



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A
LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

**MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:
ING. ALEJANDRO CASTILLO GUTIÉRREZ**

**TUTOR PRINCIPAL
ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES
FACULTAD DE INGENIERÍA**

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

Secretario: M. I. RODRÍGUEZ VEGA MIGUEL ÁNGEL

Vocal: ING. COTTIER CAVIEDES JUAN LUIS

1^{er.} Suplente: M. I. MENDOZA ROSAS MARCO TULIO

2^{d o.} Suplente: M. I. CANDELAS RAMÍREZ LUIS

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD DE MÉXICO Y MADRID-ESPAÑA

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE

ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, que es la persona más maravillosa del mundo, gracias por todo tu amor, comprensión y apoyo que siempre me haz brindado siendo mi motivación para poder culminar esta etapa en mi desarrollo profesional.

A mi hermano, por ser un gran ejemplo a seguir, por todo tu apoyo que me brindaste y consejos para poder superarme día a día

Al Ing. Juan Luis Cottier Caviedes por haberme dado todo su apoyo, consejos y dirección en la realización de esta tesis

A la Dra. María del Carmen Andrade Perdrix del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja en Madrid España, por haberme aceptado como su estante, ser mi co-tutora, y compartir sus conocimientos para llevar a cabo los proyectos prácticos de esta tesis

A todos los Investigadores y compañeros del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja que me dieron su apoyo durante mi estancia en España

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación profesional que he recibido a la cual siempre le estaré agradecido

Al CONACYT por el apoyo proporcionado durante mis estudios de maestría

A mis compañeros de la maestría, por todos esos buenos momentos y esas grandes experiencias que compartimos juntos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

OBJETIVO GENERAL

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

CAPÍTULO 1.....	1
LA ESTRUCTURA DEL CONCRETO	1
1.1 Composición del concreto.....	1
1.2 Fase agregado.....	2
1.3 Fase pasta de cemento hidratado.....	3
1.3.1 Compuesto hidrato de silicato de calcio	5
1.3.2 Compuesto hidróxido de calcio.....	6
1.3.3 Compuesto sulfoaluminatos de calcio.....	6
1.4 Clinker no hidratado.....	7
1.5 Aire en la pasta de cemento	7
1.6 Porosidad en el concreto	8
1.6.1 Propiedades del concreto con aire incluido.....	9
1.7 Agua en la pasta de cemento.....	9
1.7.1 Agua capilar	9
1.7.2 Agua libre.....	9
1.7.3 Agua absorbida	10
1.8 Fase adherencia agregados-pasta de cemento (zona de transición).....	10
1.8.1 Propiedades de la zona de transición	12
CAPÍTULO 2.....	13
FACTORES DE DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	13
Introducción	13
2.1 Patologías del concreto por deficiencias constructivas.....	14
2.1.1 Fisuración.....	14
2.1.2 Causas de las fisuraciones.....	16
2.1.3 Sangrado.....	16
2.1.4 Segregación del concreto	17

2.1.5 Decoloración y manchas en el concreto.....	17
2.1.6 Acero de refuerzo expuesto por falta de recubrimiento	18
2.1.7 Junta fría.....	19
2.2 Factores quimicos que afectan la durabilidad del concreto	19
2.2.1 Definición de durabilidad.....	19
2.2.2 Cementos resistentes a sulfatos.....	20
2.2.3 Composición de los cementos.....	21
2.2.4 Ataque químico al concreto	24
2.2.4.1 Reacción álcali agregado en el concreto	24
2.2.4.1.1 Efectos de la reacción álcali agregado	25
2.2.4.1.2 Ensayes petrográficos	26
2.2.4.1.3 Diagnóstico de reacción álcali-agregado	27
2.2.4.1.4 Recomendaciones para controlar la reacción álcali agregado	28
2.2.4.2. Ataque por ácidos.....	29
2.2.4.2.1 Prevención de ataques ácidos.....	31
2.2.4.2.2 Recomendaciones para mitigar el ataque por ácidos	31
2.2.4.2.3 Barreras protectoras	32
2.2.4.3 Lixiviación del concreto.....	33
2.2.4.4 Concreto expuesto al ambiente marino.....	33
2.2.4.4.1 Mecanismo de ataque.....	35
2.2.4.4.2 Recomendaciones ante ambiente marino	37
2.2.4.5 Ataque por sulfatos	37
2.2.4.5.1. Los sulfatos y su origen	38
2.2.4.5.2. Proceso de ataque por sulfatos.....	39
2.2.4.5.3. Prevención de ataque por sulfatos.....	41
2.2.4.5.4. Factores que mitigan el ataque por sulfatos	42
2.2.4.6. Ataque por cloruros.....	43
2.2.4.6.1. Proceso de ataques por cloruros.....	43
2.2.4.6.2. Efecto de los cloruros en el acero de refuerzo	44
2.2.4.6.3. Cloruros en la mezcla.....	46
2.2.4.6.4. Tratamientos adicionales para prevenir el ingreso de ion cloruro	46
2.2.4.6.5. Recubrimiento del acero de refuerzo	47

2.2.4.7 Corrosión del acero	48
2.2.4.7.1 Formas y causas de corrosión en el acero	49
2.2.4.7.2. Corrosion localizada	51
2.2.4.7.3 Corrosion generalizada	52
2.2.4.7.4 Medios para prevenir la corrosión	52
2.2.4.8 Carbonatación del concreto.....	52
2.2.4.8.1 Análisis y determinación de la carbonatación.....	53
CAPÍTULO 3.....	55
DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS.....	55
3.1 Ensayo de penetración de cloruros en el concreto	55
3.1.1 Método integral acelerado.....	55
3.1.2 Procedimiento de medición.....	65
3.2 Resultados de pruebas icorr y ecorr	70
3.3 Cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en que se produce la despasivación de la armadura.....	77
3.4 Cálculo del coeficiente de difusión en estado no estacionario (aparente)	77
3.5 Cálculo de la corrosión acumulada o penetración de la corrosión p_{corr}	78
3.6 Determinación de concentración de cloruros totales por valoración potenciométrica	87
3.7 Cálculo de pérdida de masa mediante la ley de faraday	88
3.8 Tabla con resumen de los resultados de la perdida de masa.....	91
3.9 Ensaye de carbonatación en las probetas	92
3.10 Pruebas en elementos de concreto mediante el uso del corrosímetro in situ (gecor 10).....	93
3.11 Resultados	98
CAPÍTULO 4.....	126
CONCLUSIONES:	126
4.1 Principales definiciones en las pruebas de corrosión.....	129
BIBLIOGRAFÍA.....	130
FUENTES DE INTERNET:	130

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más utilizado en la construcción, hoy en día se tiene conocimiento para fabricar concretos de altas resistencias a compresión, sin embargo, en muchas ocasiones no cumple con la vida útil para la cual fue diseñado esto debido a diversos problemas que se presentan de acuerdo con las condiciones del sitio donde se construyen.

En los últimos años el término “durabilidad” se ha estado escuchando con mayor frecuencia en las obras de ingeniería civil algunos países industrializados como los EUA, España, Francia, y Japón, el tema de durabilidad se ha tomado muy en serio, por lo cual ya están incluyendo en sus códigos de construcción, recomendaciones para el diseño de estructuras de concreto por durabilidad

Al inicio de la tesis se abordan las características del concreto mediante las fases por las cuales pasa durante el proceso de fraguado

En el capítulo dos se abordan los factores de deterioro del concreto relacionados a los ataques químicos así como a los problemas que se tienen por malas prácticas constructivas

La parte experimental se desarrolla en el capítulo 3 en donde se han realizado pruebas de laboratorio como carbonatación, corrosión de acero de refuerzo y mediciones in situ en las instalaciones del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja en Madrid España

Por último las conclusiones se presentan en el capítulo 4 donde se explican los resultados obtenidos y las futuras líneas de investigación.

OBJETIVOS

Análisis de los agentes químicos que afectan el comportamiento de durabilidad del concreto así como de los problemas que se presentan durante el ataque a la estructura por patologías constructivas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Conocer los tipos de problemas a los cuales se ve expuesta una estructura de concreto en medios agresivos
2. Determinar cuáles son las patologías que presenta un concreto que está siendo atacado por algún agente nocivo
3. Determinar y evaluar la velocidad de corrosión, resistividad eléctrica del acero en muestras de mortero
4. Medición y evaluación de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto armado
5. Fomentar conciencia sobre el diseño de mezclas de concreto bajo lineamientos de durabilidad para tener estructuras sanas durante el periodo para las cuales fueron construidas

CAPÍTULO 1

LA ESTRUCTURA DEL CONCRETO

1.1 COMPOSICIÓN DEL CONCRETO

El concreto es un material compuesto por una mezcla de cemento y agregados inertes que al contacto con el agua endurece después de un cierto tiempo. Los elementos activos del concreto son el agua y el cemento entre los cuales ocurre una reacción química que al fraguar alcanza un estado de gran solidez; los elementos inertes, que son la arena y la grava, forman el esqueleto de la mezcla, ocupando un gran porcentaje del volumen final del producto.

La estructura del concreto está formada por los elementos de mayor tamaño que son visibles al ojo humano (límite de detección del ojo es de 200 μm) llamada Macroestructura y la Microestructura, la cual solo se puede visualizar por medio de una amplificación con microscopio.

En la Macroestructura del concreto es posible observar fácilmente los agregados de varias formas y tamaños, y la masa formada por la pasta de cemento hidratada, (figura 1)

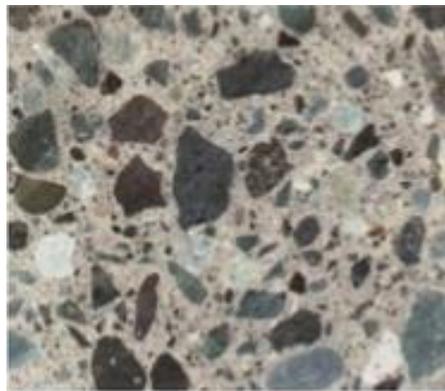


Figura 1. Macroestructura del concreto.

En la microestructura del concreto es posible observar mediante ayuda de microscopios, las características relacionadas con la porosidad de la pasta de cemento endurecido, cristales de hidróxido de calcio (figura 2), pequeños hidratos de silicato de calcio, la conexión entre pasta hidratada y el agregado, entre otros factores



Figura 2. Microestructura del concreto

Al examinar una sección de concreto, pueden observarse tres fases las cuales son: Fase Agregado grueso, Fase Pasta de Cemento Hidratada y la Fase Zona de Transición (P. KUMAR METHA 1988), las cuales se detallan a continuación:

1.2 FASE AGREGADO

La fase agregado del concreto, es la predominante en el peso unitario, módulo de elasticidad y de la estabilidad dimensional¹ del concreto, debido a que estas propiedades dependen en mayor parte de la densidad y la resistencia del agregado, y que estos son determinados por las características físicas de la estructura del agregado, algunas características físicas del agregado son: volumen, porosidad, permeabilidad, conductividad entre otros. La grava natural tiene una textura superficial tersa y forma redonda, la roca triturada es de textura rugosa, dependiendo del tipo de roca y su proceso de trituración puede contener partículas planas y alargadas, las cuales alteran muchas propiedades que tiene el concreto

¹ Propiedad que tienen ciertos materiales que al ser sometidos a cambios de temperatura y humedad no pierden su forma y mantiene sus dimensiones originales

Cuanto más grande sean los agregados y de forma alargada y planas, se tendrá mayor riesgo a presentarse sangrado en el concreto, debido a la formación de películas de agua que se acumulan cercanamente a la superficie del agregado.

Mientras no se tengan agregados altamente porosos y débiles, tales como la piedra pómez, la fase agregado no influye directamente en la resistencia del concreto, sin embargo su tamaño y forma si influye de forma indirecta

1.3 FASE PASTA DE CEMENTO HIDRATADO

La fase pasta de cemento hidratado, se debe al resultado de la reacción química resultante de los minerales del cemento portland al contacto con el agua

El cemento portland moderno es un material finamente pulverizado generalmente de tamaño entre 30 y 50 μm , constituido por Clinker y yeso, el Clinker está formado por Óxido de calcio (CaO), Sílice (SiO_2), Alúmina (Al_2O_3), y Óxido de Hierro (Fe_2O_3), Los cuales están contenidos en la Piedra caliza, Arcillas y óxido de hierro que son las materias primas usadas en su elaboración.

La composición química de los compuestos anteriores cuando son llevados a altas temperaturas forman los minerales del Clinker que son el Silicato Tricalcico –Alita” (C_3S) (figura 3) Silicato Bicalcico –Belita” (C_2S) (figura 4), Aluminato Tricalcico –Celita” (C_3A) y el Ferroaluminato Tetracalcico –Ferrita” (C_4AF), a los cuales se les agrega yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para formar el cemento.

En la figura 5 se muestra la matriz donde se reúnen los compuestos mencionados

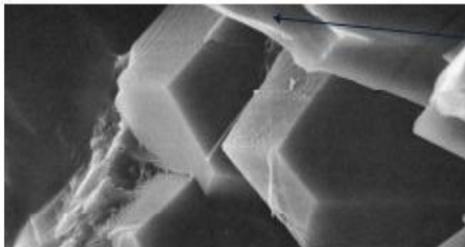


Figura 3 Cristales de Alita

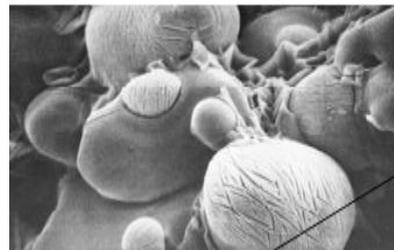


Figura 4 Cristales de Belita

Durante su producción la cantidad de Alita generalmente está en el rango entre 45 y 60%, la belita entre 15 y 30%, la celita entre 6 y 12% y ferrita entre 6 y 8 % del total del clinker

La cantidad de yeso que se agrega es aproximadamente el 5% del peso del cemento portland. La función del yeso es regular el proceso de hidratación del cemento y así poder trabajarlo; sin la adición del yeso, el concreto endurecería inmediatamente después de añadir agua.

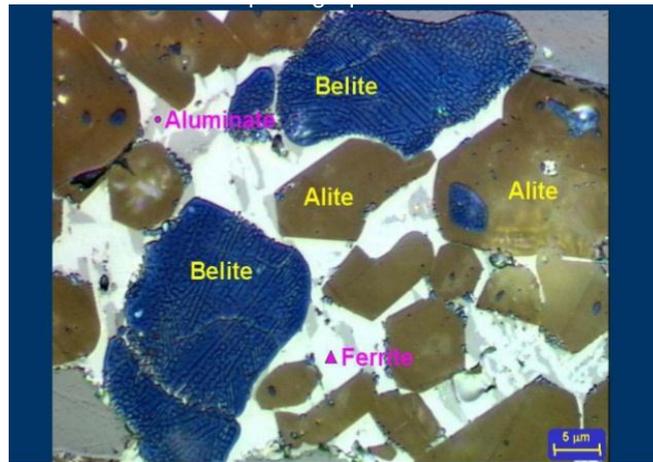


Figura 5 Matriz de Alita, Belita, Celita, Ferrita

Es importante señalar que el Óxido de Hierro es el compuesto que da el color gris, por lo cual si durante la elaboración del cemento este material se elimina, obtendremos cemento blanco, que tiene un tamaño de partículas alrededor de 30 μm .

Cuando el cemento entra en contacto con el agua, el sulfato de calcio se satura rápidamente y en los primeros minutos de la hidratación del cemento aparecen cristales en forma de aguja de Sulfoaluminatos de calcio llamados etringita, después de unas horas, los espacios vacíos empiezan a ser ocupados por cristales grandes de hidróxido de calcio y cristales pequeños de hidrato de silicato de calcio, al cabo de unos días la etringita se descompone formando hidrato de monosulfato el cual es un compuesto estable Figura 6

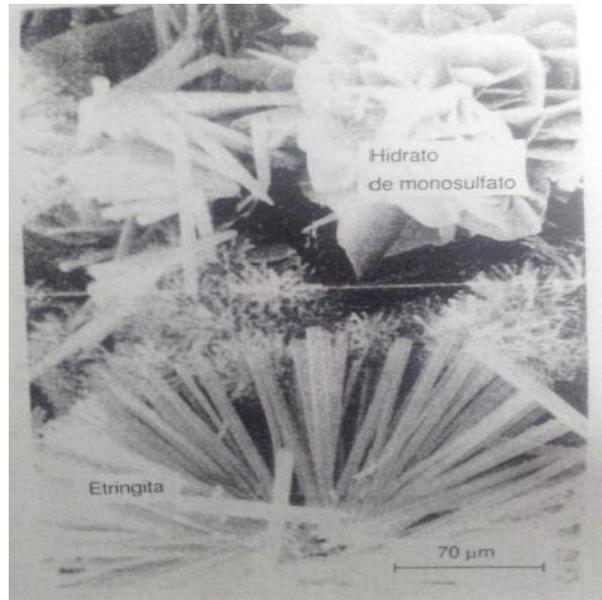


Figura 6 Cristales de Hidrato de Monosulfato y cristales de Etringita

El endurecimiento se produce a través de por lo menos dos etapas fundamentales (Figura.7) Primero se forma una capa gelatinosa en la superficie de las partículas de silicato de calcio y posteriormente una capa de hidróxido de calcio

1.3.1 COMPUESTO HIDRATO DE SILICATO DE CALCIO

Este compuesto representa entre 50 y 60% del volumen de sólidos en la pasta de cemento y es la más importante para determinar las propiedades de la pasta (P. KUMAR METHA 1988). La morfología del hidrato de silicato de calcio es inestable, y se presenta desde fibras cristalinas hasta redes reticulares, sin embargo, la estructura interna de los cristales del hidrato de Silicato de Calcio no han sido resueltas perfectamente hasta el momento por lo cual es abreviado por las siglas H-S-C.

Después de aproximadamente dos horas la capa de gel desarrolla protuberancias fibrilares que sobresalen radialmente de cada una de las partículas de silicato de calcio. Los tentáculos fibrilares crecen en número y tamaño entrecruzándose e integrándose. El crecimiento en longitud se hace más lento, y se produce la unión lateral de las fibrillas para formar hojas estriadas que tienen huecos.

1.3.2 COMPUESTO HIDRÓXIDO DE CALCIO

Este compuesto también llamado portlandita, representa entre un 20 a 25% del volumen de los sólidos de la pasta hidratada, a diferencia del Silicato de Calcio el hidróxido de calcio (P. KUMAR METHA 1988) es una materia cristalina con una composición fija representada por $\text{Ca}(\text{OH})_2$

El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ forma grandes cristales de prismas hexagonales, que varían de acuerdo al espacio disponible, la temperatura de hidratación y las impurezas. Cuando se tiene una cantidad mayor de hidróxido de calcio en el concreto puede resultar peligroso en la durabilidad química por ataque de ácidos. A pesar de la tendencia del silicato y del hidróxido de calcio a ocupar todo el espacio, se forman huecos, probablemente a causa de la pérdida de volumen del hidróxido de calcio al formar una matriz cristalina debido a que los materiales cristalinos tienen una mayor densidad que los materiales amorfos y, por tanto, una cierta cantidad de material ocupará menos volumen dando lugar a huecos.

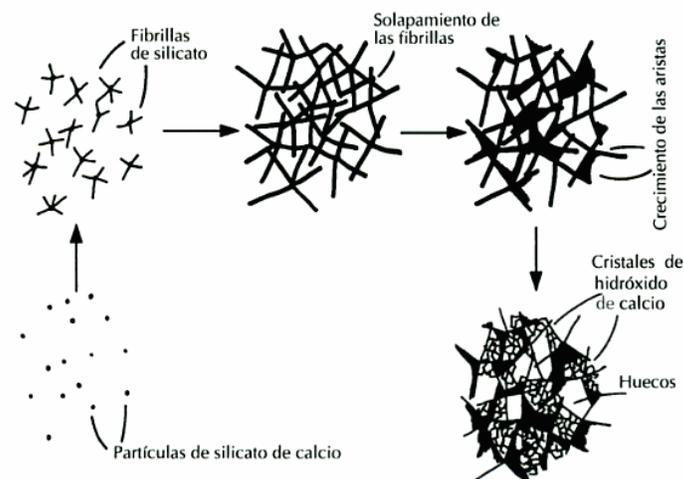


Figura 7. Representación de los pasos del endurecimiento del cemento Portland

1.3.3 COMPUESTO SULFOALUMINATOS DE CALCIO

Esta fase representa entre un 15 a 20% del volumen de los sólidos de la pasta de cemento hidratada, a edades tempranas de hidratación la relación sulfato-alumina favorece a formar el hidrato trisulfato, también llamado etringita.

La etringita (figura 8) se forma en el sistema de cemento Portland hidratado como resultado de la reacción de aluminato de calcio con sulfato de calcio, ambos presentes en el cemento Portland.

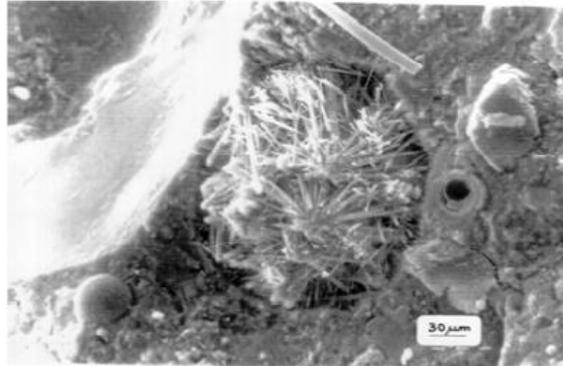


Figura 8, Agujas de etringita en la hidratación del cemento

En el sistema de cemento, la presencia de etringita depende de la relación de sulfato de calcio a trialuminato de calcio, cuando esta relación es baja, forma etringita durante la hidratación temprana y luego se convierte en el aluminato de calcio monosulfato.

La presencia de hidrato de monosulfato hace al concreto más vulnerable contra ataques por sulfatos el cual se explicará más adelante.

1.4 CLINKER NO HIDRATADO

En función del grado de hidratación de la pasta y la distribución del tamaño de partículas del cemento anhidro, se pueden encontrar partículas de clinker no hidratados en la microestructura de la pasta de cemento hidratada, a medida que se va dando la hidratación las partículas más pequeñas sin hidratar van desapareciendo, y las de mayor tamaño se van reduciendo, son difíciles de observar debido a que en las últimas fases de hidratación los hidratos se forman envolviendo las partículas de cemento.

1.5 AIRE EN LA PASTA DE CEMENTO

El aire en la pasta de cemento se presenta mediante formas esféricas, este puede quedar atrapado durante la mezcla, o incorporado intencionalmente para modificar las

características del concreto, tienen un tamaño que varía entre 50 a 200 μm . La presencia de aire puede afectar adversamente la resistencia y permeabilidad del concreto. El volumen de aire incorporado es introducido durante las operaciones de dosificación y mezcla del concreto y es variable en cantidad, tamaño y forma de las burbujas; si el tamaño de las burbujas ocupa un volumen relativamente grande y permanecen dentro de la masa del concreto, se obtiene una disminución importante en la resistencia potencial de la mezcla, de allí la necesidad de una buena compactación del concreto para extraer la mayor cantidad posible del aire atrapado, sin embargo incluir aire en la mezcla también tiene ventajas.

1.6 POROSIDAD EN EL CONCRETO

La porosidad en el concreto, se define como la cantidad de huecos capilares que quedan inmersos dentro de la pasta de cemento hidratada, como consecuencia de la evaporación del agua de la mezcla y del aire atrapado. (Figura 9)

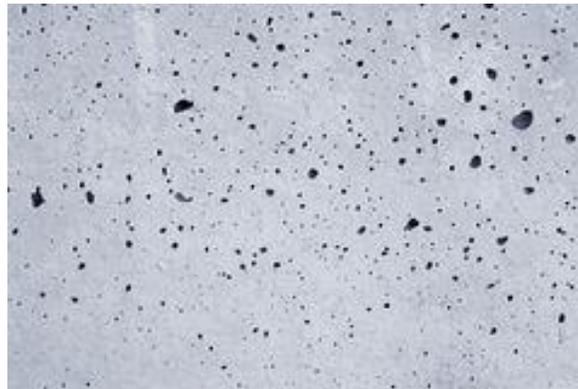


Figura 9 Porosidad en el concreto

El agua al estar ocupando un espacio, y evaporarse en forma parcial más el aire atrapado, deja millones de huecos entrecruzados en todas las direcciones; éstos espacios pueden unirse debilitando el concreto al generar unos pequeños conductos capilares. La porosidad es una variable importante del concreto y de esta dependen en parte otras propiedades como la resistencia a la compresión y la durabilidad.

Por medio de los poros en el concreto se propician daños ocasionados por los líquidos y de los gases que lo penetran, tales como CO_2 , agua, oxígeno, cloruros, sulfatos,

etc. Estos elementos o compuestos originan reacciones químicas, afectando la durabilidad cuando se expone al ambiente de servicio.

1.6.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AIRE INCLUIDO

La inclusión de una cantidad apropiada de aire en el concreto produce efectos deseables en sus características. En estado fresco mejora la trabajabilidad y disminuye el riesgo de segregación; en estado endurecido mejora notablemente la durabilidad en especial contrarresta la acción de congelamiento y deshielo; además, reduce la permeabilidad; aumenta la resistencia a la acción de los sulfatos y sustancias químicas, permite la reducción del agua del mezclado para un determinado grado de trabajabilidad y de la cantidad de arena de la mezcla.

1.7 AGUA EN LA PASTA DE CEMENTO

Dependiendo de la humedad del medio ambiente y de la porosidad que tenga la pasta, el cemento tiene la capacidad de retener agua en gran cantidad, la clasificación del agua en varios tipos es clasificada en base a la complejidad para ser removida de la pasta hidratada. El agua puede existir en la pasta de cemento de varias formas

1.7.1 AGUA CAPILAR

Es el agua que ocupa los huecos mayores a 50 \AA^2 de manera que parte de ella está sujeta débilmente a las fuerzas de atracción de la superficie del gel H-S-C

1.7.2 AGUA LIBRE

Es la que se encuentra fuera de la influencia de las fuerzas de superficie, de tal modo que tiene completa movilidad y puede evaporarse con facilidad.

² Angstrom $\text{\AA} = 0,0000001 \text{ mm} = 0.0001 \text{ Micrómetro } [\mu\text{m}]$

1.7.3 AGUA ABSORBIDA

Es una capa molecular de agua que se encuentra altamente adherida a las superficies de la pasta de cemento hidratada, es llamada también “agua activa” por su influencia en el comportamiento del concreto, es la principal responsable de la contracción por secado del concreto

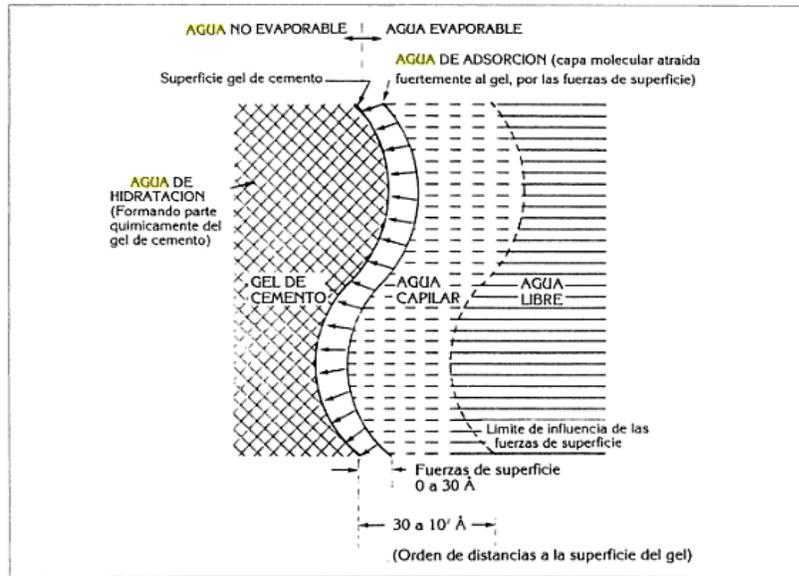


Figura 10 Tipos de agua en la pasta de cemento

1.8 FASE ADHERENCIA AGREGADOS-PASTA DE CEMENTO (ZONA DE TRANSICIÓN)

La adherencia se determina como la fuerza necesaria para separar dos componentes sólidos unidos entre sí en su interfaz. La adherencia pasta-agregado es el resultado de una combinación o entrelazamiento mecánico de los productos de hidratación del cemento con la superficie del agregado, y de reacciones químicas entre ésta superficie y la pasta de cemento, a esta adherencia entre agregado y pasta se le conoce como Zona de Transición, (figura 11)

La zona de transición comprende la interfaz entre la partícula de agregado y la pasta de cemento hidratado. En el inicio de la hidratación se forman unas finas películas de agua

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

envolviendo las partículas del agregado, dando lugar a una elevada relación a/c en esta zona. Mientras, en el interior de la pasta se van formando cristales de portlandita y etringita; pero en la zona de transición, la elevada relación A/C permite que los cristales anteriores formen grandes cristales dando lugar a una estructura muy porosa que con el tiempo se va llenando de hidrato de silicato de calcio, hidróxido de calcio y etringita.

La fuerza de esta unión se ve disminuida por la presencia de la porosidad. El tamaño y cantidad de poros depende del tamaño y distribución del agregado, contenido de cemento, relación A/C. condiciones de curado del concreto, factores ambientales, etc.

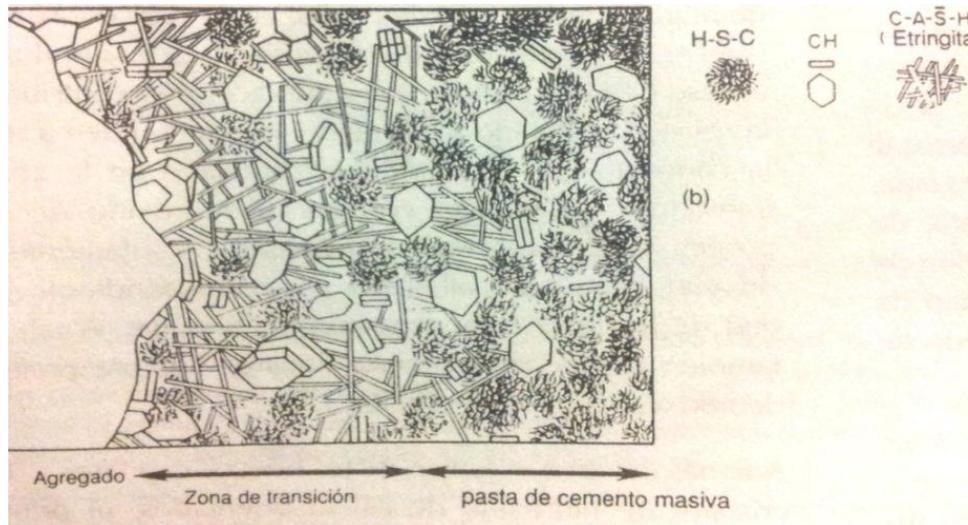


Figura 11 Unión agregados-pasta (zona de transición)

Por estas razones, se considera la zona de transición como la parte más débil del concreto esta zona es mucho menos resistente a los esfuerzos que la pasta de cemento hidratada y el agregado.

Al avanzar la hidratación, el H-S-C pobremente cristalino, y los cristales más pequeños de etringita y de hidróxido de calcio llenan el espacio vacío entre el marco creado por los grandes cristales de etringita y de hidróxido de calcio

1.8.1 PROPIEDADES DE LA ZONA DE TRANSICIÓN

La resistencia de la zona de transición depende del volumen y del tamaño de los huecos presentes. La cantidad de microfisuras depende de muchos agentes incluyendo el tamaño del agregado, su granulometría, cantidad de cemento, relación A/C, condiciones de curado y humedad.

La zona de transición formada, será susceptible de fisuración cuando esté sometida a fuerzas de tensión inducidas por movimientos diferenciales entre el agregado y la pasta. Estos movimientos surgen con el secado y el enfriamiento del concreto. En otras palabras, las microfisuras en la zona de transición se producen aún antes de que la estructura sea cargada. Evidentemente, el impacto de cargas, la contracción por secado, o el soporte de cargas mantenidas con altos niveles de tensión, aumentará el tamaño y número de las fisuras.

El volumen de los huecos y microfisuras, influyen en la durabilidad del concreto, debido a que lo vuelven más permeable permitiendo el paso de agua y propiciando la corrosión en el acero de refuerzo.

