Lineal (RPL); que consisten en la aplicación de señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien la aplicación de señales de corriente y el registro de la respuesta en potencial, cada una de ellas aporta información acerca de las condiciones de la interfase acero-concreto y con ello del grado de corrosión que se presente en la armadura.

A continuación se presenta un resumen de las técnicas electroquímicas empleadas en este trabajo.

Ruido Electroquímico (RE)

Consiste en el registro de fluctuaciones tanto en potencial como en corriente que puede existir entre electrodos, lo más común es emplear dos

electrodos idénticos para las señales en corriente y un electrodo de trabajo con uno de referencia para las señales en potencial. El ruido electroquímico puede clasificarse en dos tipos: el primero, ruido en potencial, que como su nombre lo indica corresponde a las fluctuaciones de potencial y el segundo, ruido en corriente que son las fluctuaciones en corriente.

Cuando se ejerce un control potencioestático solo es posible realizar ruido en corriente y cuando el control es galvanostático solo se puede determinar el ruido en potencial. En condiciones de circuito abierto se pueden obtener ambos tipos de ruido y la combinación de ambos ha dado excelentes resultados para el seguimiento y control de la corrosión uniforme. A pesar de que en general se acepta que el ruido electroquímico contiene información útil acerca de los procesos electroquímicos, no existe un consenso sobre el mejor método para extraer la información. Esto se debe a que el mejor método varía de acuerdo con el tipo de proceso bajo estudio, aunque también es un área donde se requiere mayor desarrollo [8].

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)

La técnica de EIE, 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) y determinando la respuesta en corriente [15].

En el procedimiento experimental más comunmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial-tiempo y corriente-tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancia” [15].

El uso de la técnica de impedancia puede proporcionar información de los parámetros de un sistema de corrosión [15]:

- Resistencia de la disolución y/o del electrolito, R_s
- Resistencia a la transferencia de carga, R_p , frecuentemente llamada resistencia a la polarización, la cual se utiliza para calcular la velocidad de corrosión.
- Impedancia de Warburg, proporciona información sobre los procesos controlados por difusión.
- Capacitancia de la doble capa eléctrica, C_{dl} , la cual proporciona información sobre las propiedades de la capa dieléctrica y películas. (dl en la C significa double layer, traducido al español es doble capa)

Debido a la complejidad matemática que implica la técnica de EIE, se han desarrollado simuladores, los cuales están basados en circuitos electrónicos equivalentes, que explican el comportamiento de la interfase electrodo-electrolito

Para modelar un proceso de corrosión electroquímico se pueden usar un circuito electrónico equivalente. La reacción de corrosión puede simularse por una o más resistencias, y la doble capa electroquímica puede simularse por una combinación de resistencias y capacitores.

Análisis de resultados

El análisis de la información generada por la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica depende, como en la mayoría de las técnicas electroquímicas, del tipo de información que el usuario requiera. Dos tipos de análisis pueden considerarse [16]:

- a) Gráfico, a través de los diagramas de Nyquist.

- b) Ajuste de los datos obtenidos, a la respuesta de circuitos electrónicos equivalentes.

Circuitos electrónicos equivalentes para procesos de corrosión.

Un circuito equivalente es una combinación de elementos pasivos, (resistencias, capacitancias, inductores y otras formas de impedancias distribuidas) que dan la misma respuesta, a toda frecuencia, de una celda de corrosión [16].

Cuando el análisis de los datos de EIE se realiza mediante un ajuste de los datos experimentales a un circuito electrónico equivalente, se obtiene valores de diferentes parámetros eléctricos. Estos valores son utilizados para obtener información, tanto de velocidades de corrosión como de mecanismos de corrosión [16].

El número de circuitos equivalentes que pueden cumplir el comportamiento de una celda de corrosión es prácticamente infinito. No obstante, existe una condición esencial para la selección de un circuito equivalente: tanto los componentes del circuito, como el circuito electrónico en sí mismo, deben tener explicación física. Esto es de particular importancia ya que usualmente pueden existir varios circuitos equivalentes que describen con la misma exactitud los datos experimentales. En este caso se usó el circuito eléctrico que se muestra a continuación, Figura 10.

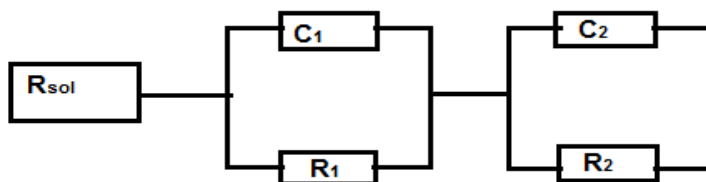


Figura 10. Circuito eléctrico equivalente propuesto para describir los espectros de impedancia asociados al proceso de corrosión.

A fin de ajustar espectros de EIE a un circuito electrónico equivalente, suelen utilizarse “elementos de fase constante” (CPE, por sus siglas en inglés). Un elemento de fase constante es, en realidad, una expresión matemática que representa varios componentes. La Figura 11 muestra los espectros de EIE, calculados para un circuito en paralelo (CPE y R) y en serie con R_{sol} , en este caso se considera un CPE en lugar de un capacitor [16].

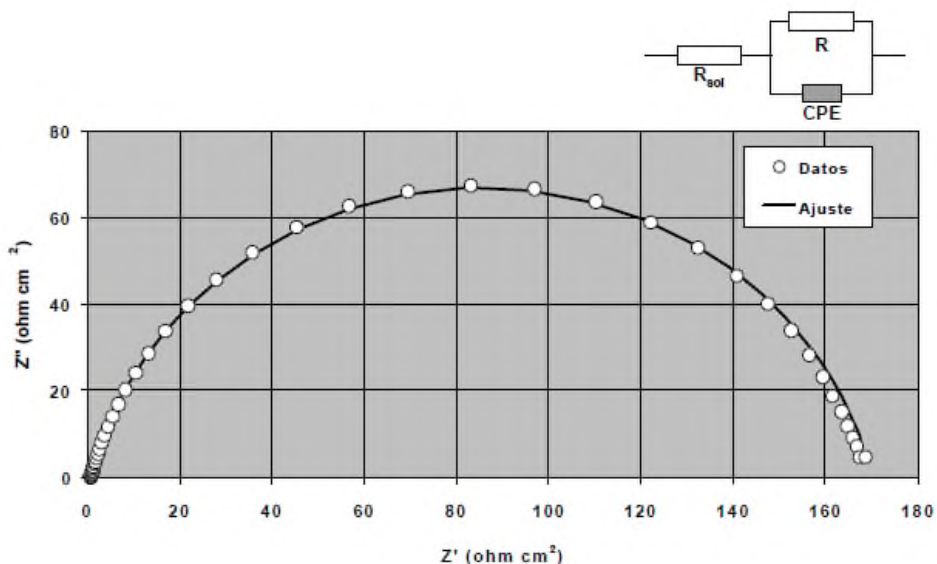


Figura 11. Espectro de impedancia , representación de Nyquist y, ajuste de los datos a un circuito electrónico equivalente en paralelo (R y CPE) y en serie con R_{sol} [16].

Resistencia a la Polarización (R_p)

La resistencia a la polarización (R_p) o polarización lineal es una técnica electroquímica que se aplica solamente cuando exista un control activacional o por transferencia de carga. Los materiales que son susceptibles de ser evaluados mediante la aplicación de R_p deben estar en electrólitos conductores, es decir, que la resistividad de las soluciones no sea alta [17]. En esta técnica la aplicación de una de corriente externa desplazará el potencial del E_{corr} inicial. Esto se conoce como polarización. Si la polarización está entre ± 10 a ± 25 mV del E_{corr} , el potencial cambia, proporcional a la corriente aplicada, una curva típica se muestra

en la Figura 12, en la cual la línea de puntos indica la pendiente y, el valor de la resistencia es de 922,5 Ohmios.

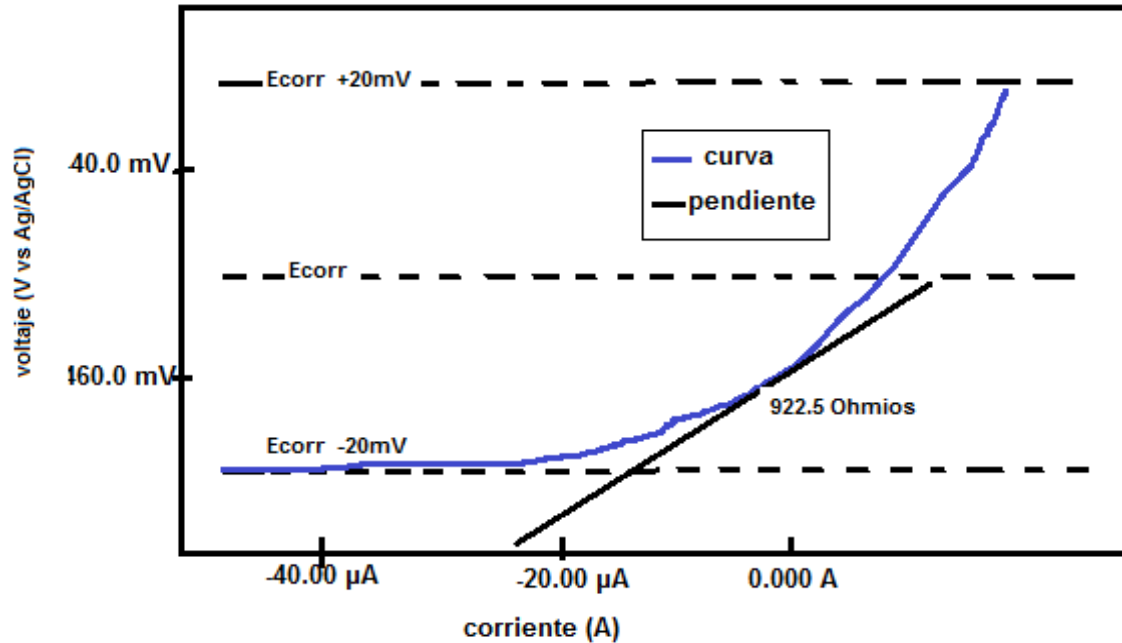


Figura 12. Curva típica de resistencia a la polarización lineal en concreto.

La pendiente obtenida en un punto de corriente cero de la curva, indica el valor de la resistencia R_p (ohmios), este valor corresponde a la resistencia que tiene la interfase acero-concreto [18].

$$\frac{\Delta E}{\Delta i}_{i=0} = R_p \quad \text{ó} \quad I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (1)$$

Donde:

i = Densidad de corriente aplicada (μA)

I_{corr} = Relación de corriente de corrosión ($\mu A/cm^2$)

R_p = Resistencia a la polarización ($\Omega \cdot cm^2$)

B = Constante, típicamente el valor es de 26 mV

El continuo monitoreo de la corrosión está basado principalmente en mediciones electroquímicas del potencial de corrosión (E_{corr}) y de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}). La primera está relacionada con la probabilidad de que el acero de refuerzo sufra corrosión activa, y la segunda proporciona información relacionada con la cinética del fenómeno (velocidad de corrosión) [8].

Potencial de Corrosión (E_{corr})

Cuando el acero se corroe en el concreto, existe sobre el acero una diferencia de potencial entre las áreas de media celda anódica y las áreas de media celda catódica. El potencial de corrosión de media celda puede medirse por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido [8].

Velocidad de Corrosión (i_{corr})

Se llama velocidad de corrosión (i_{corr}) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm^2 día; aunque la forma usual es definirla a partir de medidas de tipo electroquímico transformando ese dato a partir de la densidad del metal, en unidades de penetración en mm/año [8].

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El trabajo que se presenta consiste en la exposición de probetas de concreto adicionado con celulosa hidrofóbica y CBCA, reforzado con alambrcn de acero NMX-B-365 de 6.3 mm de diámetro y una longitud de 12 cm, exponiéndolos a un proceso de curado que tiene como finalidad facilitar las reacciones de hidratación del cemento y por ende saturar los espacios o poros resultantes del proceso natural de fabricación. El curado de las probetas se llevó a cabo en una solución saturada de hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y tuvo una duración de veintiocho días, "tiempo de curado". Posteriormente estas mismas probetas fueron sometidas a solución de NaCl 3% durante 3 meses.

Durante el tiempo de exposición de estas probetas se llevaron a cabo mediciones de potencial de corrosión en la interfase acero-concreto con un Potenciostato ACM Instruments Field Machine serial 914 para la primera exposición [solución $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado] y para la segunda exposición [NaCl 3%] se usó un potenciostato/galvanostato AUTOLAB 302N, en ambos casos usando un electrodo de calomel ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$) como referencia para conocer el estado electroquímico de la varilla de acero y un contraelectrodo de grafito. A cada probeta de ensayo se le realizan 3 mediciones (RE, EIE, LRP). Al final de la exposición se caracterizaron.



Figura 13. Potenciostato/Galvanostato ACM Instruments Field Machine serial 914.



Figura 14. Potenciostato/galvanostato AUTOLAB 302N



Figura 15. Espectrofotometro de infrarrojo, spectrum 100 Perkin-Elmer.

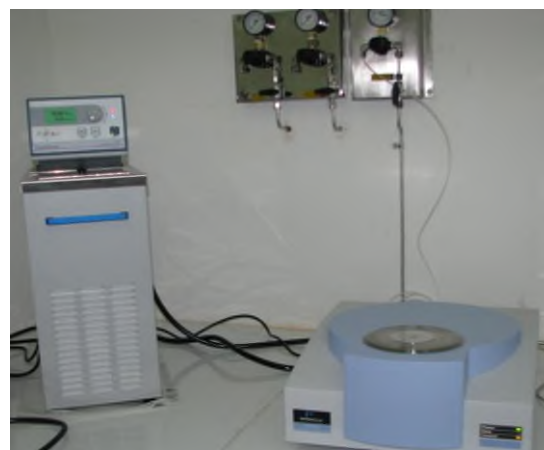


Figura 16. Analizador térmico simultaneo, STA 6000, Perkin-Elmer.



Figura 17. Difractómetro de rayos X, D8 ADVANCE BRUKER.



Figura 18. Microscópio electrónico de barrido JEOL JSM-7600F de MICRONA-UV.

Preparación de celulosa residual

La celulosa residual de la empresa Bioppapel de San Juan Bautista Tuxtepec, se coloca en charolas y se seca con la luz del sol. Una vez seca, se corta en trozos y se muele en una licuadora industrial de 12 litros, con el fin de obtener trozos más pequeños. Se tamiza a través de una malla de no. 50 para obtener polvo de 300 micras.

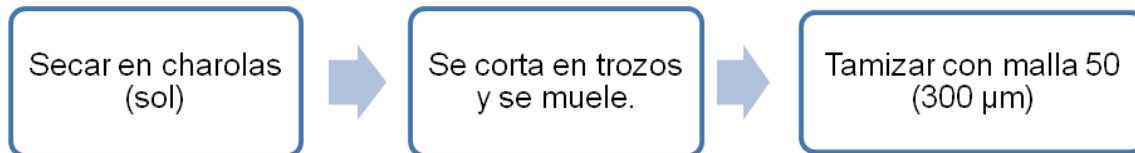


Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de celulosa.