CAPÍTULO 2

FACTORES DE DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se observan las fases por las cuales pasa el concreto durante su proceso de hidratación así como la serie de reacciones químicas que dan resultado a obtener un concreto endurecido; en este capítulo, se abordan las patologías que sufre el concreto por deficiencias constructivas, es decir la sintomatología de daño que se presenta en el concreto

Para hablar de patología del concreto, primero tendríamos que definir que es patología, según el diccionario de la real academia española, define patología como: el grupo de síntomas asociados a una determinada dolencia; de acuerdo con esta definición y ampliándola un poco más en relación al concreto, podemos definir patología del concreto como: La parte de la durabilidad que se refiere a los signos, causas posibles y diagnósticos del deterioro que experimenta los estructuras del concreto. Es decir, como el estudio sistemático de los defectos del concreto, sus causas, sus consecuencias y soluciones.

La patología del concreto, está presente durante toda su vida, desde su fabricación hasta su demolición; durante el proceso de fabricación el concreto puede presentar ciertas patologías derivadas de la calidad de los materiales que lo conforman, un buen cemento, agregados de calidad, aditivos y el agua de mezclado, minimizarán la presencia de defectos en el concreto. Es importante tener agregados que no sean reactivos con los álcalis del cemento para no producir la reacción álcali-agregado en el concreto de la cual se hablara más adelante.

No todas las posibles causas de deterioro están asociadas a los materiales del concreto, otras afectaciones pueden ser dadas por un mal diseño de la mezcla, mala práctica durante el mezclado, problemas en el proceso de colado, mal vibrado, un mal curado, así

como las condiciones del sitio donde se colocará, por eso es recomendable hacer estudios previos de la calidad del ambiente al cual se va a ver expuesto el concreto.

Por ejemplo: los químicos ácidos destruyen la estructura y se observa un efecto de desconchamiento; la humedad y el oxígeno penetran hasta las varillas de refuerzo, se genera corrosión, los productos de la corrosión se expanden y produce grandes fisuras por donde entra más humedad; como resultado de esto, la estructura falla.

Dicho lo anterior se explicarán las patologías del concreto y como se presentan.

2.1 PATOLOGÍAS DEL CONCRETO POR DEFICIENCIAS CONSTRUCTIVAS

2.1.1 FISURACIÓN

El concreto es frágil por naturaleza, las fisuras que se forman en su superficie permiten la entrada de humedad y con ésta diversos químicos disueltos que dependiendo de sus características tienen un efecto destructivo a mediano y corto plazo.

Los motivos por los cuales se fisura el concreto son muy variables, pero lo importante es saberlas reconocer, de acuerdo con la forma en la que se presentan; teniendo en cuenta esto, conociendo su causa es posible prevenir su aparición y/o determinar qué consecuencias pueden traer al concreto.

Las fisuras pueden clasificarse de diferentes maneras:

Dependiendo de su tamaño pueden ser micro y macro fisuras; de acuerdo con la tabla 1 las que son menores a .05 mm se les llaman micro fisuras ya que no son perceptibles a simple vista y suelen no afectar al concreto siempre y cuando el ambiente no sea agresivo, generalmente carecen de importancia; las que tienen un tamaño mayor de 0.05mm hasta 0.4 mm son llamadas macrofisuras, las mayores a 0.4 mm son consideradas como grietas, estas suelen tener repercusiones en el sistemas estructural de la construcción.

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

Tabla 1. Clasificación de las fisuras

Clasificación	Tamaño	Características
Microfisuras	Menores a 0.05 mm	No suelen afectar al concreto, no son perceptibles a simple vista
Macrofisuras	> 0.05mm hasta 0.4 mm	Son apreciables a simple vista, si no se reparan pueden ocasionar daños a la estructura
Grietas	Mayores a 0.4 mm	Suelen afectar a la estructura, pueden ocasionar corrosión al acero por penetración de humedad.

También existen otras variables significativas para su caracterización, tales como la forma, posición y espaciamiento en el elemento, trayectoria, amplitud de la abertura, movimiento, entre otras.

Otra clasificación para las fisuras es:

1.-De acuerdo con la etapa en la cual se presentan, estas pueden ser en estado plástico del concreto o en estado endurecido

2.- De acuerdo con el tipo de tratamiento que se utilizara para repararlas, clasificándolas como fisuras vivas y fisuras muertas (M. FERNÁNDEZ CÁNOVAS 1988)

2.1.2 CAUSAS DE LAS FISURACIONES

Las causas más comunes de las fisuraciones son debidas a problemas intrínsecos del propio concreto, problemas del proyecto y/o de ejecución de obra, como por ejemplo: curado deficiente, contracción, variaciones térmicas, ataque químico, errores de proyecto, defectos en la construcción

Debido a factores ambientales se tienen otras causas que son las condiciones climáticas, por ejemplo, heladas y congelamiento, medios marinos, así como el ataque por fuego, abrasión, y también producto de fallas mecánicas

2.1.3 SANGRADO

Se manifiesta como la formación de una película de agua en la superficie del concreto recién colado, causado por el asentamiento de las partículas sólidas de la mezcla y simultáneamente la elevación del agua hacia la superficie (figura 1); el sangrado es un proceso normal y no debería disminuir la calidad del concreto si es reducido y el concreto ha sido colocado, acabado y curado adecuadamente.

El agua producida por el sangrado es útil en el control de la fisuración por contracción plástica. Pero si la cantidad de agua es excesiva aumenta la relación agua-cemento cerca de la superficie; y puede originar una capa superficial débil y con poca durabilidad.



Figura 1 Sangrado de concreto en una losa

2.1.4 SEGREGACIÓN DEL CONCRETO

La segregación del concreto es la separación de los diferentes elementos que componen la mezcla teniendo una distribución de partículas no uniforme, las partículas más gruesas tienden a desplazarse hacia el fondo, mientras las partículas más finas se desplazan hacia la superficie (figura 2) esto se produce cuando la cohesión interna de los materiales no es la adecuada; la segregación produce un concreto más frágil y menos durable, el acabado será muy pobre por no contar con agregados gruesos.

La segregación puede producirse por varios motivos, entre ellos por un déficit de cemento en la mezcla, exceso de agua, mayor cantidad de agregado grueso en relación a agregado fino, durante el transporte del concreto y principalmente por un mal procedimiento constructivo asociado a una mala colocación y exceso de vibrado



Figura 2 Segregaciones del concreto.

2.1.5 DECOLORACIÓN Y MANCHAS EN EL CONCRETO

La decoloración es la carencia de uniformidad en el color del concreto, se puede presentar en forma de manchas o cambios en la intensidad del color en la superficie terminada del concreto (figura 3). La decoloración en el concreto endurecido, puede ser causada por diversos factores como son:

- Diferentes lotes de arena, grava o cemento, en algunos casos cambio de aditivo
- Quemaduras por un uso inadecuado o excesivo de herramientas para acabado por ejemplo la llana metálica
- Durante la fabricación de la mezcla, el uso de diferentes cementos
- Empleo de diversos revenimientos en una misma área, por lo cual es importante mantener un revenimiento constante
- Cuando se adiciona cloruro de calcio en el concreto, alterando el color debido a que las ferritas en el cemento tienen una hidratación retardada
- Uniformidad en el curado de un elemento

En la mayoría de los casos el cambio de color, no presenta serios problemas estructurales en el concreto, pero si en la apariencia de la estructura.



Figura 3 Mancha en una superficie de concreto

2.1.6 ACERO DE REFUERZO EXPUESTO POR FALTA DE RECUBRIMIENTO

La falta de recubrimiento expone al acero a la acción de los agentes agresivos del ambiente como pueden ser sulfatos o cloruros disminuyendo la durabilidad del concreto; en muchos casos el acero queda expuesto debido a un mal uso de la cimbra debido a que no se toman las medidas necesarias para que el acero quede completamente ahogado en el concreto, actualmente existen separadores coloquialmente llamados “poyos” que ayudan a garantizar que se cumpla el espacio entre el acero y la cimbra para cumplir con el recubrimiento requerido y que el acero no quede expuesto.

2.1.7 JUNTA FRÍA

Las juntas frías son unos de los principales problemas que se tienen cuando se realiza un colado inapropiado de concreto plástico, las juntas frías son discontinuidades ocasionadas por un retraso en la colocación del concreto, con lo cual se coloca concreto plástico sobre concreto que ha empezado a fraguar, provocando que no haya buena adherencia entre las mezclas, disminuyendo la resistencia del concreto en la unión propiciado una falla o discontinuidad de la estructura que facilita la aparición de grietas.

2.2 FACTORES QUIMICOS QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

2.2.1 DEFINICIÓN DE DURABILIDAD.

El American Concrete Institute 201 define la durabilidad del concreto de la siguiente forma

—La durabilidad del concreto de cemento hidráulico se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable conservará su forma, calidad y servicio originales al estar expuesto a su ambiente”

La Norma Mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014 menciona que la durabilidad es: —La capacidad del concreto hidráulico para resistir satisfactoriamente durante la vida útil de la estructura las cargas de diseño, la acción ambiental, ataque químico o abrasión y de proteger al acero de refuerzo y demás elementos metálicos embebidos de la corrosión o cualquier otro proceso de deterioro, con el objeto de que el concreto mantenga su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas.”

Teniendo en cuenta estas condiciones, la expectativa de mejorar la durabilidad y por tanto la vida útil de una estructura, dependerá de las condiciones de exposición al medio ambiente, condiciones de servicio y los procedimientos constructivos del elemento.

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

Los principales agentes que afectan la durabilidad del concreto están dados por ataque de sulfatos, exposición al agua de mar, ataque ácido, carbonatación, abrasión, corrosión del acero de refuerzo y reacciones químicas; así como, la permeabilidad, malas prácticas constructivas previas, durante y posteriores a la colocación del concreto.

2.2.2 CEMENTOS RESISTENTES A SULFATOS

Para mitigar el ataque por sulfatos existen ciertos tipos de cemento los cuales favorecen el diseño de la mezcla contra ataques químicos, se pueden clasificar los cementos de acuerdo con ASTM C 150 y a NMX-C- 414-1997

Tabla 2 Clasificación ASTM C 150 cementos

Cemento	Composición de los compuestos (%)							pérdida en el encendido
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	CaO libre	MgO	
Tipo I	59	15	12	8	2.9	0.8	2.4	1.2
Tipo II	46	29	6 (8 máx)	12	2.8	0.6	3.0	1.0
Tipo III	60	12	12 (15 máx)	8	3.9	1.3	2.6	1.9
Tipo IV	30 (35 máx)	46 (40 mín)	5 (7 máx)	13	2.9	0.3	2.7	1.0
Tipo V	43	36	4 (5 máx)	12	2.7	0.4	1.6	1.0

Tabla 3 Descripción de los cementos ASTM C 150

TIPO I.	Cemento de uso general, cuando no se necesitan las propiedades especiales de otros cementos.
TIPO II.	Cemento de uso general que tiene resistencia moderada a los sulfatos y moderado calor de hidratación.
TIPO III.	Cemento de alta resistencia a temprana edad.
TIPO IV.	Cemento indicado cuando se necesita bajo calor de hidratación, como es el caso de las construcciones de concreto masivo.

**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

TIPO V.	Cemento utilizable cuando se requiere resistencia a los sulfatos, por ejemplo estructuras que están en contacto con suelos o aguas freáticas de alto contenido de sulfatos, y en concretos en contacto con aguas negras domésticas concentradas
---------	---

Tabla 4 Clasificación NMX-C- 414- ONNCCE -1997

Tipo CPO	Cemento Portland Ordinario
Tipo CPP	Cemento Portland Puzolánico
Tipo CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
Tipo CPC	Cemento Portland Compuesto
Tipo CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
Tipo CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto Horno

Tabla 5 Características especiales de los cementos

RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alkali Agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

2.2.3 COMPOSICIÓN DE LOS CEMENTOS

Tabla 6 Composición de los cementos

Tipo	Clinker	Componentes Principales			Caliza
	Portland+yeso	Escoria Granulada de alto horno	Materiales Puzolánicos	Humo de Sílice	
CPO	95-100	---	---	---	---
CPP	50-94	---	50-6	---	---
CPEG	40-94	60-6	---	---	---
CPC	50-94	35-6	35-6	10-1	35-6
CPS	90-99	---	---	10-1	---
CEG	20-39	80-61	---	---	---

**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

La NMX-C-155-ONNCEE-2014 da la siguiente tabla acerca de la exposición a acciones de deterioro del concreto

Tabla 7 Condiciones de exposición de los cementos

CLASIFICACIÓN	CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	
1	Ambiente seco:	
	Interior de edificaciones habitables.	
	Componentes interiores que no se encuentran expuestos en forma directa al viento ni a suelos o agua.	
	Regiones con humedad relativa mayor al 60% por un lapso no mayor de tres meses al año.	
2a	Ambiente húmedo sin congelamiento:	
	Interior de las edificaciones con humedad relativa mayor al 60% por mas de tres meses al año.	
	Elementos exteriores expuestos al viento pero no al congelamiento.	
	Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua sin posibilidad de congelamiento.	
2b	Ambiente húmedo con congelamiento:	
	Elementos exteriores expuestos al viento y al congelamiento	
	Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua con posibilidad de congelamiento.	
3	Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes:	
	Elementos exteriores expuestos al viento, con posibilidad de congelamiento y/o exposición a agentes congelantes.	
	Elementos en suelos no reactivos o no agresivos y/o en agua con posibilidad de congelamiento y agentes químicos descongelantes.	
4a	Ambiente marino totalmente sumergido:	
	Estructuras totalmente sumergidas sin exposición parcial o total al aire.	
4b	Ambiente marino grado moderado:	
	Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado moderado, colocadas entre 3 km y 300 m de la línea de costa.	
4c	Ambiente marino grado severo:	
	Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado severo, la línea de costa y 300 metros.	
4d	Ambiente marino zona de salpicadura:	
	Área rica en sales en contacto con agua. Estructuras en contacto con aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado.	
5a	Ambiente de agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos):	
	En contacto con agua	
	Ph	6.5-5.5

**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

	CO ₂ agresivo (en mg/l como CO ₂)	15-30
	Amonio (en mg/l como NH ₄ ⁺)	15-30
	Magnesio (en mg/l como Mg ²⁺)	100-300
	Sulfato (en mg/l como SO ₄ ²⁻)	200-600
	En contacto con suelo:	
	Grado de acidez según Baumann - Gully	mayor a 20
	Sulfatos (en mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire)	2000-6000
5b	Ambiente de agresividad química moderada (por gases, líquidos o sólidos):	
	En contacto con el agua:	
	pH	5.5-4.5
	CO ₂ agresivo (en mg CO ₂ /l)	31-60
	Amonio (en mg NH ₄ ⁺ /l)	31-60
	Magnesio (en mg Mg ²⁺ /l)	301-1500
	Sulfato (en mg SO ₄ ²⁻ /l)	601-3000
	En contacto con suelo:	
	Sulfatos (en mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire)	6000-12000
5c	Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos):	
	En contacto con agua	
	pH	4.5-4.0
	CO ₂ agresivo (en mg CO ₂ /l)	61-100
	Amonio (en mg NH ₄ ⁺ /l)	61-100
	Magnesio (en mg Mg ²⁺ /l)	1501-3000
	Sulfato (en mg SO ₄ ²⁻ /l)	3001-6000
	En contacto con suelo:	
	Sulfatos (en mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire)	>12000
5d	Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, químicos o sólidos):	
	pH	< 4.0
	CO ₂ agresivo (en mg CO ₂ /l)	> 100
	Amonio (en mg NH ₄ ⁺ /l)	> 100
	Magnesio (en mg Mg ²⁺ /l)	> 3000
	Sulfato (en mg SO ₄ ²⁻ /l)	> 6000
6	Acciones de erosión y cavitación:	
6a	Grado ligero. Vialidad con escasa circulación. Vehículos ligeros y tráfico peatonal. Sin riesgo de congelación (SRC).	

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

6b	Grado mediano. Carreteras y caminos de red secundaria. Pisos industriales con circulación de montacargas con ruedas de hule con menos de 12 ton. De carga. Superficies con maniobras de carga ligeras en interiores.
6c	Grado alto. Carreteras con carga intensa. Montacargas provistos de ruedas de hule o metálicas con cargas mayores a 12 ton. Flujo hidráulico menor a 12 m/s.
6d	Grado severo. Carreteras con carga muy intensa. Montacargas provistos de ruedas de hule, metálicas y tipo oruga. Patios de maniobras con tráfico alto y arrastre de objetos pesados. Flujo hidráulico mayor a 12 m/s con riesgo de cavitación.

Como propósito de este trabajo se analizaran los ataques químicos al concreto

2.2.4 ATAQUE QUÍMICO AL CONCRETO

En la mayoría de los casos el concreto no es atacado por sustancias químicas secas y sólidas. Para producir un ataque significativo sobre el concreto los químicos agresivos deben estar en solución. (M. FERNÁNDEZ CÁNOVAS 1988) El concreto es más vulnerable cuando se encuentra expuesto a soluciones agresivas ejerciendo presión en sus lados, ya que la presión tiende a forzar la solución agresiva hacia su interior

Por lo tanto se define como ataque químico al concreto a aquellos procesos de degradación que son causados por agentes agresivos provenientes de sustancias químicas de ambientes externos a la estructura los cuales se introducen a su interior en forma de solución y reaccionan con la pasta de cemento.

Algunos de los factores que provocan mayor preocupación son la exposición a los sulfatos, cloruros, los ácidos y la carbonatación dando paso a la corrosión del refuerzo y al deterioro del concreto; este tipo de ataques se explican detalladamente a continuación.

2.2.4.1 REACCIÓN ÁLCALI AGREGADO EN EL CONCRETO

La mayoría de los agregados en los concretos con cemento hidráulico son químicamente estables, y no presentan una interacción dañina con otros componentes del concreto. Sin embargo, este no es el caso de los agregados que contienen ciertos minerales

que reaccionan con los álcalis solubles del cemento. La reactividad álcali-agregado es una de las causas de deterioro en estructuras de concreto.

La reacción álcali-agregado se muestra como un proceso físico-químico en el cual intervienen los minerales que constituyen la naturaleza de los agregados según sea su origen cristalino o amorfo y los hidróxidos alcalinos del concreto que pueden ser aportados por el cemento, por lo tanto se define que la reacción álcali-agregados es la reacción entre los hidróxidos del cemento y las fases minerales en el agregado.

2.2.4.1.1 EFECTOS DE LA REACCIÓN ÁLCALI AGREGADO

La reacción álcali-agregado, es un fenómeno de carácter expansivo, que produce agrietamientos, que tienen origen en la unión entre el agregado reactivo y la pasta de cemento, en ocasiones se genera un anillo en el contorno del agregado reactivo, la exudación de gel a través de los poros o fisuras (formando escamas endurecidas sobre la superficie), la deformación de los elementos estructurales debido a la expansión interna del concreto; y los desprendimientos del concreto.



Figura 4: Fisuras en forma de mapeo formadas por reacción álcali-agregado

La presencia del acero en el concreto es un factor que define el aspecto de las fisuras, debido a la naturaleza expansiva del fenómeno y los esfuerzos provocados en la masa del concreto, las fisuras generadas en la parte del elemento que no contenga acero de refuerzo serán en forma de mapeo y en donde se tenga contacto con el acero se tendrán fisuras paralelas a la posición del refuerzo que pueden llegar a tener hasta 15mm de espesor y profundidades de 30 cm.

Dentro la reacción álcali-agregado se conocen básicamente dos mecanismos que se diferencian fuertemente por el tipo de agregado utilizado y de la velocidad de deterioro:

1. Reacción álcali-sílice: producida entre los álcalis y la sílice amorfa presentes en algunos agregados que resulta bastante lenta ya que generalmente se manifiesta luego de 5 a 15 años.
2. Reacción álcali-carbonato: producida entre los álcalis presentes en la solución de poro y algunos compuestos de carbonato que forman parte de ciertos agregados calizos o dolomíticos. En este caso la reacción suele ser bastante más rápida manifestándose luego de unos cuantos meses.

2.2.4.1.2 ENSAYES PETROGRÁFICOS

La reactividad de un agregado, dependen de la composición, origen geológico, y características de la textura de las rocas de las cuales deriva haciendo que reaccione rápida o lentamente.

Asumiendo que se trata de agregados sobre los cuales no existe historia previa de utilización, se debe recurrir en primer instante a efectuar un Ensayo Petrográfico con metodologías estandarizadas (ASTM 295) de una muestra representativa de agregado para obtener sus características y saber si tiene en su composición alguno o varios de los minerales y/o rocas que pudieran causar la reacción. Si la petrografía no detecta ninguno de estos elementos, se considera el agregado inocuo

Si se presentan algunos minerales reactivos, se debe recurrir a varios ensayos de acuerdo al ASTM

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

Tabla 8 Ensayos ASTM empleados para evaluar la reactividad en agregados

Ensayo ASTM	Parámetros que evalúa	Tipo de Especimen	Condición de Ensayo	Duración Usual	Pros	Contras
C 289	Sílice disuelta y reducción en alcalinidad en Agregados	Agregado Pulverizado	Inmersión en NaOH a 80 °C	24 Horas	Rápido, detecta agregados con elevada reactividad	Falla con agregados de reacción lenta, no usa gradación real
C 227	Expansión en combinaciones de cemento y agregado	Prismas de mortero de 25mm x 25 mm x 285 mm	Inmersión en H ₂ O a 38 °C	90 días y 180 días	Detecta agregados con reactividad rápida, permite comparar cementos	Demora mucho, falla con agregados de reacción lenta, no usa gradación real
C 1260 C 1567	Expansión en combinaciones de cemento y agregado, Efectividad de Adiciones	Prismas de mortero de 25mm x 25 mm x 285 mm	Inmersión en NaOH a 80 °C	16 días	Relativamente rápido, detecta agregados con reactividad lenta, permite comparar cementos	Muy severo, puede mostrar como reactivos agregados inocuos, no usa gradación real
C 1293	Expansión en combinaciones de cemento y agregado, Efectividad de Adiciones	Prismas de concreto de 75mm x 75 mm x 285 mm	Inmersión en H ₂ O a 38 °C	1 año a 2 años	Más realista, se acerca a la condición de obra	Demora mucho, el resultado se afecta mucho por las condiciones de almacenaje
C 441 (*)	Efectividad de Adiciones, usando cemento con alto contenido de álcalis y pyrex	Prismas de mortero de 25mm x 25 mm x 285 mm	Inmersión en H ₂ O a 38 °C	14 días y 56 días	Permite determinar la efectividad de adiciones minerales vs la dosis empleada	No es muy rápido, sólo estima resultados comparativos pero no absolutos

(*) No sirve para calificar agregados pero se incluye como información práctica relevante.

Cada ensayo establece un valor límite para cada edad de prueba, que de superarse indicaría que el agregado puede traer problemas de reactividad.

2.2.4.1.3 DIAGNÓSTICO DE REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

Actualmente es fácil identificar si hay problemas de reacción álcali-agregado en una estructura en la que se sospeche un ataque por álcalis aunque no se tengan expansiones en el concreto: una metodología a seguir para realizar la prueba se indica a continuación

1. Primero es extraer un núcleo con perforadora de la sección donde se sospeche que existe este fenómeno

2. Se obtienen secciones pulidas para que sean evaluarlas en el microscopio petrográfico por un especialista experto, de acuerdo con ASTM C 856 para detectar la aparición del gel.
3. Se procede a impregnar en la superficie de concreto una solución de acetato de uranilo, y luego hacer una observación visual mediante luz ultravioleta que revela la presencia del gel con una luminosidad verde amarillenta. Como se muestra en las siguientes imágenes.



Figura 5 Acetato de uranilo en una reacción álcali sílice

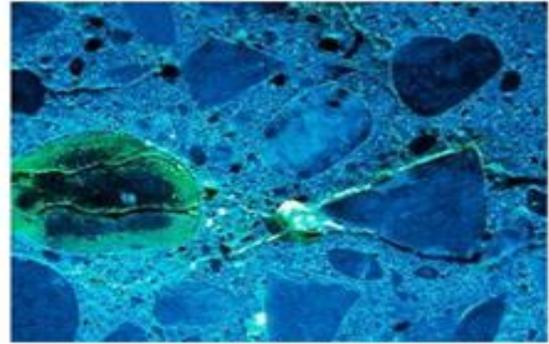


Figura 6 Revelado de Gel con luz ultravioleta

2.2.4.1.4 RECOMENDACIONES PARA CONTROLAR LA REACCIÓN ÁLCALI AGREGADO

- La primera recomendación es no utilizar agregados potencialmente reactivos, previa evaluación siguiendo la Norma ASTM C 295 que describe la caracterización petrográfica del agregado.
- También la Norma ASTM C 150 recomienda usar cementos con contenidos de álcalis que no sean mayores a 0.6%, denominados de bajo contenido de álcalis (usualmente Cementos Tipo II y Tipo V), lo cual ayuda mucho a reducir el problema potencial.
- Se debe limitar el contenido total de álcalis de las mezclas de concreto que se usarán en el proyecto a valores que oscilan entre 1.8 kg/m³ a 3.0 kg/m³ dependiendo de la condición de exposición al medio ambiente, ya que se ha comprobado que con estos límites se mitiga el control de las expansiones.

- Otra forma de controlar los álcalis, es reducir la cantidad de cemento en el concreto e integrar adiciones minerales tales como las puzolanas, cenizas volantes, humo de sílice, etc; que permiten reemplazos de cemento entre el 10% al 50% ,reduciendo la permeabilidad y siendo neutras ante la reacción con los álcalis
- Inhibir el ingreso de humedad con pinturas, láminas plásticas, etc; si no es posible controlar la humedad externa es recomendable reducir la porosidad y su permeabilidad limitando la relación agua/cemento a valores no mayores a 0.50

2.2.4.2. ATAQUE POR ÁCIDOS

El concreto es un material con un pH del orden de 13, que presenta un pobre desempeño durable frente al contacto permanente o frecuente con ambientes ácidos, es susceptible al ataque de cualquier vapor de ácido o ácido líquido aunque sean muy débiles. Por lo anterior, no existen los concretos altamente resistentes a los ácidos y por ello, deben protegerse de su acción mediante barreras impermeables y resistentes que los protejan del contacto directo. Debido a esto el concreto expuesto a ambientes ácidos con un $\text{pH} < 6$ deben protegerse adecuadamente mediante recubrimientos especialmente diseñados

La agresividad del ácido que ataca al concreto determina la velocidad de la reacción de la pasta del cemento con los diferentes ácidos inorgánicos y orgánicos

Los ácidos que afectan el concreto se producen por medio de sustancias que existen en el medio ambiente los cuales se producen de la siguiente manera:

- Cuando se realiza la combustión de combustibles, los gases sulfurosos que desprenden se mezclan con la humedad del ambiente creando ácido sulfúrico
- Los suelos que contengan sulfuro de hierro (pirita), al oxidarse producen ácido sulfúrico.
- Las corrientes de agua en regiones montañosas, son a veces ligeramente ácidas debido a que contienen CO_2 libre disuelto producen algunos ácidos orgánicos.

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

- En los campos agrícolas y en las industrias de procesamiento como son: fermentadoras, destilerías, lecherías, carnicerías, producción de jugos cítricos entre otras, producen ácidos orgánicos, que también atacan el concreto.

Los principales ácidos que atacan al concreto son: ácido sulfúrico, nítrico, sulfuroso, hidroclorehídrico y clorhídrico. Un pH de 5.5 a 6.0 puede considerarse como el límite máximo de tolerancia de un concreto de excelente calidad en contacto con alguno de los ácidos mencionados, igualmente pueden producirse ataques por ácidos al concreto a partir de las aguas provenientes de minas, industrias, corrientes montañosas, o fuentes minerales.

El deterioro del concreto por acción de los ácidos puede deberse a:

- a) La reacción del ácido y el hidróxido de calcio de la pasta; y
- b) La reacción del ácido con los agregados calizos y dolomíticos cuando estos se emplean.

El ácido ataca al concreto disolviendo los productos de hidratación del cemento o a través de reacciones químicas ácido-base, atacando a los hidratos de silicato de calcio del concreto

Cuando se presenta un ataque por ácido sulfúrico, el deterioro se presenta en mayor grado y más rápidamente, dado que el sulfato de calcio resultante de la reacción ataca al concreto

En la tabla 9 se muestra los tipos de ácidos y su peligrosidad

Si las soluciones acidas pueden filtrarse y alcanzar el acero de refuerzo, se puede presentar el fenómeno de corrosión.

Tabla 9: Tipos de ácidos y velocidad de daño en el concreto

Tipo de acido	Velocidad de Daño	Tipo de Acido	Velocidad de Daño
Acético	Desintegra lentamente	Láctico	Desintegra lentamente
Aguas acidas	Desintegra lentamente	Fosfórico	Desintegra lentamente
Carbónico	Desintegra lentamente	Oleico	Desintegra lentamente
Clorhídrico	Desintegra lentamente	Hidrofluoridrico	Desintegra rápidamente

Húmico	Desintegra lentamente	Nítrico	Desintegra rápidamente
Hidroclorhídrico	Desintegra lentamente	Sulfúrico	Desintegra rápidamente
Hipoclorhídrico	Desintegra lentamente	Bórico	Daño mínimo

2.2.4.2.1 PREVENCIÓN DE ATAQUES ÁCIDOS

Como ya es bien sabido el concreto no es resistente a los ácidos, las consecuencias que produce un ataque por ácidos pueden ser muy severas en la durabilidad del concreto, por lo cual debe tenerse mucho cuidado cuando va ser expuesto a estas soluciones, a continuación se presentan una serie de recomendaciones para mitigar el ataque por sustancias acidas.



Figura 7: Ataque por ácidos en una columna

2.2.4.2.2 RECOMENDACIONES PARA MITIGAR EL ATAQUE POR ÁCIDOS

- Solo se podrán emplear concretos de cemento Pórtland en ambientes ácidos si se cuentan con barreras protectoras o recubrimientos impermeables resistentes al ataque de ácidos.
- Una mezcla densa de concreto con baja relación agua-cemento puede proveer una protección aceptable contra el ataque de ácido diluido.
- Reemplazo de una proporción de cemento por materiales puzolánicos tales como humo de sílice, que en particular, incrementan la resistencia del concreto a los

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

ácidos. En todos estos casos, la exposición de los ácidos debe ser minimizada si es posible, y la inmersión del concreto en éstos debe evitarse.

- Ningún concreto hidráulico, por bueno que sea, podrá soportar agua con alta concentración de ácidos (ph = 3 o menor). En estos casos, una apropiada barrera protectora deberá ser utilizada (ACI-515.1R).
- Puesto que ningún concreto de cemento portland es totalmente inmune al ataque de ácidos, los aditivos pueden usarse sólo para disminuir la tasa de deterioro.

Los aditivos reductores de agua, incluyendo los superplastificantes, reducen la relación agua-cemento, y por lo tanto, la permeabilidad. Sin embargo, a medida que el concreto se deteriora, nuevas superficies están expuestas al ácido, especialmente cuando los productos de la reacción son solubles

2.2.4.2.3 BARRERAS PROTECTORAS

El ACI 515.1R realiza la siguiente categoría para la elección de la barrera protectora del concreto

Tabla 10 Elección de barrera protectora

Severidad del ambiente químico	Espesor nominal total	Barreras protectoras típicas	Usos típicos pero no excluyentes de los sistemas protectores en orden de severidad
Moderado	Menos de 40 mil (1 mm)	Polivinil butiral, poliuretano, epoxi, acrílico, asfalto de copolímero acrílico-estireno, alquitrán de carbón, goma clorada, vinilo, neopreno, epoxi de alquitrán de carbón, uretano de alquitrán de carbón	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra sales anticongelantes • Mejorar la resistencia a los ciclos de congelamiento y deshielo • Evitar que el hormigón se manche • Aplicación en servicios de agua de alta pureza • Proteger el hormigón en contacto con soluciones químicas con pH tan bajos como 4, dependiendo del agente químico presente
Intermedio	125 a 375 mil (3 a 9 mm)	Epoxi con filler de arena, poliéster con filler de arena, poliuretano con filler de arena, materiales bituminosos	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger al hormigón contra la abrasión y la exposición intermitente a ácidos diluidos en plantas químicas, tambos y establecimientos procesadores de alimentos
Severo	20 a 250 mil (1/2 a 6 mm)	Epoxi reforzado con vidrio, poliéster reforzado con vidrio, láminas de neopreno, láminas de cloruro de polivinilo plastificado	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger tanques y pisos de hormigón continuamente expuestos a materiales diluidos (pH menor que 3), ácidos orgánicos, soluciones salinas, álcalis fuertes
Severo	20 a 280 mil (1/2 a 7 mm) Más de 250 mil (6 mm)	Sistemas compuestos: (a) Sistema de epoxi con filler de arena con sobrecapa de epoxi pigmentado pero sin filler (b) Membrana asfáltica cubierta por ladrillos a prueba de ácidos utilizando mortero resistente a los agentes químicos	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger tanques y pisos de hormigón continua o intermitentemente sumergidos, expuestos al agua, ácidos diluidos, álcalis fuertes y soluciones salinas • Proteger el hormigón contra ácidos concentrados o combinaciones de ácidos y solventes

2.2.4.3 LIXIVIACIÓN DEL CONCRETO

La lixiviación es un fenómeno que resulta ser una forma de desarreglo que ocurre cuando el agua disuelve componentes en el concreto. El cemento Pórtland hidratado contiene entre un 25% a 30% de hidróxido de calcio, Ca(OH)_2 , el cual es soluble en agua. Este componente, con mucha probabilidad, será lixiviado del concreto.