Figura 20. Preparación de la celulosa residual.

Preparación de celulosa hidrofóbica

Se pesó 500 g de celulosa (polvo 300 micras) y se colocó en la licuadora industrial, se puso a reaccionar con 175 ml de HCl 38% diluido en 3 litros de agua. Se agitó en 5 etapas (cada etapa tenía una duración de 1 minuto), se le agregó otros 3 litros de agua en la licuadora. Se pasó a las mallas y sobre estas se le adicionó 1 litro de agua aproximadamente a cada una y se dejó escurrir completamente. Una vez obtenido el pH de 6, se pasó a la licuadora y se le

adicionó 750 ml de acetona, se agitó en 5 etapas (cada etapa tenía una duración de 1 minuto), se pasaron a los refractarios y se metió a secar en el horno con temperatura de 70°C por 12 horas. Una vez seco, se volvió a moler y se obtiene la celulosa hidrofóbica (CAG). El proceso de conversión a celulosa hidrofóbica considera el método de intercambio de solvente, para mas detalles ver referencias [19-20].

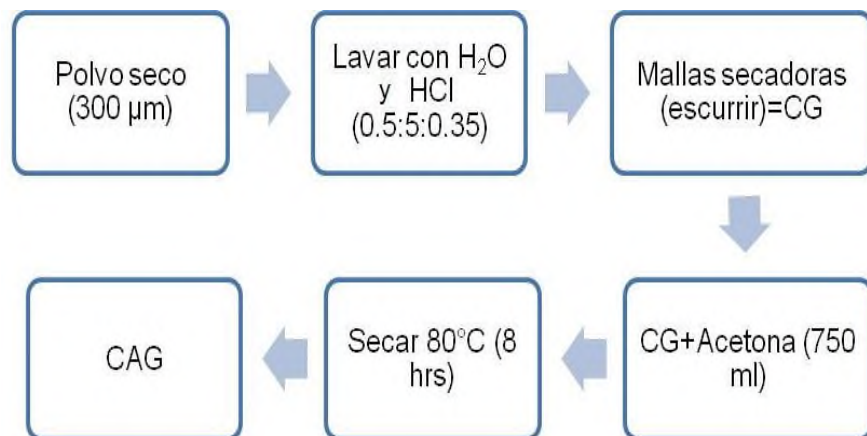


Figura 21. Diagrama de flujo de preparación de celulosa hidrofóbica.

Preparación de la ceniza hidrofóbica

La ceniza de caña de azúcar del Ingenio Adolfo López Mateos de San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., se introduce al horno a una temperatura de 100 °C por 8 horas para eliminar la humedad y obtener un polvo seco, se tamiza con la malla 50 para obtener polvo de 300 micras. Una vez obtenido el tamaño adecuado se le adiciona acetona (1:4) para formar ceniza hidrofóbica (AG).

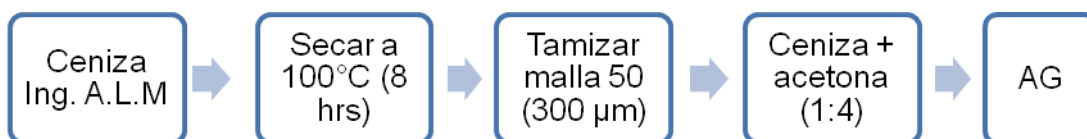


Figura 22. Diagrama de flujo de preparación de ceniza hidrofóbica.

Composito de ceniza hidrofóbica y celulosa hidrofóbica

Se prepara en proporción **1:0.25:3.5 CAG, AG y acetona** respectivamente; se seca a 60°C, una vez seca se muele para obtener partículas de escala micro.

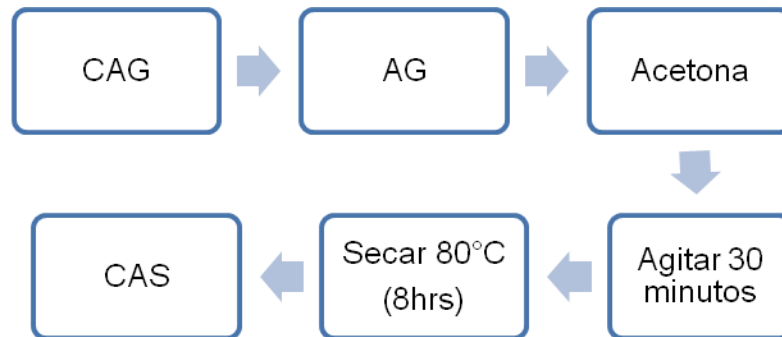


Figura 23. Preparación de composito de ceniza hidrofóbica + celulosa hidrofóbica.

Tabla 1. Descripción de la composición de las 5 probetas de ensayo.

Probeta 1= Blanco: cemento, arena y agua
Probeta 2= GC0: celulosa sin previo tratamiento (lodo), cemento, agua y arena.
Probeta 3= GC1: CAG, cemento, arena y agua
Probeta 4= GC2: CAS, cemento, arena y agua
Probeta 5= GC4: CAS, adhetop, cemento, arena y agua.

Tabla 2. Componentes de cada una de las probetas de ensayo.

	Cemento	Celulosa residual	CAG	CAS	CAS + Adhetop	Arena	Agua
Blanco	100 g	.....	.....	.....	.....	150 g	60 ml
GC0	95 g	5 g	.....	.....	.....	150 g	65 ml
GC1	95 g	.....	5 g	.....	.....	150 g	65 ml
GC2	95 g	.....	.....	5 g	.....	150 g	60 ml
GC4	95 g	.....	.....	.....	5 g	150 g	60 ml

Procedimiento del colado de las probetas y pruebas

- Se cortó el alambón a una medida de 12 cm y se lijó con el fin de quitarle la capa de óxido.
- Al alambón se le puso cinta aislante excepto en los 5 cm del área que entró en contacto con la disolución (área activa de 9 cm²).
- El contraelectrodo de grafito, se cortó a la medida del alambón (12 cm).
- Se preparó el molde y la mezcla para el colado.
- En el molde se colocó el alambón (electrodo de trabajo) y el grafito (contraelectrodo), antes de colar.
- Se colaron las probetas.
- Se esperó un tiempo para obtener un buen fraguado, posteriormente se sometieron al proceso de curado por 28 días.
- Se llevaron a cabo las mediciones de las pruebas en disolución aplicándose las técnicas de RE, RPL y EIE con el potenciostato durante los días 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 28.

Se realizaron mediciones cada día para las 5 probetas en cada día del registro de fraguado, en total se hicieron 8 registros, se aplicaron las 3 técnicas electroquímicas. Cada medición fue registrada por duplicado, lo cual da la colección de 48 registros de mediciones electroquímicas. A estos datos se debe sumar los registros de medición de prueba salina, por duplicado, a 90 días de cada una de las probetas.



Figura 24. Mezcla de componentes para la elaboración de probetas.

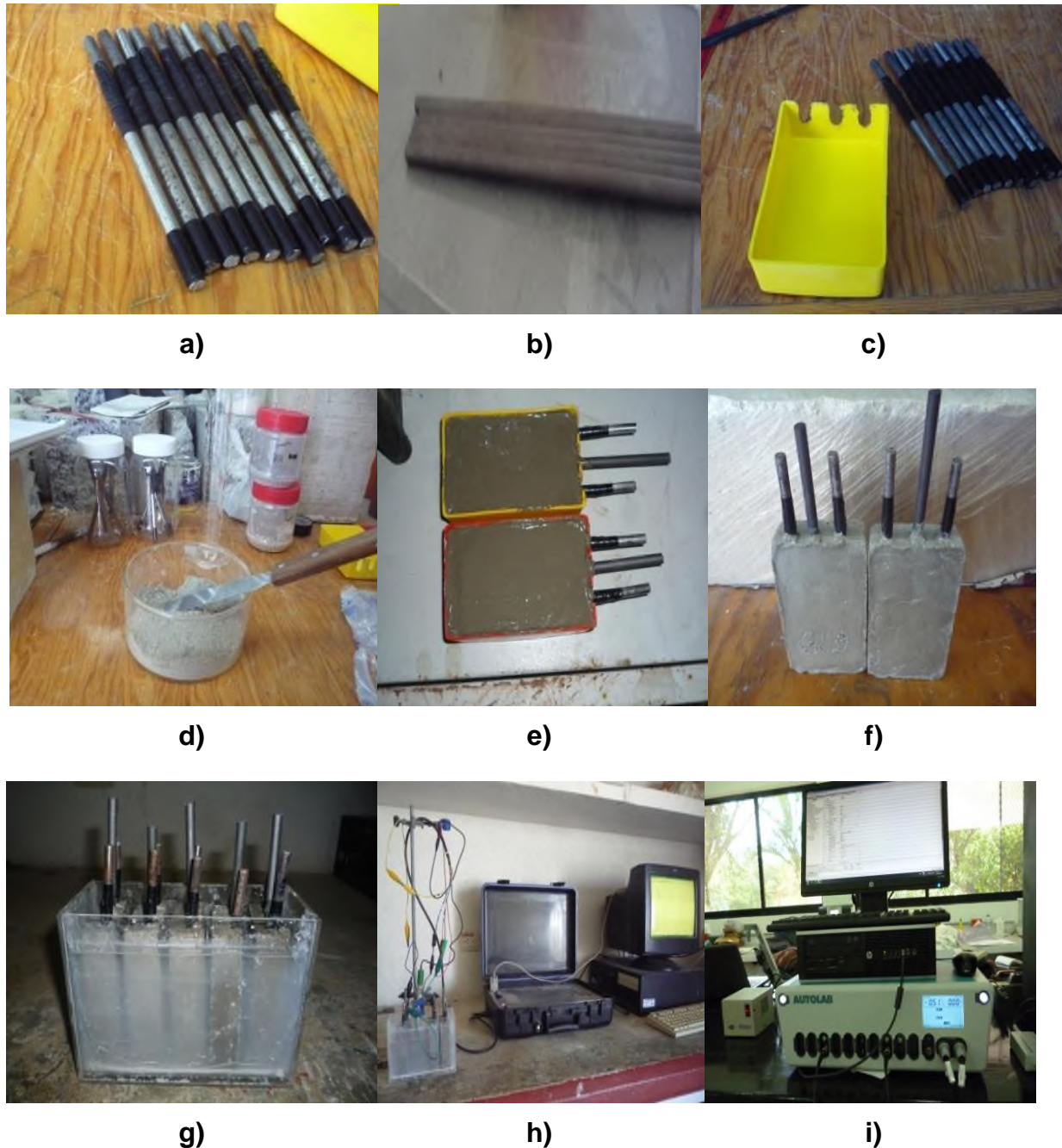


Figura 25. Procedimiento de colado de probetas y mediciones electroquímicas: a) Acero, b) Contraelectrodos de Grafito, c) Molde y acero, d) Mezcla de cemento mas compuesto, e) Colado en moldes, f) Probetas , g) Probetas en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, h) Potenciostato/Galvanostato de campo (cicorr-UAC), i) Potenciostato/Galvanostato (UNPA).

El orden en el que se miden las pruebas electroquímicas es el siguiente:

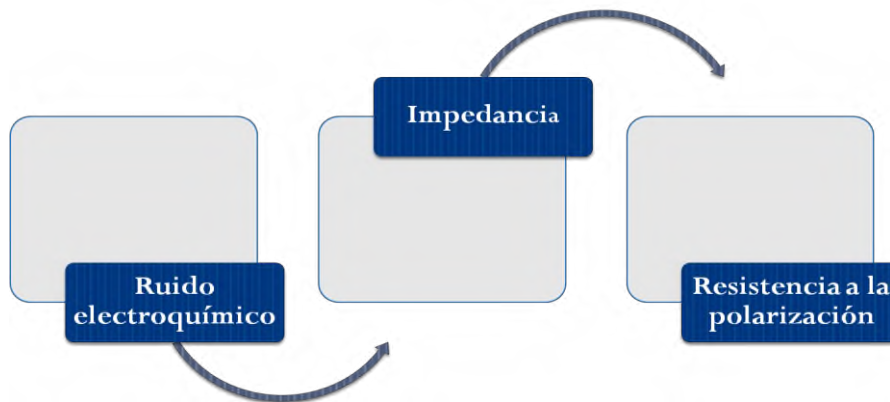


Figura 26. Diagrama de flujo de las técnicas electroquímicas.

Proceso de curado

En 1.5 litros de agua se agrega hidróxido de calcio (cal comercial) hasta saturar la solución, se disuelve completamente hasta obtener la solución color blanca para finalmente introducir las probetas de ensayo durante 28 días.



Figura 27. 24 horas de fraguado.



Figura 28. Proceso de curado.

Exposición de probetas de ensayo en disolución de NaCl 3%

En un litro de agua desionizada se agregan 30 gramos de NaCl (grado reactivo), disolviéndolo completamente hasta obtener la disolución salina. Finalmente las probetas de ensayo se introducen en la disolución durante 90 días y seguir con las mediciones electroquímicas.

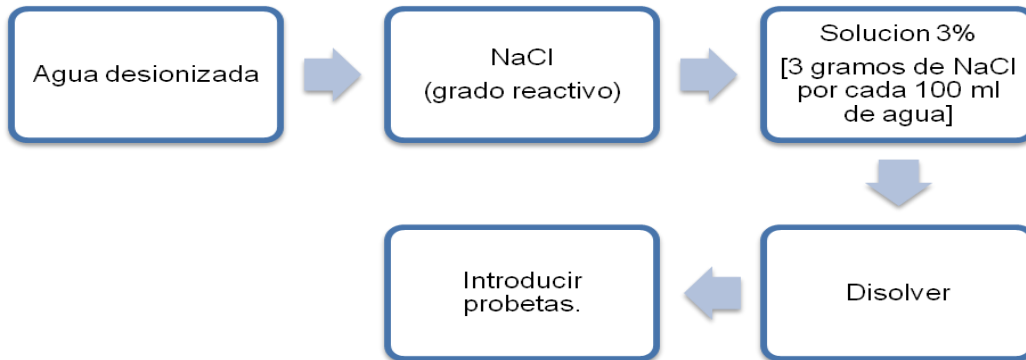


Figura 29. Procedimiento de preparación de celulosa hidrofóbica.