Cuando el agua proveniente de lluvia, deshielo, u otro proceso que implique la presencia de aguas puras penetran con cierta facilidad por una estructura de concreto provocan la lixiviación de los compuestos cálcicos que suelen manifestarse exteriormente a través de manchas. Por lo regular este fenómeno sólo causa deterioro estético del concreto, sin embargo, si el agua pasa a través de grietas o juntas, la lixiviación también puede erosionar el concreto interno.

La lixiviación del hidróxido de calcio que contiene el concreto, trae como consecuencia la degradación de otros componentes de la pasta hidratada (silicatos, aluminatos y ferritos), y por ello el concreto pierde resistencia y se desintegra.

2.2.4.4 CONCRETO EXPUESTO AL AMBIENTE MARINO.

El agua de mar es uno de los factores principales entre los agentes naturales capaces de causar efectos destructivos sobre el concreto, la destrucción del concreto por acción del agua de mar es debida a uno o varios de los siguientes factores:

- a) Acción del oleaje.
- b) Evaporación del agua de mar, la cual deposita las sales dentro del concreto por encima del nivel de baja marea.
- c) Diferencia de mareas que favorece la acción destructiva debido a la cristalización de las sales.
- d) Reacción química entre las sales del agua y el concreto, la cual favorece la corrosión del acero de refuerzo.
- e) Los organismos marinos y los productos de su actividad biológica.
- f) La acción destructiva debida a la corrosión y expansión del acero de refuerzo.

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

Debido a las acciones indicadas, se forma en el concreto una concentración de sales que, al cristalizar, reaccionan con la pasta de cemento hidratado destruyendo el concreto. Al penetrar las sales en el concreto, por absorción o permeabilidad, originan, en el acero de refuerzo celdas anódicas o catódicas.

Cuando el agua de mar tiene forma de ingresar al concreto por medio de permeabilidad o fisuras, está acelerará el proceso de la corrosión del acero de refuerzo y la magnitud del ataque químico, el cual puede ser en el concreto sumergido, o a la porción del elemento por encima del nivel de marea. El concreto que presenta ciclos de humedad y secado es más propenso a sufrir ataques químicos debido a la evaporación del agua y la penetración de sales, que el concreto que está permanentemente sumergido en el agua.

El agua de mar se caracteriza por la gran estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas, y sobre todo por su salinidad, que varía de 30% a 37% por cada litro de agua.

De manera aproximada, una composición tipo de agua de mar se presenta en la tabla 11 :

Tabla 11: Componentes que constituyen el agua de mar

Componente	Formula química	Cantidad
Cloruro de sodio	NaCl	27
Cloruro de magnesio	MgCl ₂	3.2
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄	1.6
Sulfato de calcoo	SO ₄ Ca	1.3
Sulfato de potasio	SO ₄ K ₂	0.8
Cloruro de potasio	ClK	0.5
Carbonato de calcio	CO ₃ Ca	0.1
Varios bromuro de sodio, cloruro de estroncio etc	NaBr SrCl	0.5

*Valores expresados en gramos por cada litro de agua de mar

Total 35 % - pH 7.9-8.3

El concreto situado entre la zona de mareas está sujeto a la acción destructiva del oleaje, por debajo del nivel de baja marea, el concreto está sujeto a ataques químicos y pequeños procesos de abrasión por acción de arenas y gravas.

Pocos metros por debajo de la superficie la fuerza del impacto de las olas sólo es reducida, no siendo apreciables la erosión física y la acción del oleaje.

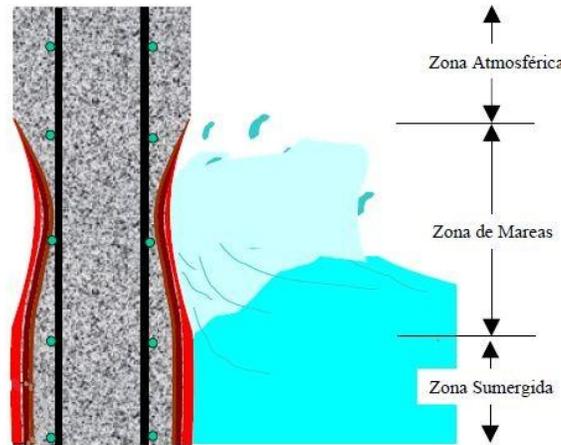


Figura 8: Representación de las zonas de mar en una columna ahogada

2.2.4.4.1 MECANISMO DE ATAQUE

En el ataque químico al concreto por acción del agua de mar intervienen los sulfatos, los cloruros que favorecen la solubilidad del yeso, así como la combinación de estos.

Las reacciones que se presentan en el concreto cuando es atacado por agua de mar son las siguientes:

- Eliminación del sulfato de calcio, debido a la mayor solubilidad del yeso, por acción de los cloruros;
- Sustitución del calcio por hidróxido de magnesio;
- Reacción del sulfato de magnesio con la cal;
- Formación expansiva de sulfoaluminatos y posterior descomposición de éstos, con formación de alúmina hidratada, hidróxido de magnesio y sulfato cálcico.
- Descomposición de los silicatos hidratados, con formación de sílice hidratada, yeso, y óxido de magnesio

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS



Figura 9: Deterioro del concreto expuesto a agua de mar

Como se ha explicado, en agua de mar se conjugan las acciones químicas de varios iones tales como los sulfatos, los cloruros, magnesio, acciones físicas como la acción de mareas, ciclos de humedad-secado, y abrasión y biológicas por la presencia de organismos marinos, por lo cual es un medio altamente nocivo para el concreto

Tabla 12: Efecto de las sustancias químicas en el concreto

VELOCIDAD DE ATAQUE A TEMPERATURA AMBIENTE	ACIDOS INORGANICOS	ACIDOS ORGANICOS	SOLUCIONES ALCANINAS	SOLUCIONES SALINAS
Rápida	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	–	Cloruro de aluminio
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de Sodio >20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio
Lenta	Carbónico	–	Hidróxido de Sodio 10% a 20% Hipoclorito de sodio	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cloruro de sodio
Insignificante	–	Oxálico Tártarico	Hidróxido de Sodio <10% Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de Sodio

2.2.4.4.2 RECOMENDACIONES ANTE AMBIENTE MARINO

El concreto armado expuesto al agua de mar presenta problemas especiales, ya que la sal puede penetrar en él, que dan como resultado corrosión del acero de refuerzo, fisuración y desprendimientos del concreto.

Se recomienda seguir las siguientes indicaciones:

- El acero en el concreto armado que está completa y permanentemente inmerso por debajo del nivel de baja marea se encuentra libre de corrosión, debido a que el oxígeno y el CO₂ se encuentran virtualmente excluidos. Por lo tanto, a pesar de estar contaminadas por concentraciones altas de cloruros, las estructuras sumergidas bajo el mar no estarán sujetas a una corrosión significativa.
- La permeabilidad del concreto como se ha mencionado a lo largo de este trabajo es un factor importante que favorece la penetración de cloruros por lo cual se deben de tener concretos de baja permeabilidad con relaciones agua/cemento bajas
- Se recomienda el uso de cementos tipo II y tipo V resistentes a los sulfatos con adiciones de materiales cementantes
- El concreto debe mantener un Ph entre 12 y 13 para mantener una adecuada protección al acero de refuerzo e impedir la corrosión
- Se debe llevar acabo un correcto proceso constructivo de los elementos a colar, teniendo especial cuidado en los tiempos de curado para evitar posibles patologías que favorezcan el ingreso de sustancias nocivas

2.2.4.5 ATAQUE POR SULFATOS

El ataque de sulfatos es una de las grandes amenazas para el concreto, los sulfatos realizan una reacción química que incluye la formación de productos expansivos en el concreto endurecido produciendo deformaciones en la estructura y su deterioro

El concreto atacado por sulfatos, sufre deterioro de acuerdo a los componentes de la mezcla, la calidad del concreto en el lugar expuesto, y la cantidad de concentración de sulfatos

2.2.4.5.1. LOS SULFATOS Y SU ORIGEN

Los sulfatos pueden originarse de tres formas: de origen natural, biológico e industrial

- Entre los sulfatos de origen natural se pueden mencionar algunos suelos orgánicos, suelos arcillosos y aguas freáticas de los mismos que produzcan sales sulfatadas. El agua de mar es un agente altamente compuesto de sales de sulfato, además de otras sales agresivas para el concreto.
- Los sulfatos de origen biológico provienen de microorganismos o de aguas residuales que contiene descomposición biológica aeróbica en sustancias orgánicas que comúnmente contienen proteínas y/o azufre.
- Entre los sulfatos de origen industrial se presentan aguas residuales con presencia de azufre, especialmente sulfatos, así como los que provienen de plantas industriales y fábricas, laboratorios, entre otros, los cuales son desechados y penetran al suelo y a las aguas freáticas.

En zonas industriales y urbanas se presenta una alta combustión de carbón y gasolina con azufre, lo cual produce dióxido de azufre que en presencia de oxígeno y humedad forman ácido sulfúrico. El cual es llevado a la atmosfera y cuando se presenta precipitación forma lluvias ácidas que atacan la superficie del concreto endurecido.

Los sulfatos más agresivos al concreto son:

- Sulfato de amonio (NH_4SO_4)
- Sulfato de calcio (CaSO_4)
- Sulfato de magnesio (MgSO_4)
- Sulfato de sodio (NaSO_4)

Otros sulfatos perjudiciales para el concreto pero que no son tan agresivos son:

- Sulfato de cobre Cu_2SO_4
- Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$
- Sulfato de bario $BaSO_4$

2.2.4.5.2. PROCESO DE ATAQUE POR SULFATOS

La degradación del concreto por la acción de los sulfatos, es el resultado de las reacciones químicas entre el cemento portland hidratado y los iones de sulfato generados por un agente externo (P. KUMAR METHA 1988). El ataque por sulfatos puede presentarse de dos formas, mediante expansión del concreto y por pérdida de la resistencia y de la masa.

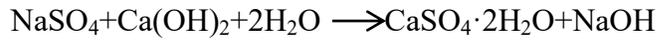
Cuando el concreto presenta fisuras, tiene una mayor permeabilidad dando paso fácil al agua con presencia de sulfatos, originando que el concreto se expanda y ocasione daños estructurales.

Existen dos reacciones químicas involucradas en el ataque de sulfatos al concreto.

1. Combinación de los sulfatos con hidróxido de calcio (cal hidratada), liberada durante el proceso de hidratación del cemento. Esta combinación forma sulfato de calcio (yeso)
2. Combinación de sulfato de calcio y aluminato de calcio hidratado para formar sulfoaluminato de calcio también llamado etringita secundaria

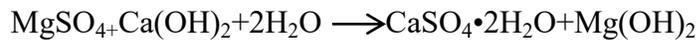
Una solución de sulfato ataca el cemento, puesto que el sulfato reacciona con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) y con los hidratos de aluminato de calcio, la formación de yeso se forma por el intercambio de cationes, originando la reducción de la rigidez y la resistencia, seguido por la expansión y el agrietamiento transformando la pasta de cemento en una masa esponjosa y no cohesiva, de acuerdo con el tipo de catión que se encuentre en

el sulfato que puede ser Na^+ o Mg^{2+} , el hidrato de silicato de calcio y el hidróxido de calcio pueden ser convertidos en yeso de las siguientes formas:



En este caso el ataque de sulfato de sodio (Na) la formación del hidróxido de sodio forma una alta alcalinidad en la ecuación, el volumen de yeso es mayor con lo que puede presentarse un fenómeno de expansión.

Cuando el sulfato que ataca es magnesio se presenta la siguiente forma



En la cual la transformación de hidróxido de calcio a yeso es seguida por la formación de hidróxido de magnesio el cual es alcalino e insoluble, afectando la estabilidad del hidrato de silicato de calcio, por lo cual el sulfato de magnesio hace más daño en el concreto. Los productos de la reacción, yeso y sulfoaluminato de calcio (etringita secundaria) Figura 10, tienen un volumen mucho mayor que los compuestos que reemplazan, de modo que su reacción con los sulfatos produce expansión y ruptura del concreto.



Figura 10 Depósitos de etringita secundaria formándose en un vacío

Los sulfatos agresivos mencionados anteriormente reaccionan de la siguiente manera:

El sulfato de calcio ataca el aluminato de calcio hidratado y forma etringita secundaria. El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando yeso y etringita secundaria. El sulfato de magnesio ataca, de manera similar, al sulfato de sodio y forma yeso, etringita secundaria y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma primeramente en la superficie del concreto, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y entonces descompone el silicato de calcio hidratado

2.2.4.5.3. PREVENCIÓN DE ATAQUE POR SULFATOS

De acuerdo con Neville, las consecuencias del ataque de sulfatos no sólo producen degradación por expansión y fisuración; sino también, una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento. Desde luego, lo anterior conlleva una pérdida de adherencia entre la pasta y las partículas de los agregados. El deterioro, por lo general, comienza en las esquinas, siguiendo una fisuración que dañan el concreto.

Existen niveles establecidos de concentración de sulfatos que permiten evaluar su grado de agresividad al concreto, tales como las indicadas en la tabla 13

Tabla 13 Clasificación de la severidad de ambiente de sulfatos de acuerdo con el ACI 201

Exposición	Concentración de sulfatos solubles expresados en SO ₄	
	En el suelo (%)	En el agua (ppm)
Suave	<0.1	<150
Moderada	0.1 a 0.2	150 a 1500
Severa	0.2 a 2.0	1500 a 10000
Muy Severa	>2.0	>10000

2.2.4.5.4. FACTORES QUE MITIGAN EL ATAQUE POR SULFATOS

Es importante conocer las condiciones de obra de los concretos que estarán expuestos a sulfatos. La agresividad de las condiciones depende de la saturación del suelo, del agua, de la temperatura y humedad, así como la concentración de sulfatos y el tipo de sulfatos involucrados. El sulfato de magnesio es el más dañino, seguido del sulfato de sodio y posterior el sulfato de calcio

En relación a la tabla anterior se pueden emplear algunas soluciones para reducir el ataque por sulfatos en el concreto.

- Reducir al mínimo el contenido de C3A del cemento, para ello es conveniente utilizar un cemento RS (resistente a sulfatos)
- Reducir la cantidad de Ca(OH)_2 de la pasta de cemento hidratado utilizando cementos compuestos que contengan escoria de alto horno o de puzolanas.
- Puede obtenerse protección frente al ataque por sulfatos si se emplea concretos densos, de alta calidad, con baja relación agua-cementante, y con cementos de adecuada resistencia a los sulfatos.
- Por lo cual se recomienda para exposición moderada el uso de cemento tipo II o de cemento compuesto
- Para exposición severa con sulfatos el cemento tipo V (ASTM C 150) es la mejor opción ya que tiene características Resistente a Sulfatos, se requiere de una mezcla de cemento y puzolona (la puzolona entre un 25 y 40% del peso del material cementante total de la mezcla) o escoria de alto horno (no menor de 70%)
- Un cemento tipo V que no este compuesto de cemento + Puzolona o escoria de alto horno, no será recomendable debido a que si bien en su composición no contiene C3A para formar etingita secundaria, el silicato de hidróxido de calcio es vulnerable al ataque acido de los sulfatos
- La superficie de los concretos expuesta al ataque de sulfatos deberá ser tratada con pinturas a base de resinas epoxy, alquitrán, brea, bitumen o asfalto. Ello con la finalidad de sellar los poros capilares con una capa impermeable. La capa de revestimiento debe quedar perfectamente adherida al concreto

2.2.4.6. ATAQUE POR CLORUROS

La presencia de cloruros dentro del concreto da origen al fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo, cuando se tienen concretos sin refuerzo, este proceso degradante es de menor importancia. Los cloruros pueden estar presentes en el concreto desde el diseño de la mezcla, pero el mayor ataque se presenta cuando los iones ingresan desde el exterior.

Como la mayor parte de los agentes químicos degradantes, los cloruros penetran como contaminación en los componentes del concreto al momento de la dosificación o bien cuando el concreto está expuesto a un medio ambiente agresivo principalmente el agua de mar o en deshielos. De esta manera los cloruros se vuelven un elemento activo en el proceso de daño y degradación de las estructuras en ambientes marinos.

Los cloruros pueden penetrar fácilmente al interior del concreto por capilaridad, bajo los efectos de variación de humedad, resultado de los ciclos de humedecimiento y secado.

2.2.4.6.1. PROCESO DE ATAQUES POR CLORUROS

Los cloruros totales en el concreto se pueden subdividir químicamente en ligados y libres. Esta distinción resulta importante ya que son los cloruros libres los responsables de la corrosión del acero de refuerzo.

Los cloruros ligados son los que están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión; por lo tanto, los límites en las especificaciones deben aplicarse al contenido de cloruros libres en lugar de al contenido total o soluble en ácido

El ataque por cloruro se da principalmente cuando el ingreso de cloruros es desde el exterior, debido a sales descongelantes o concreto en contacto con agua de mar.

Cuando el concreto está expuesto permanentemente a los cloruros como son los elementos sumergidos en el agua de mar, los cloruros ingresan hasta una cierta profundidad, pero si no existe presencia de oxígeno no producirá corrosión, si el concreto está expuesto a ciclos de humedad y secado el ingreso de los cloruros se da rápidamente, debido a que el concreto seco absorbe agua y si las condiciones ambientales cambian a secas, el agua absorbida se evapora desde los poros hacia el aire pero lo único que se evapora es el agua dejando las sales como residuos en el concreto.

El agua se traslada hacia afuera del concreto y las sales hacia su interior lo que hará que cuando se repita el ciclo de humedad, el agua de mar traerá más sales que penetraran mas profundamente hasta alcanzar el acero de refuerzo. Por lo cual en el concreto armado, la absorción de las sales establece áreas anódicas y catódicas, la acción electrolítica resultante conduce a la producción de la corrosión sobre el acero (tema que se abordara más adelante), con la consecuente ruptura del concreto que lo rodea, de tal manera que los efectos aumentan

El ingreso de cloruros es fuertemente influido por los ciclos de humedad y secado que dependerá del movimiento del mar, el viento y la exposición al sol.

2.2.4.6.2. EFECTO DE LOS CLORUROS EN EL ACERO DE REFUERZO

La pasta de cemento tiene un pH mínimo de 13 y el acero de refuerzo embebido no es propenso a corroerse en esa circunstancia, fundamentalmente por la presencia de una película microscópica de óxido que evita su disolución anódica. No obstante, si el pH disminuye a menos de 10 por la acción de efectos tales como la carbonatación, la corrosión puede iniciarse. El efecto de la carbonatación puede disminuir el pH a niveles de 8 o 9, resultando en corrosión del acero cuando están presentes la humedad y los iones cloruro disueltos en agua en niveles por encima de 0.2 por ciento relativos a la masa de cemento, lo cual acelera la corrosión.

La corrosión puede iniciarse por la acción de iones de cloruro sobre el acero de refuerzo, aun en ambientes con un pH superior a 10 u 11, aunque estos casos se relacionan con cloruros presentes de origen en la mezcla por efectos de los agregados, el agua o los aditivos, pues los que penetran del exterior están generalmente asociados con el proceso de carbonatación, el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el concreto.

En relación con el acero ahogado en el concreto, las barras de refuerzo actuarán como un conductor eléctrico y el agua en los poros de la pasta actuará como electrolito. Durante el proceso de corrosión, el oxígeno es consumido y genera los productos de corrosión; el agua se necesita para permitir que el proceso de corrosión se mantenga y continúe, su presencia se relaciona con la generación de óxido férrico. Así, el resultado principal y más grave de la acción de los cloruros sobre el acero de refuerzo lo constituye la corrosión acelerada que éste sufre a consecuencia de su acción como catalizador en ese proceso electrolítico.

En muchas estructuras de concreto localizadas en ambientes marinos cercanos a las costas, en las que el daño se ha iniciado a través de una incipiente penetración de cloruros hacia el acero debido a una permeabilidad excesiva del concreto, su carbonatación o el agrietamiento de las secciones, la acción de la corrosión y del incremento de diámetro de las varillas causan por sí mismas agrietamiento en el recubrimiento del concreto, lo que facilita en gran medida el acceso de humedad, aire y cloruros contenidos en el agua, y acelera así el proceso de ataque, llevando las estructuras a daños irreversibles en periodos notablemente cortos. Así, ante la sospecha de ataque, se deberán incorporar de inmediato programas de reparación y mantenimiento de los elementos afectados



Figura 11 Corrosión del acero de refuerzo por ataque de cloruros

2.2.4.6.3. CLORUROS EN LA MEZCLA

Los cloruros se pueden presentar desde el inicio en la mezcla de concreto ya sea por agregados contaminados, en los aditivos o en el agua, estos cloruros se expresan como porcentaje de ion cloruro respecto al peso del cemento el ACI 318-89 considera que el contenido de ion cloruro del concreto se limita a 0.15 por ciento por masa de cemento El mismo cemento portland contiene una mínima cantidad de cloruro (0.01 por ciento de su masa) lo cual no es perjudicial en el concreto

El principal problema que se tiene cuando un concreto está expuesto a cloruros es que se lleva a cabo el proceso de corrosión en el acero de refuerzo, es decir, el ataque de cloruros al concreto está prácticamente ligado a generar corrosión en el acero, por tal motivo es importante controlar en nivel de exposición del concreto a sustancias dañinas

2.2.4.6.4. TRATAMIENTOS ADICIONALES PARA PREVENIR EL INGRESO DE ION CLORURO

Las membranas a prueba de agua han sido usadas para minimizar el ingreso de iones cloruro en el concreto. Una barrera en contra del agua también actuará como una barrera contra cualquier cloruro disuelto externo.

Algunas membranas ofrecen una considerable resistencia a los cloruros y la humedad, aun cuando haya presencia de burbujas o grietas en el concreto

Los requerimientos para un sistema a prueba de agua ideal son:

- Ser fácil de instalar;
- Tener buena adherencia con la superficie;
- Ser compatible con todos los componentes del sistema incluyendo la subbase, la parte inferior, el primer revestimiento, adhesivos, y la capa superior (cuando se utiliza)
- Mantener la impermeabilidad a los cloruros y humedad bajo condiciones de servicio, especialmente temperaturas extremas, movimientos de grietas, envejecimiento, y cargas sobre impuestas.

La impregnación con polímeros es otro procedimiento para evitar el ingreso de ion cloruro y consiste en llenar algunos de los vacíos en el concreto endurecido. Los estudios de laboratorio han demostrado que el concreto impregnado con polímero (ACI 548.1R) es fuerte, durable y casi siempre impermeable.

La sobrecapa puede ser colocada ya sea por roseado de la resina sobre la superficie del concreto o por premezclado de todos los ingredientes y colocación del concreto poliméricos.

Se pueden utilizar barreras protectoras igual como se explicó en el ataque por ácidos cumpliendo con los requerimientos del ACI 201

2.2.4.6.5. RECUBRIMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO

Según las NTC para diseño y construcción de estructuras de concreto menciona los siguientes valores para recubrimientos

Tabla 14: Recubrimiento libre mínimo requerido NTC-DCEC

Recubrimiento libre mínimo requerido								
Clasificación de exposición	Resistencia a compresión especificada, MPa (kg/cm ²)							
	15 (150) ⁽¹⁾	20 (200)	25 (250)	30 (300)	40 (400)	50 (500)	60 (600)	70 (700)
	Recubrimiento mínimo requerido (mm)							
A1	30	25	25	20	20	20	15	15
A2	50	40	35	30	25	25	20	20
B1	65	50	40	35	30	30	25	25
B2	—	—	50	45	40	35	30	30
C	—	—	—	—	—	70 ⁽²⁾	65 ⁽²⁾	60 ⁽²⁾

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

En donde la clasificación de exposición es la siguiente.

Tabla 15: clasificación de exposición NTC-DCEC

Superficies y ambiente de exposición	Clasificación de exposición
a) Superficie de miembros en contacto con el terreno:	
1) Protegida por una membrana impermeable	A1
2) En suelos no agresivos	A2
3) En suelos agresivos ¹	D
b) Superficies de miembros en ambientes interiores:	
1) Encerrado totalmente dentro de un edificio, excepto por breve periodo de exposición al ambiente durante la construcción ²	A1
2) En edificios o sus partes donde los miembros pueden estar sujetos a humedecimiento y secado repetido ²	B1
c) Superficies de miembros no en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores ³ que son:	
1) No agresivos	A2
2) Ligeramente agresivos	B1
3) Agresivos	B2
d) Superficies de miembros en agua ⁴ :	
1) En contacto con agua dulce (dura)	B1
En agua dulce a presión (dura)	B2
En agua dulce corriente (dura)	B2
2) En contacto con agua dulce (suave)	B2
En agua dulce a presión (suave)	D
En agua dulce corriente (suave)	D
3) En agua con más de 20 000 ppm de cloruros:	
– Sumergida permanentemente	B2
– En zonas con humedecimiento y secado	C
e) Superficies de miembros en otros ambientes:	
En cualquier ambiente de exposición no descritos en los incisos de (a) a (d)	D

2.2.4.7 CORROSIÓN DEL ACERO

CONCEPTOS SOBRE LA CORROSIÓN

La corrosión del acero es un fenómeno en el cual existe una oxidación y representa la destrucción progresiva del metal.

La corrosión metálica cuando tiene lugar en un medio acuoso es un fenómeno de carácter electroquímico, es decir, supone la existencia de una reacción de oxidación y una reducción y la circulación de iones a través del electrolito. Así, sobre la superficie del metal, se generan dos zonas, de las cuales, donde se produzca la oxidación del metal, actuara de ánodo liberando electrones que emigran a través del metal hacia otro lugar donde reaccionan a base de producir una reducción de alguna sustancia existente en el electrolito.

Esta sustancia serán los iones hidrogeno en medios ácidos y el oxígeno disuelto en el agua en medios alcalinos y neutros. (C.ANDRADE 1988)

El proceso de corrosión crea una pila electroquímica la corrosión a través del metal y del electrolito genera un circuito cerrado entre ánodo y cátodo, si el circuito de interrumpe en alguno de sus puntos la corrosión se detiene

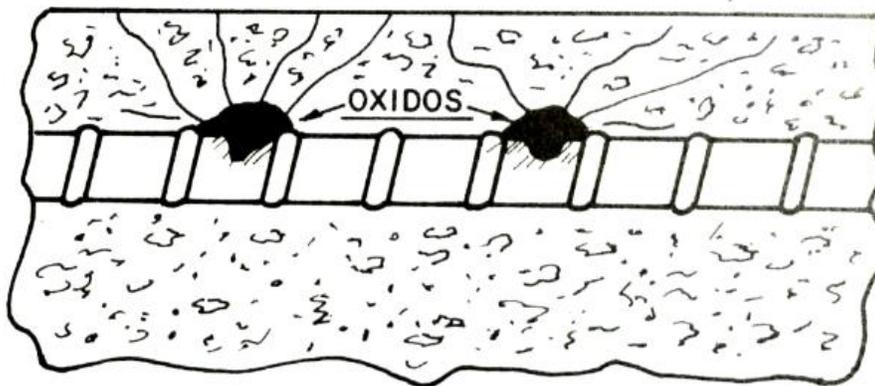


Figura 12 Formación de la pila de corrosión

Las causas por las cuales una estructura puede ser afectada por corrosión del acero, se originan por el medio agresivo al cual está expuesto el concreto así como por los materiales que se utilizan para la fabricación de la mezcla

2.2.4.7.1 FORMAS Y CAUSAS DE CORROSIÓN EN EL ACERO

Existen diversas formas en las cuales se puede presentar la corrosión, se clasifica principalmente por la extensión del área dañada. Los tipos más frecuentes son: generalizada, localizada, por picaduras y por fisuras como se muestra en la figura 12

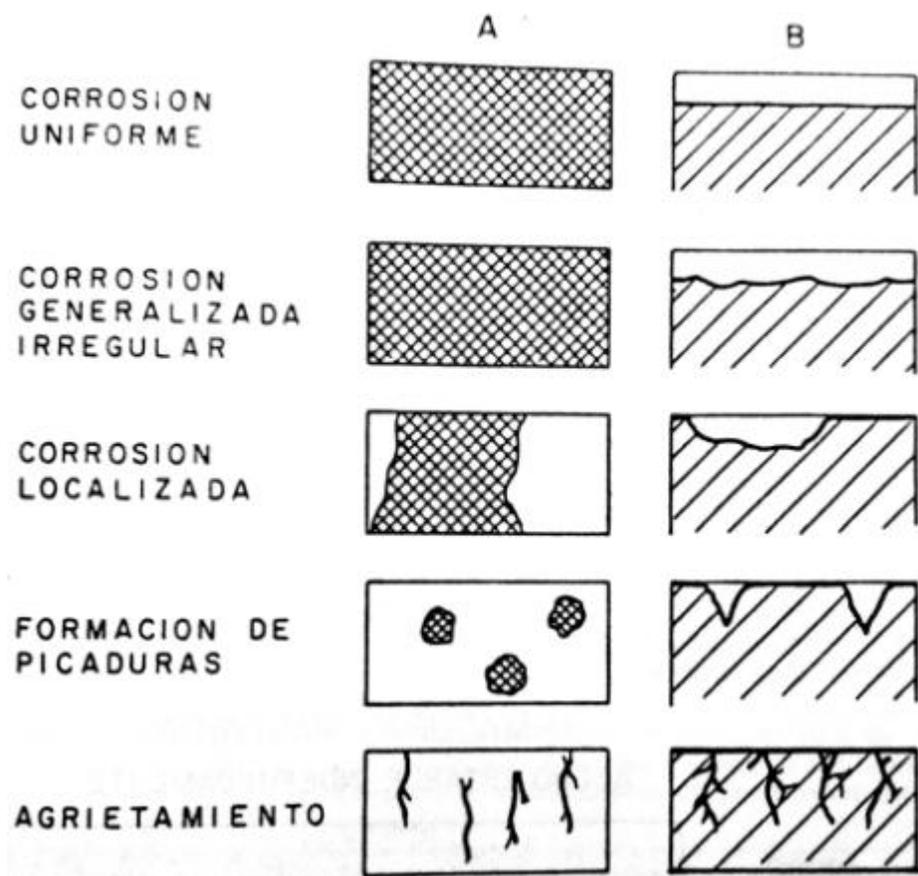


Figura 12 Morfologías de la corrosión

La alcalinidad del concreto es debida principalmente al hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y los álcalis que puedan estar incorporados como sulfatos en el Clinker (C.ANDRADE 1988)

Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12.6 y 14, es decir en el extremo más alcalino de la escala de pH. A estos valores de pH y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de refuerzo se encuentra pasivado, es decir, recubierto de una capa de óxidos transparentes, compacta y continua que lo mantiene protegido por periodos indefinidos, aun en presencia de humedades elevadas en el concreto.

Esencialmente son las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivante del acero son:

- ✓ La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (tanto porque se añadan durante el amasado como porque penetren desde el exterior), u otros iones despasivantes en contacto con la el refuerzo, y
- ✓ La disminución de la alcalinidad del concreto por reacción con sustancias acidas del medio

Como se muestra en la siguiente figura los iones despasivantes dan lugar a una corrosión de tipo localizada, mientras que la reducción del pH permite la disolución completa de la capa pasivante y por lo tanto da lugar a una corrosión de tipo generalizado, en esta figura se muestra otro tipo de corrosión como es la fisurante bajo tensión que aparece en presfuerzo.

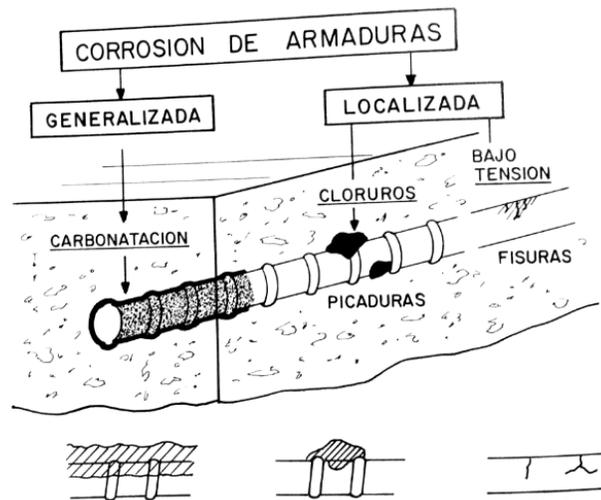


Figura 13 Tipo de corrosión del refuerzo

2.2.4.7.2. CORROSION LOCALIZADA

La presencia de cloruros es la situación más agresiva y responsable del mayor número de casos de corrosión del refuerzo, los iones sulfuro y sulfato son también despasivantes, pero son menos frecuentes y peligrosos que el caso de los cloruros, destruyendo de forma puntual la capa pasivante del acero provocando corrosión por picaduras.