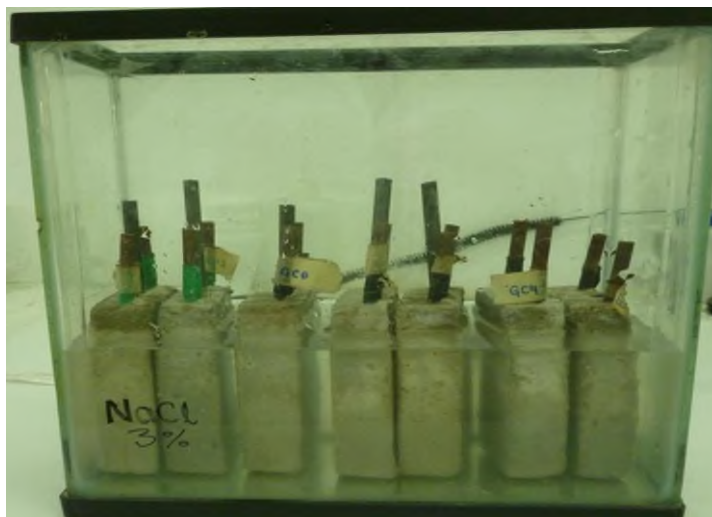


Figura 30. Probetas de ensayo expuestas en solución salina.



Figura 31. Medición electroquímica con el potenciostato/galvanostato.



Ca(OH)₂ saturado



NaCl 3%

Figura 32. Medición electroquímica de las probetas de ensayo.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados de los experimentos de proceso de curado a 28 días, y de exposición a la solución de cloruro de sodio a 90 días, por separado. Las técnicas electroquímicas aplicadas a las muestras de estos experimentos son: RE, EIE, RPL.

PROBETAS EN PROCESO DE CURADO

Ruido electroquímico

El análisis visual de los espectros de ruido electroquímico en función del tiempo suele ser la forma más sencilla y rápida de obtener información del sistema y, a través de este, se puede lograr una valoración cualitativa del estado electroquímico del mismo, de acuerdo a las condiciones de la norma ASTM C876, esto se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Norma ASTM C876

E_{corr} vs SCE (mV)	Probabilidad de corrosión
<-270	>90% que se presente
-120 a -270	Zona incierta
>-120	10% que se presente

El potencial electroquímico es un parámetro muy importante desde el punto de vista termodinámico, ya que permite conocer qué metal se comporta como ánodo y cuál como cátodo. Las zonas que actúan cátodo presentan un potencial más positivo y las que actúan ánodo muestran un potencial más negativo.

La medición del potencial es sensible a cambios que acontezcan en un proceso de corrosión. Un cambio brusco puede indicar el paso de un estado activo a condiciones de pasividad y viceversa. Así mismo, adquiere valores característicos para diferentes situaciones de temperatura, agitación, movimientos etc.

Proceso de curado (solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado) por 28 días

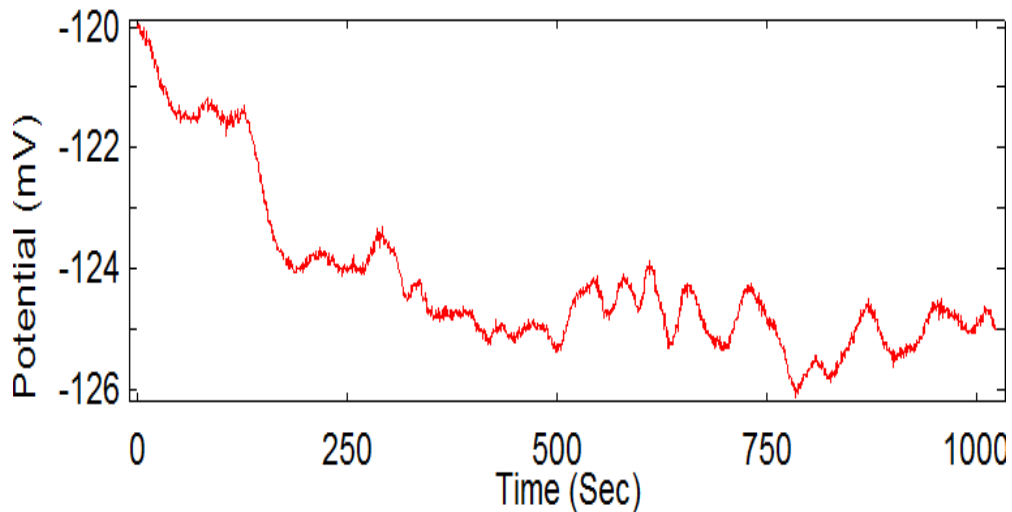


Figura 33. Serie de potencial-tiempo de la probeta 1 (blanco) en el día 28.

La Figura 33, muestra la señal de ruido electroquímico para el periodo de 28 días, como se observa la señal de potencial tiende a bajar en función de los días de exposición en comparación con la señal del día 1 que se encuentra en anexo. De acuerdo a la norma ASTM C876 el material se encuentra en una zona incierta.

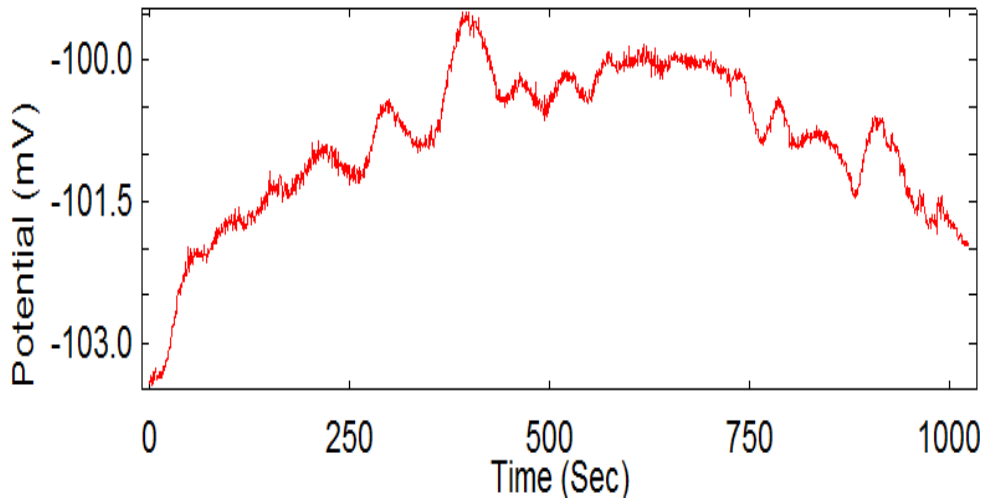


Figura 34. Serie de potencial-tiempo de la probeta 2 (GC0) en el día 28.

De acuerdo a la señal que se observa en la Figura 34 y a la norma ASTM C876 la probabilidad que se presente la corrosión es del 10 %.

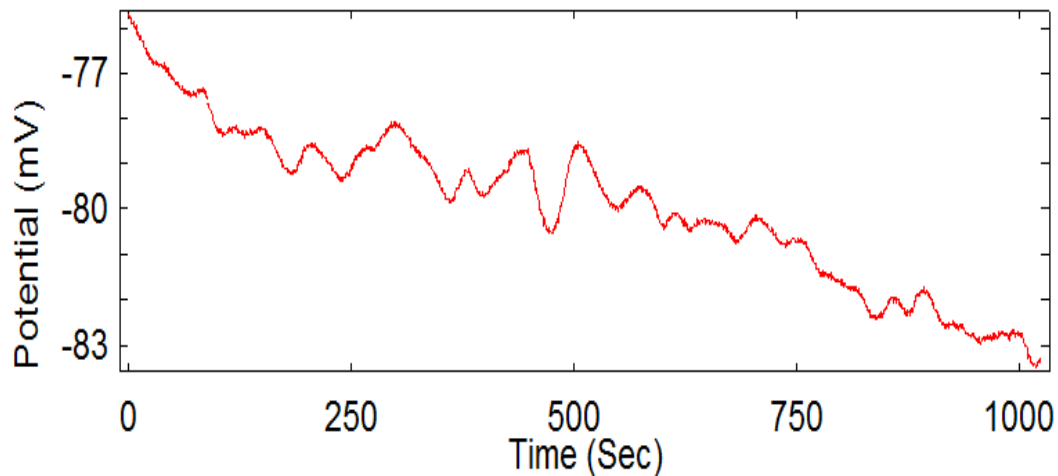


Figura 35. Serie de potencial-tiempo de la probeta 3 (GC1) en el día 28.

En la Figura 35, la probabilidad que se presente corrosión es del 10% de acuerdo a la norma establecida en la Tabla 3. De las 5 muestras, es el mejor candidato a inhibir la corrosión de la varilla. Este comportamiento deberá ser evaluado a mayor periodo de tiempo para comprobarlo.

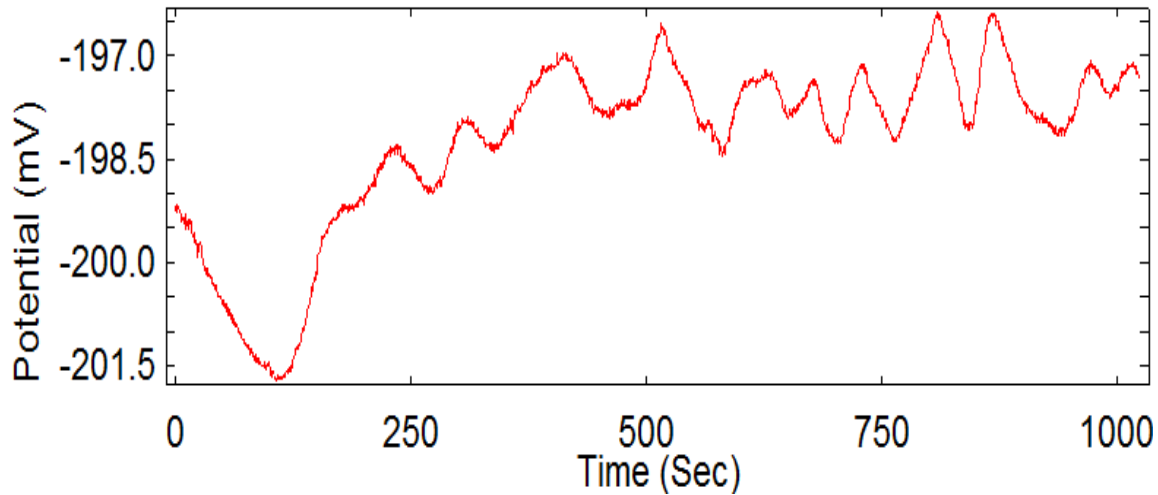


Figura 36. Serie de potencial-tiempo de la probeta 4 (GC2) en el día 28.

Interpretando la señal de la Figura 36 de acuerdo a la norma ASTM C876 vemos que el material se encuentra en zona incierta hasta ese momento.

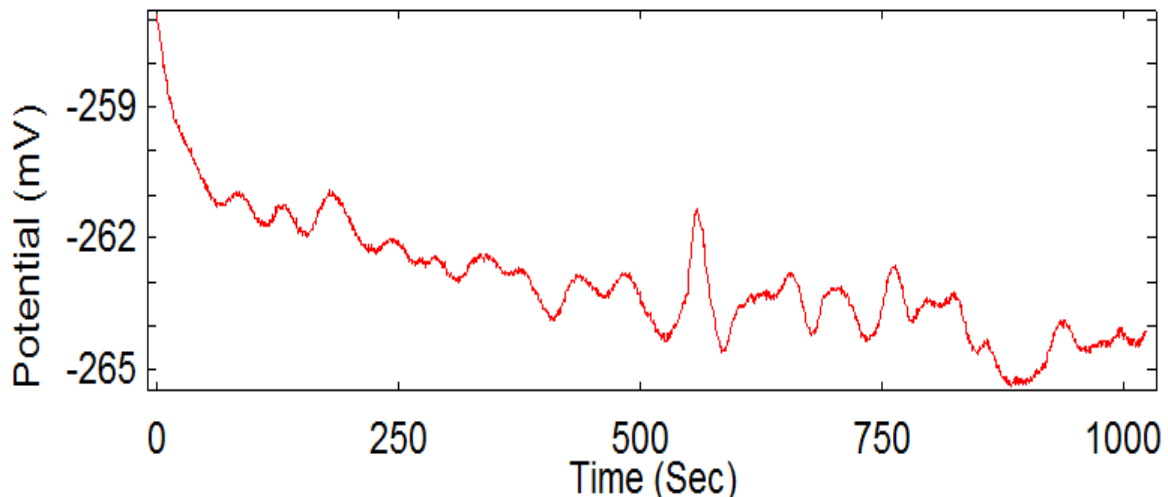


Figura 37. Serie de potencial-tiempo de la probeta 5 (GC4) en el día 28.

En la Figura 37, la señal de corriente que muestra el gráfico y de acuerdo a la norma ASTM C876 indican que el material presenta zona incierta también.

Para las 5 probetas los índices de potenciales observados tienen una gran variabilidad en la densidad de potencial por lo que no proporcionan una tendencia que indique en qué condiciones físicas o químicas se encuentra el acero de refuerzo. Este comportamiento es provocado probablemente por la

heterogeneidad en el tamaño de las partículas contenidas en la pasta de concreto que tiene contacto con la superficie de la varilla, tal como se observo por microscopia electrónica de barrido.

De acuerdo a las condiciones de la norma ASTM C876, las probetas que presentan baja probabilidad de corrosión son GC0 y GC1, Figura 34 y 35, debido a que hasta 28 días de exposición ambas probetas muestran una densidad de potencial mayor que el resto de las probetas. Mientras tanto el blanco, GC2 y GC4 presentan zona

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.

Se realizaron medidas de impedancia para las probetas de ensayo, para ellos se hicieron los espectros, los cuales fueron ajustados en función de un circuito equivalente como se muestra en la Figura 10. En la Figura 11, se muestran los datos de un espectro de impedancia, en representación de Nyquist obtenidos experimentalmente para un acero al carbón inmerso en ácido clorhídrico 0.5M. En esta misma figura se muestra el ajuste de los datos a un circuito eléctrico equivalente serie paralelo que considera un CPE (en lugar de un capacitor).

Las medidas de corriente de corrosión, se puede apreciar en la Figura 38. De manera general, existe diferencia en la densidad de corriente máxima entre el blanco, concreto típico, y las muestras que contienen composito sustituto de cemento, GC0, GC1 y GC4, ya que en estas últimas se presentan 2 máximos de densidad, al contrario del blanco que sólo muestra un máximo.

La probeta GC2 muestra un comportamiento semejante al blanco, pues sólo presenta un máximo de corriente de corrosión. La probeta del blanco alcanza la estabilización al término de 20 días de fraguado, alcanzando un nivel de corriente semejante al del inicio de la reacción de hidratación. En cambio la probeta de GC2 alcanza a los 18 días un nivel pseudo-estabilizado que es de mayor nivel de corriente que el inicial; los días subsecuentes la densidad de corriente de corrosión va aumentando progresivamente pero muy discretamente.