2.2.4.7.3 CORROSION GENERALIZADA

Es la que se produce por un descenso de la alcalinidad del concreto que puede ser debido a un deslavado principalmente por aguas puras o acidas o por las reacciones de los compuestos NaOH, KOH y CaOH₂ de los compuestos del concreto reaccionando con el CO₂ del medio ambiente produciendo carbonatación

2.2.4.7.4 MEDIOS PARA PREVENIR LA CORROSIÓN

El control de la corrosión se basa en la inhibición de las reacciones químicas que conducen a la destrucción del estado metálico. El carácter y extensión de las medidas preventivas adoptadas dependen de la naturaleza del metal y del ambiente al que está expuesto.

El diseño de la estructura y las prácticas constructivas son importantes en la corrosión del acero de refuerzo. Las proporciones de mezcla del concreto, el espesor del recubrimiento los procedimientos de control de las grietas y la implementación de medidas diseñadas específicamente para proteger de la corrosión al acero son algunos de los factores que ayudan a controlar la magnitud y velocidad del proceso corrosivo.

2.2.4.8 CARBONATACIÓN DEL CONCRETO

La carbonatación es un fenómeno que ocurre en las estructuras del concreto, es un proceso químico que avanza lentamente desde el exterior de la estructura hacia el interior hasta afectar la pasivación del refuerzo, propiciándole corrosión; en concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación particularmente, es un proceso que tiene menores consecuencias.

La carbonatación del concreto además de propiciar corrosión en el acero, provoca variaciones en su resistencia a compresión, tensión, y fisuraciones en las zonas afectadas de la estructura

Se puede definir el efecto de la carbonatación en el concreto como la reducción del pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico penetra en los poros del concreto y se combina con el hidróxido de calcio convirtiéndolo en carbonato de calcio. La pérdida de pH es grave ya que el concreto originalmente tiene un valor de 12 a 13, con lo cual protege el acero de refuerzo de la corrosión

La protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino.

Cuando avanza la carbonatación hacia el interior, la capa protectora deja de ser estable, con un pH menor de 9.5, y la corrosión empieza, resultando finalmente en el agrietamiento y desconchamiento del concreto. La penetración del dióxido de carbono a través de la porosidad del concreto puede tardar muchos años antes de que se produzca la corrosión del acero, si no se trata a tiempo puede ser crítica y muy costosa de reparar.

En los concretos con alta relación agua-cemento, bajo contenido de cemento, escaso tiempo de curado, baja resistencia y pasta porosa es más probable que se produzca carbonatación.

2.2.4.8.1 ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LA CARBONATACIÓN

Para detectar la carbonatación en una estructura, la manera más fácil es realizar una inspección visual y en base a esta obtener una muestra de concreto en donde se sospeche que hay carbonatación.

Después de limpiar la muestra de suciedades como el polvo, se emplea un indicador de pH obtenido a partir de una solución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico.

La Fenolftaleína es un compuesto químico inorgánico que se obtiene por reacción del fenol (C_6H_5OH) y el anhídrido ftálico ($C_8H_4O_3$), en presencia de ácido sulfúrico. Su función es la de cambiar de color de acuerdo al PH del elemento al que se le aplica.

Es un ensaye muy simple pero que debe ser interpretada por un experto en la materia, dicha prueba consiste en colocar un poco de la solución sobre el concreto con un gotero o spray.

Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor a 9.5 tomarán un color fusha. (Figura 14)



Figura 14 Efecto de una muestra de concreto con aplicación de fenolftaleína, donde se aprecia las variaciones de color, la parte que toma el color fusha no está carbonatada, la zona que no cambia de color ha sido afectada por carbonatación

Este cambio apreciable de color muestra cuál es la situación de carbonatación del concreto. La prueba del indicador de fenolftaleína es recomendada para establecer un estimado de la profundidad que ha alcanzado la carbonatación

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Para el desarrollo experimental de este capítulo se han hecho pruebas de laboratorio para medir la corrosión del acero de refuerzo en las instalaciones del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja Madrid-España, bajo la dirección de la Dra. María del Carmen Andrade Perdrix.

3.1 ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN EL CONCRETO

3.1.1 MÉTODO INTEGRAL ACELERADO

Introducción

Mediante la norma española UNE 83992-2:2012 EX se realizó el ensaye de penetración de cloruros en probetas de mortero.

Objetivo del ensaye

Tiene por objetivo determinar los efectos de la composición de la mezcla del mortero (tipo de cemento, adiciones minerales, aditivos, etc.), sobre

- a) la resistencia a la penetración de los iones cloruro, definida por el coeficiente de difusión en estado no estacionario y el tiempo hasta despasivación del acero;
- b) la concentración crítica de estos iones que provocan la corrosión del refuerzo; y
- c) el progreso de la corrosión del refuerzo, mediante la medida de su velocidad de corrosión.

Descripción del Ensaye

El ensayo consiste en exponer una probeta de hormigón, en la que se ha embebido transversalmente una barra de acero, a una corriente eléctrica por medio de dos electrodos, uno colocado en una disolución de cloruro sódico y cloruro de cobre (II) en contacto con

una cara de la probeta, y el otro electrodo colocado en la cara opuesta. Los iones cloruro penetran de forma acelerada debido a la acción del campo eléctrico, y migran desde el recipiente de la disolución hasta el electrodo en la cara opuesta, encontrando en su camino al acero y desencadenando la corrosión.

Se registra el tiempo desde que se conecta el campo eléctrico hasta la despasivación del acero, que es indicativo del coeficiente de difusión en estado no estacionario (también denominado coeficiente aparente, D_{ap}). Se registra el valor de la carga, en culombios, que ha dado lugar a la corrosión. Se desconecta la corriente y se rompe la probeta, obteniéndose muestras de la parte cercana al refuerzo en la cara más cercana al recipiente con cloruros, y de la superficie donde estaba el recipiente colocado, para analizar respectivamente la concentración crítica de cloruros que ha producido el inicio de la corrosión, así como la concentración superficial de cloruros. En otra probeta se continúa el ensayo desconectando la corriente o manteniéndola conectada para producir una cierta corrosión del acero con el fin de, respectivamente, obtener valores de la velocidad de corrosión media, (I_{corr} media), o completa, (I_{corr} completa) de la barra embebida.

Modelo experimental

Plan de trabajo

Se fabricaron mezclas de mortero con adición (puzolana superfina) para ver su resistencia al ingreso de cloruros mediante ensayo Integral Acelerado, las probetas se fabricaron de dimensiones de 7x7x7 cm con las siguientes características:

- Mortero 1:3 y 0,5
 - Mezclas de 100% cemento Portland
 - 80% cemento + 20% puzolana
 - 60 cemento +40% puzolana
- Curado:
 - 7 días al 100% HR y 20°C
 - 1 día al 100% HR y 20°C y 6 días al 100% HR y 40°C

Por cada mezcla se fabricaron dos probetas gemelas y se clasificaron de la siguiente manera:

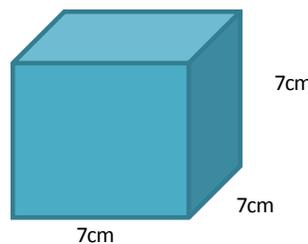
- Las probetas con curado 7 días al 100% HR y 20°C *son curado normal y tienen la letra N*
- Las probetas con curado 1 día al 100% HR y 20°C y 6 días al 100% HR y 40°C *son curado especial y tienen la letra E*
- Las probetas fabricadas con 100% cemento *son tipo I*
- Las probetas fabricadas con 80% cemento y 20 % puzolana *son tipo II*
- Las probetas fabricadas con 60% cemento y 40 % puzolana *son tipo III*
- Las probetas con número 1 se partirán cuando se tenga la medida -300 mV y las número 2 se siguen midiendo para obtener I_{corr}

El cemento que se utilizó es el CEM I, el agregado fino que se utilizó se obtuvo mediante las bolsas de arena certificadas por la AENOR, el agua de mezclado se tomó del grifo comprobando que fuera apta para utilizar.

Dosificación

La dosificación se realizó en base a las condiciones de las probetas obteniendo los siguientes resultados:

De acuerdo con la medida del molde, para cada probeta se colocan unos 850gr de material, y la capacidad de la amasadora es de 2000 gr por lo cual para cada amasada se hicieron dos probetas.



Tamaño de la probeta

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

Debido a que la proporción del mortero es 1:3 se tiene la siguiente dosificación:

Mezcla de 100% cemento

	1 probeta	2 probetas	4 probetas
	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Cemento	225 gr	450 gr	900 gr
Arena	675 gr	1350 gr	2700 gr
Agua	112.5 ml	225 ml	450 ml
TOTAL	1012.5 gr	2025 gr	4050 gr

Mezcla de 80% cemento y 20% puzolana

	1 probeta	2 probetas	4 probetas
	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Cemento	180 gr	360 gr	720 gr
Puzolana	45 gr	90 gr	180 gr
Arena	675 gr	1350 gr	2700 gr
Agua	112.5 ml	225 ml	450 ml
TOTAL	1012.5 gr	2025 gr	4050 gr

Mezcla de 60% cemento y 40% puzolana

	1 probeta	2 probetas	4 probetas
	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Cemento	135 gr	270 gr	540 gr
Puzolana	90 gr	180 gr	360 gr
Arena	675 gr	1350 gr	2700 gr
Agua	112.5 ml	225 ml	450 ml
TOTAL	1012.5 gr	2025 gr	4050 gr

Preparación de las barras de acero

Las barras de acero se prepararon previamente garantizando que su superficie estuviera completamente limpia y sin residuos de óxido.

Procedimiento

Se marcan y cortan las barras de acero con una longitud de 8 cm como se muestra en la figura



Figura 1. Preparación de las barras



Figura 2. Barra marcada para cortarse

Posteriormente las barras se van introduciendo en una disolución para decapar (HCL 30% en H₂O) (1:1) que se vierte en un vaso de precipitados y se mantienen así hasta conseguir una superficie completamente limpia y sin residuos de óxido, el procedimiento se realiza mediante una máquina de ultrasonidos para acelerar el proceso manteniéndolas por dos minutos. Teniendo decapadas las barras de acero, se lavan con agua destilada y se secan mediante aire caliente.



Figura 3. Líquido decapante



Figura 4. Máquina de ultrasonidos



Figura 5. Diferencia de color después de decapar

Una vez limpias las barras, se delimita la superficie que va ser atacada por cloruros y se protege el resto de la superficie con cinta adhesiva aislante, la longitud de la barra que

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

se introducirá en el mortero es de aproximadamente 5 cm en todas las barras, en el otro extremo queda descubierto para poder realizar las medidas.



Figura 6 Acero limpio y delimitado listo para ensaye

Preparación de las probetas

De acuerdo a las cantidades obtenidas en el diseño de la mezcla se hizo la preparación de las probetas, primeramente se pesaron los materiales como se muestra a continuación



Figura 7. Peso de cemento



Figura 8. Arena embazada



Figura 9. Peso de puzolana

La arena ya viene en bolsas de 1350 ± 5 gr

Mezclado

Una vez que se tienen los materiales pesados y listos para el amasado, se procede a mezclarlos con ayuda de una mezcladora para mortero, cuidando los tiempos de mezclado normalizados; primeramente se agrega el cemento y puzolanas con el agua y se mezcla a una velocidad baja durante 30 segundos, después se agrega la arena y se mezcla durante

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

otros 30 segundos, una vez que se cumple el tiempo se sigue mezclando por 30 segundos a velocidad rápida, concluido este tiempo se deja reposar durante 30 segundos para proceder a un último mezclado de 1 minuto a velocidad rápida. En la siguiente imagen se presenta el procedimiento de mezclado



Figura 10 .Proceso de mezclado

Ya preparada la mezcla de mortero se dio paso a verterlo en los moldes que previamente fueron preparados agregándoles grasa desmoldante, Antes de colocar la barra, se compacto ligeramente le hormigón dándole homogeneidad al material y retirando las burbujas de aire de su interior, se procede a colocar las barras con cuidado dejándolas verticales y se le da una última compactación para dejar sin aire el contorno del acero



Figura 11 Molde engrasado



Figura 12 Vertido de mezcla en moldes

Los moldes se marcan en base a las probetas realizadas. El procedimiento se repitió hasta tener todas las probetas deseadas



Figura 13. Probeta lista para curado

Curado

Una vez que se tienen todas las probetas se curaron en una cámara húmeda y a las 24 horas se procedió a desmoldarlas, las probetas que se clasificaron con la letra N después de desmoldarlas se volvieron a introducir en la cámara húmeda durante 6 días más, las probetas con curado especial se introdujeron sin destapar calentándose a humedad alta en un horno de secado a 40°C durante seis días.

Después de este tiempo se dejan secar a temperatura ambiente durante 1 hora.



Figura 14. Secado de probetas a temperatura ambiente

Tubos de plástico

Al finalizar el periodo de curado, se procede a la colocación del tubo de plástico (piscina) en una de las caras laterales perpendiculares de la probeta, se aplica un cordón de silicón sobre el contorno de la piscina



Figura 15. Tubos de plástico para ensaye



Figura 16. Cordón de silicona en el tubo



Figura 17. Cordón de silicón entre probeta y molde

Una vez aplicado el silicón en todas las probetas se dejó secar durante 24 horas y se procedió a llenar los recipientes con agua destilada y dejándola durante unas horas para comprobar que no tuviera fugas del líquido.



Figura 18 Secado de silicón

Preparación de disolución de cloruros

Mientras se comprobaba que las probetas no tuvieran fuga de líquido se procedió a elaborar la disolución de cloruros; para preparar la disolución se agrega 0,6 Mol de NaCl y de 0,4 Mol de CuCl₂. Lo cual corresponde por litro de disolución de 35,06g de NaCl y 68.20g de CuCl₂ en agua destilada. Después se almacenó en recipientes.



Figura 19 Peso de sustancias



Figura 20 Preparación de la disolución

Preparación de las probetas para aplicar voltaje

Comprobado que no se tenían ausencias de líquido y ya con la disolución hecha, se procedió a preparar los recipientes donde se colocaron las probetas.

Los materiales utilizados para colocar las probetas son:

- Recipiente de plástico
- Rejilla de plástico 20 mm de altura
- Esponjas
- Disolución
- Mallas de acero (ánodo)
- Electrodo de cobre (cátodo)
- Película termoplástica

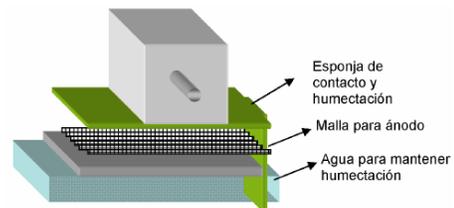


Figura 21 Esquema de preparación de las probetas

En el fondo del recipiente se pone la rejilla de plástico y se le agrega agua destilada de forma que la esponja permanezca húmeda durante todo el ensayo, la malla de acero se coloca por arriba de la esponja y debajo de la probeta funcionando de ánodo, se agrega disolución hasta llenar la piscina y se introduce el electrodo de cobre (cátodo) y se cubre la piscina con la película termoplástica para evitar que se evapore la disolución.

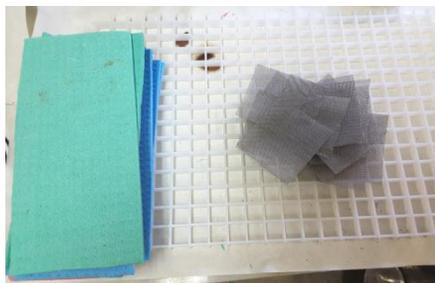


Figura 22. Esponja y mallas para pruebas



Figura 23 Electrodo de cobre

Se conectaron los electrodos a la fuente de potencial teniendo como el polo positivo la malla de acero y polo negativo el electrodo de cobre, se aplicó un potencial de 12 V el cual fue constante durante todo el ensayo, se toma la medida de la resistencia eléctrica inicial de las muestras (los valores se describen en el apartado de resultados) y se realizaron medidas diariamente.



Figura 24. Probetas conectadas a la fuente de potencial

3.1.2 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Para las medidas, se desconectaron las probetas de la fuente de potencial y se espera 15 minutos para que se despolarice la barra de acero, las probetas se van midiendo primeramente mediante el uso de un voltímetro y un electrodo de referencia (electrodo de cloruro de plata) para obtener su E_{corr} y luego se procede a medir mediante un equipo y programa GPES de cómputo y obtener potencial de corrosión (E_{corr}), resistencia a la polarización (R_p) y la Resistividad eléctrica del mortero ($R\Omega$)



Figura 25 Electrodo de referencia

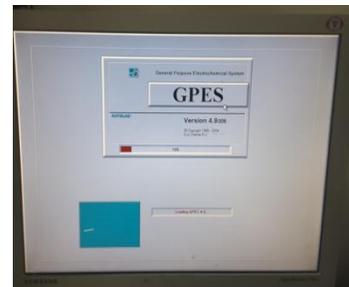


Figura 26 Software GPES



Figura 27 Conexiones para medida

La corrosión se detecta cuando el potencial es igual o inferior a -300 mV respecto del electrodo de referencia, los resultados se ven en el siguiente apartado

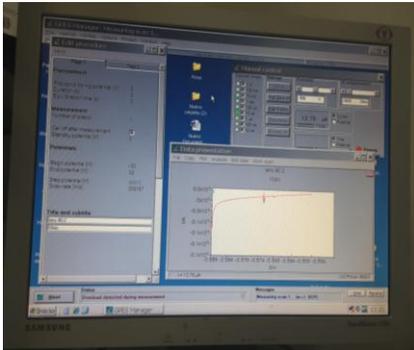


Figura 28 Proceso de medición con el software GPES



Figura 29. Equipo para medir Ecorr

Una vez que el ensayo ha dado -300 mV se volvió a medir en un lapso de 2 horas para comprobar y se desconectó de la fuente, las probetas que han sido asignadas con el número 1 se les retiró la disolución y se les quitaron las piscinas para proceder a romperlas y observar la corrosión en la barra de acero, la probeta se parte por la mitad y en una parte se le aplicó disolución de nitrato de plata para comprobar hasta donde habían penetrado los cloruros.

Las probetas con número 2 solamente se desconectaron y se siguieron midiendo diariamente para seguir observando su comportamiento.



Figura 30. Desmolde de piscinas



Figura 31. Probeta preparada para ser partida



Figura 32. Aplicación de nitrato de plata

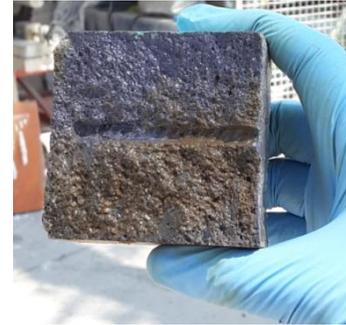


Figura 33. Probeta que se le ha aplicado nitrato de plata para revelar el frente de cloruros

Las barras se guardaron dentro de bolsas herméticas para después ser analizadas mediante un microscopio y observar el fenómeno de corrosión.

Obtención de cloruros

Después de haber partido las probetas y de aplicar el revelador de cloruros, se procedió a extraer muestras de unos 2-3 gr aproximadamente de cloruros para el análisis del contenido de cloruros totales, se extrajeron muestras de la parte superior de la probeta, así como de la parte adyacente donde estaba colocada la barra de acero, una vez obtenidas las muestras se trituraron con ayuda de un recipiente de porcelana para después guardar el material en tubos de plástico y que no se contaminen con el medio ambiente, los resultados se muestran en el apartado de resultados

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS



Figura 34. Obtención de muestras de cloruros



Figura 35. Obtención de cloruros en la superficie de la probeta



Figura 36. Muestra de cloruros



Figura 37. Trituración de muestra de cloruros

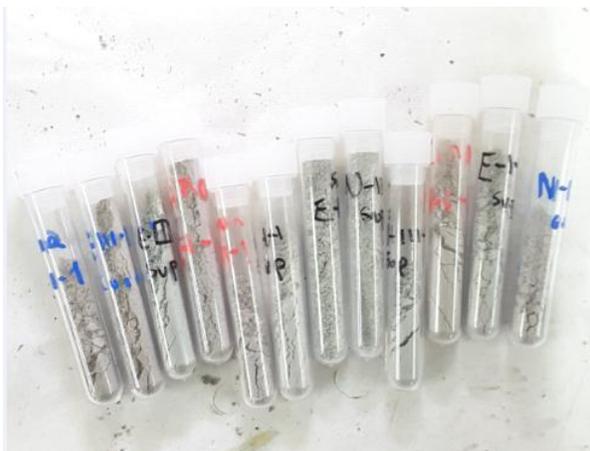


Figura 38. Almacenamiento de cloruros



Figura 39. Análisis de Cloruros

Observación de la Corrosión con microscopio

Finalmente se colocaron las barras de acero en el microscopio para observar detalladamente el grado de corrosión, en las siguientes imágenes se puede ver las zonas afectadas



Figura 40. Análisis del acero mediante microscopio



Figura 41 Acero de la probeta N-III-1 se observa una zona altamente afectada por corrosión



Figura 42. Acero de la probeta E-III-1



Figura 43. Zona corroída en el acero de la probeta N-II-1



Figura 44. Pequeñas picaduras en el acero de la probeta E-III-1

Barras de acero vistas desde un microscopio óptico donde se puede apreciar las zonas afectadas por corrosión

Una vez obtenidas las imágenes se decaparon de nuevo las barras de acero para eliminar la corrosión y observar la pérdida de material que se tuvo producto de la corrosión



Figura 45 Pérdida de material en barra de la probeta N-I-1



Figura 47 Pérdida de material en barra de la probeta E-III-1



Figura 46 Pérdida de material en la barra de la probeta N-III-1

3.2 RESULTADOS DE PRUEBAS ICORR Y ECORR

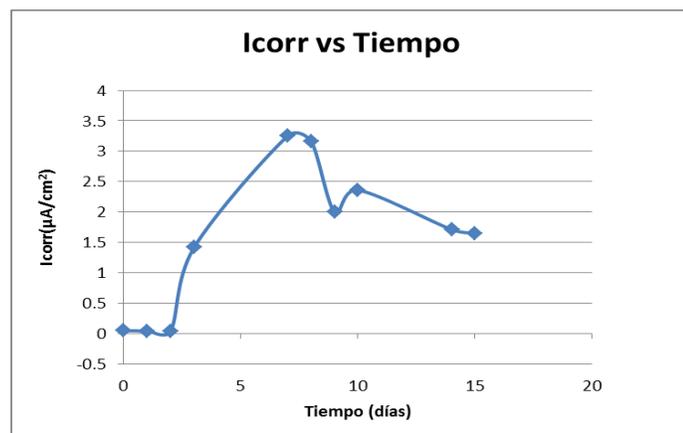
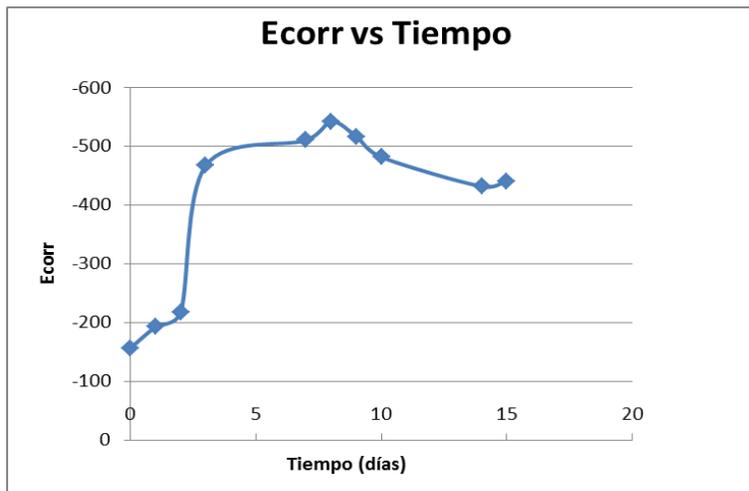
Representación gráfica de los valores de potencial de corrosión E_{corr} frente al tiempo y de la velocidad de corrosión I_{corr} frente al tiempo

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en las mediciones

CÁLCULO DE LA PROBETA N-I-1

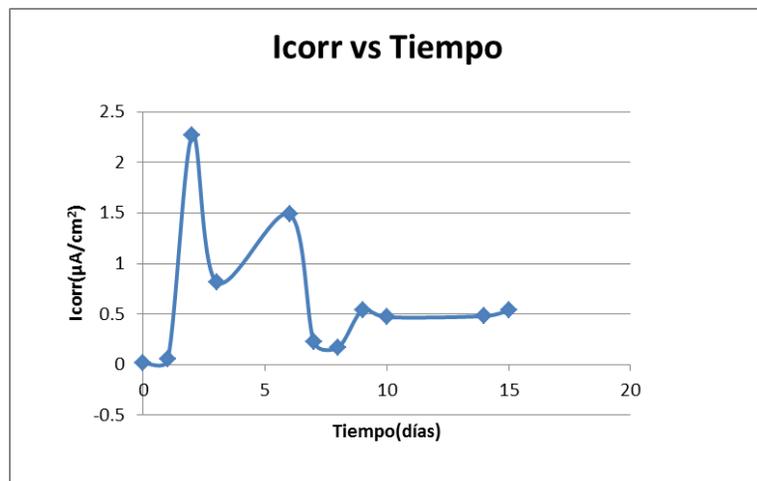
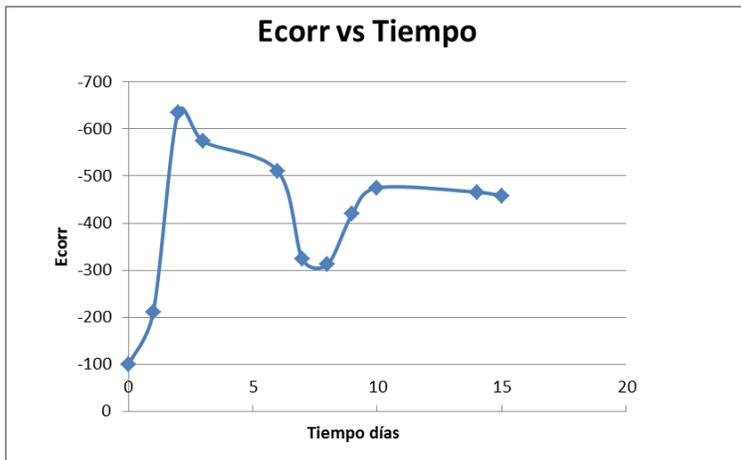
Constante	B = 0.026 V	Diámetro	0.6	cm		
		Long barra	5.197	cm		
Área(cm2)	10.0788811	pi	3.1416			
FECHA	Tiempo de aplicación (días)	Ecorr Equipo	1/slope	RΩ	Rp	Icorr(μA/cm2)
19/04/2016	0	-157	56490	170	56320	0.04580347
20/04/2016	1	-193	60980	140	60840	0.042400582
21/04/2016	2	-218	61100	170	60930	0.042337952
22/04/2016	3	-468	1992	170	1822	1.415835028
26/04/2016	7	-511	1003	210	793	3.253028273
27/04/2016	8	-543	996	180	816	3.161337525
28/04/2016	9	-517	1481	190	1291	1.998180806
29/04/2016	10	-482	1273	180	1093	2.360156835
03/05/2016	14	-432	1707	200	1507	1.71177931
04/05/2016	15	-441	1763	200	1563	1.650448766



ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

Cálculo de la probeta N-II-1

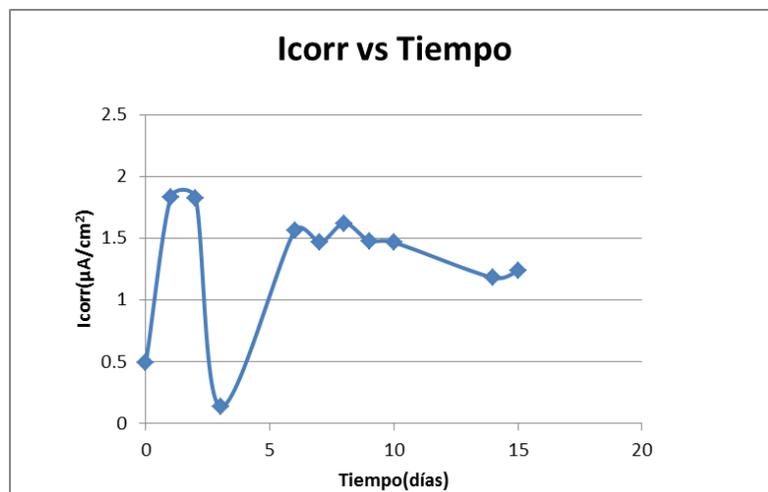
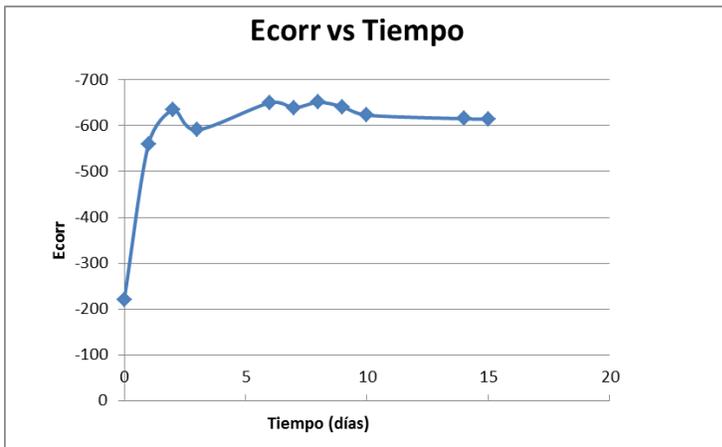
Constante	B = 0.026 V	Diámetro	0.6	cm		
		Long barra	4.896	cm		
Área(cm2)	9.51150816	pi	3.1416			
FECHA	Tiempo de aplicación (días)	Ecorr Equipo	1/slope	RΩ	Rp	Icorr(μA/cm2)
19/04/2016	0	-99	125500	160	125340	0.021808926
20/04/2016	1	-210	53260	130	53130	0.051449854
21/04/2016	2	-635	1345	140	1205	2.268490246
22/04/2016	3	-574	3480	130	3350	0.815979327
25/04/2016	6	-511	1999	160	1839	1.486422374
26/0 /2016	7	-323	12390	180	12210	0.223876392
27/04/2016	8	-312	16120	170	15950	0.171381238
28/04/2016	9	-420	5213	170	5043	0.542044566
29/04/2016	10	-475	5975	160	5815	0.470082673
03/05/2016	14	-466	5867	180	5687	0.480663047
04/05/2016	15	-458	5261	170	5091	0.536933951



**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

Cálculo de la probeta N-III-1

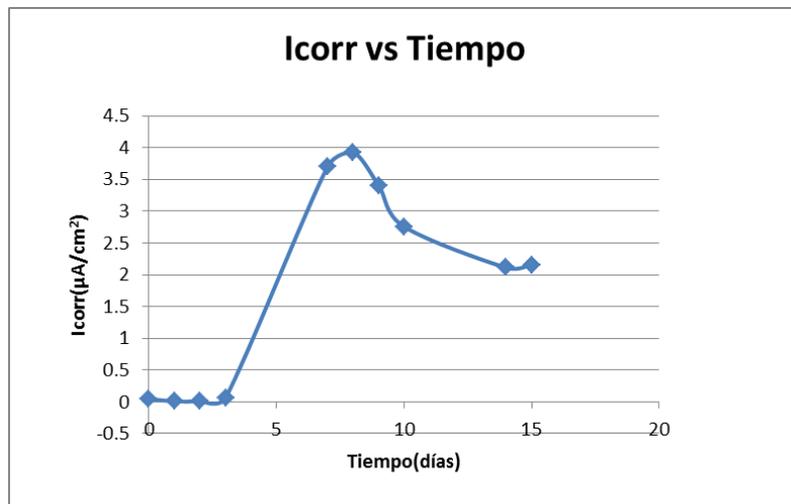
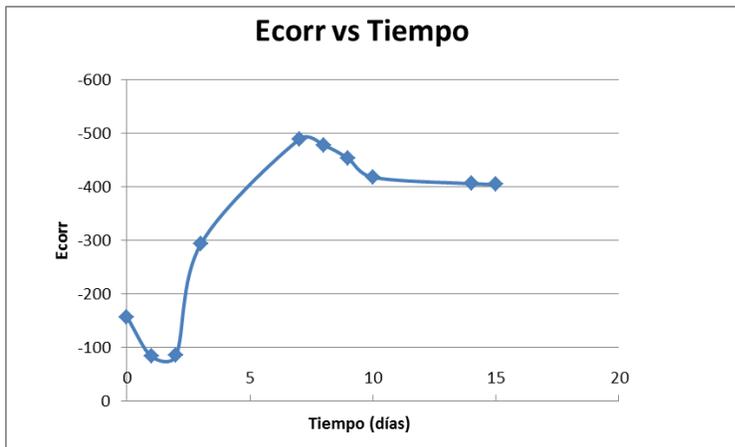
Constante	B = 0.026 V	Diámetro	0.6	cm		
		Long barra	5.273	cm		
Área(cm²)	10.2221381	pi	3.1416			
FECHA	Tiempo de aplicación (días)	Ecorr Equipo	1/slope	RΩ	Rp	Icorr(μA/cm²)
19/04/2016	0	-220	5215	80	5135	0.495326036
20/04/2016	1	-560	1466	80	1386	1.835136506
21/04/2016	2	-634	1475	80	1395	1.823296916
22/04/2016	3	-591	18510	80	18430	0.138008638
25/04/2016	6	-650	1717	90	1627	1.563306206
26/04/2016	7	-639	1827	90	1737	1.464305813
27/04/2016	8	-651	1649	80	1569	1.621095728
28/04/2016	9	-641	1809	90	1719	1.479638858
29/04/2016	10	-623	1814	80	1734	1.466839214
03/05/2016	14	-615	2243	90	2153	1.181374453
04/05/2016	15	-614	2307	250	2057	1.23650909



ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

Cálculo de la Probeta E-I-1

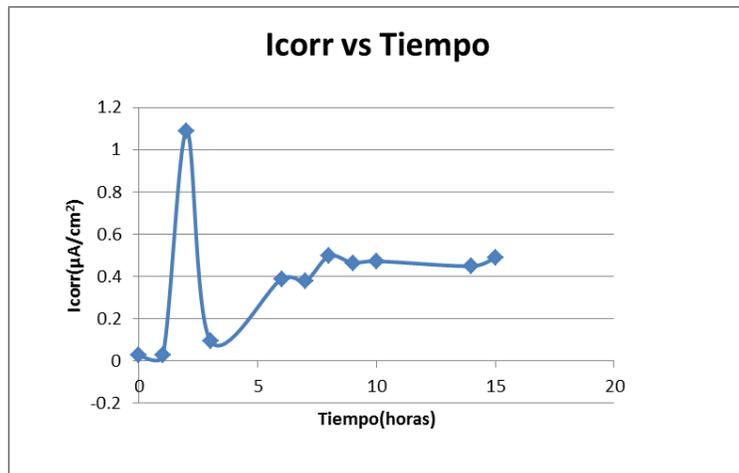
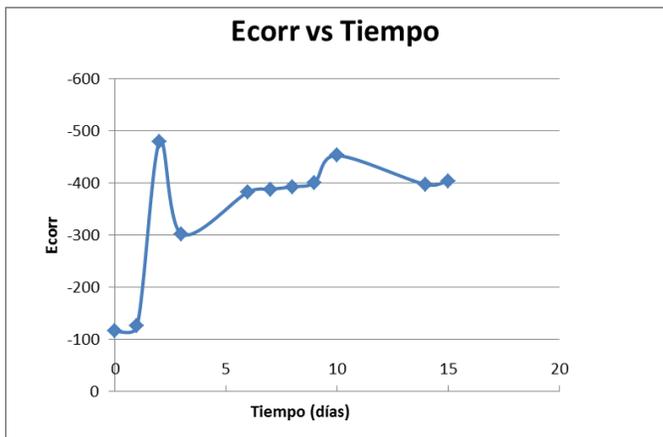
Constante	B = 0.026 V	Diámetro	0.6	cm		
		Long barra	5.328	cm		
Área(cm2)	10.3258109	pi	3.1416			
FECHA	Tiempo de aplicación (días)	Ecorr Equipo	1/slope	RΩ	Rp	Icorr(μA/cm2)
19/04/2016	0	-157	56490	170	56320	0.044708133
20/04/2016	1	-83	271300	220	271080	0.009288631
21/04/2016	2	-85	203600	210	203390	0.01237997
22/04/2016	3	-293	38120	210	37910	0.066419469
26/04/2016	7	-489	909.8	230	679.8	3.703974782
27/04/2016	8	-478	871.3	230	641.3	3.926340335
28/04/2016	9	-453	979.1	240	739.1	3.406794827
29/04/2016	10	-418	1153	240	913	2.757899295
03/05/2016	14	-406	1442	250	1192	2.112384276
04/05/2016	15	-405	1418	250	1168	2.155789432



**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

Cálculo de la Probeta E-II-1

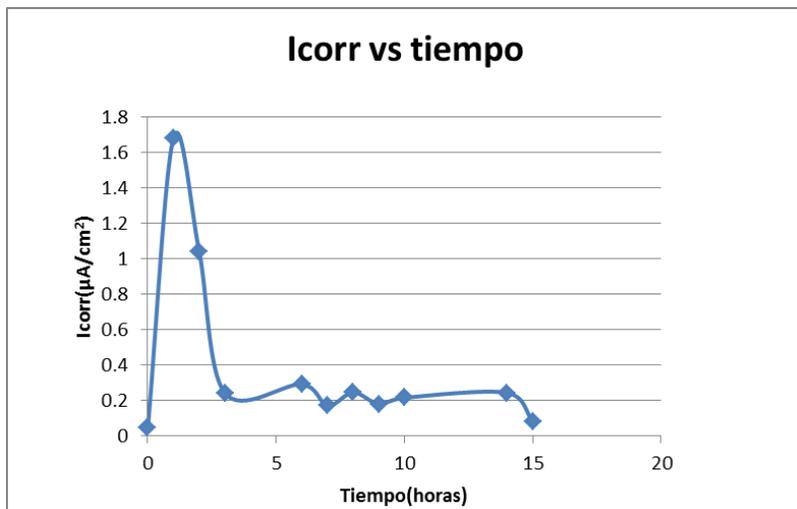
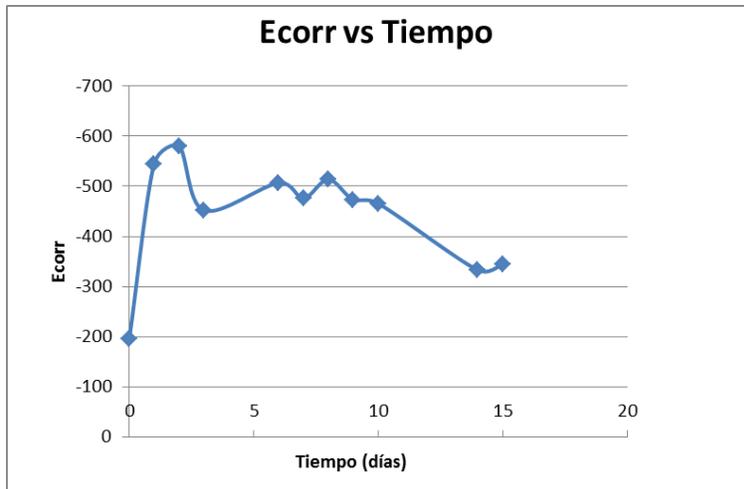
Constante	B = 0.026 V	Diámetro	0.6	cm		
		Long barra	5.136	cm		
Área(cm2)	9.96389856	pi	3.1416			
FECHA	Tiempo de aplicación (días)	Ecorr Equipo	1/slope	RΩ	Rp	Icorr(μA/cm2)
19/04/2016	0	-116	97700	210	97490	0.026766031
20/04/2016	1	-125	97810	170	97640	0.026724912
21/04/2016	2	-479	2590	190	2400	1.087258493
22/04/2016	3	-302	27360	180	27180	0.096005165
25/04/2016	6	-383	6912	210	6702	0.389349505
26/04/2016	7	-388	7111	220	6891	0.378670786
27/04/2016	8	-393	5459	210	5249	0.497127145
28/04/2016	9	-401	5830	210	5620	0.464309677
29/04/2016	10	-453	5720	200	5520	0.472721084
03/05/2016	14	-397	6027	220	5807	0.449357738
04/05/2016	15	-404	5548	210	5338	0.488838588



**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

Cálculo de la Probeta E-III-1

Constante	B = 0.026 V	Diámetro	0.6	cm		
		Long barra	5.017	cm		
Área(cm²)	9.73958832	Pi	3.1416			
FECHA	Tiempo de aplicación (días)	Ecorr Equipo	1/slope	RΩ	Rp	Icorr(μA/cm²)
19/04/2016	0	-195	56410	100	56310	0.047407518
20/04/2016	1	-545	1649	60	1589	1.679998332
21/04/2016	2	-581	2633	70	2563	1.041559637
22/04/2016	3	-452	11040	80	10960	0.243569101
25/04/2016	6	-507	9227	100	9127	0.29248574
26/04/2016	7	-476	15558	100	15458	0.172694873
27/04/2016	8	-514	10930	80	10850	0.246038465
28/04/2016	9	-473	14820	80	14740	0.181107012
29/04/2016	10	-466	12410	80	12330	0.216505868
03/05/2016	14	-333	10990	70	10920	0.244461296
04/05/2016	15	-344	31999	70	31929	0.083607922



3.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA INICIAL Y EN EL MOMENTO EN QUE SE PRODUCE LA DESPASIVACIÓN DEL REFUERZO

Utilizamos la fórmula:

$$Re_{inicial} = \frac{V}{I_{inicial}} \text{ y } Re_{despasivación} = \frac{V}{I_{despasivación}}$$

Donde

Re: es la resistencia eléctrica, en Ω

V: es el potencial aplicado, en V

$I_{inicial}$: es la corriente que circula por la probeta a (5-15) min, en A

$I_{despasivación}$: es la corriente que circula por la probeta justo antes de finalización del ensayo, en A

3.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EN ESTADO NO ESTACIONARIO (APARENTE)

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 * t_{lag} * \varphi}$$

Donde

D_{ns} : es el coeficiente de difusión en condiciones de ensayo natural, en cm^2/s

t_{lag} : es el tiempo hasta la corrosión del acero en el ensayo acelerado o “time lag”, en s

e: es el espesor de recubrimiento de la probeta a ensayar, en cm

$\varphi = \frac{z x F}{R x T} x \Delta\phi = 40 x \Delta\phi$ para 22°C , es el factor de aceleración del campo eléctrico

$\Delta\phi = \frac{\Delta V}{L}$ es el campo eléctrico normalizado, en V

L: es la distancia entre electrodos (espesor de la probeta), en cm

ΔV : es el potencial aplicado, en V

R: es la constante de los gases perfectos, en cal/mol K (1.9872)

F es la constante de Faraday, en cal/Veq (23060)

T es la temperatura, en $^\circ\text{K}$

Z es la valencia del ion cloruro ($z=1$)

3.5 CÁLCULO DE LA CORROSIÓN ACUMULADA O PENETRACIÓN DE LA CORROSIÓN P_{CORR}

La penetración homogénea equivalente de la corrosión, en cm, se calcula según las fórmulas:

- Estudio de la evolución de la corrosión en condiciones naturales

$$P_{corr} = 0.00116 \times I_{corr,media} \times t$$

Dónde:

P_{corr} : es la penetración homogénea equivalente de la corrosión o pérdida del radio de la barra, en cm;

0.0116= es una constante que transforma $\mu A/cm^2$ en cm;

$I_{corr,media}$ = es la media de las velocidades de corrosión medidas durante el periodo de propagación de la corrosión en condiciones naturales, mediante la medida de la R_p , en $\mu A/cm^2$

T= es el periodo de propagación de la corrosión, en años

Cálculo de la probeta

N-I-1

Datos generales:

Voltaje aplicado (V) 12

Espesor de la probeta (cm) 7

Recubrimiento de la barra (cm) 3.165

Parámetros Medidos

Intensidad inicial (A) 0.01354

Intensidad Final (A) 0.01315

Temperatura (K) 295.15 22°C

Tiempo hasta la corrosión (s) **653400**

- a) Cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en el que se produce la despasivación del refuerzo

$$Re\ inicial = \frac{V}{I\ inicial} \quad y \quad Re\ despasivación = \frac{V}{I\ despasivación}$$

$$Re\ inicial = \frac{12}{0.01354} = \quad \mathbf{886.26\ \Omega}$$

$$Re\ despasivación = \frac{12}{0.01315} = \quad \mathbf{912.54\ \Omega}$$

- b) Cálculo del coeficiente de difusión en estado estacionario (aparente)

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \times t_{lag} \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{z \times F}{R \times T} \times \Delta\phi$$

$$D_{ns} = \frac{3.165^2}{2 \times 653400 \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{L} = \frac{12}{7} = 1.714$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times 1.714 = 67.40$$

$$D_{ns} = \frac{3.165^2}{2 \times 653400 \times 67.40} = \mathbf{1,14E - 07\ cm^2/s}$$

Cálculo de la probeta **N-II-1**

Datos generales:

Voltaje aplicado (V)	12
Espesor de la barra (cm)	7
Recubrimiento de la probeta (cm)	3.397

Parámetros Medidos

Intensidad inicial (A)	0.01405
Intensidad Final (A)	0.0102
Temperatura (K)	295.15 22°C
Tiempo hasta la corrosión (s)	63000

- a) Cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en el que se produce la despasivación del refuerzo

$$Re\ inicial = \frac{V}{I\ inicial} \text{ y } Re\ despasivación = \frac{V}{I\ despasivación}$$

$$Re\ inicial = \frac{12}{0.01405} = \mathbf{854.09\ \Omega}$$

$$Re\ despasivación = \frac{12}{0.0102} = \mathbf{1176.47\ \Omega}$$

- b) Cálculo del coeficiente de difusión en estado estacionario (aparente)

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \times t_{lag} \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{z \times F}{R \times T} \times \Delta\phi$$

$$D_{ns} = \frac{3.397^2}{2 \times 63000 \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{L} = \frac{12}{7} = 1.714$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times 1.714 = 67.40$$

$$D_{ns} = \frac{3.397^2}{2 \times 63000 \times 67.40} = 1,36E - 06 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Cálculo de la probeta **N-III-1**

Datos generales:

Voltaje aplicado (V)	12
Espesor de la probeta (cm)	7
Recubrimiento de la barra (cm)	3.111

Parámetros Medidos

Intensidad inicial (A)	0.01419
Intensidad Final (A)	0.01081
Temperatura (K)	295.15 22°C
Tiempo hasta la corrosión (s)	63000

- a) Cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en el que se produce la despasivación del refuerzo

$$Re \text{ inicial} = \frac{V}{I \text{ inicial}} \text{ y } Re \text{ despasivación} = \frac{V}{I \text{ despasivación}}$$

$$Re \text{ inicial} = \frac{12}{0.01419} = 845.66 \Omega$$

$$Re \text{ despasivación} = \frac{12}{0.01081} = 1110.08 \Omega$$

b) Cálculo del coeficiente de difusión en estado estacionario (aparente)

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \times t_{lag} \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{z \times F}{R \times T} \times \Delta\phi$$

$$D_{ns} = \frac{3.111^2}{2 \times 63000 \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{L} = \frac{12}{7} = 1.714$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times 1.714 = 67.40$$

$$D_{ns} = \frac{3.111^2}{2 \times 63000 \times 67.40} = 1,14E - 06 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Cálculo de la probeta

E-I-1

Datos generales:

Voltaje aplicado (V)	12
Espesor de la probeta (cm)	7
Recubrimiento de la barra (cm)	3.367

Parámetros Medidos

Intensidad inicial (A)	0.01315
Intensidad Final (A)	0.01216
Temperatura (K)	295.15 22°C
Tiempo hasta la corrosión (s)	653400

- a) Cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en el que se produce la despasivación del refuerzo

$$Re\ inicial = \frac{V}{I\ inicial} \quad y \quad Re\ despasivación = \frac{V}{I\ despasivación}$$

$$Re\ inicial = \frac{12}{0.01315} = \quad \mathbf{912.54\ \Omega}$$

$$Re\ despasivación = \frac{12}{0.01216} = \quad \mathbf{986.84\ \Omega}$$

- b) Cálculo del coeficiente de difusión en estado estacionario (aparente)

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \times t_{lag} \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{z \times F}{R \times T} \times \Delta\phi$$

$$D_{ns} = \frac{3.367^2}{2 \times 653400 \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{L} = \frac{12}{7} = 1.714$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times 1.714 = 67.40$$

$$D_{ns} = \frac{3.367^2}{2 \times 653400 \times 67.40} = \mathbf{1,29E - 07\ cm^2/s}$$

Cálculo de la probeta **E-II-1**

Datos generales:

Voltaje aplicado (V)	12
Espesor de la probeta (cm)	7
Recubrimiento de la barra (cm)	3.215

Parámetros Medidos

Intensidad inicial (A)	0.01206
Intensidad Final (A)	0.01101
Temperatura (K)	295.15 22°C
Tiempo hasta la corrosión (s)	189000

- a) Cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en el que se produce la despasivación del refuerzo

$$Re\ inicial = \frac{V}{I\ inicial} \quad y \quad Re\ despasivación = \frac{V}{I\ despasivación}$$

$$Re\ inicial = \frac{12}{0.01206} = \quad \mathbf{995.02\ \Omega}$$

$$Re\ despasivación = \frac{12}{0.01101} = \quad \mathbf{1089.91\ \Omega}$$

- b) Cálculo del coeficiente de difusión en estado estacionario (aparente)

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \times t_{lag} \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{z \times F}{R \times T} \times \Delta\phi$$

$$D_{ns} = \frac{3.215^2}{2 \times 189000 \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{L} = \frac{12}{7} = 1.714$$

$$\phi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times 1.714 = 67.40$$

$$D_{ns} = \frac{3.215^2}{2 \times 189000 \times 67.40} = 4,06E - 07 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Cálculo de la probeta

E-III-1

Datos generales:

Voltaje aplicado (V)	12
Espesor de la probeta (cm)	7
Recubrimiento de la barra (cm)	3.736

Parámetros Medidos

Intensidad inicial (A)	0.02308
Intensidad Final (A)	0.0182
Temperatura (K)	295.15 22°C
Tiempo hasta la corrosión (s)	63000

- a) Cálculo de la resistencia eléctrica inicial y en el momento en el que se produce la despasivación del refuerzo

$$Re \text{ inicial} = \frac{V}{I \text{ inicial}} \text{ y } Re \text{ despasivación} = \frac{V}{I \text{ despasivación}}$$

$$Re \text{ inicial} = \frac{12}{0.02308} = 519.93 \Omega$$

$$Re \text{ despasivación} = \frac{12}{0.0182} = 659.34 \Omega$$

b) Cálculo del coeficiente de difusión en estado estacionario (aparente)

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \times t_{lag} \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{z \times F}{R \times T} \times \Delta\phi$$

$$D_{ns} = \frac{3.736^2}{2 \times 63000 \times \varphi}$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{L} = \frac{12}{7} = 1.714$$

$$\varphi = \frac{1 \times 23060}{1.9872 \times 295.15} \times 1.714 = 67.40$$

$$D_{ns} = \frac{3.736^2}{2 \times 63000 \times 67.40} = 1,64E - 06 \text{ cm}^2/\text{s}$$

**3.6 DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLORUROS TOTALES
POR VALORACIÓN POTENCIOMÉTRICA**

INFORME DE ENSAYO - RESULTADOS					
Ensayo:	Determinación de concentración de cloruros totales por valoración potenciométrica				
Descripción de las muestras:	Muestras pulverizadas con taladro procedentes de probetas de ensayos de integral acelerado				
Solicitante:	Alejandro Castillo	Observaciones/Incidencias:			
Analista:	Enrique Moreno	Se analizaron los cloruros procedentes de las probetas			
Fecha de entrega de resultados:	10-06-16				
Nº ORDEN	NOMBRE MUESTRA	ID	Fecha análisis (dd/mm/aaaa)	Resultados de concentración de cloruros	
				[Cl ⁻] (ppm)	% [Cl ⁻]/P muestra
1	N-I-2	Cuna	02/06/2016	2243.666	0.22435
2	N-I-2	Superficie	02/06/2016	11956.414	1.19554
3	N-III-2	Cuna	02/06/2016	2798.644	0.27984
4	N-III-2	Superficie	02/06/2016	22633.461	2.26315
5	E-I-2	Cuna	02/06/2016	3203.305	0.32030
6	E-I-2	Superficie	02/06/2016	10807.009	1.08061
7	E-III-2	Cuna	02/06/2016	6866.648	0.68661
8	E-III-2	Superficie	02/06/2016	28340.569	2.83382
9	E-I-1	Cuna	06/06/2016	630.735	0.06307
10	E-I-1	Superficie	06/06/2016	12580.831	1.25798
11	E-II-1	Cuna	06/06/2016	632.059	0.06320
12	E-II-1	Superficie	06/06/2016	8065.522	0.80648
13	E-III-1	Cuna	06/06/2016	2135.927	0.21357
14	E-III-1	Superficie	06/06/2016	12048.124	1.20471
15	N-I-1	Cuna	06/06/2016	1813.281	0.18131
16	N-I-1	Superficie	06/06/2016	9245.875	0.92451
17	N-II-1	Cuna	06/06/2016	1031.127	0.10310
18	N-II-1	Superficie	06/06/2016	9221.317	0.92205
19	N-III-1	Cuna	06/06/2016	1347.399	0.13473
20	N-III-1	Superficie	06/06/2016	12371.866	1.23708
21	N-II-2	Cuna	07/06/2016	896.692	0.08966
22	N-II-2	Superficie	07/06/2016	9874.454	0.98736
23	E-II-2	Cuna	07/06/2016	583.563	0.05835
24	E-II-2	Superficie	07/06/2016	8341.164	0.83405

3.7 CÁLCULO DE PÉRDIDA DE MASA MEDIANTE LA LEY DE FARADAY

De acuerdo con la ley de Faraday se tiene que:

$$\frac{I \cdot t}{F} = \frac{\Delta w}{W_m / Z}$$

Dónde:

I= Intensidad de corriente en A

t= tiempo en s

F= Constante de Faraday 96500 C mole⁻¹

Δw= Pérdida de Masa en g

W_m= Peso molecular del metal Fe = 55,847 g/ mol

Z= Número de electrones intercambiados = 2 Fe → Fe²⁺ 2e⁻

Cálculo de pérdida de masa para probeta N-I-1

N-I					
Tiempo Dias	Años	Icorr	Icorr.t	Icorr acum	Ley Faraday gr
0	0	0,0458034698	0,0001208275	0,0001208275	0,0000111119
1	0,002739726	0,0424005822	0,0001160802	0,0002369077	0,0000106753
2	0,005479452	0,0423379521	0,0019974972	0,0022344049	0,0001837002
3	0,008219178	1,4158350278	0,0255828126	0,0278172175	0,0023527284
7	0,019178082	3,2530282732	0,0087868025	0,0366040200	0,0008080800
8	0,021917808	3,1613375253	0,0070678333	0,0436718533	0,0006499947
9	0,024657534	1,9981808061	0,0059703255	0,0496421788	0,0005490622
10	0,02739726	2,3601568350	0,0223119789	0,0719541577	0,0020519255
14	0,038356164	1,7117793103	0,0046057919	0,0765599496	0,0004235726
15	0,04109589	1,6504487656	0,0078745012	0,0844344508	0,0007241800
16	0,043835616	4,0979371258	-0,0898178000	-0,0053833492	-0,0082601116

**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

Cálculo de pérdida de masa para probeta N-II-1

N-II					
Tiempo Dias	Años	Icorr	Icorr.t	Icorr acum	Ley Faraday gr
0	0	0,0218089257	0,0001003545	0,0001003545	0,0000087103
1	0,002739726	0,0514498541	0,0031780001	0,0032783546	0,0002758367
2	0,005479452	2,2684902460	0,0042253008	0,0075036554	0,0003667379
3	0,008219178	0,8159793273	0,0094619248	0,0169655802	0,0008212543
6	0,016438356	1,4864223743	0,0023428750	0,0193084552	0,0002033515
7	0,019178082	0,2238763920	0,0005414488	0,0198499040	0,0000469954
8	0,021917808	0,1713812380	0,0009772956	0,0208271997	0,0000848250
9	0,024657534	0,5420445660	0,0013864757	0,0222136753	0,0001203401
10	0,02739726	0,4700826735	0,0052095656	0,0274232409	0,0004521678
14	0,038356164	0,4806630467	0,0013939685	0,0288172094	0,0001209905
15	0,04109589	0,5369339514	-0,0110328894	0,0177843200	-0,0009576072

Cálculo de pérdida de masa para probeta N-III-1

N-III					
Tiempo Dias	Años	Icorr	Icorr.t	Icorr acum	Ley Faraday gr
0	0	0,3056498876	0,0019699371	0,0019699371	0,0001837566
1	0,002739726	1,1324041652	0,0030924692	0,0050624062	0,0002884669
2	0,005479452	1,1250983318	0,0016578891	0,0067202954	0,0001546486
3	0,008219178	0,0851607256	0,0043143579	0,0110346533	0,0004024452
6	0,016438356	0,9646663632	0,0025592366	0,0135938899	0,0002387267
7	0,019178082	0,9035763805	0,0026080860	0,0162019759	0,0002432834
8	0,021917808	1,0003264327	0,0026210470	0,0188230230	0,0002444924
9	0,024657534	0,9130379133	0,0024906542	0,0213136772	0,0002323293
10	0,02739726	0,9051396614	0,0089541267	0,0302678039	0,0008352448
14	0,038356164	0,7289884686	0,0020438339	0,0323116379	0,0001906497
15	0,04109589	0,7630102931	0,0024963839	0,0348080217	0,0002328638
16	0,043835616	1,0593499364	-0,0232186287	0,0115893930	-0,0021658437

**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

Cálculo de pérdida de masa para probeta E-I-1

E-I					
Tiempo Dias	Años	Icorr	Icorr.t	Icorr acum	Ley Faraday gr
0		0,0447081331	0,0000739682	0,0000739682	0,0000069698
1	0,002739726	0,0092886309	0,0000296830	0,0001036512	0,0000027969
2	0,005479452	0,0123799698	0,0001079444	0,0002115956	0,0000101712
3	0,008219178	0,0664194687	0,0206596945	0,0208712901	0,0019466919
7	0,019178082	3,7039747818	0,0104524865	0,0313237766	0,0009849018
8	0,021917808	3,9263403347	0,0100453906	0,0413691672	0,0009465426
9	0,024657534	3,4067948270	0,0084447865	0,0498139537	0,0007957231
10	0,02739726	2,7578992953	0,0266864853	0,0765004390	0,0025145756
14	0,038356164	2,1123842757	0,0058468133	0,0823472523	0,0005509251
15	0,04109589	2,1557894321	0,0057169688	0,0880642211	0,0005386903
16	0,043835616	2,0175978018	-0,0442213217	0,0438428995	-0,0041668228

Cálculo de pérdida de masa para probeta E-II-1

E-II					
Tiempo Dias	Años	Icorr	Icorr.t	Icorr acum	Ley Faraday gr
0		0,0267660312	0,0000732753	0,0000732753	0,0000066625
1	0,002739726	0,0267249118	0,0015260047	0,0015992799	0,0001387504
2	0,005479452	1,0872584931	0,0016209091	0,0032201890	0,0001473795
3	0,008219178	0,0960051649	0,0019946082	0,0052147973	0,0001813577
6	0,016438356	0,3893495051	0,0010520826	0,0062668799	0,0000956595
7	0,019178082	0,3786707856	0,0011997232	0,0074666031	0,0001090836
8	0,021917808	0,4971271449	0,0013170367	0,0087836398	0,0001197502
9	0,024657534	0,4643096768	0,0012836038	0,0100672436	0,0001167104
10	0,02739726	0,4727210839	0,0050524867	0,0151197303	0,0004593922
14	0,038356164	0,4493577378	0,0012852004	0,0164049307	0,0001168555
15	0,04109589	0,4888385881	-0,0100446285	0,0063603022	-0,0009132977

**ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE
A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS**

Cálculo de pérdida de masa para probeta E-III-1

E-III		Icorr	Icorr.t	Icorr acum	Ley Faraday gr
Tiempo Dias	Años				
0		0,0474075182	0,0023663094	0,0023663094	0,0002103106
1	0,002739726	1,6799983321	0,0037281616	0,0060944710	0,0003313481
2	0,005479452	1,0415596371	0,0017604503	0,0078549213	0,0001564637
3	0,008219178	0,2435691013	0,0022029651	0,0100578864	0,0001957931
6	0,016438356	0,2924857401	0,0006372337	0,0106951201	0,0000566355
7	0,019178082	0,1726948732	0,0005736073	0,0112687274	0,0000509805
8	0,021917808	0,2460384654	0,0005851308	0,0118538582	0,0000520047
9	0,024657534	0,1811070115	0,0005446752	0,0123985334	0,0000484091
10	0,02739726	0,2165058678	0,0025258475	0,0149243809	0,0002244899
14	0,038356164	0,2444612958	0,0004494099	0,0153737908	0,0000399422
15	0,04109589	0,0836079223	0,0002965559	0,0156703467	0,0000263570
16	0,043835616	0,1328779169	-0,0029123927	0,0127579540	-0,0002588449

3.8 TABLA CON RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PERDIDA DE MASA

Condiciones	Nombre	Tiempo(días)	Pérdida de material(g)
100% cemento Curado normal	N-I-1	16	0,0007241800
80% cemento 20% puzolana y Curado normal	N-II-1	15	0,0001209905
60% cemento 40% puzolana y curado normal	N-III-1	16	0,0002328638
100% cemento Curado Especial	E-I-1	16	0,0005386903
80% cemento 20% puzolana y Curado normal	E-II-1	15	0,0001168555
100% cemento y Curado Especial	E-III-1	16	0,0000263570

3.9 ENSAYE DE CARBONATACIÓN EN LAS PROBETAS

Una vez tomadas las muestras para el análisis de cloruros se le aplicó a una parte de la probeta fenolftaleína para comprobar si las probetas presentaban carbonatación como se muestra a continuación, se pudo observar que la carbonatación fue mínima, solo se presentó en algunas esquinas.



Figura 48 Aplicación de fenolftaleína para prueba de carbonatación

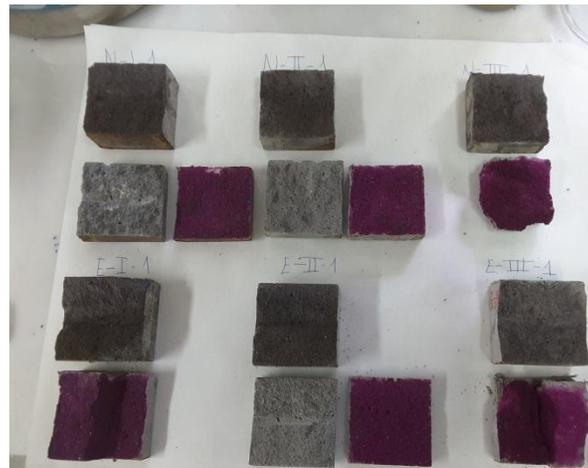


Figura 49 Fenolftaleína aplicada en las probetas; la presencia de carbonatación es mínima y solo en algunas esquinas

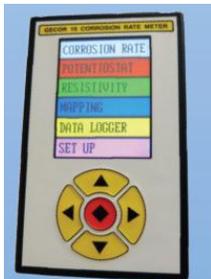
3.10 PRUEBAS EN ELEMENTOS DE CONCRETO MEDIANTE EL USO DEL CORROSÍMETRO IN SITU (GECOR 10)

INTRODUCCIÓN

El GECOR 10 es un equipo que permite medir la velocidad de corrosión en estructuras de concreto de gran tamaño; es un equipo para realización de ensayos en laboratorio de forma rápida y sencilla, tanto con confinamiento del anillo de guarda como sin confinamiento, para ensayos rutinarios de resistencia de polarización, sin perder la capacidad de aplicación a trabajos de evaluación de estructuras reales en campo.

Descripción del Equipo

El GECOR 10 es un equipo ligero y de pequeño tamaño, con una pantalla táctil a color y funciona a base de pilas. Es un equipo altamente robusto, que incluye un sistema de protección flexible contra impactos y caídas, de cara a su uso en campo.



El GECOR 10, incorpora 3 sensores de contacto con la estructura.

- Un sensor circular para medida de la velocidad de corrosión, fabricado de material transparente de cara a permitir el control del nivel del electrolito interior así como verificación del estado de las conexiones y los contactos, facilitando la conservación y el mantenimiento por parte del usuario.
- Dos electrodos auxiliares, uno central circular y otro concéntrico con el anterior

(anillo de guarda) que confina la corriente aplicada con el electrodo central.

- Dos electrodos de referencia para el control de la corriente aplicada con el anillo de guarda exterior, que se sitúan entre el electrodo circular central y el anillo concéntrico
- Un sensor de mapeo con un electrodo de referencia central y un solo electrodo circular auxiliar de tamaño pequeño y cableado para contacto con el dispositivo de medida
- Sensor de 4 puntas para medida de la resistividad del hormigón mediante el método Wenner.