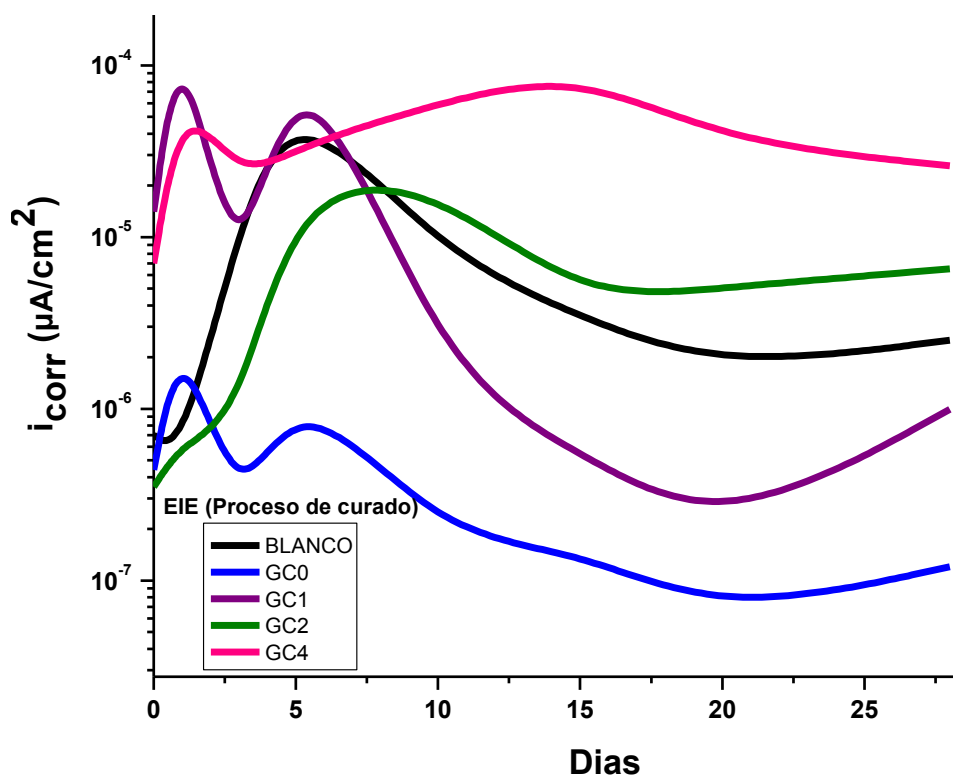


Figura 38. Corriente de corrosión (i_{corr}) de las 5 probetas durante los 28 días del proceso de curado obtenida por impedancia.

Comparando estos resultados, se puede decir que la intensidad de corriente de GC1 es la máxima observada entre todas las probetas, por lo tanto mientras mayor es la corriente de corrosión de la muestra mayor es la corriente de corrosión de la varilla embebida en ese concreto. En cambio la probeta de GC2 muestra corriente de corrosión por debajo de la intensidad mostrada por el blanco, indicando la baja probabilidad de corrosión de esa varilla embebida. Se puede observar que la probeta de GC0 es la de menor intensidad entre todas las muestras, por lo que se presenta como el mejor candidato a inhibir la corrosión de la varilla. Este comportamiento deberá ser evaluado a mayor periodo de tiempo para comprobarlo.

Dado que el aumento de la corriente de corrosión se relaciona con una menor conductividad y esto facilitaría el proceso de corrosión, entonces a mayores valores de densidad de corriente la corrosión puede ser mayor.

Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

Como se puede ver en la Figura 12 una curva típica de RPL muestra como la corriente incrementa con el potencial, estos experimentos se hicieron así para todos los tratamientos en este trabajo. De cada experimento se calculó la corriente de corrosión para comparar con el valor obtenido por medio de EIE.

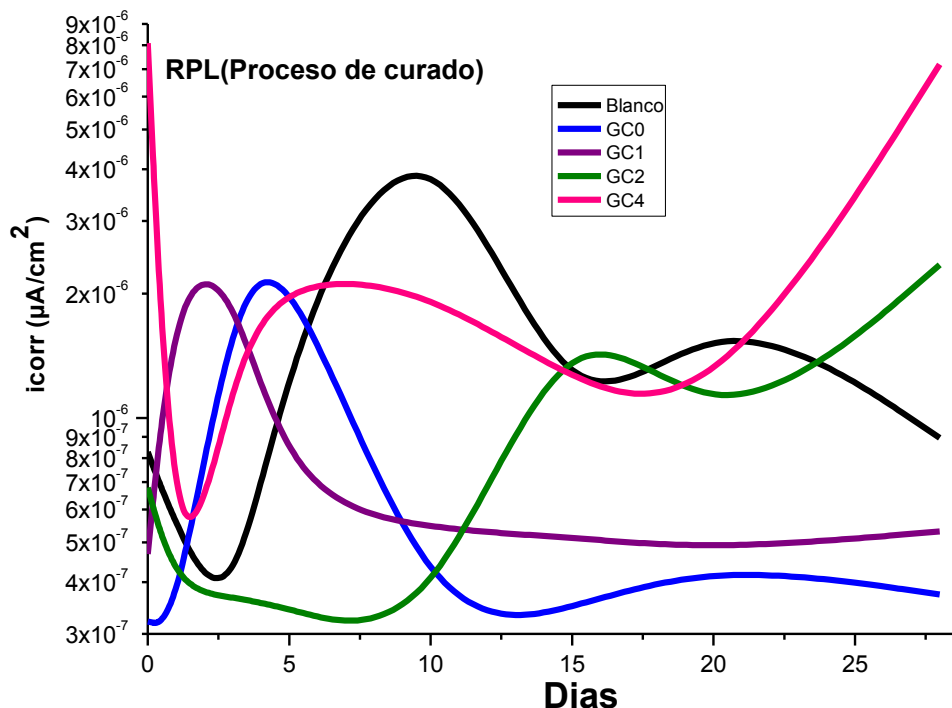


Figura 39. Corriente de corrosión (i_{corr}) de las 5 probetas durante los 28 días del proceso de curado medida determinada por RPL.

En la Figura 39 se muestran las corriente de corrosión (i_{corr}) de cada probeta de ensayo en la mayoría de los casos la densidad de corriente disminuye a los 10 días de tratamiento, esto comparado con el blanco y comienza a disminuir más conforme aumenta el tiempo, esto nos habla que la probabilidad que se presente corrosión es menor. Los datos obtenidos con esta técnica muestran la misma tendencia respecto a los valores obtenidos con EIE, aunque la técnica de EIE muestra mayor sensibilidad al proceso de corrosión ya que los valores de corriente son mayores.

PROBETAS EN SOLUCIÓN SALINA POR 90 DIAS

Las probetas que se obtuvieron por el proceso de curado se sumergieron en solución de cloruro de sodio, 3% (reactivo analítico). Se midió la respuesta a EIE y su señal de RPL durante 90 días de exposición utilizando un potenciostato/galvanostato Autolab 302N para coleccionar dichas mediciones.

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE)

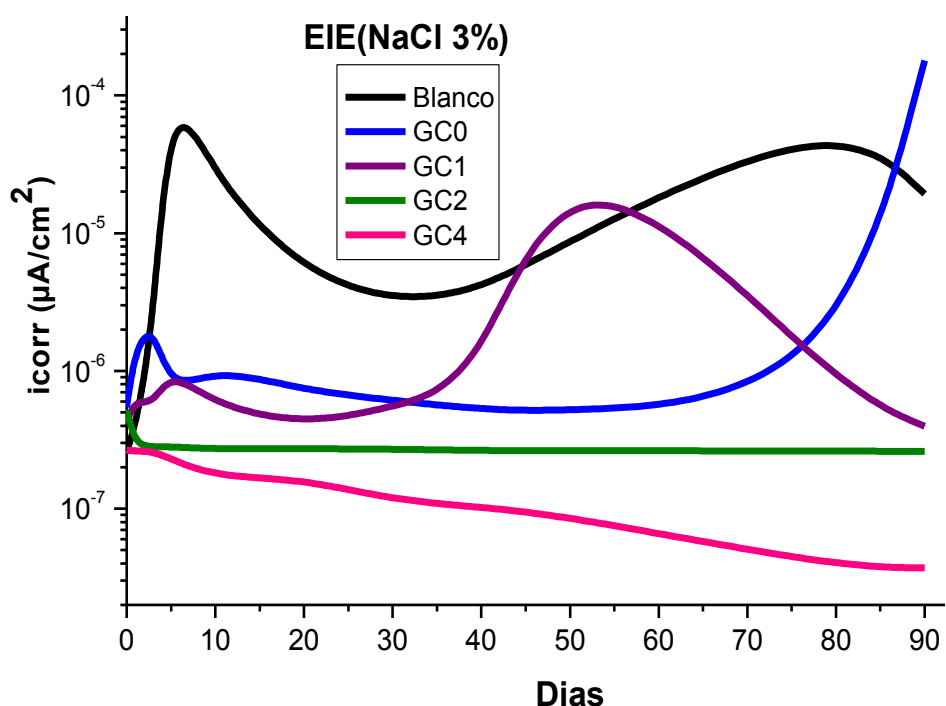


Figura 40. Corriente de corrosión (i_{corr}) de las 5 probetas durante 90 días de exposición en NaCl 3%, determinada por EIE.

La Figura 40 muestra los resultados de exposición de las probetas medidos por EIE y posteriormente evaluadas sus corrientes de corrosión. Podemos observar la relación entre la corriente de corrosión y el tiempo, así las probetas GC2 y GC4 presentan un comportamiento continuo con una tendencia al valor de cero de corriente; se puede decir que la corrosión es despreciable mientras que en el resto de las probetas empieza un proceso de despasivación.

Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

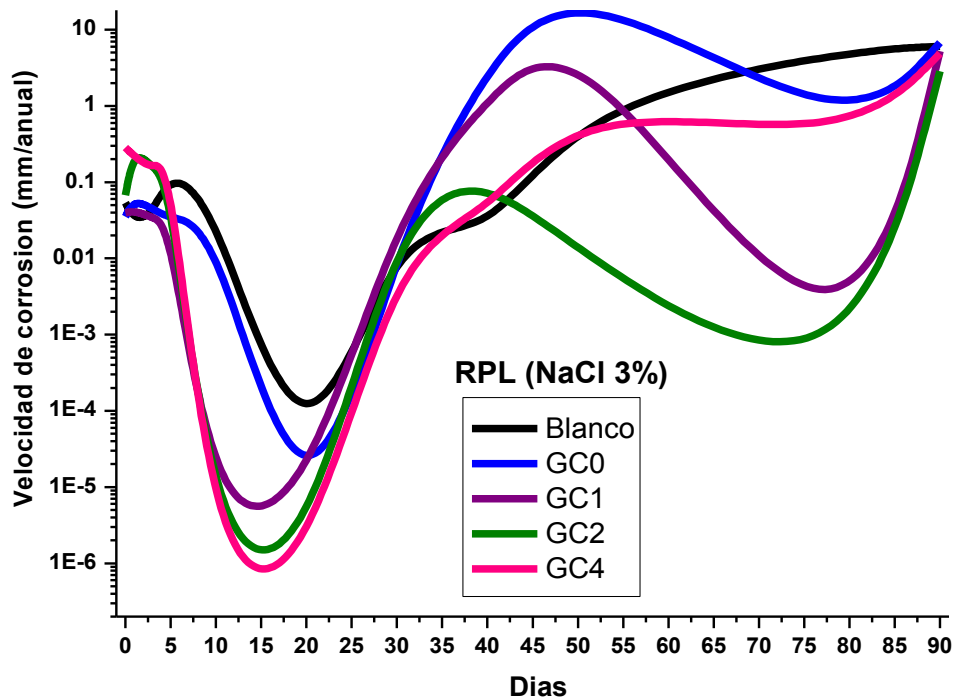


Figura 41. Velocidad de corrosión (mm/año) de las 5 probetas de ensayo.

En la Figura 41 de acuerdo a la RPL encontramos que la velocidad de corrosión del acero es mayor en las probetas GC0 y GC1 pues contiene celulosa (lodo) y celulosa lavada con HCl, respectivamente. Pero GC1 muestra mayor corrosión elevada ya que puede contener remanentes de iones cloruros afectando directamente el pH del concreto y propiciando la destrucción de la capa pasiva pues estos iones desplazan al oxígeno del óxido pasivante dando paso al proceso de corrosión. En la muestra blanco la velocidad de corrosión es menor pero es mucho menor en las probetas GC2 y GC4 ya que ambas contienen celulosa hidrofóbica y ceniza. La adición de celulosa y ceniza a las probetas afecta los resultados de la velocidad de corrosión en RPL pues la ceniza contiene óxido de silicio con propiedades dieléctricas que amortiguan el campo eléctrico que la atraviesa aumentando las variaciones de la resistencia a la polarización y la celulosa siendo un polímero natural ayuda a cerrar alguno de los poros en el material cementante para evitar el paso de agentes agresivos.

TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS AL FINAL DE LA EXPOSICIÓN

Muestras de las probetas se caracterizaron por espectroscopia IR medio, análisis térmico simultáneo, difracción de Rayos-X, y microscopia electrónica de barrido y los resultados se presentan en lo sucesivo.

Espectroscopía de Infrarrojo medio (IR)

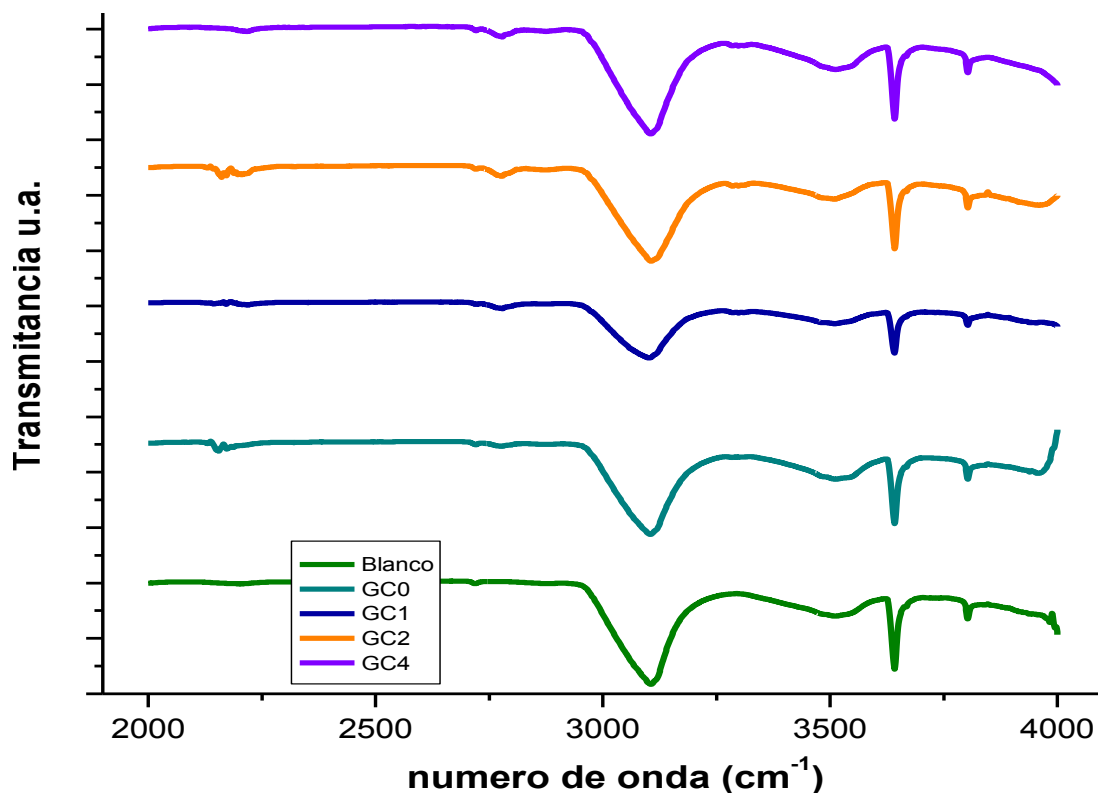


Figura 42. IR de las muestras de las probetas de ensayo.