El equipo cuenta con un software que controla tanto la unidad central como los diferentes sensores de contacto necesarios para la medida con las diferentes técnicas que permite realizar

TÉCNICAS DE MEDICIÓN:

La Medición de velocidad de corrosión tanto en probetas como en estructuras reales a través de la Técnica avanzada de Confinamiento Modulado (MCT) con controladores de campo eléctrico entre el contraelectrodo central y el anillo de guarda es el único equipo en el mercado que puede garantizar la medida correcta de la velocidad de corrosión. Estos dos electrodos controlan las corrientes inyectadas por el contra central y el anillo de guarda lo que permite balancearlas de forma dinámica durante la medición y confinar la señal en el anillo concéntrico con el central y el de guarda, que pasa entre los dos electrodos de control del campo.

La MCT permite realizar la medición de tres variables fundamentales relacionadas con los procesos de corrosión que se pueden dar en la estructura a través de técnicas altamente contrastadas: medidas de potencial eléctrico, de resistividad y de resistencia de polarización (polarización lineal). Incorpora como novedad un sensor para la medida de la resistividad por el método de las 4 puntas

Puede aplicar corrientes suficientemente altas de forma estable durante uno o varios minutos seguidos. Tiene la capacidad de modular la corriente que inyecta por el anillo de aguarda de una forma flexible que se adapta a cada estructura para alcanzar el grado de confinamiento correcto.

Mapeo de potencial: Permite realizar mediciones rápidas cualitativas sobre el grado de riesgo de corrosión asociado a la estructura a través de la medición combinada de potencial de corrosión y resistividad, creando un mapa de medidas parametrizable.

Medición de la resistividad del concreto en menos de dos segundos a través de un sensor especial de 4 puntas para aplicación de la norma UNE 83988-2.

El equipo cuenta con la funcionalidad de operación como potencióstato de laboratorio, lo que permite su uso para la realización de ensayos en todo tipo de probetas de laboratorio, de forma muy sencilla, ya que incorpora procesos pre-programados para la medida de la resistencia de polarización sin confinar la corriente.

El sistema incluye una caja de verificación que permite la comprobación del correcto funcionamiento de los diferentes elementos del sistema, mediante la conexión de la unidad central a la caja de verificación se puede comprobar el funcionamiento del equipo en los modos “Velocidad de corrosión” y “Mapeo”, por otro lado, mediante la conexión del sensor de 4 puntas y por contacto directo con la caja de verificación se puede comprobar la correcta medición de la resistividad

OBJETIVO DEL ENSAYE

Realizar mediciones en elementos de concreto reforzado para determinar la corrosión del acero y resistividad del concreto

MODELO EXPERIMENTAL

Se hacen medidas cada 15 días en las vigas, losas y pilares para llevar el control de la evolución de la corrosión y resistividad de los elementos de concreto reforzado.

PROCEDIMIENTO

Se configura el GECOR, ingresando el área del acero, la prueba a realizar y el tiempo de aplicación de corriente.

- Se toma la temperatura ambiente y temperatura del elemento a medir



Figura 50 Se toma la temperatura ambiente y del elemento con un termómetro

- Como primera medición se mide la velocidad de corrosión del acero (los resultados se muestran más adelante)
- Se conectan el GECOR tanto al electrodo de anillo y al acero de refuerzo a analizar cómo se muestra en las siguientes imágenes, se tomaron tres puntos de referencia en las vigas, dos puntos en las losas y tres en los pilares, los resultados de las mediciones se muestran más adelante

ESTUDIO DE DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO FRENTE A LOS AGENTES QUÍMICOS AGRESIVOS

- Se humedecen los elementos de concreto para realizar las mediciones y se coloca el anillo sobre los puntos húmedos.



Figura 51 Se humedecen los puntos donde se hicieron las medidas

- Se procede a medir la velocidad de Corrosión Icorr

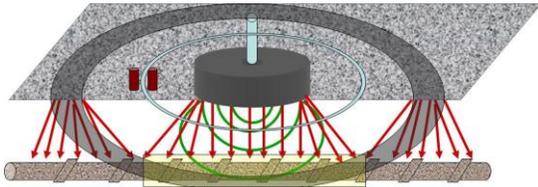


Figura 52 El área polarizada es la que queda debajo del círculo amarillo



Figura 53 GECOR midiendo

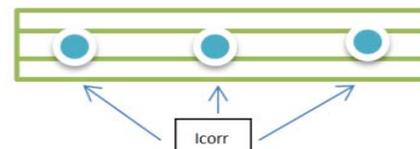
- Se cambia el anillo por el sensor de cuatro puntas para proceder a medir la resistividad del concreto



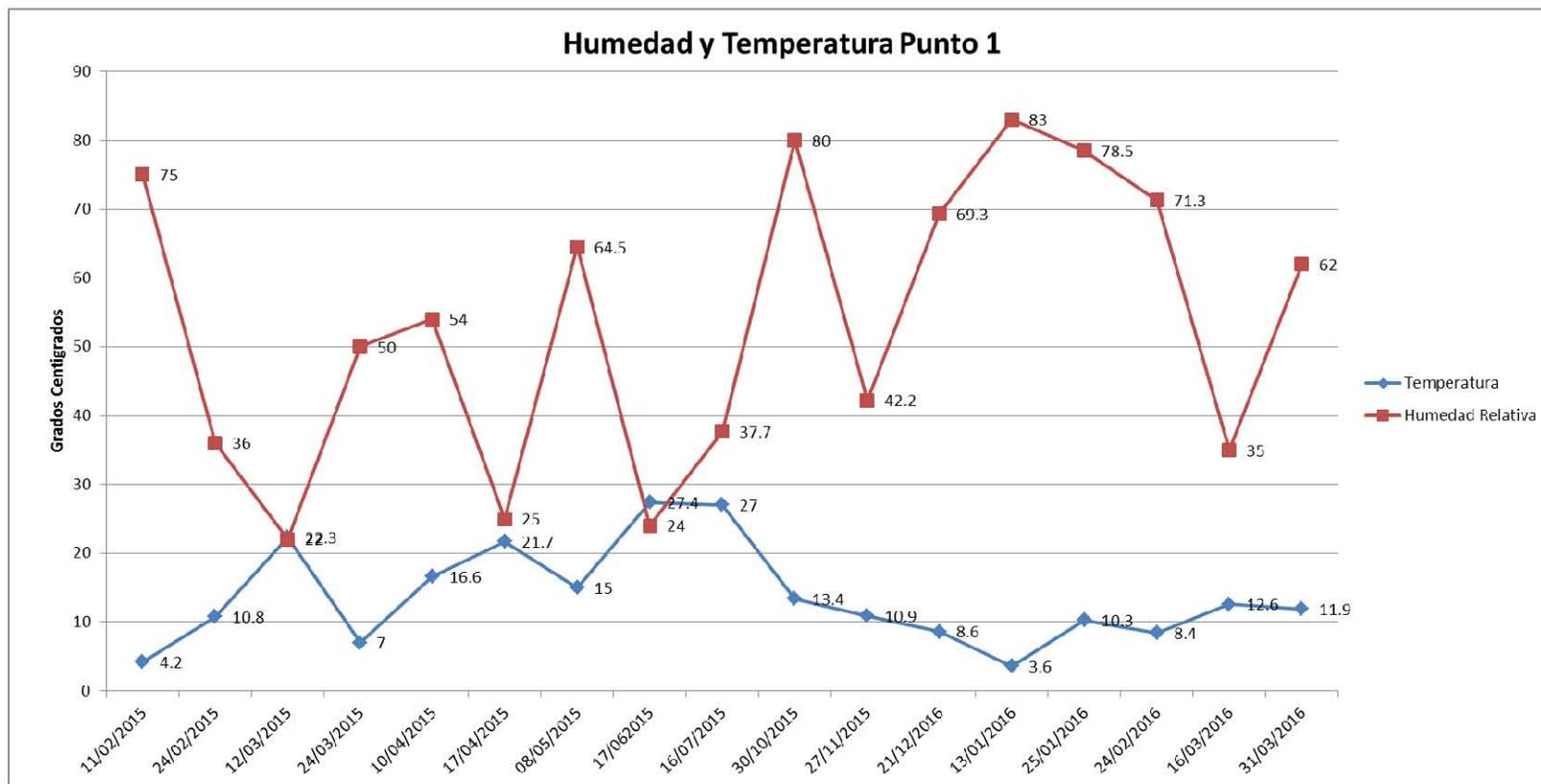
Figura 54 Método de las cuatro puntas para medir la resistividad del hormigón

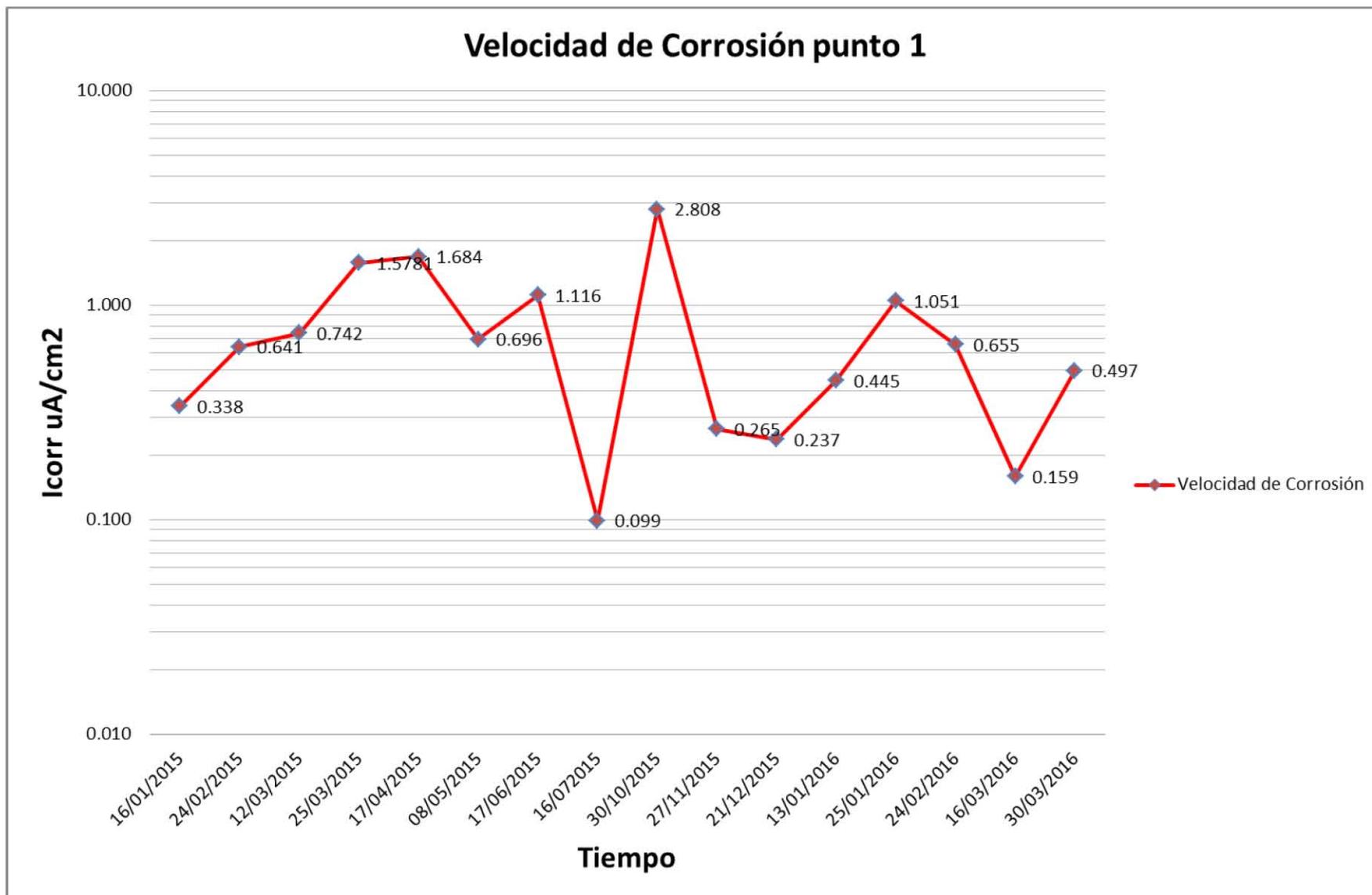
3.11 RESULTADOS

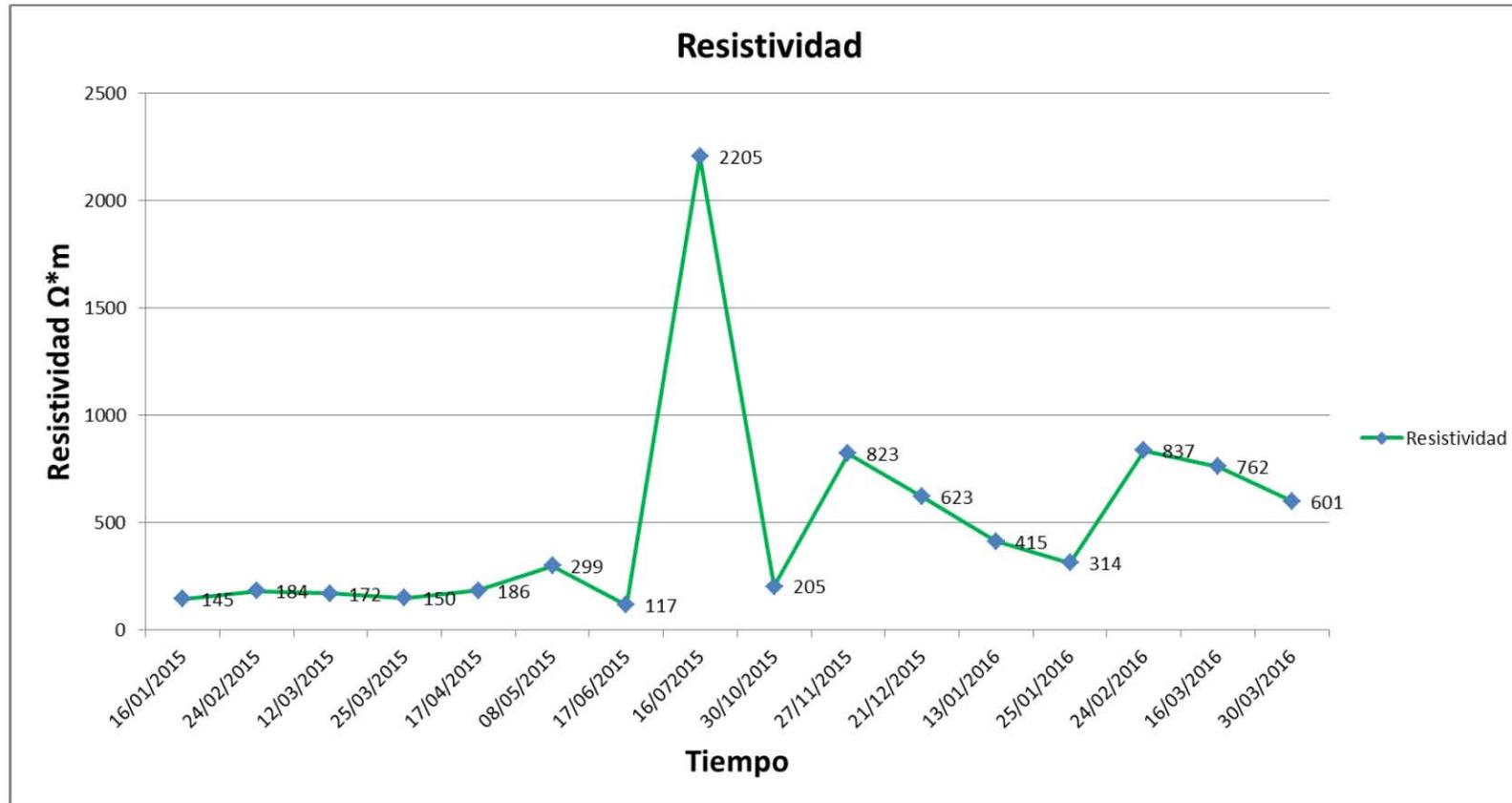
Viga Punto 1



FECHA	HORA	Puntos	TEMP °C (EXT)	HR% (EXT)	Area Acero	Tiempo medida	Icorr (ua/cm2)	Ecorr (mV)	Resistividad (Ω*m)
16/01/2015	11:30	1	4.2	75	32	60s	0.338	-465.8	145
24/02/2015	12:15	1	10.8	36	32	60s	0.641	-385	184
12/03/2015	15:30	1	22.3	22	32	60s	0.742	-392.1	172
25/03/2015	11:00	1	7	50	32	60s	1.5781	-417.01	150
17/04/2015	12:00	1	16.6	54	32	60s	1.684	-467	186
08/05/2015	11:15	1	19.1	48.5	32	60s	0.696	-387.6	299
17/06/2015	11:40	1	27.4	24	32	60s	1.116	-472	117
16/072015	09:35	1	26.1	42.2	32	60s	0.099	-210.2	2205
30/10/2015	11:00	1	14	78	32	60s	2.808	-410.4	205
27/11/2015	11:10	1	11.2	36.7	32	60s	0.265	-306	823
21/12/2015	11:20	1	7.3	79.6	32	60s	0.237	-344	623
13/01/2016	10:40	1	3.7	82.6	32	60S	0.445	-380	415
25/01/2016	11:15	1	10.1	81	32	60S	1.051	-384	314
24/02/2016	11:45	1	8.4	71.3	32	60S	0.655	-341	837
16/03/2016	12:50	1	12.6	35	32	60S	0.159	-304.4	762
30/03/2016	11:00	1	11.9	62	32	60S	0.497	-353.2	601

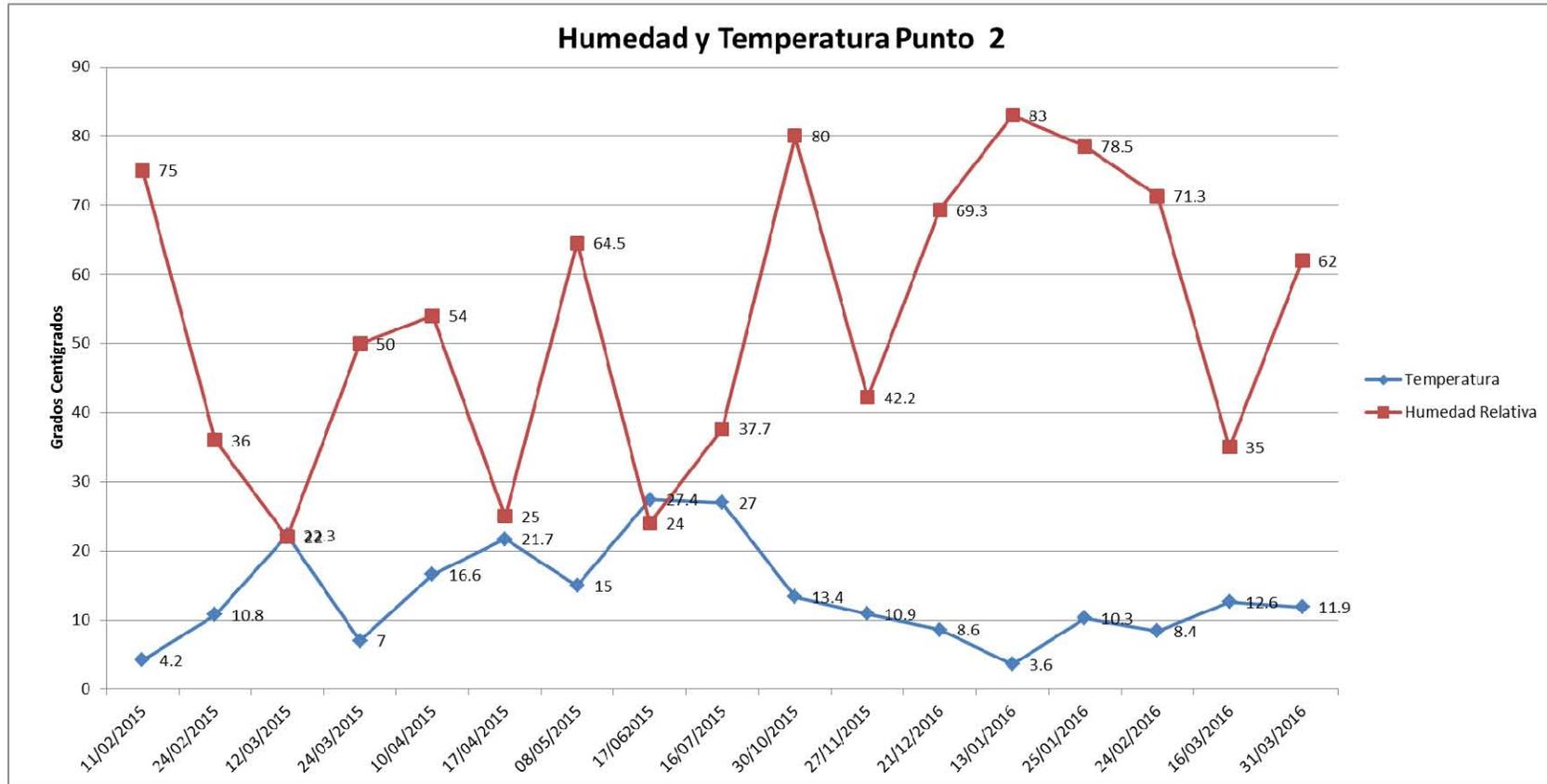


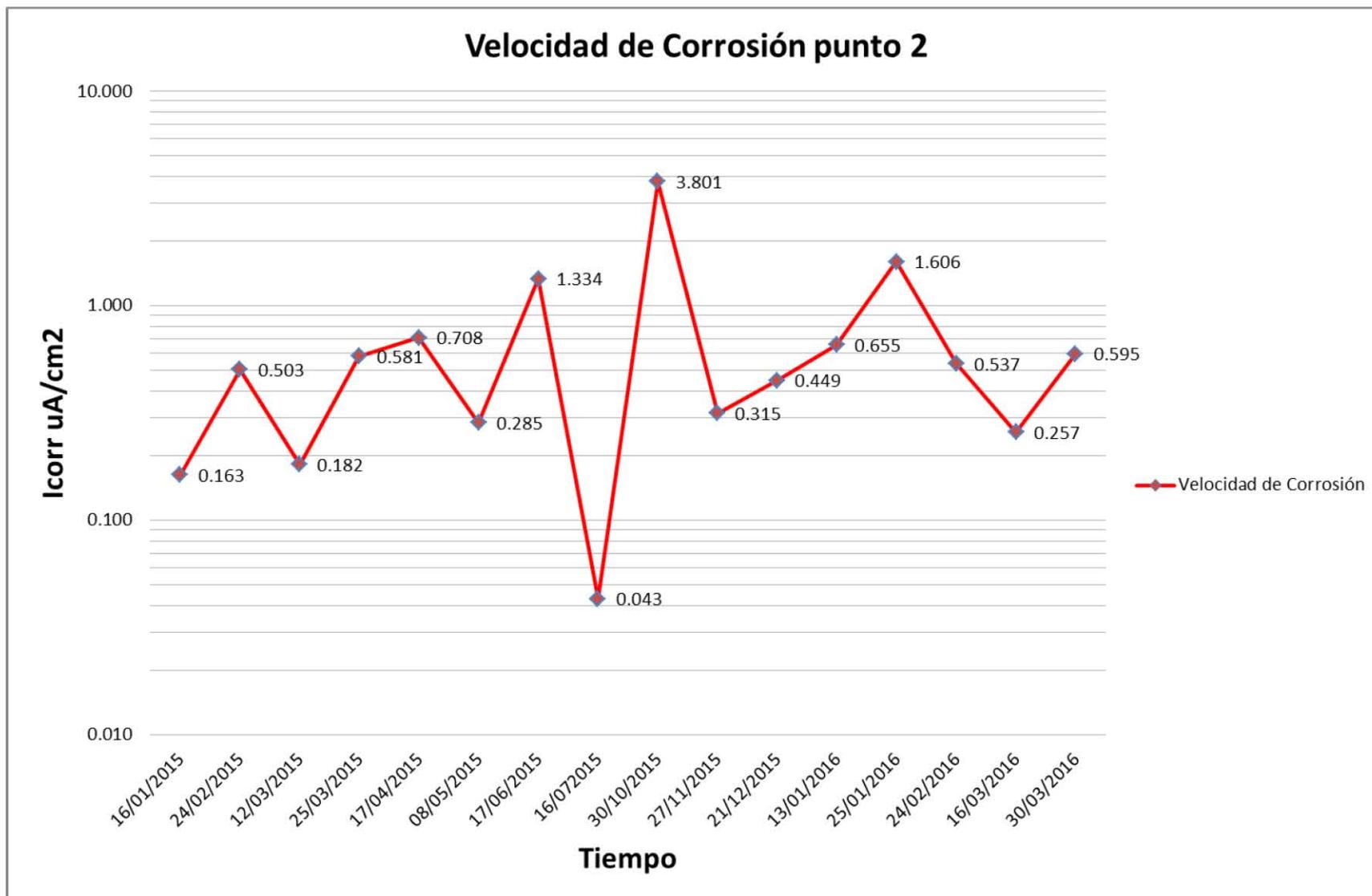


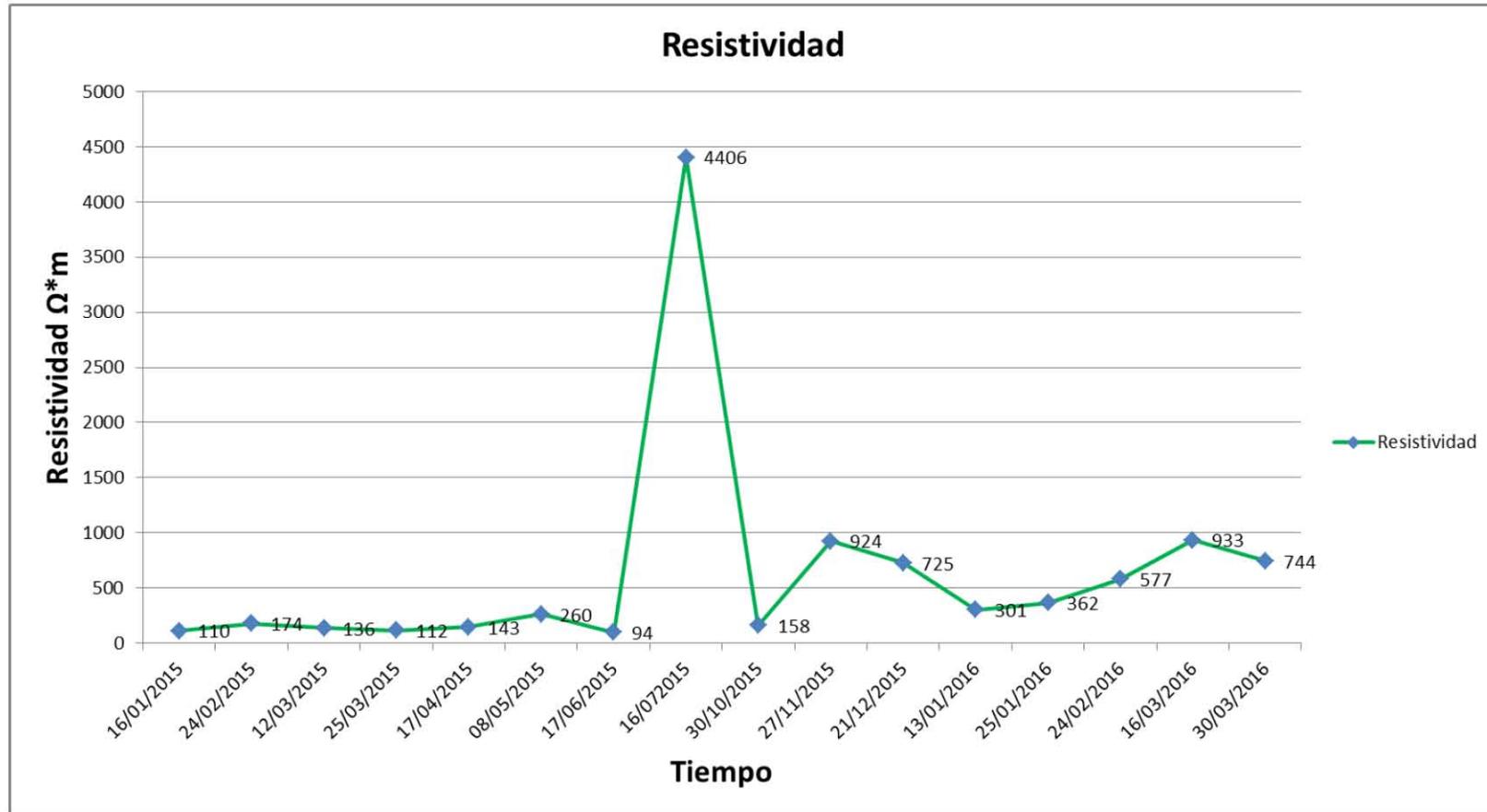


Punto 2

FECHA	HORA	Puntos	TEMP °C (EXT)	HR% (EXT)	Area Acero	Tiempo medida	Icorr (ua/cm2)	Ecorr (mV)	Resistividad (Ω *m)
16/01/2015	11:30	2	4.2	75	32	60s	0.163	-452.3	110
24/02/2015	12:15	2	10.8	36	32	60s	0.503	-404.8	174
12/03/2015	15:30	2	22.3	22	32	60s	0.182	-395.5	136
25/03/2015	11:00	2	7	50	32	60s	0.581	-430.5	112
17/04/2015	12:00	2	16.6	54	32	60s	0.708	-448.56	143
08/05/2015	11:15	2	19.1	48.5	32	60s	0.285	-369.9	260
17/06/2015	11:40	2	27.4	24	32	60s	1.334	-455.7	94
16/07/2015	09:35	2	26.1	42.2	32	60s	0.043	-222	4406
30/10/2015	11:00	2	14	78	32	60s	3.801	-433	158
27/11/2015	11:10	2	11.2	36.7	32	60s	0.315	-354	924
21/12/2015	11:20	2	7.3	79.6	32	60s	0.449	-364.5	725
13/01/2016	10:40	2	3.7	82.6	32	60S	0.655	-411	301
25/01/2016	11:15	2	10.1	81	32	60S	1.606	-384	362
24/02/2016	11:45	2	8.4	71.3	32	60S	0.537	-369	577
16/03/2016	12:50	2	12.6	35	32	60S	0.257	-330.7	933
30/03/2016	11:00	2	11.9	62	32	60S	0.595	-370.37	744