En la Figura 42 se pueden comparar las bandas de vibración de la probeta blanco (concreto típico) con el resto de las muestras, GC0, GC1, GC2 y GC4. Se observa una banda muy intensa y ancha característica de vibración de grupos (OH) en 3100-3200 cm⁻¹. Por su parte, la banda que aparece en aproximadamente 3600 cm⁻¹ se puede asignar al agua absorbida por el material; mientras que las bandas que están entre 2800-2900 cm⁻¹ se deben a la porción de carbonato de

calcio presente en el cemento. En general, las gráficas muestran diferencias muy poco significativas entre ellas pues las bandas asociadas a la celulosa no pueden detectarse por su baja concentración.

Análisis térmico simultáneo

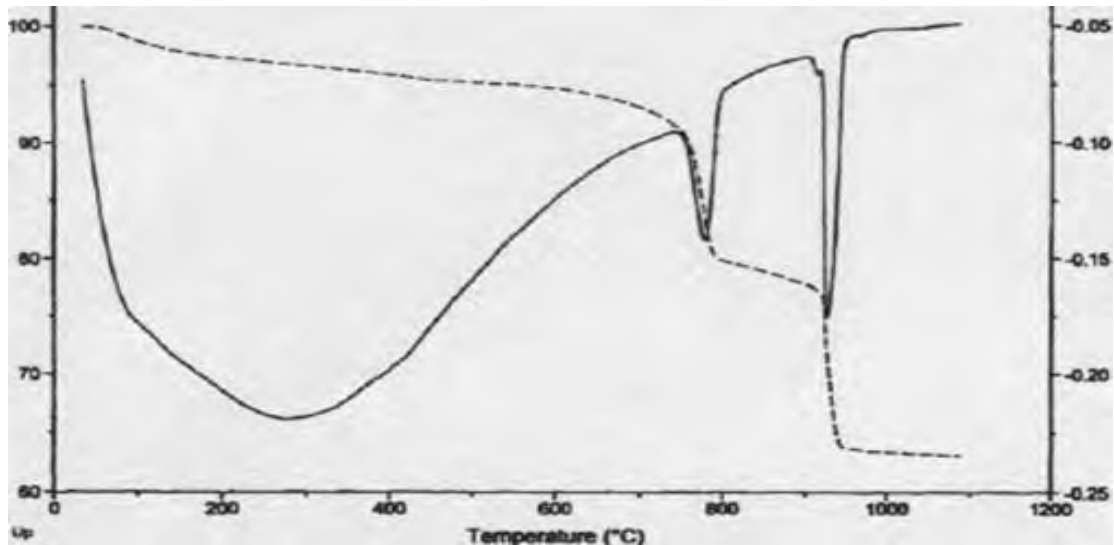


Figura 43. TG-DTA de concreto Portland rico en dolomita y bajo en calcita [extraída de la base de datos del STA 6000, Perkin-Elmer]

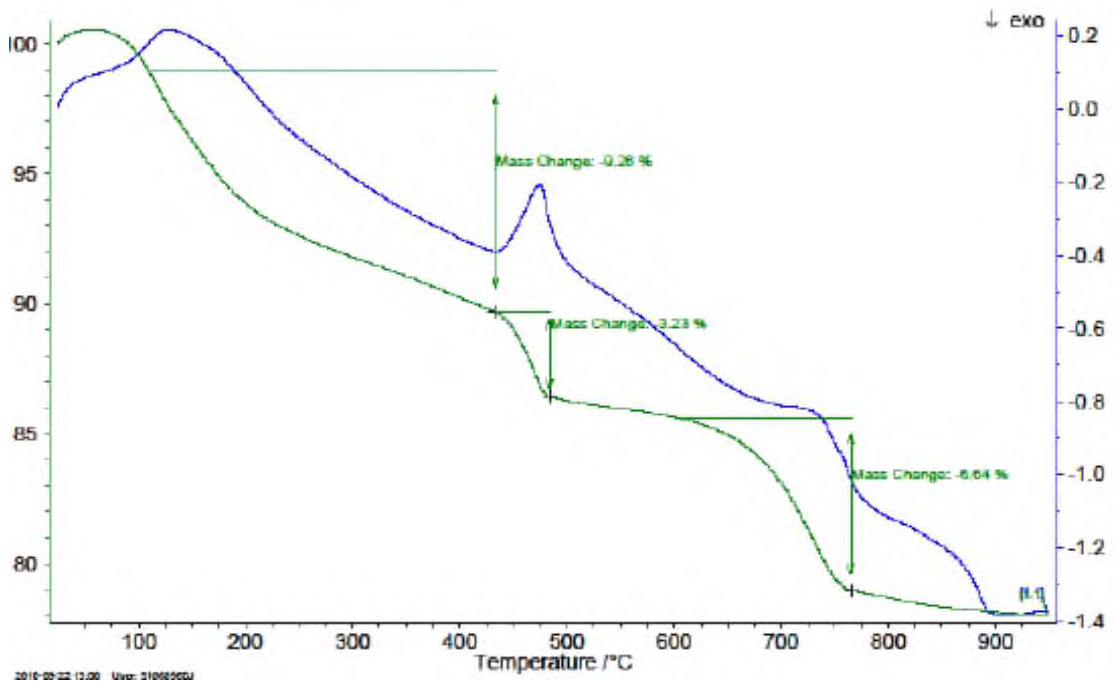


Figura 44. TG-DTA de una muestra de pasta de concreto [21].

Las Figuras 43 y 44 se incluyen con el objetivo de compararlas con los resultados de las mediciones de las muestras de probetas de ensayo.

TG-DTA de las probetas de ensayo de este trabajo

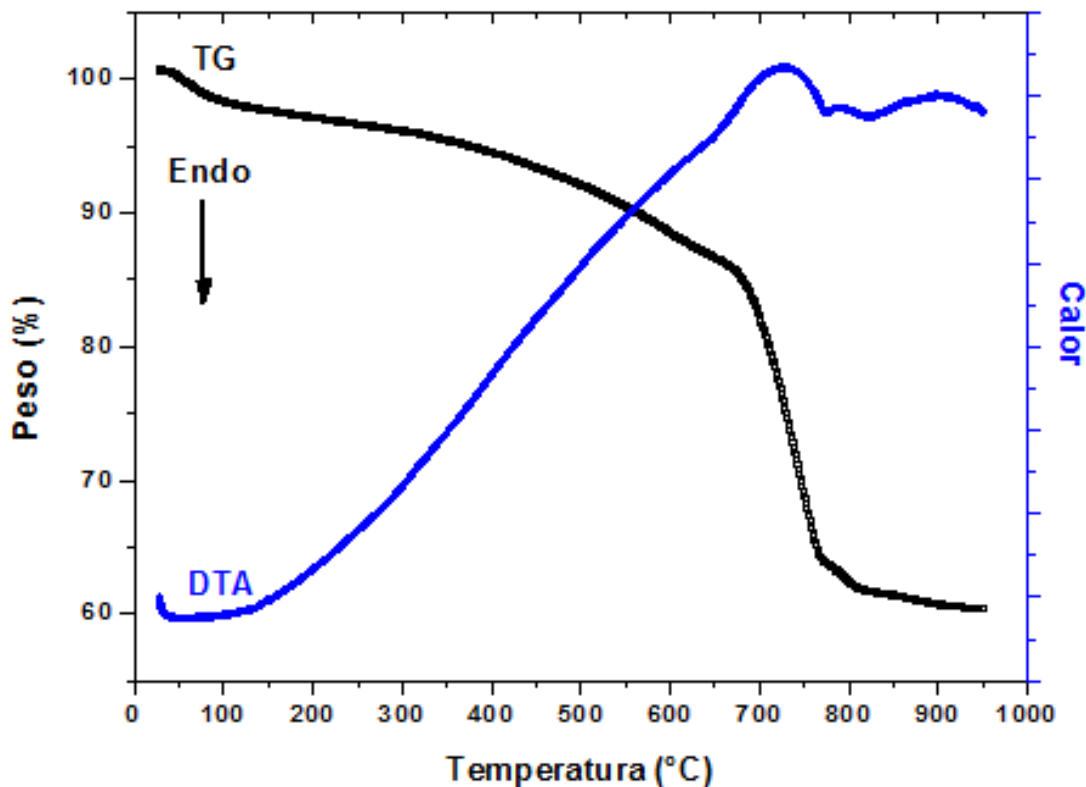


Figura 45. TG-DTA experimental de la probeta 1 (BLANCO).

En la Figura 45, la escala de temperatura va de 35°C a 950°C y muestra el primer evento exotérmico entre 700 y 800°C asociado a la pérdida de aproximadamente 40% peso. La descomposición térmica ocurre lentamente y coincide con lo reportado bibliográficamente en el concreto tradicional sin la adición de compositos o otros aditivos.

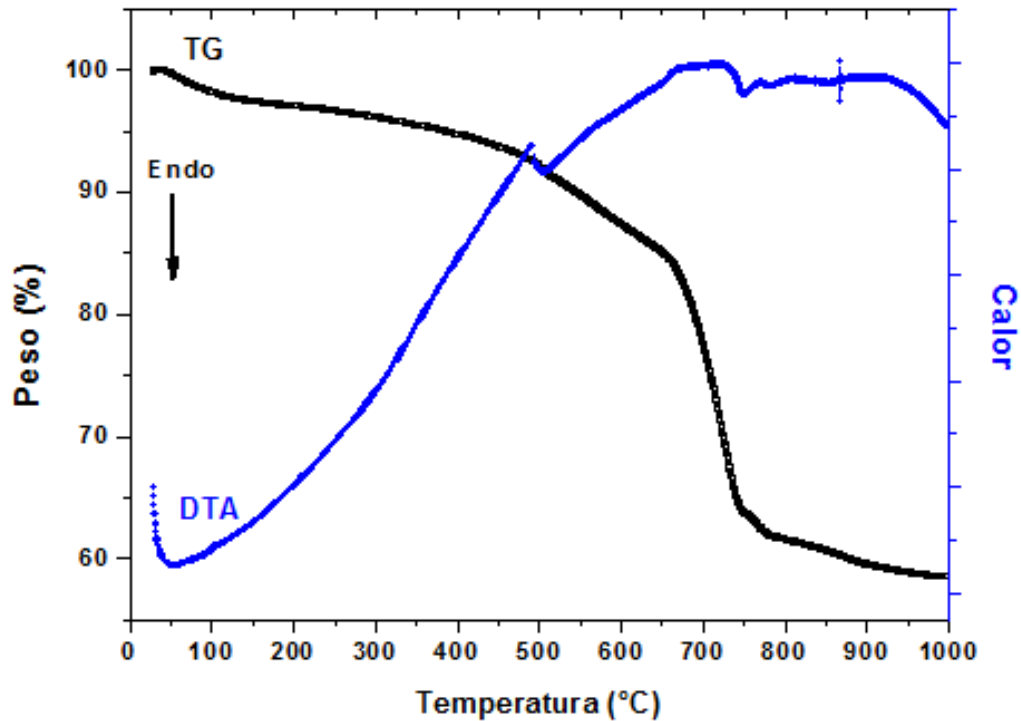


Figura 46. TG-DTA experimental de la probeta 2 (GC0).

En la Figura 46 se observan principalmente dos eventos; el primero ocurre a los 500°C y la segunda cercana a los 800°C, en esta muestra la pérdida de peso es de aproximadamente 40%, a 800°C. Al igual que la muestra anterior sigue perdiendo el mismo porcentaje de peso, la descomposición térmica en esta muestra inicia antes que en de la Figura 45, a este evento se le asocia la adición del composito, aunque la mayor parte del peso se libera en el segundo evento entre 700-800°C.

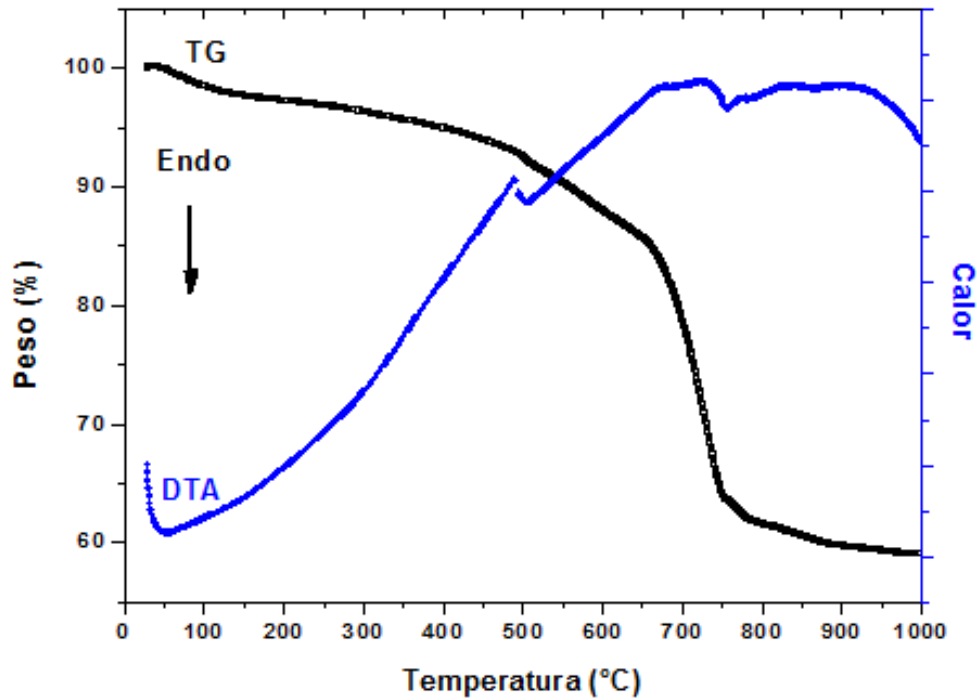


Figura 47. TG-DTA experimental de la probeta 3 (GC1).

Esta gráfica (Figura 47) es muy parecida a la de la Figura 46 pues ocurren dos eventos principalmente; el primero ocurre a 500°C y el segundo cercano a los 800°C, la pérdida de peso es de aproximadamente 40% y se libera en el segundo evento. La descomposición térmica en esta muestra inicia igual que en la anterior a este evento se le asocia la adición del compuesto.

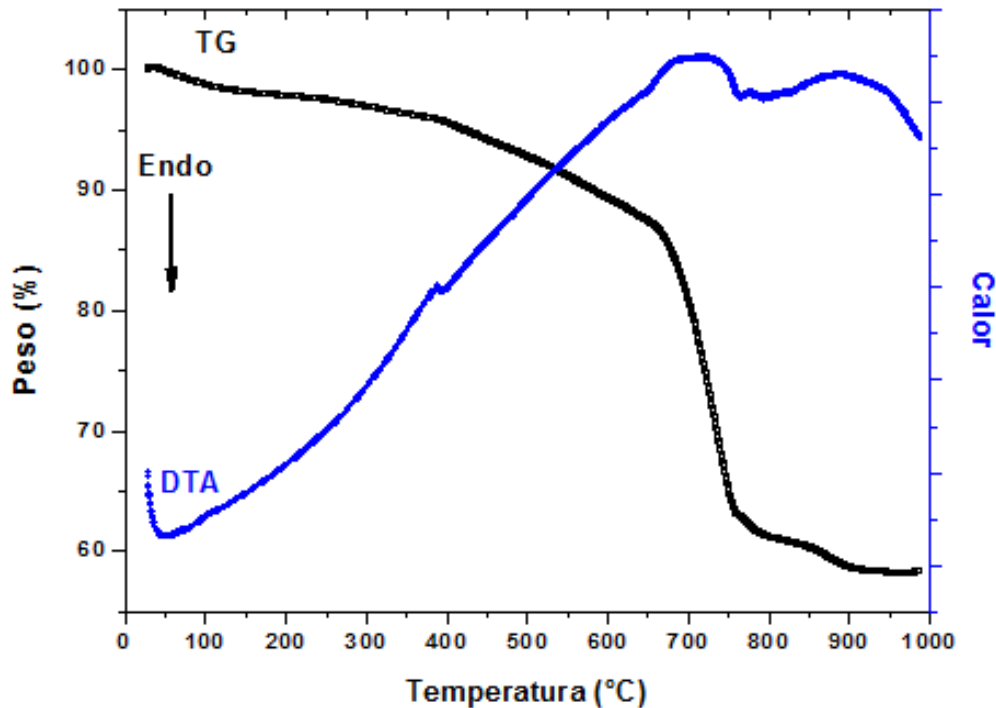


Figura 48. TG-DTA experimental de la probeta 4 (GC2).

En esta gráfica se siguen observando dos eventos exotérmicos solo que el primer evento se presenta apenas por encima de 400°C y no es muy intenso como en las muestras de la Figura 46 y 47. El segundo evento, entre 700-800°C sigue siendo muy notable como en todas las anteriores; la pérdida de peso es de aproximadamente 42%, a 800°C. La baja intensidad del segundo evento está asociada a la composición del composito que se le adicionó al material (celulosa + ceniza), y el segundo evento que se mantiene en todas las gráficas es característico de la descomposición térmica del cemento.

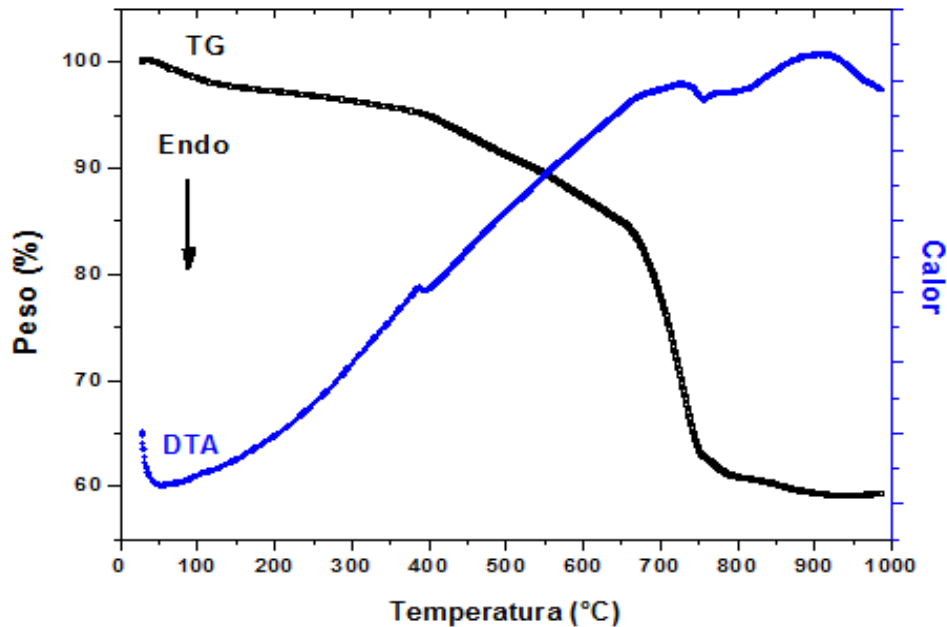


Figura 49. TG-DTA experimental de la probeta 5 (GC4).

La Figura 49 es muy parecida a la Figura 48, sin embargo el primer evento térmico ocurre apenas por debajo de los 400°C, de igual manera ya no es muy intenso. El segundo evento, entre 700-800°C es semejante a los anteriores pues la pérdida de peso es de aproximadamente 42%, a 800 °C.

Las 5 gráficas (Figuras 45-49) de este trabajo muestran claramente que el comportamiento de las probetas de concreto corresponde con la gráfica de la Figura 43, puesto que las muestras pierden aproximadamente 40% en peso a 800°C. En TGA el concreto pierde dos fracciones de peso, la primera de ellas alrededor de 400°C correspondiente a la descomposición de Ca(OH)_2 para dar agua y CaO . La segunda transformación ocurre alrededor de 700°C correspondiente a la descomposición del CaCO_3 para dar CO_2 y agua. Además de estas dos fases es posible determinar la cantidad de agua combinada en el gel C-S-H y en las fases minoritarias de aluminatos y sulfo-aluminatos AFm y AFt a partir del agua que se pierde alrededor de 110°C y el comienzo de la descomposición de la portlandita puesto que el agua eliminada en ese intervalo de temperatura es debida principalmente a la descomposición del C-S-H [21].

Difracción de Rayos X (DRX).

A continuación se muestra un difractograma de rayos X (Figura 50) de una probeta de concreto con el fin de compararlo con los resultados de nuestras probetas de ensayo, en esta caso el difractograma de referencia es de una probeta que se sometió a carbonatación a HR de 53 %. El difractograma correspondiente al estado final, después de la carbonatación, se ha desplazado 4000 cuentas hacia arriba para separarlos del estado inicial, antes de la carbonatación.

Las probetas de estudio de este proyecto se sometieron a dos procesos de exposición; en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado y NaCl 3% por lo tanto podemos retroalimentar la información ya que ambos fenómenos provocan un problema parecido al concreto y al acero.

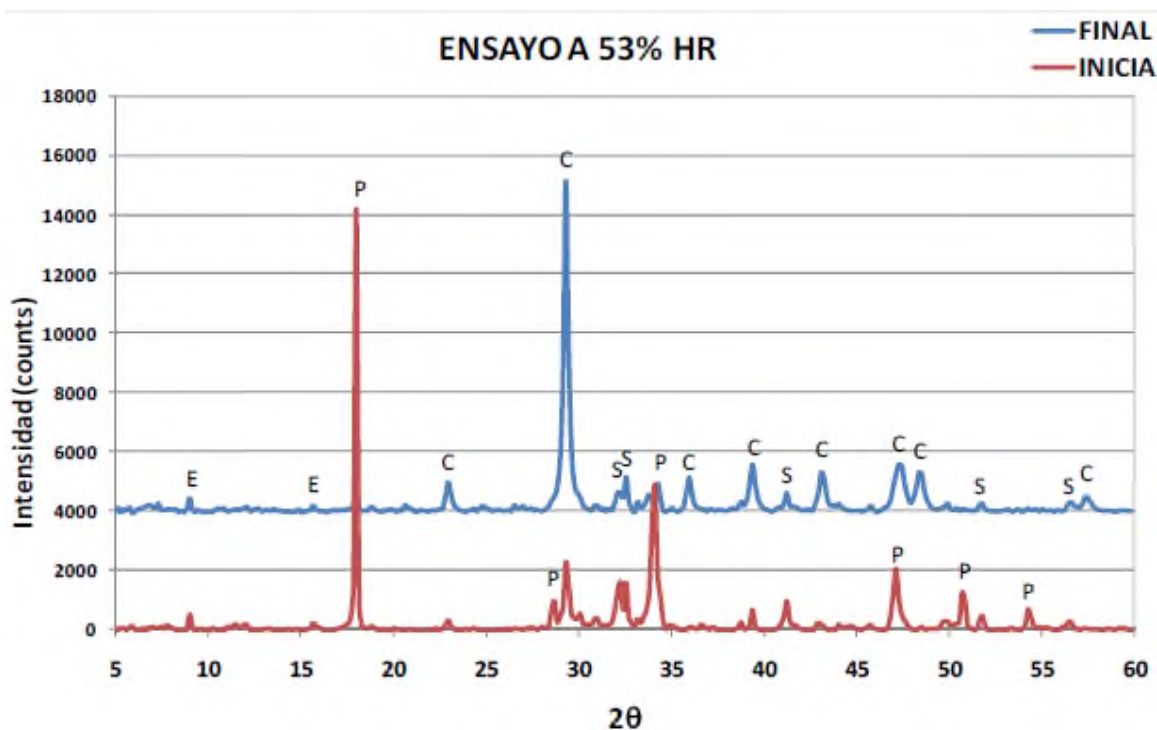


Figura 50. DRX de concreto [21].

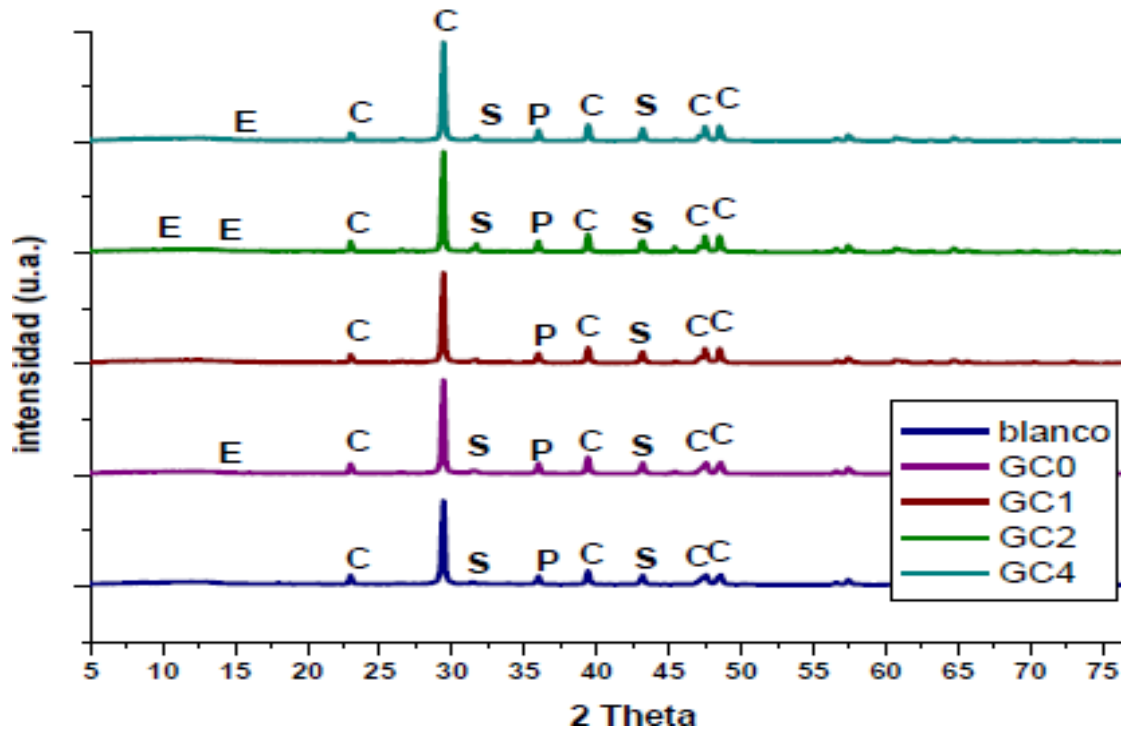


Figura 51. DRX de las 5 probetas de ensayo.

El patrón de difracción mostrado en la Figura 50 es considerado como referencia de los picos característicos del concreto. La intensidad de esos picos no es igual a la distribución de intensidad de los picos de los difractogramas medidos, ya que el pico de mayor intensidad se desplazó del ángulo 18 al ángulo 30 indicando así que la distancia interplanar ha disminuido lo cual significa que la fibra ha ocupado esos intersticios en el sólido de concreto.

Las posiciones de los picos principales de las fases cristalinas contenidas se han indicado con letras: E (etringita), P (portlandita), C (calcita), S (silicato tricálcico).

Los picos principales de la etringita se encuentran en ángulos 2θ de 9.1° y 15.8° ; los de la calcita en 2θ 23.1° , 29.5° , 36.0° , 39.4° , 43.2° , 47.6° , 48.6° y 57.4° ; por último, los del silicato tricálcico se encuentran en ángulos 2θ de 32.2° , 32.5° , 41.2° , 51.8° y 56.3° [21].

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Por medio de microscopía electrónica de barrido, se realizó la observación de la morfología del material después de pasar por los dos procesos de exposición. Los resultados se muestran a continuación.

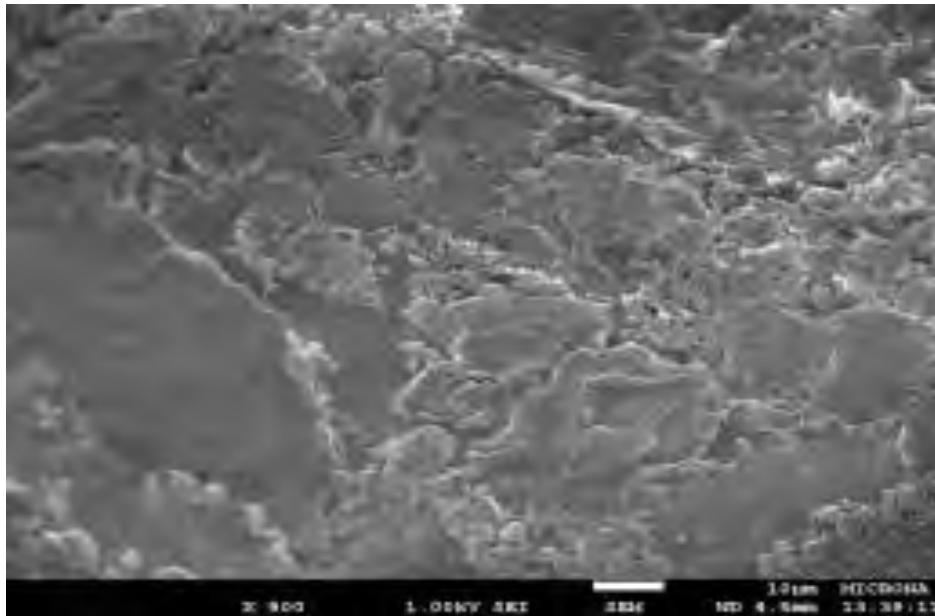


Figura 52. SEM del *blanco*: concreto típico.