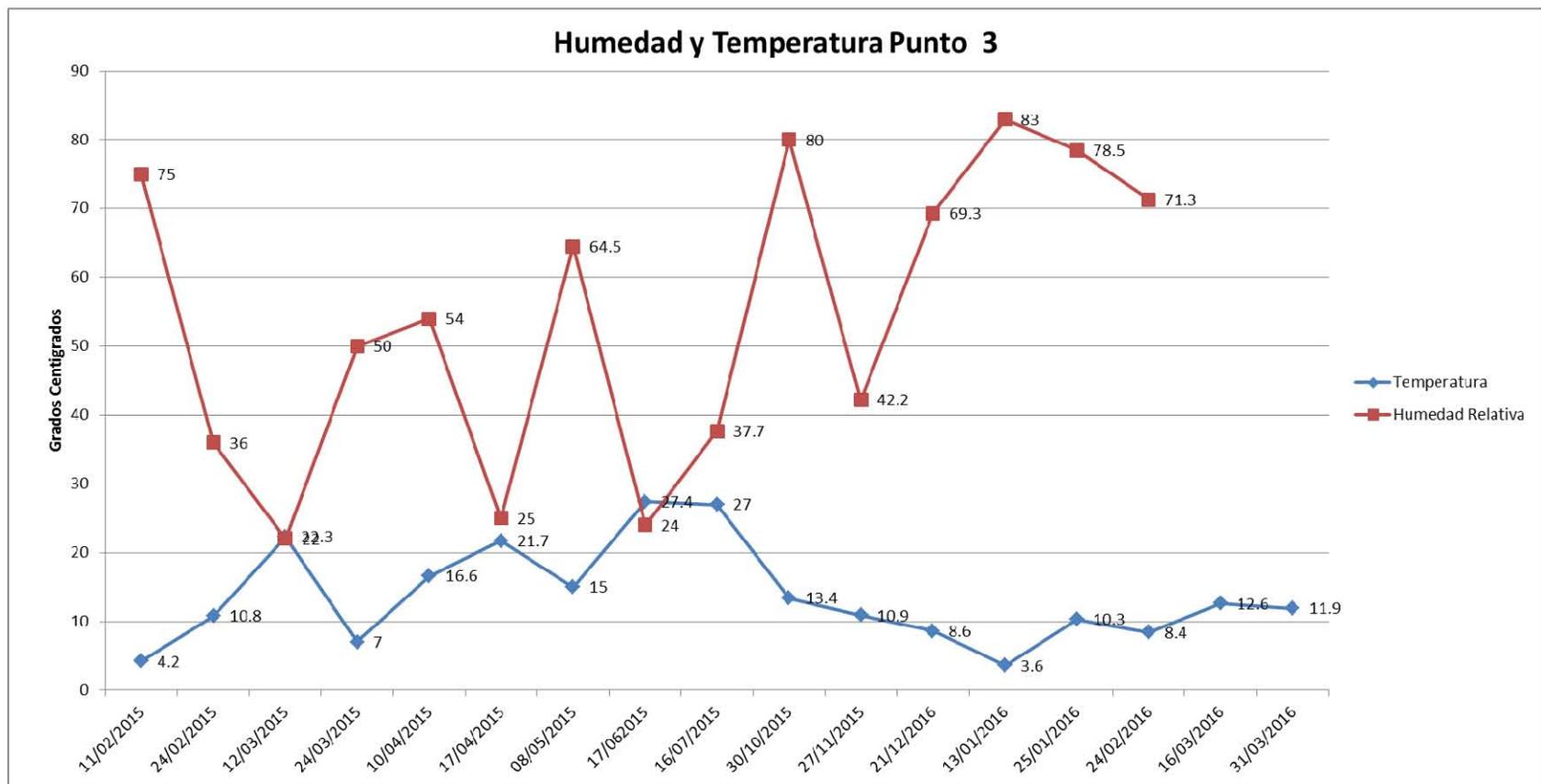


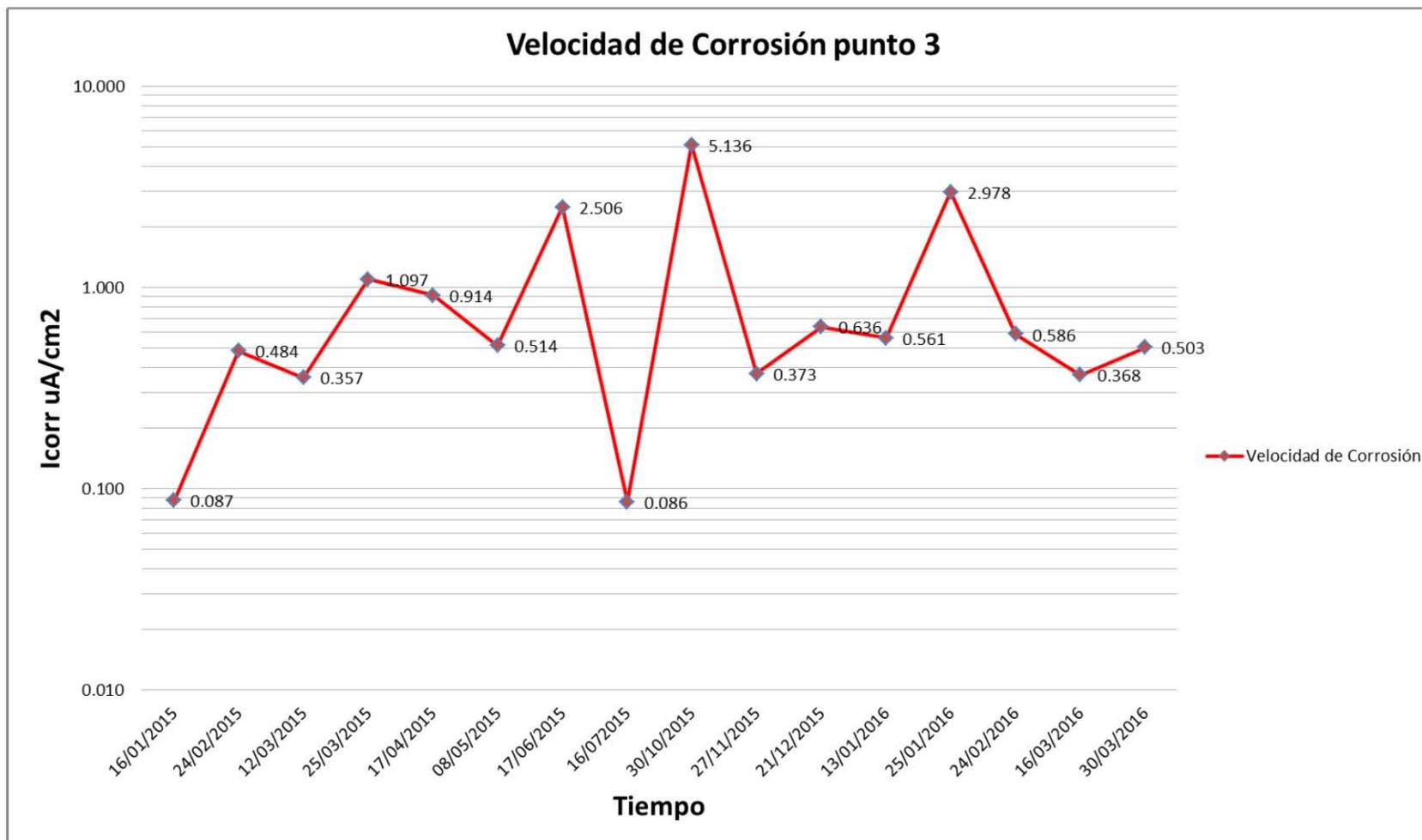


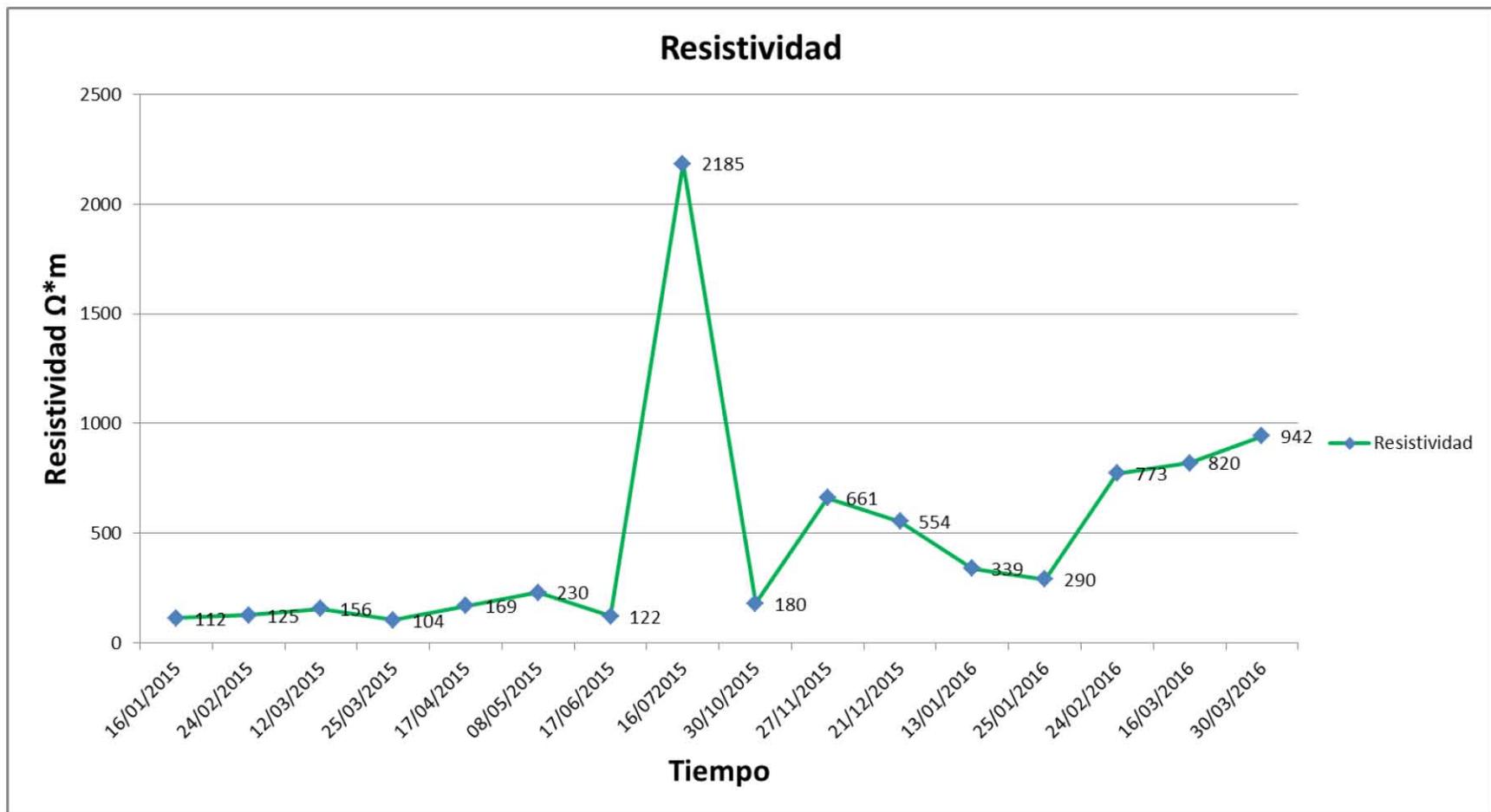


Punto 3

FECHA	HORA	Puntos	TEMP °C (EXT)	HR% (EXT)	Area Acero	Tiempo medida	Icorr (ua/cm2)	Ecorr (mV)	Resistividad (Ω *m)
16/01/2015	11:30	3	4.2	75	32	60s	0.087	-482.8	112
24/02/2015	12:15	3	10.8	36	32	60s	0.484	-444	125
12/03/2015	15:30	3	22.3	22	32	60s	0.357	-420.5	156
25/03/2015	11:00	3	7	50	32	60s	1.097	-473.69	104
17/04/2015	12:00	3	16.6	54	32	60s	0.914	-419.04	169
08/05/2015	11:15	3	19.1	48.5	32	60s	0.514	-421	230
17/06/2015	11:40	3	27.4	24	32	60s	2.506	-475	122
16/07/2015	09:35	3	26.1	42.2	32	60s	0.086	-256	2185
30/10/2015	11:00	3	14	78	32	60s	5.136	-437	180
27/11/2015	11:10	3	11.2	36.7	32	60s	0.373	-373	661
21/12/2015	11:20	3	7.3	79.6	32	60s	0.636	-395.4	554
13/01/2016	10:40	3	3.7	82.6	32	60S	0.561	-418	339
25/01/2016	11:15	3	10.1	81	32	60S	2.978	-398	290
24/02/2016	11:30	3	8.4	71.3	32	60S	0.586	-374	773
16/03/2016	12:50	3	12.6	35	32	60S	0.368	-345.6	820
30/03/2016	11:00	3	11.9	62	32	60S	0.503	-389.3	942



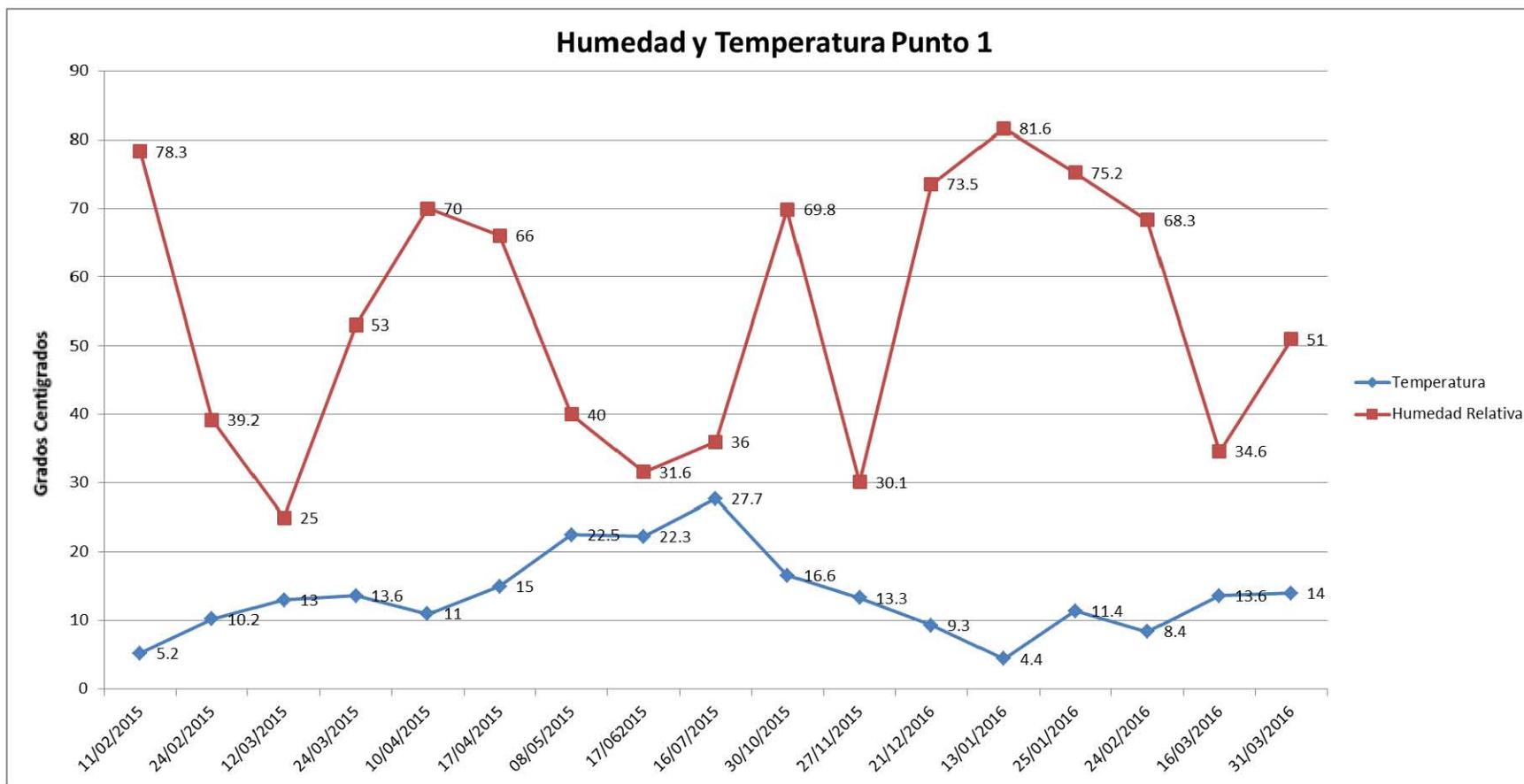


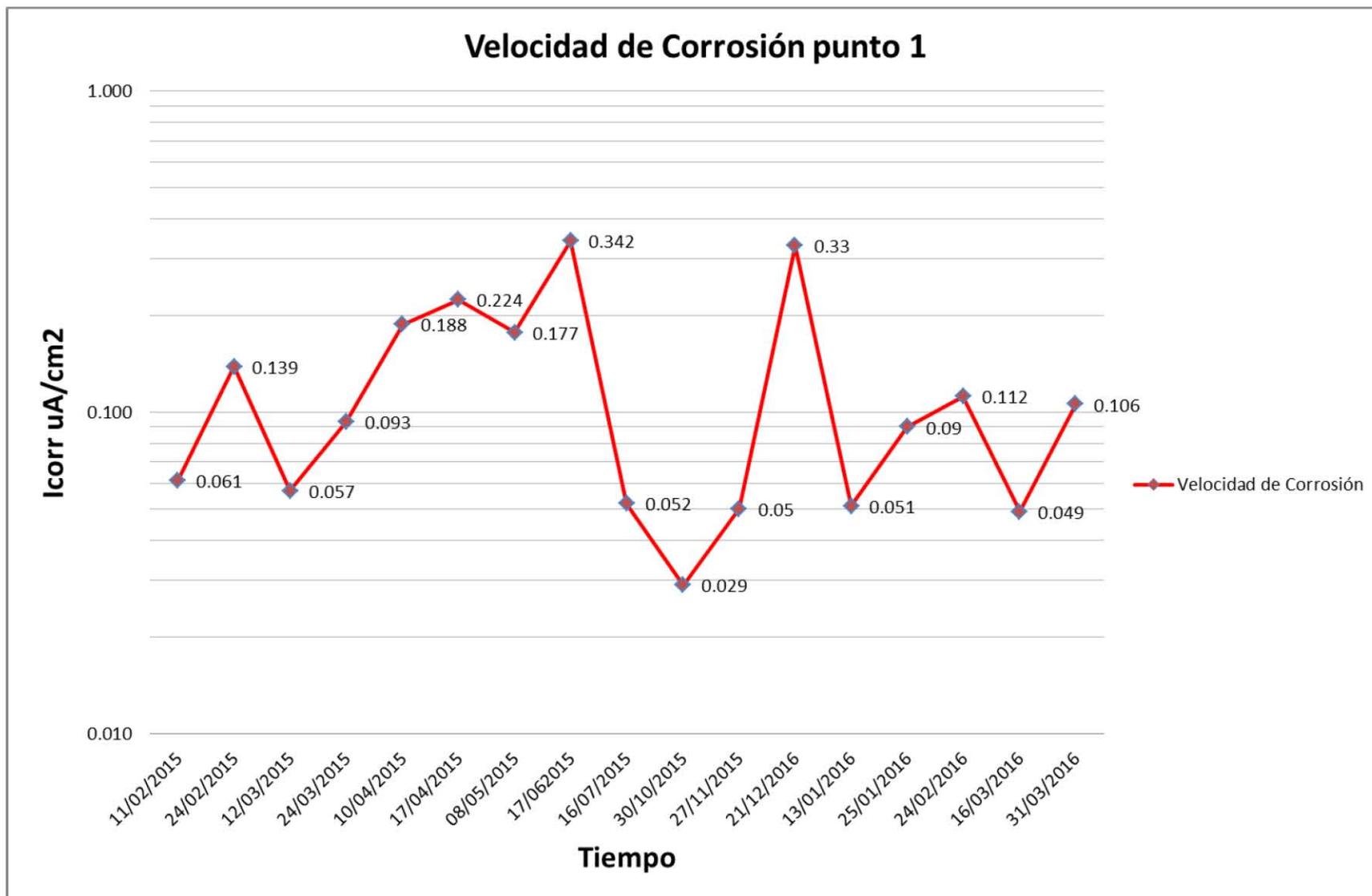


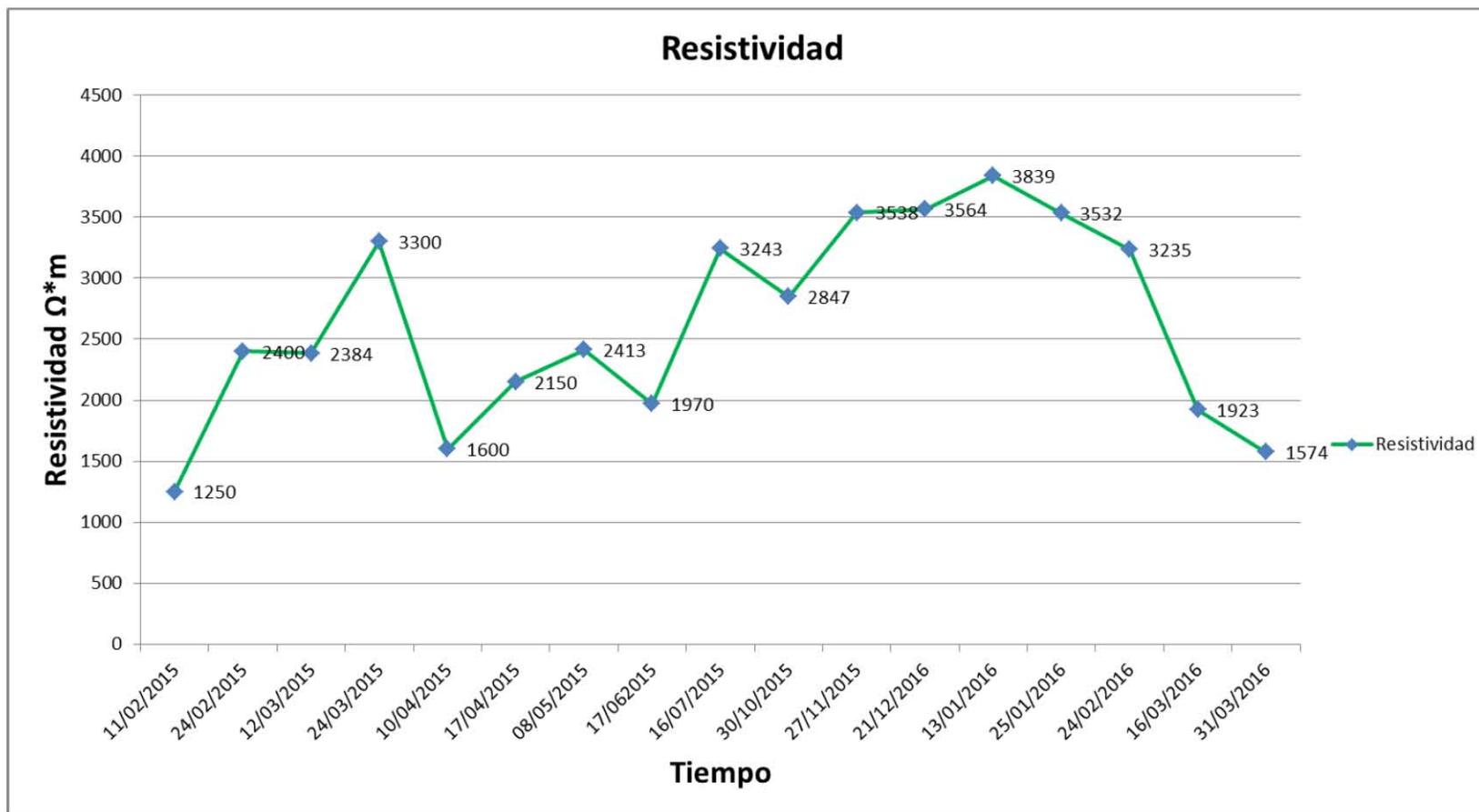
Losas Punto 1



FECHA	HORA	Puntos	TEMP °C (EXT)	HR% (EXT)	Ø Acero	Tiempo medida	Icorr (ua/cm2)	Ecorr (mV)	Resistividad (Ω*m)
11/02/2015	11:30	1	5.2	78.3	16	60s	0.061	-99.7	1250
24/02/2015	12:10	1	10.2	39.2	16	60s	0.139	-106.5	2400
12/03/2015	09:10	1	13	25	16	60s	0.057	-81	2384
24/03/2015	15:00	1	13.6	53	16	60s	0.093	-145.66	3300
10/04/2015	11:00	1	11	70	16	60s	0.188	-114	1600
17/04/2015	10:40	1	15	66	16	60s	0.224	-86.4	2150
08/05/2015	13:30	1	22.5	40	16	60s	0.177	-128.5	2413
17/06/2015	13:10	1	22.3	31.6	16	60S	0.342	-143.3	1970
16/07/2015	11:00	1	27.7	36	16	60S	0.052	-63.7	3243
30/10/2015	13:15	1	16.6	69.8	16	60s	0.029	-138.4	2847
27/11/2015	11:55	1	13.3	30.1	16	60s	0.05	-73.7	3538
21/12/2016	12:15	1	9.3	73.5	16	60s	0.33	-69.5	3564
13/01/2016	11:30	1	4.4	81.6	16	60s	0.051	-127	3839
25/01/2016	12:00	1	11.4	75.2	16	60s	0.09	-117.2	3532
24/02/2016	12:20	1	8.4	68.3	16	60s	0.112	-113.7	3235
16/03/2016	11:15	1	13.6	34.6	16	60s	0.049	-117.01	1923
31/03/2016	11:30	1	14	51	16	60s	0.106	-128.2	1574

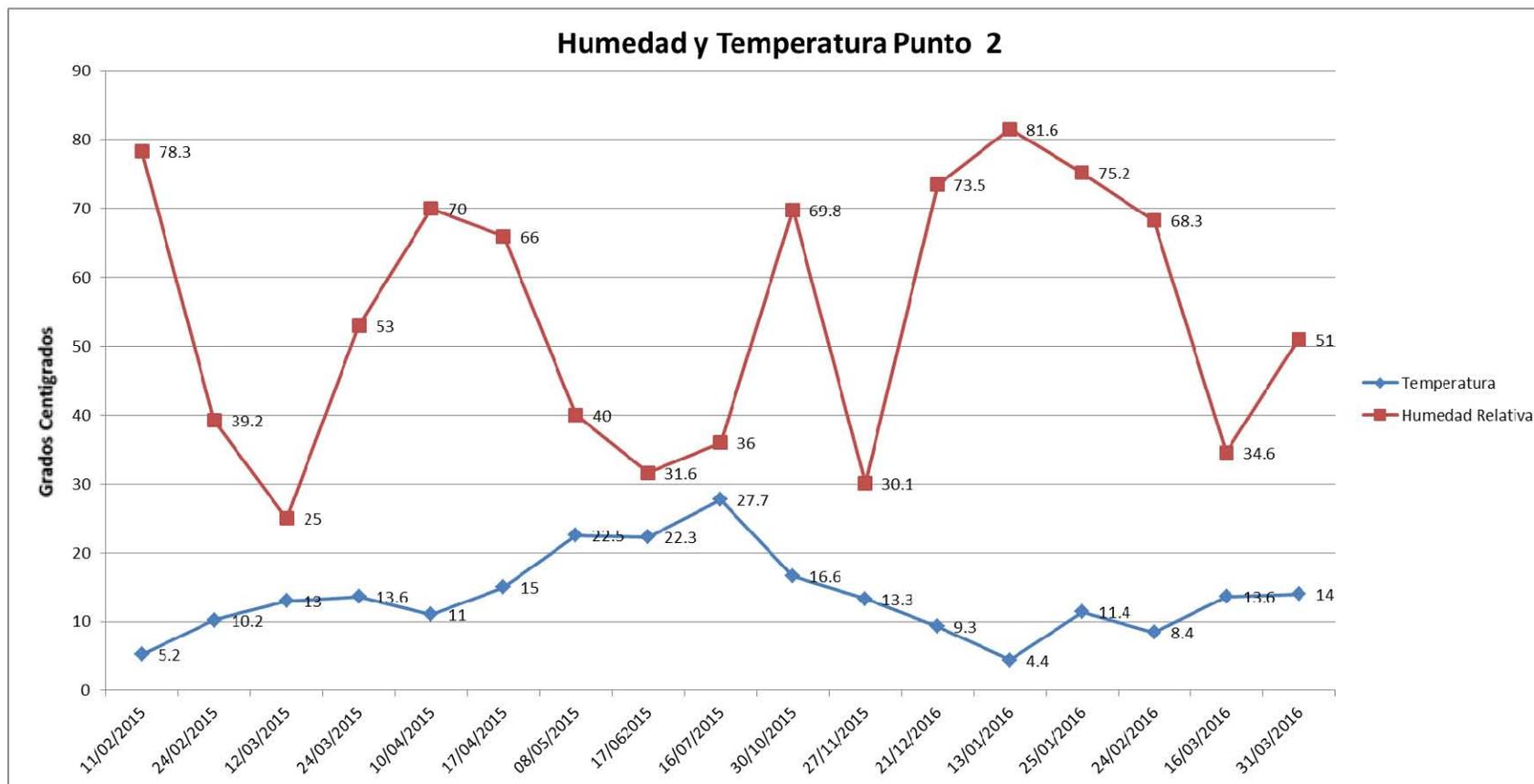


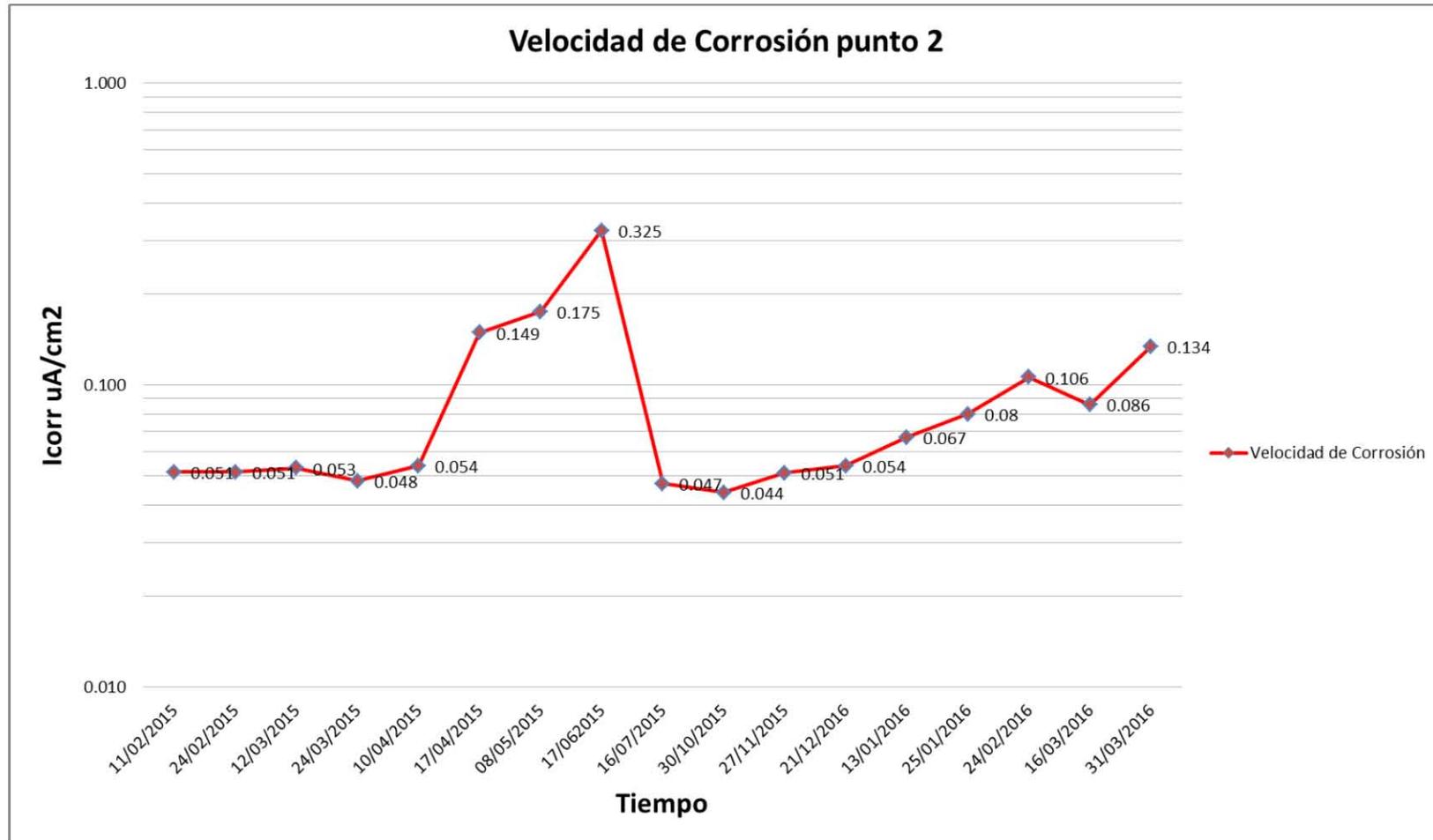


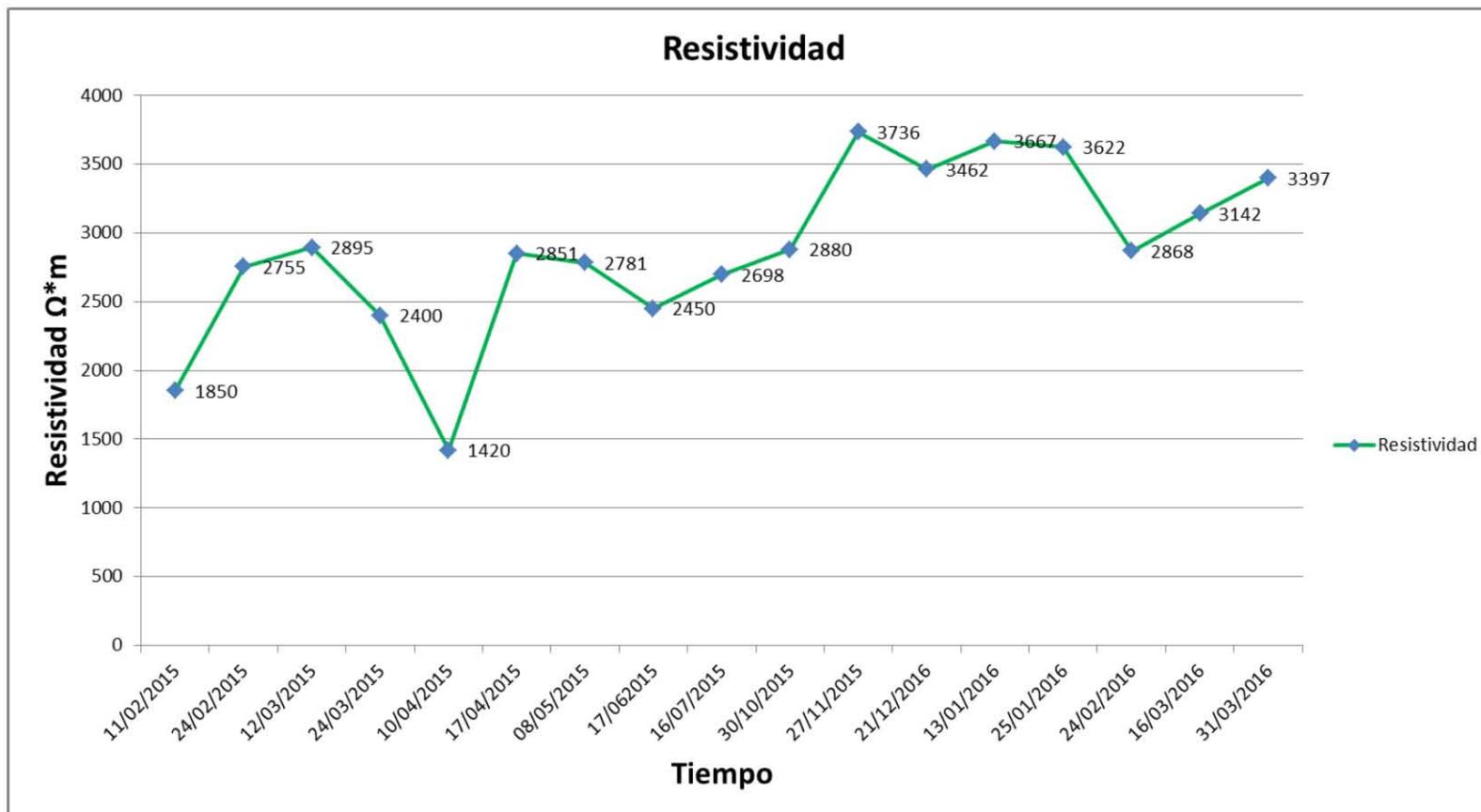


Punto 2

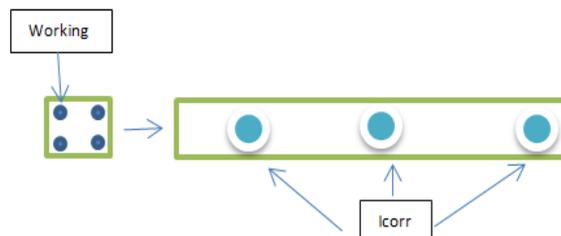
FECHA	HORA	Puntos	TEMP °C (EXT)	HR% (EXT)	Ø Acero	Tiempo medida	Icorr (ua/cm2)	Ecorr (mV)	Resistividad (Ω*m)
11/02/2015	11:30	2	5.2	78.3	16	60s	0.051	-140.2	1850
24/02/2015	12:10	2	10.2	39.2	16	60s	0.051	-92	2755
12/03/2015	09:10	2	13	0.25	16	60s	0.053	-65	2895
24/03/2015	15:00	2	13.6	53	16	60s	0.048	-174.01	2400
10/04/2015	11:00	2	11	70	16	60s	0.054	-103.23	1420
17/04/2015	10:40	2	15	66	16	60s	0.149	-122.9	2851
08/05/2015	13:30	2	22.5	40	16	60s	0.175	-111.35	2781
17/06/2015	13:10	2	22.3	31.6	16	60S	0.325	-130.8	2450
16/07/2015	11:00	2	27.7	36	16	60S	0.047	-74.3	2698
30/10/2015	13:15	2	16.6	69.8	16	60s	0.044	-125.2	2880
27/11/2015	11:55	2	13.3	30.1	16	60s	0.051	-106.2	3736
21/12/2016	12:15	2	9.3	73.5	16	60s	0.054	-48.2	3462
13/01/2016	11:30	2	4.4	81.6	16	60s	0.067	-113.1	3667
25/01/2016	12:00	2	11.4	75.2	16	60s	0.08	-117.7	3622
24/02/2016	12:20	2	8.4	68.3	16	60s	0.106	-98.2	2868
16/03/2016	11:15	2	13.6	34.6	16	60s	0.086	-100.02	3142
31/03/2016	11:30	2	14	51	16	60s	0.134	-100.3	3397