El análisis de la muestra blanco Figura 52 permite observar gran parte de la superficie rugosa, con muchos fragmentos porosos y poco homogéneos. Las zonas grisáceas corresponden al gel de C-S-H, que es el encargado de darle adherencia y cohesión al concreto.

En la muestra GC0, Figura 53, se observa una superficie más lisa, las fibras de celulosa que contiene propician menos fragmentos porosos y la morfología en la superficie se observa plastificada con zonas irregulares. Se observa más homogénea que la muestra anterior.

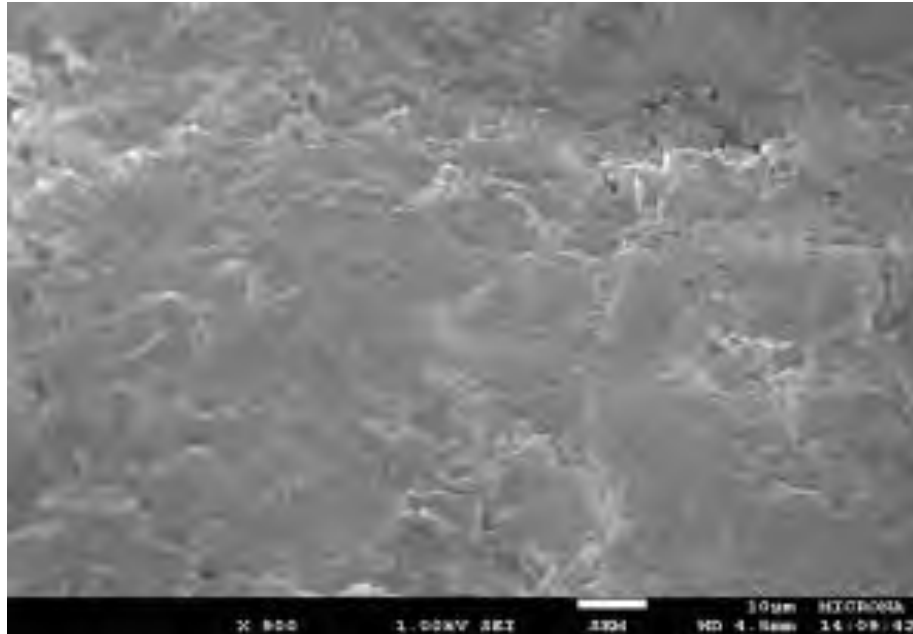


Figura 53. SEM de GC0: concreto + celulosa (lodo)

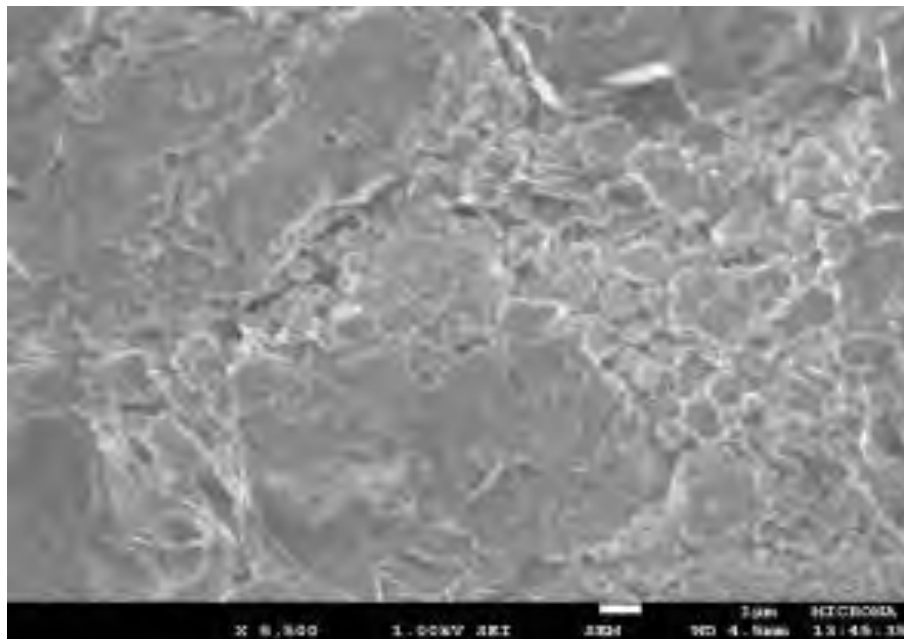


Figura 54. SEM de GC1: concreto + celulosa (lavada con HCl)

En la Figura 54 se observan fragmentos y superficies porosas en el material. Algunas zonas están plastificadas mientras que otras no, pareciera que algunas fibras de celulosa no se integraron completamente al material.

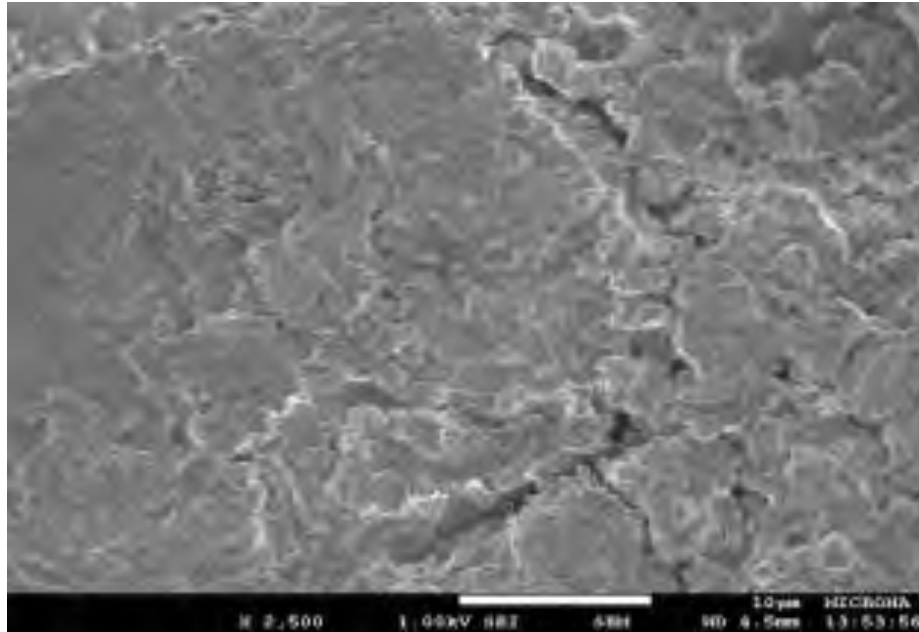


Figura 55. SEM de GC2: concreto + compuesto

En la Figura 55 se observan fragmentos porosos pero se nota una superficie plastificada debido a la adición del compuesto de celulosa y ceniza.

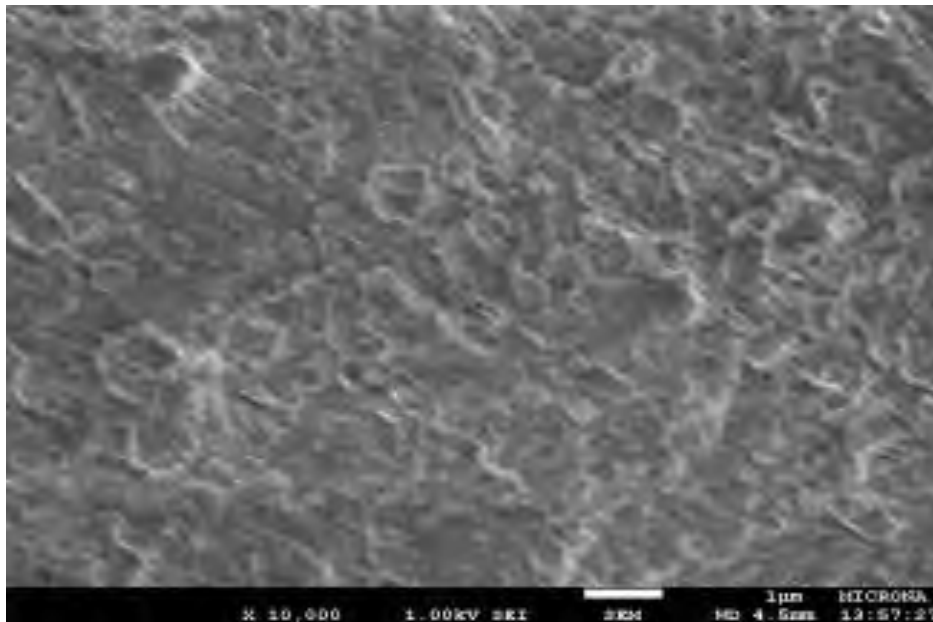


Figura 56. SEM de GC4: concreto + celulosa acetogel + ceniza + adhetop

En la Figura 56 se observa una superficie más plastificada con menos poros y es muy homogénea comparada con las muestras anteriores.

CONCLUSIONES

Por análisis de RE, EIE, RPL durante el proceso de curado (28 días), todas las probetas presentan estado de pasividad de corrosión.

Sin embargo, de todas las probetas expuestas a solución salina durante 3 meses las que presentan baja probabilidad de corrosión son GC2 y GC4, de acuerdo a los datos de EIE, ya que contienen el composito a diferencia de GC0, GC1 y la muestra blanco. Es decir, el composito agregado como sustituto de cemento en la elaboración de concreto muestra resultados prometedores para el control de la corrosión del acero embebido en concreto.

Los resultados aquí reportados reflejan el tiempo corto de los experimentos realizados, por lo tanto, se espera que a periodo de tiempo extendido estos experimentos muestren claras diferencias en el proceso de corrosión de varilla embebida en concreto inducidas por la adición del composito a la mezcla del concreto.

Finalmente, se puede concluir que este trabajo de tesis propone una manera de aprovechar los residuos agroindustriales generados en esta ciudad aplicándolos como material sustituto de cemento en la elaboración de concreto y abre la posibilidad de introducir un nuevo sistema de edificación en el futuro cercano, libre de la emisión de gases de efecto invernadero.

ANEXOS

RUIDO ELECTROQUIMICO

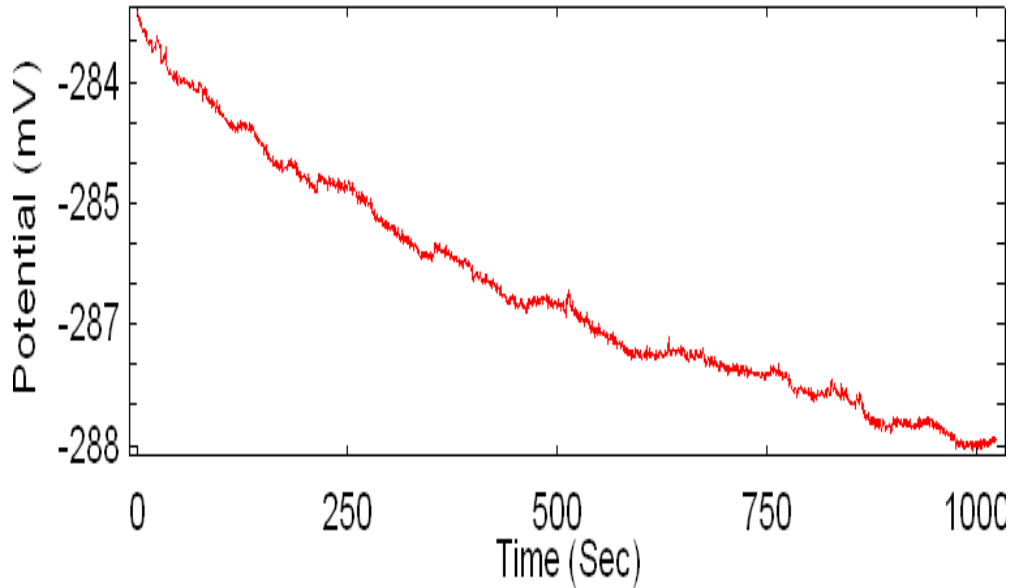


Figura 1. Serie de potencial-tiempo de la probeta 1 (blanco) en el día 1.

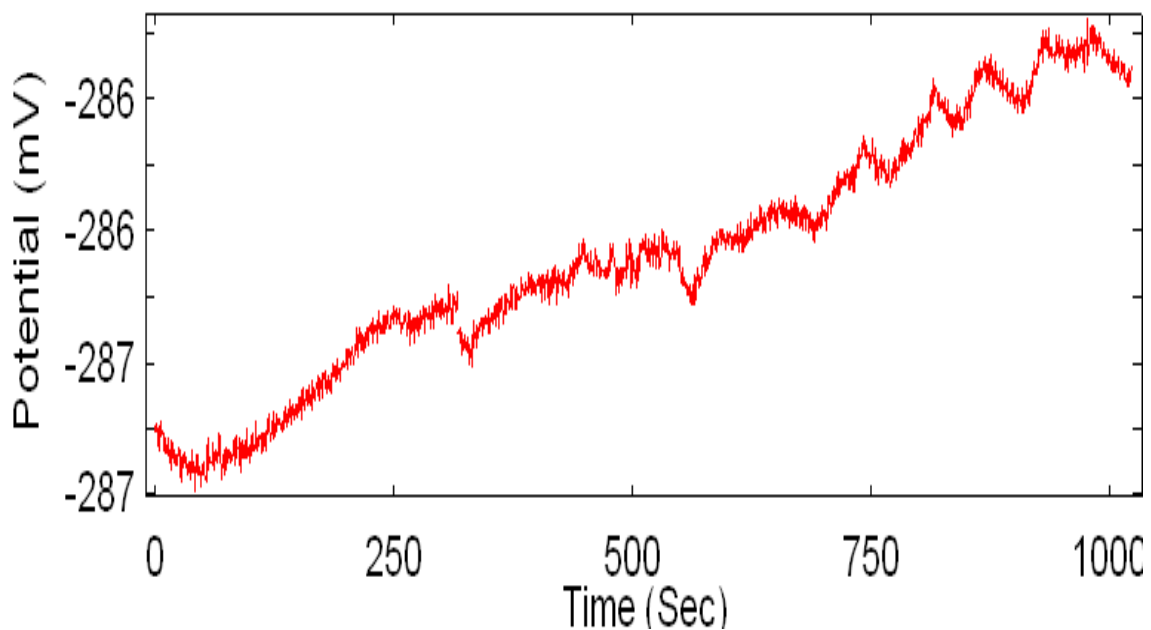


Figura 2. Serie de potencial-tiempo de la probeta 2 (GC0) en el día 1.

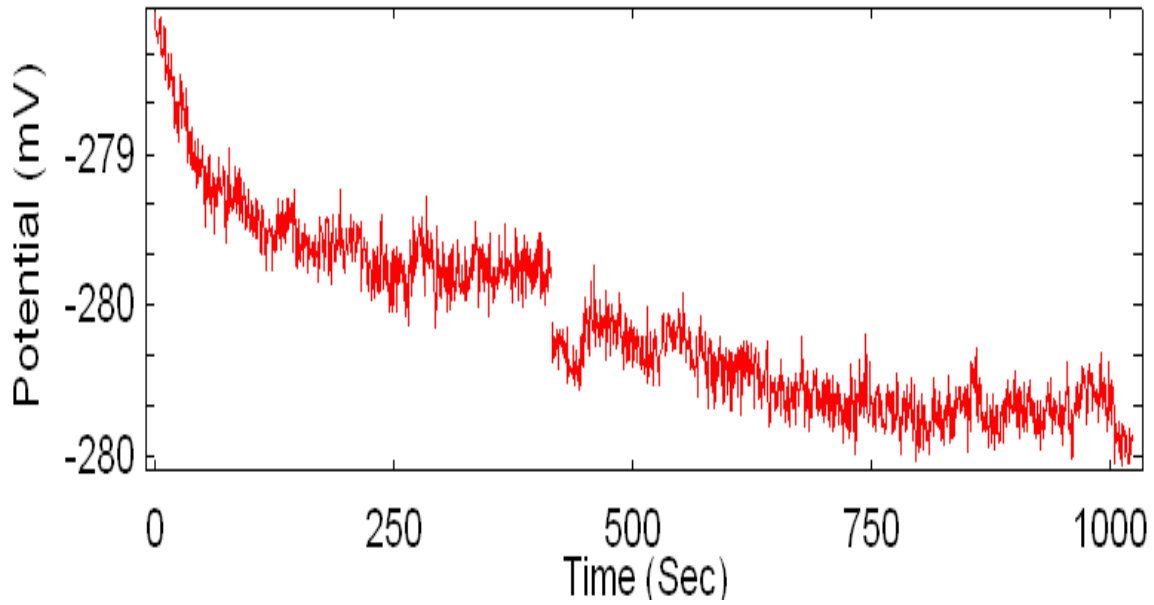


Figura 3. Serie de potencial-tiempo de la probeta 3 (GC1) en el día 1.

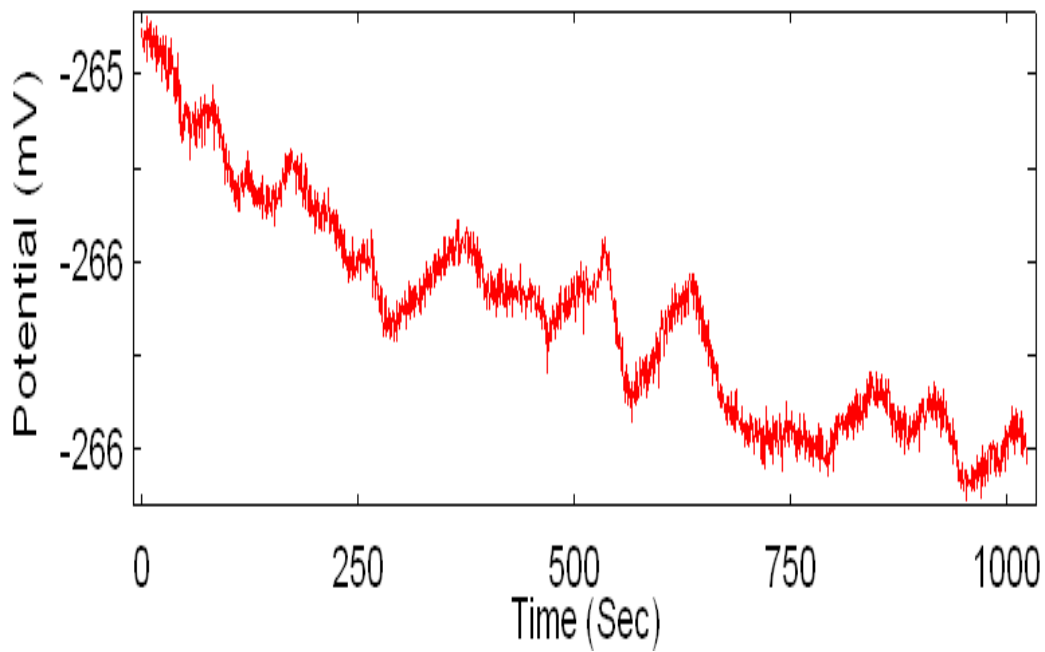


Figura 4. Serie de potencial-tiempo de la probeta 4 (GC2) en el día 1.

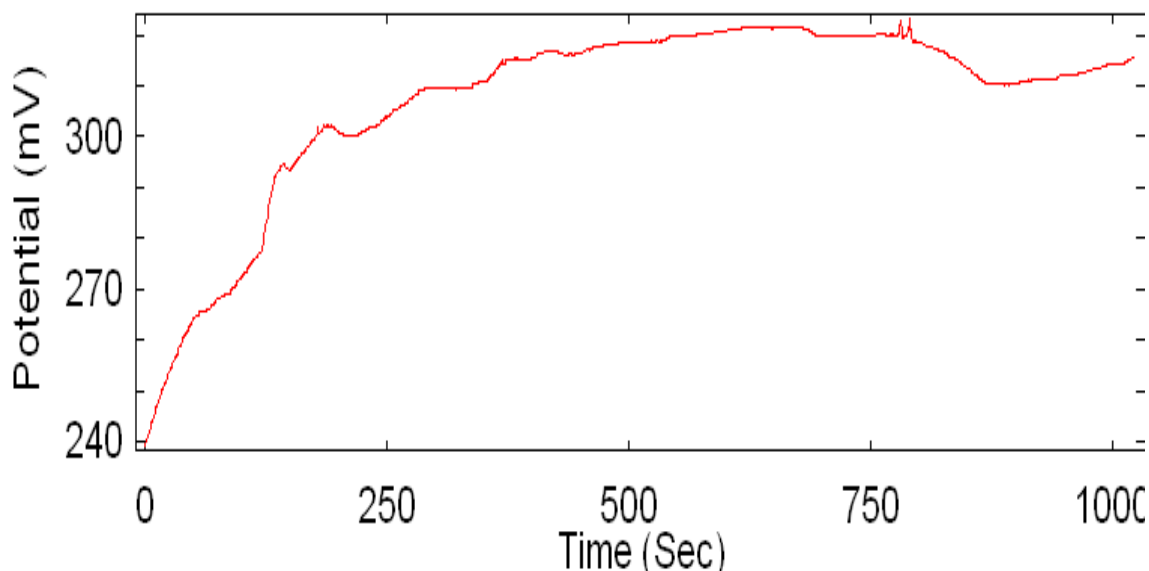


Figura 5. Serie de potencial-tiempo de la probeta 5 (GC4) en el día 1.

DATOS DE IMPEDANCIA AJUSTADOS AL CIRCUITO CORRESPONDIENTE.

Después de tener los datos de impedancia, se hicieron los espectros, los cuales fueron ajustados en función de un circuito equivalente como se muestra, estos datos se manipularon con el programa ZView-Impedance Software.

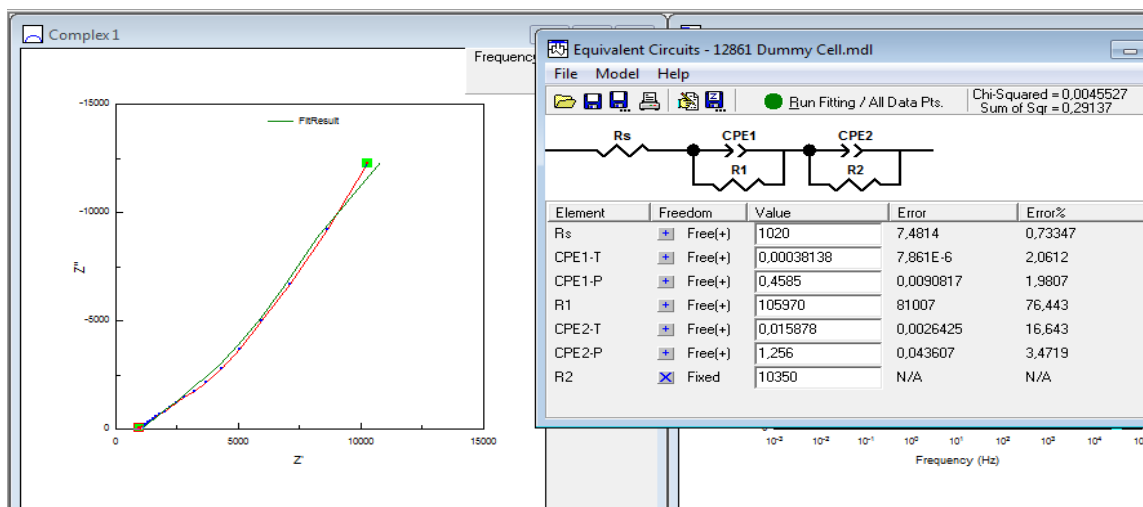


Figura 6. Probeta 1 (blanco) prueba al día 28.

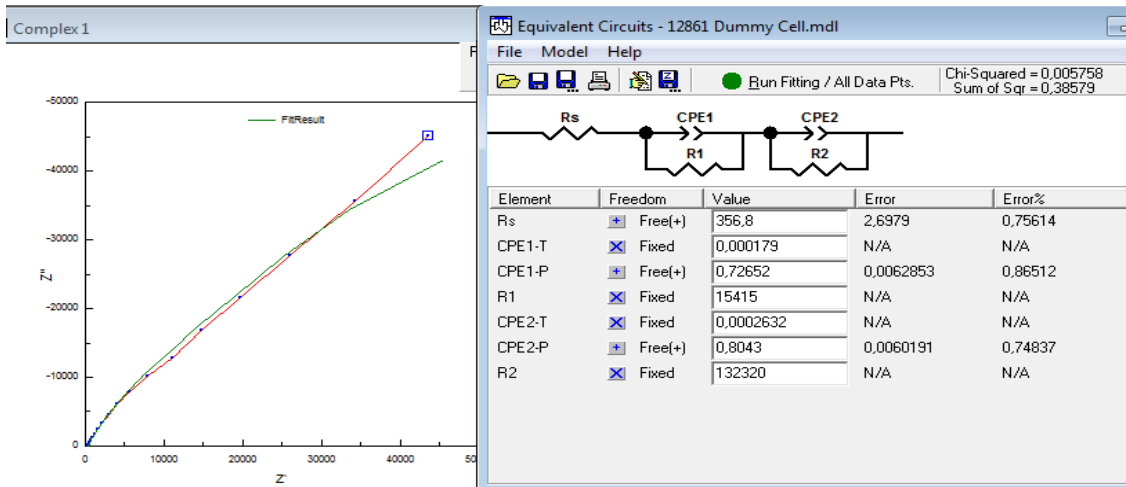


Figura 7. Probeta 2 GC0, prueba al día 3.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Pérez López, T. "Estudio de la cinética de corrosión del refuerzo de acero embebido en concreto en diferentes condiciones de exposición en medio marino" Tesis doctoral, Facultad de Química, UNAM, 2000.
- [2] Valle M., Angélica, Pérez L., T.; Martínez M., Miguel. "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado", Secretaría de comunicaciones y transportes, Instituto Mexicano del Transporte, publicación técnica No. 182. Sanfandila, Qro, 2001.
- [3] Saviour A. Umoren, Mauro J. Banera. "Inhibition of mild steel corrosion in HCl solution using chitosan" Springer Science Business Media Dordrecht 2013.
- [4] Alavéz-Ramírez R., Montes-García P., Martínez-Reyes J., Altamirano-Juárez D., Gochi-Ponce Y., "The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks" Construction and Building Materials 34, 296, 2012.
- [5] Janjaturaphan S. y Wansom S. "Pozzolanic activity of industrial sugar cane bagasse ash" Technol. 17, 4, 2010.
- [6] Deepa Rani, P., Selvaraj S. "Electrochemical behavior of Solanum trilobatum plant extract on stainless steel in natural sea water environment" Original Research Article, Annalen der Chemischen Forschung, 1, 3, 1, 2013.
- [7] Callister William D., Fundamentals of Materials Science and Engineering. 5th edition. John Wiley & Sons. United States of America, 2001.
- [8] Chávez Ulloa, E. "Análisis del proceso de corrosión del concreto reforzado elaborado con agregados calizos expuesto en un medio natural y cámara de carbonatación acelerada" Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Químico Biológico, UAC. 2010.
- [9] Chong Cao, Moe M.S. Cheung b, Ben Y.B. Chan "Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate" Corrosion Science. 69, 97, 2013
- [10] Tuuti "Corrosion of Steel in concrete", CBI fo 4.82, Sweedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm 1982.
- [11] Pérez Méndez L., "Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión. Tesis de maestría. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid. Septiembre 2010.
- [12] Metals Handbook, manuals, etc. I. ASM International. Handbook Committee II. ASM Handbook. Night Edition, 13,1993.
- [13] Manual de Inspección. "Evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", 2a. Edición. Programa Iberoamericano

- de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Red Temática XV.B DURAR, 1998.
- [14] Valle M., Angélica, Torres A, Andrés, Terán G. Jorge. “Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos” Secretaría de comunicaciones y transportes, Instituto mexicano del transporte, publicación técnica No. 290. Sanfandila, Qro, 2006.
- [15] Cabrera de la Cruz D., “Efecto del flujo turbulento en la corrosión de soldaduras de aceros de alta resistencia”. Instituto de Ingeniería. Universidad Veracruzana. Boca del Río, Veracruz. 2013.
- [16] Mendoza Flores J., Durán Romero R., Genescá Llongueras J., “Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión”. Instituto Mexicano del Petróleo y Facultad de Química, UNAM.
- [17] Rodríguez Gómez F., “Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de la corrosión. Resistencia a la Polarización.” Depto. Ing. Metalúrgica. Facultad Química, UNAM. Ciudad Universitaria-México D.F, 1957.
- [18] Martínez C., González Y., Vera D.E., Peña C. “Validación de la técnica de pulso galvanostático respecto a la técnica de resistencia a la polarización lineal.” Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. 1, 2009.
- [19] Eichhorn S. J., Dufresne A., Aranguren M., Marcovich N. E., Capadona J. R., Rowan S. J., Weder C., Thielemans W., Roman M., Renneckar S., “Current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites”. J. Mater. Sci. 45, 1, 2010.
- [20] Capadona J. R., Den Berg O.V., Capadona L. A., Schroeter M., Rowan S. J., Tyler D. J., Weder C. “A versatile approach for the processing of polymer nanocomposites with self-assembled nanofibre templates”. Nat Nanotechnology. 2, 765, 2007.
- [21] Galan Garcia I, “Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH”. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid, 2011.
- [22] <http://constructorelectrico.com/home/teoria-y-aplicacion-de-conectores/>
- [23] Rodríguez Robledo M. C., “Acetilación de celulosa residual por proceso económico y verde” Tesis de licenciatura. Universidad del Papaloapan-Tuxtepec, 2014.
- [24] <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8231/1/CorrTema5.pdf>