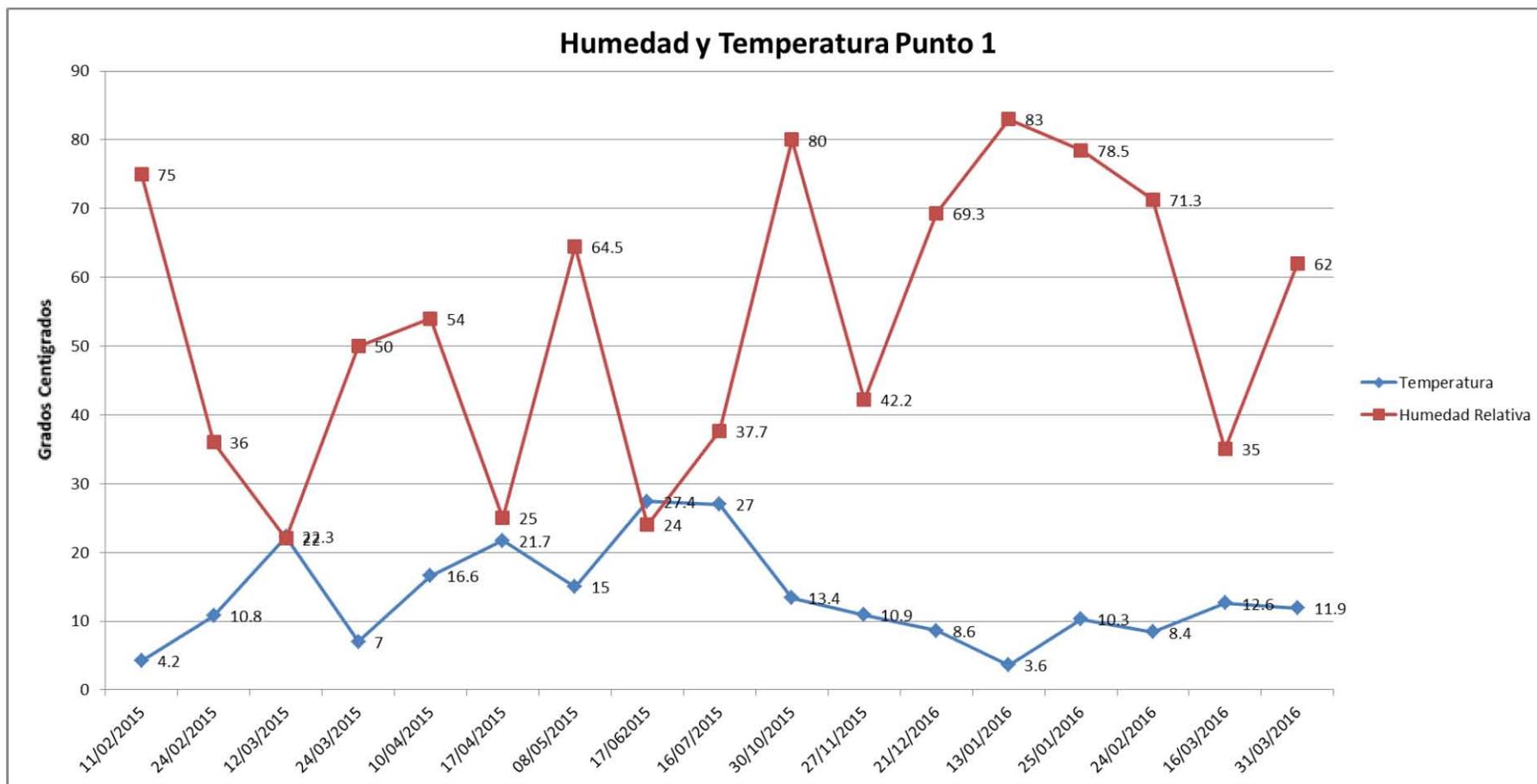




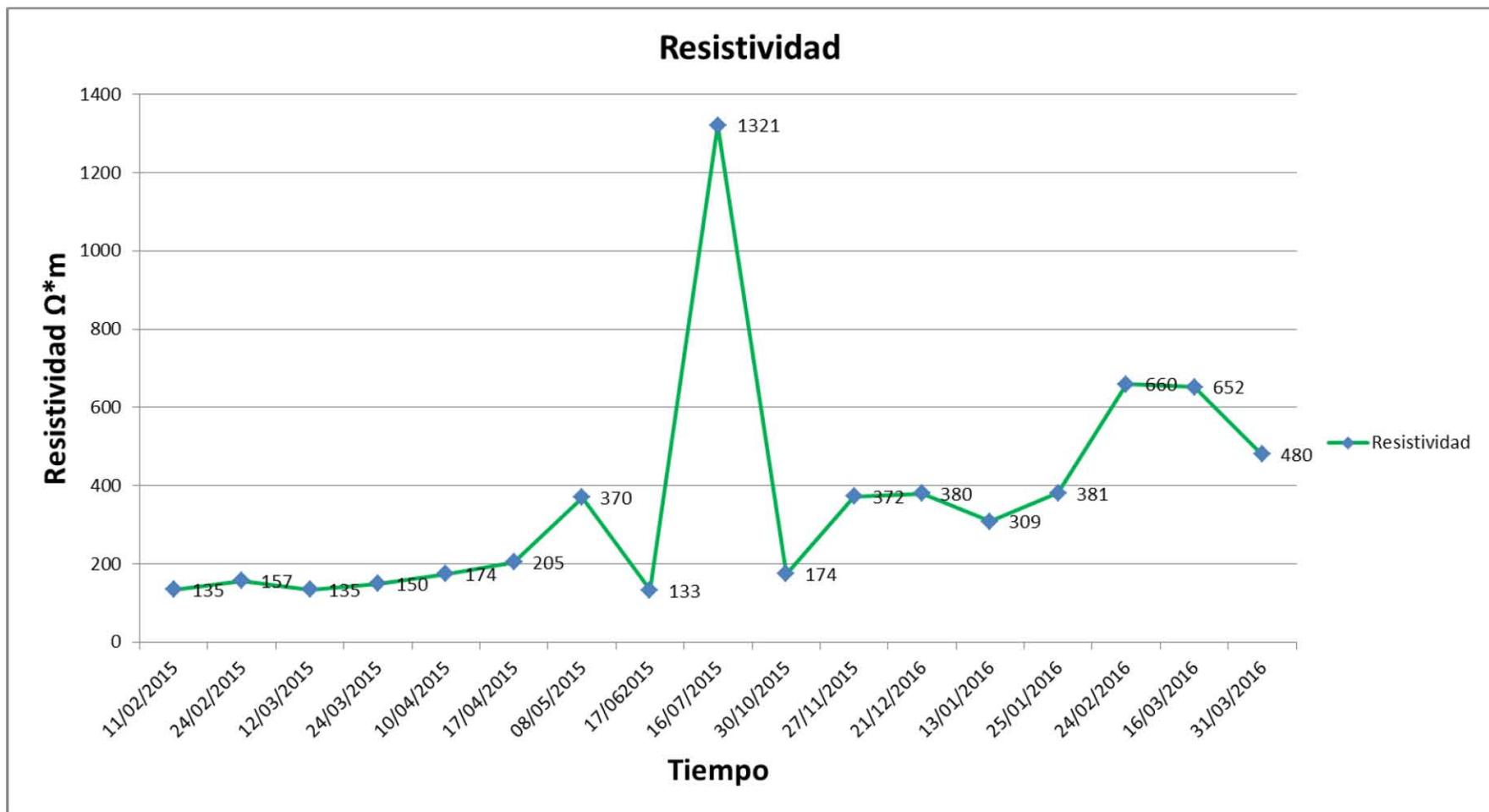
Pilar Punto 1



FECHA	HORA	Puntos	TEMP °C (EXT)	HR% (EXT)	Ø Acero	Tiempo medida	Icorr (ua/cm2)	Ecorr (mV)	Resistividad (Ω*m)
11/02/2015	11:30	1	4.2	75	12	60s	0.289	-469	135
24/02/2015	12:15	1	10.8	36	12	60s	0.196	-453.4	157
12/03/2015	15:30	1	22.3	22	12	60s	1.391	-378.2	135
24/03/2015	11:00	1	7	50	12	60s	1.518	-420.44	150
10/04/2015	12:10	1	16.6	54	12	60s	1.527	-382.05	174
17/04/2015	11:00	1	21.7	25	12	60s	2.381	-351.67	205
08/05/2015	10:45	1	15	64.5	12	60s	1.203	-366.9	370
17/062015	11:15	1	27.4	24	12	60s	1.842	-412.09	133
16/07/2015	09:15	1	27	37.7	12	60s	0.767	-236.04	1321
30/10/2015	10:10	1	13.4	80	12	60s	1.853	-430.1	174
27/11/2015	10:50	1	10.9	42.2	12	60s	2.539	-368	372
21/12/2016	11:10	1	8.6	69.3	12	60s	1.26	-370	380
13/01/2016	10:40	1	3.6	83	12	60S	1.007	-397	309
25/01/2016	11:20	1	10.3	78.5	12	60S	0.587	-382	381
24/02/2016	11:30	1	8.4	71.3	12	60S	0.748	-354.7	660
16/03/2016	12:50	1	12.6	35	12	60S	0.637	-335.8	652
31/03/2016	11:00	1	11.9	62	12	60s	0.735	-370.16	480

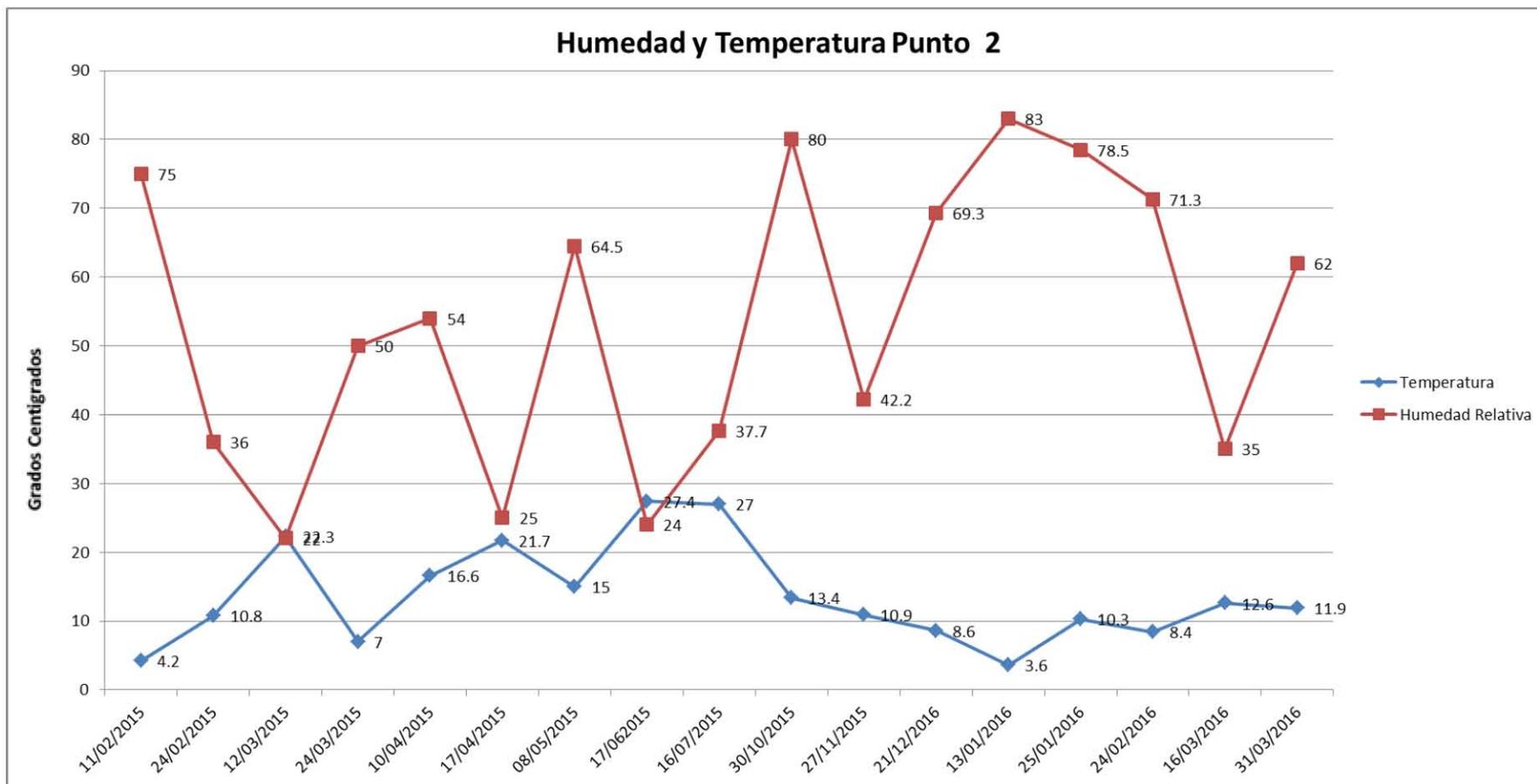


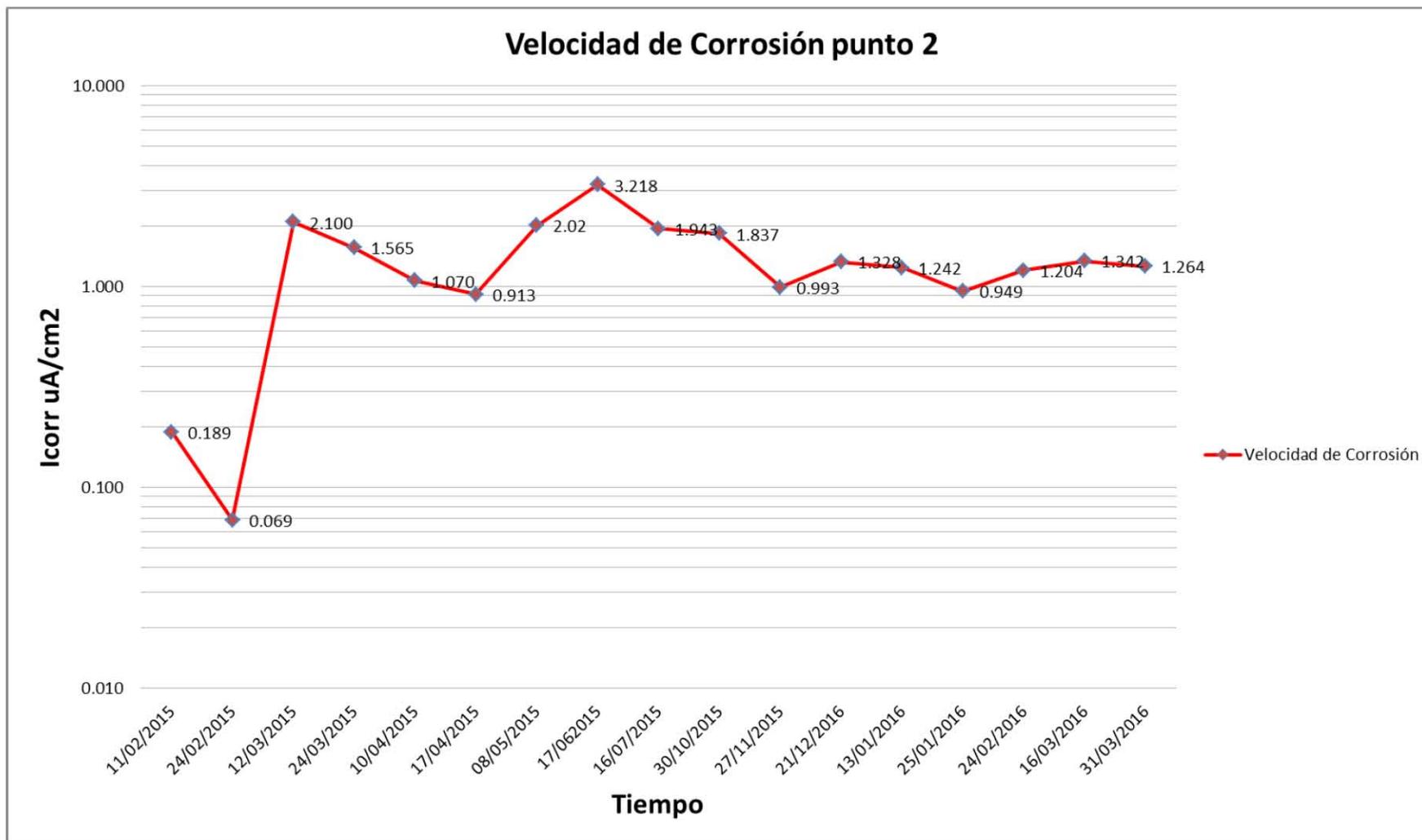


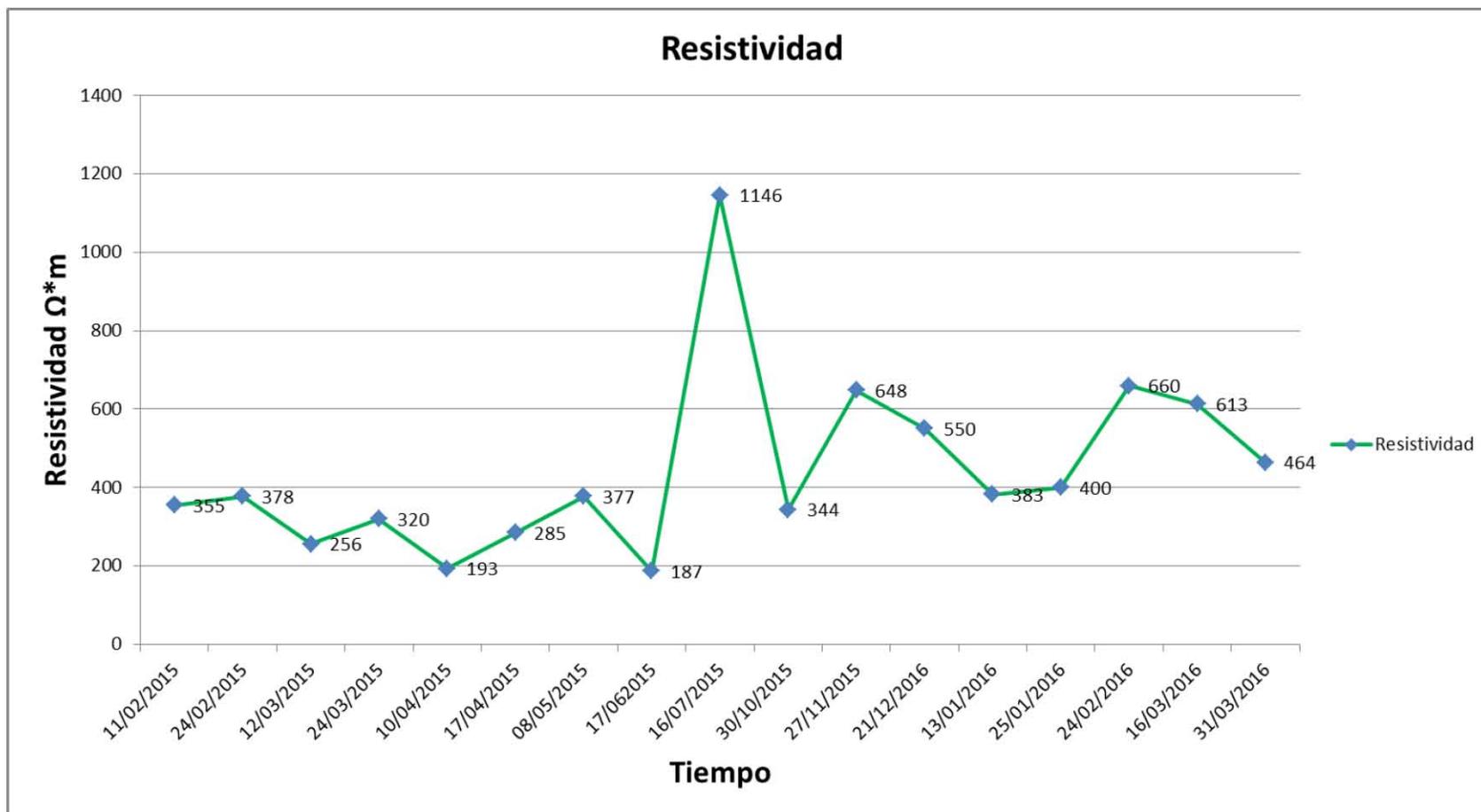


Punto 2

FECHA	HORA	Puntos	TEMP °C (EXT)	HR% (EXT)	Ø Acero	Tiempo medida	Icorr (ua/cm2)	Ecorr (mV)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
11/02/2015	11:30	2	4.2	75	12	60s	0.189	-430.9	355
24/02/2015	12:15	2	10.8	36	12	60s	0.069	-441	378
12/03/2015	15:30	2	22.3	22	12	60s	2.100	-356.7	256
24/03/2015	11:00	2	7	50	12	60s	1.565	-418.3	320
10/04/2015	12:10	2	16.6	54	12	60s	1.070	-394.7	193
17/04/2015	11:00	2	21.7	25	12	60s	0.913	-371.2	285
08/05/2015	10:45	2	15	64.5	12	60s	2.02	-362	377
17/06/2015	11:15	2	27.4	24	12	60s	3.218	-398.06	187
16/07/2015	09:15	2	27	37.7	12	60s	1.943	-248.5	1146
30/10/2015	10:10	2	13.4	80	12	60s	1.837	-440.4	344
27/11/2015	10:50	2	10.9	42.2	12	60s	0.993	-372.9	648
21/12/2016	11:10	2	8.6	69.3	12	60s	1.328	-380	550
13/01/2016	10:40	2	3.6	83	12	60S	1.242	-414	383
25/01/2016	11:20	2	10.3	78.5	12	60S	0.949	-413	400
24/02/2016	11:30	2	8.4	71.3	12	60S	1.204	-390.2	660
16/03/2016	12:50	2	12.6	35	12	60S	1.342	-351	613
31/03/2016	11:00	2	11.9	62	12	60s	1.264	-391	464







CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES:

Un concreto durable es aquel que puede resistir en forma satisfactoria, las condiciones de servicio a que estará sujeto, tales como el desgaste, la acción química, entre muchas otras.

La falta de durabilidad puede deberse al medio al que está expuesto el concreto, o a causas internas del mismo material. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas; originadas por condiciones atmosféricas, temperaturas extremas, abrasión, acción electrolítica, ataques por líquidos y gases de origen natural o industrial

El ataque al concreto por sustancias químicas casi siempre se presentara en solución con líquidos las cuales pueden penetrar profundamente en el concreto, por lo cual producir concreto de alta calidad y baja permeabilidad es la primera fase para mitigar los ataques químicos, una relación agua-cemento baja es factor importante para reducir la permeabilidad del concreto, el ACI 318 especifica una relación máxima de 0,4 para concreto reforzado. Debido a esto, una menor permeabilidad mejora la vida de servicio del concreto frente ataques químicos.

El diseño no solamente deberá estar basado en el uso de la estructura, sino también en las condiciones ambientales, como variaciones diarias y estacionales de temperatura y humedad; y en la vida útil esperada de la misma, siendo ésta el periodo en el que la estructura conserva sus características geométricas, de funcionalidad y de seguridad para las cuales fue proyectado sin costos inesperados de reparación o mantenimiento, por lo cual es importante estudiar el entorno de la estructura de concreto poniendo énfasis en las condiciones climáticas

De las pruebas de laboratorio expuestas anteriormente se puede concluir que; el método integral acelerado es de gran utilidad para determinar la característica de la composición de la mezcla, la norma UNE 83992-2:2012 EX explica de manera detallada el procedimiento que se debe realizar para poder llevar a cabo la prueba.

Después de realizar los ensayos en las probetas de mortero se observó que las probetas que fueron elaboradas con 60% cemento y 40% puzolana presentaron corrosión al siguiente día de que se le aplicó corriente eléctrica, las probetas con 80% cemento y 20%puzolana tardaron tres días para presentar corrosión, y las probetas fabricadas con 100% cemento tardaron siete días para que las barras de acero tuvieran corrosión. Por lo cual se concluye que la puzolana utilizada en estas probetas no fue de para aumentar la durabilidad de las probetas, sin embargo existen otras puzolanas que si aportarían mejores características de durabilidad

De acuerdo al análisis de concentración de cloruros totales se determinó que la concentración de cloruros es mayor en las superficies de las probetas que en las cunas, esto debido a que las probetas tenían en su superficie la solución de cloruros que iba penetrando hasta el acero de refuerzo.

La capa pasiva se rompe por el ingreso de los cloruros y la velocidad de corrosión aumenta conforme avanza el tiempo.

Se observó que la corrosión atacó principalmente por picaduras en diferentes zonas de las barras, con lo cual provoco una pérdida de material que fue calculada mediante la ley de Faraday.

Cuando el potencial de corrosión superaba los -300mV las probetas se desconectan de las fuentes de energía debido a que estas ya presentaban corrosión en el acero.

El Software GPES es de gran ayuda ya que se obtienen los valores de potencial de corrosión (E_{corr}), resistencia a la polarización (R_p) y la Resistividad eléctrica del mortero ($R\Omega$) y con estos datos realizar el cálculo de la Velocidad de corrosión (I_{corr})

Adicionalmente a lo que menciona la norma se les aplico a las probetas fenolftaleína para observar la carbonatación en el mortero, y se observó que las probetas tenían una carbonatación mínima y solo se presentaba en algunas esquinas

El GECOR 10 es un gran instrumento de trabajo ya que permite realizar mediciones tanto en laboratorio como en campo. Después de realizar las mediciones a los elementos, se obtuvieron las gráficas donde se puede ir observando la resistividad así como la velocidad de corrosión que presenta el acero embebido en los elementos.

El uso del corrosímetro in situ es de gran utilidad ya que ahorra mucho tiempo de trabajo y se pueden obtener todos los datos necesarios para llevar a cabo un análisis de la corrosión de las estructuras de concreto reforzado.

La resistividad siempre fue variable debido a que las estructuras pasaban por épocas de lluvia, calor, humedad etc, con lo cual se obtuvo dispersión en las gráficas, pero con esto se concluye que el concreto se comporta diferente de acuerdo al medio en el cual este expuesto. La velocidad de corrosión se presentó de igual forma de modo disperso ya que en algunas medidas el concreto estaba muy saturado de agua y en otras estaba seco.

El Gecor 10 representa la última tecnología en los instrumentos para determinar las características de corrosión del acero y resistividad del concreto. Combina estado de la técnica incrustado sistemas de microprocesadores y tecnología flash por ordenador con el líder de investigación del mundo en el refuerzo de análisis de la velocidad de corrosión de barras.

4.1 PRINCIPALES DEFINICIONES EN LAS PRUEBAS DE CORROSIÓN

- **CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA** Capacidad de un material para transmitir la electricidad
- **CORRIENTE DE ELECTRÓDO** Corriente eléctrica originada por la transferencia de electrones en una reacción electrónica
- **DESPOLARIZACIÓN** Disminución de la polarización de un electrodo
- **ELECTRODO DE REFERENCIA** Electrodo no polarizable, de potencial conocido y reproducible, empleado en las determinaciones del potencial de otros electrodos
- **ELECTRODO DE TRABAJO** Electrodo donde tiene lugar la reacción que interesa estudiar
- **POLARIZACIÓN** Variación del valor de potencial de un electrodo debido al paso de corriente
- **VELOCIDAD DE CORROSIÓN I_{corr}** Valor medido del efecto de la corrosión por unidad de tiempo y superficie, se expresa como pérdida de peso por unidad de superficie y tiempo de penetración por unidad de tiempo

BIBLIOGRAFÍA

- M. Mena Ferrer, (2005). Durabilidad de Estructuras de Concreto en México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)
- M. Fernández Cánovas: Patología y terapéutica del hormigón armado, Editorial dossat,s.a 2da edición plaza de Santa Ana Madrid, España
- P. Kumar Metha, Paulo J.M. Monteiro 1998, Concreto Estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)
- C.Andrade Perdrix 1989 Manual inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras
- ACI Manual of Concrete Practice, (2002) American Concrete Institute. Guía para obtener un concreto durable (ACI 201.2R), Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1
- American Society for Testing and Materials ASTM C 150
- Neville A. M. (1999), "Tecnología del Concreto", Tomo 2 y 3, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- NMX-C-155-ONNCEE- Industria De La Construcción – Concreto Hidráulico - Dosificado en masa - Especificaciones y métodos de ensayo.
- Norma española UNE 83992-2:2012 EX Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado.

MESOGRAFÍA:

- ✓ <http://www.imcyc.com/revista/1998/nov/durabilidad.htm>
- ✓ <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%202%20de%202010/Tecnologia%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2007%20-%20Durabilidad.pdf>
- ✓ <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt181.pdf>
- ✓ <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen9/durabilidad.pdf>